

Rozdział

Oprogramowanie OPUS do oceny wydajności sieci komunikacyjnych z optycznym przełączaniem pakietów: motywacja, pierwsze wyniki i dalsze kierunki rozwoju

Ireneusz SZCZEŚNIAK

*Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej Polskiej Akademii Nauk
iszczesniak@iitis.gliwice.pl*

Tadeusz CZACHÓRSKI

*Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej Polskiej Akademii Nauk
tadek@iitis.gliwice.pl*

Streszczenie

Obiecującym sposobem ulepszenia obecnie pracujących sieci komunikacyjnych jest wprowadzenie do użytku optycznego przełączania pakietów (OPP). Zanim jednak technologia OPP będzie dostępna na rynku, to sieci OPP muszą zostać zaprojektowane, a to wymaga nowych rozwiązań (protokołów, algorytmów przesyłania danych) i ich wnikliwej oceny wydajności, aby zapewnić niezawodną i optymalną pracę takich sieci. W artykule przedstawimy pierwsze wyniki uzyskane za pomocą oprogramowania OPUS (ang. Optical Packet switching Unified Solver), które służy do oceny wydajności sieci OPP. Celem prowadzonych prac jest ocena wydajności modeli węzłów i sieci OPP, które swoją charakterystyką są jak najbardziej zbliżone do prototypowych węzłów i sieci. W artykule motywujemy naszą pracę oraz prezentujemy dalsze kierunki rozwoju.

1. Wprowadzenie

Kraje rozwinięte są uzależnione od szybkiej i niezawodnej wymiany informacji przez sieci komunikacyjne (na przykład przez Internet czy sieci telefoniczne), które muszą być

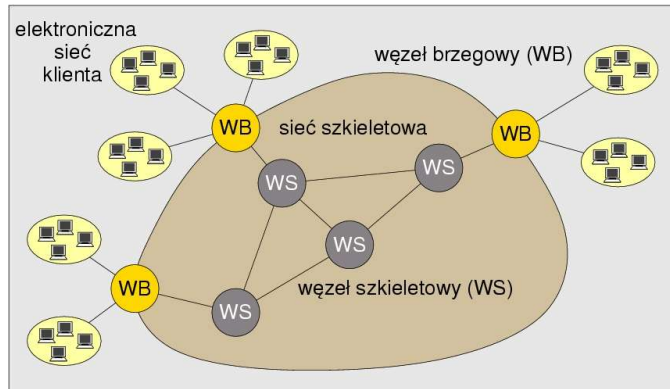
bezustannie ulepszone. Obiecującym sposobem ulepszenia obecnie pracujących sieci jest wprowadzenie do użytku optycznego przełączania pakietów (OPP). Nad technologią optycznego przełączania pakietów pracuje się na świecie już od około 15 lat. Najważniejszymi osiągnięciami z tej dziedziny jest technologia KEOPS [1] oparta na rozgłaszaniu i wybieraniu odpowiednich długości światła (ang. broadcast-and-select) oraz technologia AWG (ang. arrayed waveguide grating) wykorzystana w projekcie STOLAS [2]. Niestety kilka lat musi upłynąć zanim ta technologia dojrzeje i opuści fazę badań laboratoryjnych.

Zanim jednak technologia OPP będzie dostępna na rynku, to sieci OPP muszą zostać zaprojektowane, a to wymaga nowych rozwiązań (protokołów, algorytmów przesyłania danych) i ich wnikliwej oceny wydajności, aby zapewnić niezawodną i optymalną pracę takich sieci [3]. Najnowsze osiągnięcia z dziedziny oceny wydajności systemów komputerowych i telekomunikacyjnych niestety nie spełniają potrzeb projektowania sieci OPP, ponieważ w sieciach OPP nie buforuje się pakietów. Po pierwsze, modele kolejkowe opracowane dla tradycyjnych sieci nie znajdują zastosowania w ocenie wydajności sieci OPP. Po drugie, istniejące ogólne metody, takie jak badania symulacyjne albo modele markowowskie, nie spełniają dobrze swojego zadania w przypadku modeli sieci rzeczywistych o dużych rozmiarach. Co więcej, powstające metody oceny wydajności sieci OPP są ciągle w początkowych fazach rozwoju [4-8]. Z powyższych powodów prowadzimy prace badawcze, która przyczynią się do rozwoju oceny wydajności sieci OPP. Proponujemy rozwinąć metodę wielomianów [5] pozwalającą na ocenę wydajności sieci OPP.

W naszej pracy koncentrujemy się na synchronicznym OPP (SOPP), w odróżnieniu od asynchronicznego OPP (AOPP), ponieważ badania nad technologią SOPP są bardziej zaawansowane. Z tego także powodu technologia SOPP jest bardziej popularna w środowisku badawczym [9]. Co więcej, technologia SOPP pozwala osiągnąć niższe prawdopodobieństwa konfliktów między pakietami optycznymi (ang. contention among packets) w porównaniu z technologią AOPP [10, 11]. Konflikt pomiędzy pakietami zachodzi wtedy, gdy pakiety żądają tego samego wyjścia przełącznika, natomiast tylko jednego z nich można wysłać tym wyjściem.

Celem kilku projektów badawczych była implementacja sieci OPP, w szczególności należy wymienić projekty DAVID, STOLAS, ROM [10, 2, 12, 13] i prace badawcze na Uniwersytecie Kalifornijskim w Davis [13]. Ogólny schemat sieci OPP jest przedstawiony na rys. 1. Elektroniczne sieci klientów przyłączone są do węzłów dostępowych sieci szkieletowej. W węźle dostępowym przybywające pakiety (głównie pakiety IP [14]) są grupowane i pakowane w pakiety optyczne celem lepszego wykorzystania przepustowości sieci szkieletowej i zmniejszenia negatywnego wpływu samopodobieństwa ruchu [15, 16]. Następnie pakiet jest zamieniany z postaci

elektrycznej na postać optyczną i jest przesyłany do sieci szkieletowej. Pakiety przemieszczają się w sieci szkieletowej pomiędzy węzłami sieci pozostając w postaci optycznej, tj. dane pakietu (ang. payload) nie są zamieniane na postać elektroniczną jak to się dzieje w tradycyjnych sieciach. W docelowym węźle brzegowym pakiet jest zamieniany z postaci optycznej na elektryczną i przekazywany do docelowej elektronicznej sieci klienta.



Rys. 1. Schemat sieci opartej na optycznym przełączaniu pakietów

Nasza dotychczas wykonana praca i proponowana jej kontynuacja podąża za aktualnymi badaniami prowadzonymi na świecie w dziedzinie sieci OPP. Wymienić należy kilka najważniejszych prac. Nieograniczone przesyłanie z odbiciami (ang. unlimited deflection routing) jest badane w [17] przy użyciu łańcuchów Markowa. W [18] rozważane jest przesyłanie z odbiciami bez zapętlenia (ang. loopless deflection routing) i dlatego prezentowana analiza matematyczna jest prosta, ponieważ nie uwzględnia pakietów powracających do węzłów po wykonaniu pętli. Szczegółowa kombinatoryczna analiza odbić pakietów w węźle jest przedstawiona w [19]. Analiza ograniczonego przesyłania z odbiciami w sieciach zbudowanych z węzłów 2x2 (dwa połączenia wchodzące i dwa wychodzące) jest opublikowana w [5], która jest oparata na analizie nieograniczonego przesyłania z odbiciami opublikowanej w [20]. W pracy [8] prawdopodobieństwo utraty pakietu jest przedstawione dla sieci AOPP z nieograniczonym przesyłaniem z odbiciami. Sieci o regularnej topologii zbudowane z węzłów typu 2x2 działającymi z nieograniczoną liczbą odbić są analizowane w [21]. W [6] podobny problem jest rozważany, ale tam tylko jedna długość światła jest używana w światłowodzie i obciążenie sieci jest równomierne.

Pakiet oprogramowania OPUS [24] jest programową implementacją metody wielomianów. Celem pakietu OPUS jest ocena wydajności sieci SOPP. W artykule przedstawimy wybrane wyniki wygenerowane przez pakiet OPUS oraz przedstawimy dalsze kierunki rozwoju tego pakietu.

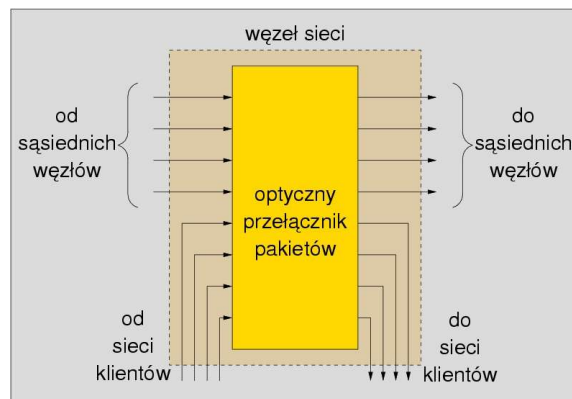
2. Założenia i funkcje oprogramowania OPUS

Oprogramowanie OPUS ma spełniać dwa podzadania. Pierwsze zadanie polega na ocenie wydajności pojedynczego węzła celem uzyskania prawdopodobieństwa odbicia pakietu (ang. probability of deflection). Drugie podzadanie polega na ocenie wydajności całej sieci celem uzyskania prawdopodobieństwa utraty pakietu.

2.1. Ocena wydajności węzła

Pierwszym zadaniem jest ocena wydajności synchronicznego węzła OPP o następującej charakterystyce. Stopień węzła (liczba wchodzących i wychodzących światłowodów) wynosi maksymalnie 10, natomiast liczba różnych długości światła w światłowodzie wynosi około 10. Rozwiązywanie konfliktów (ang. contention resolution) pomiędzy pakietami następuje w dziedzinie przestrzennej przez odbicia (ang. deflection), w dziedzinie częstotliwości przez zmianę długości światła (ang. wavelength conversion), ale nie następuje w dziedzinie czasu przez buforowanie pakietów. Na obecnym etapie rozwoju technologicznego w dziedzinie OPP największym problemem jest buforowanie pakietów i dlatego proponowany węzeł nie wykorzystuje buforowania. Spośród wielu możliwych sposobów budowy węzłów, proponowany węzeł ma szansę zostać szybko zastosowany w istniejących sieciach. Celem oceny jest uzyskanie prawdopodobieństwa odbicia pakietu jako funkcji obciążenia węzła. Ostatnio został pracowany algorytm w IITiS PAN, który z powodzeniem jest stosowany do oceny węzła typu 4x4 i jednej długości światła. Mając to doświadczenie można przewidzieć, że wersja dynamiczna tego algorytmu będzie w stanie wydajnie rozwiązać ten sam problem dla dużego stopnia węzła i dużej liczby długości światła. Podobny problem został przedstawiony i rozwiązany w [4], lecz niestety markowowskie rozwiązanie problemu tam zaproponowane może okazać się niepraktyczne przy ocenie dużych węzłów, które pragniemy rozpatrywać.

W węźle tego typu pakiet jest tracony tylko w sytuacji, kiedy liczba odbić doznanych przez pakiet osiągnęła wartość S (przesyłanie z ograniczoną liczbą odbić jest wyjaśnione w dalszej części tego dokumentu). Rozwiązywanie konfliktów między pakietami opiera się na priorytetach. Ważniejsze pakiety są przesyłane jako pierwsze, natomiast pierwszeństwo pomiędzy równie ważnymi pakietami jest ustalane na drodze losowania. Pakiet jest tym ważniejszy im mniej jest wyjść przełącznika, którymi pakiet może opuścić przełącznik. Schemat przełącznika jest przedstawiony na rys. 2.



Rys. 2. Schemat węzła

Obecnie optyczne przechowywanie pakietów jest poważnym technologicznym ograniczeniem i dlatego proponowana architektura węzła nie wykorzystuje optycznych pętli opóźniających (ang. optical delay lines, ODL), które są jedynym sposobem przechowywania pakietów. Ponieważ pętle ODL są kosztowne, mają duże rozmiary i nie działają stabilnie, stąd należy ograniczyć ich użycie.

Głównym celem oceny efektywności węzła jest uzyskanie prawdopodobieństwa odbicia pakietu (tj. skierowania pakietu do wyjścia, którego pakiet nie żąda) jako funkcji obciążenia węzła. Obciążenie węzła jest charakteryzowane przez prawdopodobieństwo u nadejścia pakietu, oraz prawdopodobieństwa v_i tego, że pakiet żąda jednego z i wyjść.

2.2. Ocena wydajności sieci

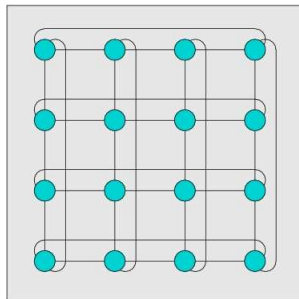
Drugim zadaniem jest ocena wydajności synchronicznych sieci OPP zbudowanych z węzłów opisanych wyżej. Sieć jest nierównomiernie obciążona, jest regularnej topologii i posiada setki węzłów. Pakiety są przyjmowane do sieci w przypadku, gdy istnieje wolna szczelina czasu (ang. time slot) w sieci. W [22] podobny problem jest przedstawiony i rozwiązany, ale tam węzły są asynchroniczne, natomiast tutaj proponuje się rozważyć węzły synchroniczne. Używając dokładnych wyników dla jednego węzła (po ukończeniu pierwszego zadania) mam nadzieję, że będzie można w bardzo dokładny sposób rozwiązać modele całych sieci. W przeciwieństwie do prac opublikowanych przez inne osoby, nasza praca koncentruje się na ograniczonej obecności pakietów w sieci: pakiety mogą przebywać w sieci tylko przez ograniczony okres czasu, po którym są usuwane z sieci. Ten warunek jest motywowany przez liczniki TCP i przez skończoną długość dopuszczalnej ścieżki optycznej. Miary wydajności, które planujemy uzyskać to rozkład prawdopodobieństwa usunięcia bądź doręczenia pakietu jako funkcji liczby skoków wykonanych przez pakiet. Skok (ang. hop) pakietu to przejście pakietu pomiędzy węzłami sieci. Uzyskanie wspomnianych miar jest głównym celem tego zadania, a proponujemy to zrobić przez wykorzystanie metody opierającej się na

wielomianach [5], co jest oryginalnym pomysłem w tej dziedzinie. Celem jest określenie w jaki sposób sieć może być optymalnie wykorzystana bez narażenia jej na zawodne działanie.

Węzeł w modelu sieci spełnia dwa zadania: działa on jako węzeł szkieletowy i jako węzeł brzegowy. Węzeł spełniając funkcję węzła szkieletowego przełącza jedynie pakiety pomiędzy węzłami szkieletowymi. Węzeł spełniając funkcję węzła brzegowego przyjmuje pakiety z elektronicznych sieci klientów i przesyła je do sieci szkieletowej, oraz usuwa pakiety z sieci szkieletowej i przesyła je do elektronicznych sieci klientów. Z elektronicznych sieci klientów pakiety nadchodzą zgodnie z rozkładem Poissona i są przesyłane do sieci szkieletowej tylko wtedy, gdy istnieje wolna szczelina czasowa (ang. time slot) na jednym z połączeń wyjściowych węzła. Węzły przeznaczenia pakietów przesyłanych do sieci szkieletowej są wybierane równomiernie pomiędzy wszystkimi węzłami sieci oprócz węzła źródłowego pakietu.

Synchroniczne działanie sieci polega na wyznaczeniu szczelin czasowych, w czasie których przesyłane są pakiety. Długość szczeliny czasowej wynosi $t=1.646\mu s$. Długość światłowodów pomiędzy węzłami w sieci może być dowolna. W proponowanej pracy długości wszystkich połączeń wynoszą 200km. Prędkość światła w światłowodzie wynosi około 2×10^8 m/s i stąd jedna szczelina czasowa odpowiada 329.2m światłowodu, natomiast 608 szczelin czasowych odpowiada 200km światłowodu.

Węzły połączone są światłowodem przez który może być przesyłane wiele długości światła. Sieć ma topologię torusa kraty dwuwymiarowej. Torus ma l wierszy, l kolumn i $N=l^2$ węzłów. Przykładowa sieć z $N=16$ węzłami jest przedstawiona na rys. 3. Ta topologia jest regularna, tj. symetryczna względem każdego węzła.

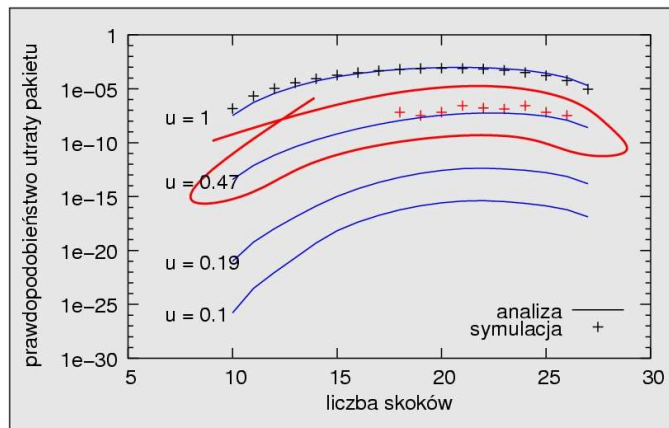


Rys. 3. Schemat sieci o topologii torusa kraty dwuwymiarowej

Przesyłanie pakietów w sieci odbywałoby się zgodnie z zasadami przesyłania z odbiciami (ang. deflection routing), co jest atrakcyjnym sposobem dla sieci OPP, ponieważ nie wymaga on przechowywania pakietów w pętlach opóźniających [3]. Jednak wadą przesyłania z odbiciami jest to, że pakiet może być przesyłany w sieci przez długi czas zanim zostanie dostarczony do węzła przeznaczenia [23]. Rozwiązaniem tego problemu jest ograniczenie liczby odbić pakietu.

W ograniczonym przesyłaniu z odbiciami liczba odbić pakietu jest ograniczona do liczby S , zwanej progiem S . Pakiet jest usuwany z sieci kiedy doznaje odbicia numer S . Z tego powodu w sieci z ograniczonym przesyłaniem z odbiciami zauważa się utraty pakietów. Dla danej topologii sieci dwa parametry wpływają na prawdopodobieństwo utraty pakietu: próg S , $S=1, 2, \dots$, i obciążenie sieci u , $0 \leq u \leq 1$.

Rys. 4 przedstawia wyniki pakietu OPUS dla sieci z rys. 3 z jedną długością światła. Podkreślenia wymaga fakt, że symulacje komputerowe nie zwracają wyników dla bardzo małych prawdopodobieństw utraty pakietu.



Rys. 4. Prawdopodobieństwo utraty pakietu w sieci z rysunku 3 z jedną długością światła

3.Podsumowanie

Głównym celem pracy jest wyznaczenie maksymalnego obciążenia, dla którego prawdopodobieństwo utraty pakietu w sieci ciągle nie przekracza ustalonej wartości, na przykład wartości 10^{-9} . Ważne jest także wyznaczenie węzłów, w których pakiety są szczególnie narażone na usunięcie (ang. hot spots). Następnie zostaną uzyskane: przepustowość sieci, rozkład prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu oraz rozkład prawdopodobieństwa utraty pakietu jako funkcji liczby skoków jakie wykonał pakiet.

Uzyskane wyniki były i będą poddane weryfikacji przez porównanie ich z wynikami symulatora programowego dla przypadków, dla których symulator pozwala uzyskać wyniki. Obecnie prowadzimy pracę nad rozszerzeniem symulatora programowego, który jest częścią pakietu OPUS, aby można ocenić wydajność bardziej złożonych sieci.

Celem jest przyczynienie się do rozwoju analitycznej oceny wydajności sieci opartych na optycznym przełączaniu pakietów (OPP). Dokładniej rzecz ujmując, celem jest ocena wydajności modeli węzłów i sieci SOPP, które swoją charakterystyką są jak najbardziej zbliżone do prototypowych węzłów i sieci SOPP. Mamy nadzieję, że uzyskane wyniki

pozwolą lepiej zrozumieć zjawiska zachodzące w sieciach OPP i pozwolą lepiej wykorzystać je do wydajnego i niezawodnego przesyłania danych.

LITERATURA

1. Guillemot C. et al.: Transparent optical packet switching: The European ACTS KEOPS project approach, *J. Lightwave Technol.*, vol. 16, no. 12, 1998, s. 2117-2134.
2. Vlachos K. G., Monroy I. T., Koonen A. M. J., Peucheret C., Jeppesen P.: STOLAS: Switching technologies for optically labeled signals, *IEEE Commun. Mag.*, 2003, s. 43-49.
3. Xu L., Perros H. G., Rouskas G.: Techniques for optical packet switching and optical burst switching, *IEEE Commun. Mag.*, 2001, s. 136-142.
4. Tomasik J., Kotuliak I., Atmaca T.: Markovian performance analysis of a synchronous optical packet switch, in *Proc. 11th IEEE/ACM MASCOTS*, 2003.
5. Szcześniak I.: Analysis of a finite number of deflections in fully and uniformly loaded regular networks, in *Proc. Networking 2004*, 2004, vol. 3042 of LNCS, s. 675-686.
6. Szcześniak I., Czachórski T., Fourneau J.-M.: Packet loss analysis in optical packet-switched networks with limited deflection routing, submitted for publication.
7. Szcześniak I., Fourneau J. M., Czachórski T.: Preliminary results of packet loss analysis in optical packet-switched networks with limited deflection routing, in *SAINT 2005 Conference Workshop on Modelling and Performance Evaluation for Quality of Service in Next Generation Internet*. 2005, IEEE Press.
8. Yao S., Mukherjee B., Dixit S.: PLATO: A generic modeling technique for optical packet-switched networks, *International Journal on Wireless & Optical Communications*, vol. 1, no. 1, 2003, s. 91-101.
9. El-Bawab T. S., Shin J. D.: Optical packet switching in core networks: Between vision and reality, *IEEE Commun. Mag.*, 2002, s. 60-65.
10. Dittmann L. et al.: The European IST project DAVID: A viable approach toward optical packet switching, *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 21, no. 7, 2003, s. 1026-1040.
11. Bregni S., Guerra G., Pattavina A.: Optical packet switching of IP traffic, in *Proc. Sixth Working Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, 2002.
12. Gravey P. et al.: Multiservice optical network: Main concepts and first achievements of the ROM program, *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, vol. 19, no. 1, 2001.
13. Yoo S. J. B. et al.: High-performance optical-label switching packet routers and smart edge routers for the next-generation internet, *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 21, no. 7, 2003, s. 1041-1051.
14. Listanti M., Eramo V., Sabella R.: Architectural and technological issues for future optical internet networks, *IEEE Commun. Mag.*, 2000, s. 82-92.

15. Yao S., Mukherjee B., Yoo S. J. B., Dixit S.: Electrical ingress buffering and traffic aggregation for optical packet switching and their effect on TCP-level performance in optical mesh networks, *IEEE Commun. Mag.*, 2002, s. 66-72.
16. Xue F., Yoo S. J. B.: Self-similar traffic shaping at the edge router in optical packet-switched networks, in *Proc. IEEE ICC '02*, 2002, vol. 4, s. 2449-2453.
17. Czachórski T., Fourneau J. M.: Performance evaluation of an optimal deflection routing algorithm on an odd torus, in *Proc. HET-NETs 2004*, 2004.
18. Jue J. P.: An algorithm for loopless deflection in photonic packet-switched networks, in *Proc. IEEE ICC '02*, 2002, vol. 5, s. 2776-2780.
19. Decina M., Trecordi V., Zanolini G.: Throughput and packet loss in deflection routing multichannel-metropolitan area networks, in *Proc. IEEE GLOBECOM '91*, 1991.
20. Acampora A. S., Shah S. I. A., Multihop lightwave networks: A comparison of store-and-forward and hot-potato routing, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 40, 1992, s. 1082-1090.
21. Bannister J., Borgonovo F., Fratta L., Gerla M.: A versatile model for predicting the performance of deflection-routing networks, *Performance Evaluation*, vol. 16, no. 1, 1992, s. 201-222.
22. Yao S., Mukherjee B., Yoo S. J. B., Dixit S.: A unified study of contention-resolution schemes in optical packet-switched networks, *J. Lightwave Technol.*, vol. 21, no. 3, 2003, s. 672-683.
23. Brassil J. T., Cruz R. L.: Bounds on maximum delay in networks with deflection routing, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 6, no. 7, 1995, s. 724- 732.
24. Szcześniak I.: OPUS: Optical packet switching unified solver, version 0.1, <http://www.iitis.gliwice.pl/opus>, 2004.