

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI, INFORMATYKI I ELEKTRONIKI,
KATEDRA TELEKOMUNIKACJI

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Grade-of-service-based routing strategies for optical networks

Strategie doboru trasy
pozwalające na różnicowanie jakości obsługi
w sieciach optycznych

MGR INŻ. ANDRZEJ SZYMAŃSKI

PROMOTOR:

Prof. dr hab. inż. Andrzej Jajszczyk Akademia Górniczo-Hutnicza

RECENZENCI:

prof. dr hab. inż. M. Pióro Politechnika Warszawska
prof. dr hab. inż. Z. Papir Akademia Górniczo-Hutnicza

KRAKÓW 2009

1 Wprowadzenie

Wynalezienie lasera [12], [16] oraz opracowanie technologii produkcji światłowodów o niskim tłumieniu otworzyło ważny rozdział w historii telekomunikacji. W krótkim czasie, w roku 1962, pojawiła się idea przenoszenia w jednym światłowodzie wielu niezależnych strumieni danych za pomocą fal świetlnych o różnej długości. Pomysł ten, znany jako technika WDM (ang. *Wavelength Division Multiplexing* – multipleksacja w dziedzinie długości fali), musiał jednak oczekiwać na powszechne zastosowanie aż do lat 90-tych XX w. Do jego wdrożenia przyczyniły się dwa czynniki: istotny wzrost ilości ruchu przenoszonego w sieciach telekomunikacyjnych oraz wynalezienie wzmacniaczy optycznych [9].

Wprowadzenie techniki WDM do systemów transportowych otworzyło nowe możliwości. W 1989 r. Chlamtac, Ganz i Karmi zaproponowali koncepcję ścieżki optycznej, będącej bezpośrednią ścieżką komunikacyjną pomiędzy dwoma węzłami sieci. Powstaje ona w wyniku użycia do transmisji tej samej długości fali na wszystkich łączach, które ją tworzą. Zastosowanie ścieżek optycznych pozwoliło na ograniczenie przetwarzania danych w węzłach tranzytowych, gdyż węzły te nie musiały wykonywać konwersji optoelektronicznej przesyłanego strumienia danych i nie musiały przetwarzać przesyłanego strumienia za pomocą elektroniki. Taką sieć nazywamy siecią optyczną z komutacją ścieżek optycznych.

Z natury opisanej sieci wynika, że ścieżka optyczna musi być zestawiona przed fazą przesyłania danych i może być rozłączona po zakończeniu tej fazy. Zestawienie ścieżki optycznej wymaga dobrania trasy i przydzielenia wolnej długości fali. Problem ten jest znany w literaturze pod nazwą RWA (ang. *Routing and Wavelength Assignment*). Zastosowanie w sieci konwerterów długości fali pozwala na zrezygnowanie z wymagania, aby ścieżka optyczna posługiwała się tą samą długością fali na każdym z łączy ją tworzących, jednakże nie jest to przedmiotem rozważań w niniejszej pracy.

Początkowo przyjmowano, że zbiór ścieżek optycznych w sieci będzie zbiorem statycznym a same ścieżki będą zestawiane ręcznie. Rozwój technik przełączania w dziedzinie optycznej stworzył możliwość dynamicznego zestawiania i rozłączania ścieżek według potrzeb. W 2001 r. międzynarodowa unia telekomunikacyjna (ITU-T) przedstawiła Zalecenie G.8080 [7] “Architecture for the automatically switched optical network (ASON)”, w którym została przedstawiona referencyjna architektura płaszczyzny sterowania siecią optyczną. W 2004 r. IETF (ang. *The Internet Engineering Task Force*) opublikował dokument opisujący architekturę uogólnionej wieloprotokołowej komutacji etykietowej (GMPLS) [13], która może być używana do sterowania siecią optyczną z komutacją ścieżek optycznych. Obie wymienione architektury rozważają użycie dwóch protokołów sygnalizacyjnych do zestawiania ścieżek optycznych: RSVP-TE [2] i CR-LDP [1].

Jakość ścieżki optycznej może być analizowana pod trzema kątami: jakości obsługi po zestawieniu połączenia – QoS (ang. *Quality of Service*), por. [8], jakości wznawiania pracy – QoR (ang. *Quality of Resilience*), por. [6], oraz jakości obsługi na etapie zestawiania połączenia – GoS (ang. *Grade of Service*). QoS jest rozumiany tutaj jako całokształt parametrów mający wpływ na przesyłany ruch w zestawionej uprzednio ścieżce optycznej, QoR jest rozumiany jako zestaw parametrów opisujących jakość wznawiania pracy w przypadku wystąpienia awarii wpływającej na daną

ścieżkę optyczną, natomiast GoS jest rozumiany jako zestaw parametrów opisujących jakość procesu zestawiania ścieżki optycznej, w szczególności prawdopodobieństwo blokady żądania zestawienia takiej ścieżki.

W przedstawionej rozprawie rozważano zagadnienia związane z jakością obsługi na etapie zestawiania połączenia (GoS). Skoncentrowano się na jednym z parametrów opisujących jakość obsługi – na prawdopodobieństwie blokady żądania zestawienia ścieżki optycznej. Założono, że topologia sieci jest dana i nie zmienia się w czasie a węzły nie posiadają możliwości konwersji długości fali. Ścieżki optyczne należą do dwóch klas: niskiego i wysokiego priorytetu. Są tworzone i usuwane na żądanie. Zestawione ścieżki nie mogą być rekonfigurowane ani zrywane przez sieć w celu uzyskania zasobów dla nowych połączeń.

Postawiono następującą tezę:

It is possible to differentiate the blocking probability of light-path requests in optical networks using moderately complex routing strategies.

W tłumaczeniu na język polski teza brzmi następująco:

Istnieje możliwość różnicowania prawdopodobieństwa blokady zgłoszeń w sieciach optycznych przez zastosowanie strategii doboru trasy charakteryzujących się umiarkowaną złożonością.

Dla udowodnienia hipotezy zaproponowano i rozważono szereg mechanizmów, których celem jest uzyskanie zróżnicowanego prawdopodobieństwa blokady żądań zestawienia ścieżek optycznych w przełączanej sieci optycznej z komutacją ścieżek.

Część wyników opisanych w niniejszej pracy została wcześniej opublikowana w postaci dwóch referatów konferencyjnych i dwóch artykułów w czasopiśmie:

[19] A. Szymanski, A. Lason, J. Rzasa and A. Jajszczyk, "Route Management Strategies for Grade of Service Differentiation in Optical Networks," *IEEE International Conference on Communications, ICC '06*, Istanbul, Turkey, pp. 2453 – 2458, 11 – 15 June 2006.

[20] A. Szymański, A. Lason, J. Rząsa, A. Jajszczyk, "Strategie zarządzania doбором trasy umożliwiające różnicowanie jakości obsługi w przełączanych sieciach optycznych", *Przegląd Telekomunikacyjny, Wiadomości Telekomunikacyjne*, Vol. 80, Iss. 2–3, pp. 64–67, 2007.

[17] A. Szymanski, A. Lason, J. Rzasa and A. Jajszczyk, "Grade-of-Service-based Routing in Optical Networks" *IEEE Communications Magazine*, Vol. 45, No. 2, pp. 82 – 87, February 2007.

[18] A. Szymanski, A. Lason, J. Rzasa and A. Jajszczyk, "Performance Evaluation of the Grade-of-Service-based Routing Strategies for Optical Networks" *IEEE International Conference on Communications, ICC '08*, Beijing, China, pp. 5252 – 5257, 19 – 23 May 2008.

2 Prace związane z obszarem badań

Zagadnienia związane z jakością obsługi w sieci optycznej z komutacją ścieżek są ściśle powiązane z zagadnieniem doboru trasy i długości fali – RWA. Problem ten może być statyczny albo dynamiczny.

W statycznym RWA zbiór ścieżek optycznych, jakie mają być zestawione, jest zadany w momencie uruchamiania sieci. Problem ten jest formułowany często jako zadanie optymalizacyjne, w którym należy zestawić żądane ścieżki używając minimalnej ilości zasobów sieciowych. Tak postawiony problem bywa pomocny przy wymiarowaniu sieci, jednakże należy do klasy problemów NP-trudnych (dowód można znaleźć w pracy [5]), w związku z czym optymalne rozwiązanie często nie jest dostępne. Ze względu na przyjęte w rozprawie założenie, że ścieżki optyczne są tworzone i usuwane na żądanie, wariant statyczny nie był przedmiotem rozważań w niniejszej pracy.

W dynamicznym RWA topologia sieci jest znana. Żądania zestawienia ścieżek optycznych nie są znane a priori lecz pojawiają się w trakcie pracy sieci. Zadaniem algorytmu RWA jest dobór trasy i długości fali dla danego żądania. Jeśli w sieci nie ma wystarczających zasobów, żądanie jest odrzucane.

Jedną z częściej stosowanych miar, opisujących wydajność zastosowanego algorytmu RWA jest prawdopodobieństwo blokady zgłoszeń, obliczane jako stosunek liczby odrzuconych żądań do liczby oferowanych żądań. W pracy [3] pokazano, że prawdopodobieństwo blokady rośnie ze wzrastającą liczbą węzłów na ścieżce pomiędzy źródłem i celem żądania. Wspomniana praca wskazuje również prawdopodobieństwo blokady zgłoszenia obliczane osobno dla każdej pary komunikujących się węzłów jako miarę równouprawnienia w przydziale zasobów.

W pracy [11] autorzy zauważają, że odrzucenie zgłoszenia może nastąpić z dwóch powodów: braku wolnych długości fal na jednym z łączy należącym do wybranej ścieżki albo z powodu braku ciągłości dostępnych długości fal (tzn. na każdym łączy jest co najmniej jedna wolna długość fali, ale jej użycie wymagałoby zastosowania konwertera długości fali, który nie jest dostępny). W pracy [3] autorzy wymieniają trzy metody minimalizowania zjawiska blokady spowodowanej nieciągłością długości fali: użycie konwerterów długości fali, modyfikowanie istniejących ścieżek optycznych oraz zastosowanie odpowiedniego algorytmu przydziału długości fali.

Dla każdego żądania zestawienia ścieżki optycznej algorytm RWA musi znaleźć trasę i wybrać długość fali. W pracy [14] autorzy wskazują, że podproblemy doboru trasy i doboru długości fali mogą być rozwiązywane albo kolejno (w dowolnej kolejności) albo naprzemiennie albo jako jeden spójny problem.

Jednym z algorytmów przydziału długości fali jest algorytm określany nazwą *First-Fit*, przydzielający ścieżce optycznej pierwszą wolną długość fali [5]. Często spotykanymi algorytmami doboru trasy są algorytm najkrótszej ścieżki (ang. *Fixed Shortest-Path Routing* [14]) oraz algorytm korzystający ze zbioru ścieżek alternatywnych (ang. *Fixed-Alternate Routing*).

W pracy [4] autorzy analizują metody proporcjonalnego różnicowania jakości obsługi pomiędzy klasami zgłoszeń. W tym celu proponują trzy algorytmy: algorytm celowego blokowania zgłoszeń, algorytm celowego zrywania połączeń i algorytm hybrydowy, będący połączeniem dwóch poprzednich. Każdy z przedstawionych algo-

rytmów opiera się na monitorowaniu prawdopodobieństwa blokady w poszczególnych klasach i na tej podstawie podejmuje decyzje dotyczące nowych zgłoszeń.

W pracy [21] autorzy analizują algorytm, w którym każdej klasie zgłoszeń jest przypisany określony zbiór długości fal, z którego mogą korzystać. Przedstawiona koncepcja jest modelowana przy pomocy łańcuchów Markowa z czasem ciągłym oraz weryfikowana za pomocą symulacji.

Rozdział 2 rozprawy zawiera szersze omówienie spotykanych w literaturze algorytmów RWA, przegląd zagadnień związanych z RWA można ponadto znaleźć w pracach [25, 26].

3 Proponowane mechanizmy i strategie

Wśród mechanizmów różnicowania jakości obsługi można wydzielić trzy grupy (por. [17]): mechanizmy, które rezerwują zasoby sieci dla przyszłych żądań wysokiego priorytetu; mechanizmy, w których każda klasa żądań jest obsługiwana innym algorytmem doboru trasy albo innym podzbiorem potencjalnych tras oraz mechanizmy, w których istniejące ścieżki niskiego priorytetu mogą być rozłączane, jeśli jest to konieczne dla obsługi żądania wyższego priorytetu.

W pracy rozważono mechanizmy różnicowania jakości obsługi należące do dwóch pierwszych grup oraz strategie zbudowane na ich podstawie.

3.1 Mechanizmy, które rezerwują zasoby

Opisane mechanizmy zostały po raz pierwszy zaproponowane w artykułach [5] oraz [6]. Schemat działania jest podobny w każdym z nich, za wyjątkiem mechanizmu *gcap*. Na wstępie dokonujemy wyboru pierwszej trasy a następnie akceptujemy bądź odrzucamy trasę na podstawie danego mechanizmu rezerwującego zasoby. W wypadku akceptacji trasy, dokonujemy przydziału długości fali i zestawiamy połączenie natomiast w przypadku odrzucenia danej trasy obliczamy i rozważamy kolejną trasę. W razie wyczerpania dostępnych tras następuje odrzucenie zgłoszenia.

Szczegółowe algorytmy opisujące działanie poszczególnych mechanizmów w przypadku sieci ze sterowaniem scentralizowanym i sieci ze sterowaniem rozproszonym oraz ocena ich złożoności obliczeniowej zostały zaprezentowane w rozprawie.

Mechanizm grupowania długości fal (*pool*)

W tym mechanizmie dostępny zbiór długości fal w sieci jest podzielony na dwie grupy, wspólną i chronioną. Pierwsza grupa zawiera długości fal, z których mogą korzystać wszystkie klasy połączeń, druga grupa zawiera długości fal, z których mogą korzystać tylko połączenia wysokiego priorytetu. Akceptacja trasy zależy od dostępności na niej wolnych, ciągłych długości fal w obydwu grupach. I tak, dla żądania wysokiego priorytetu trasa jest akceptowana jeśli w dowolnej z grup jest co najmniej jedna wolna, ciągła długość fali. Natomiast dla żądania niskiego priorytetu trasa jest akceptowana jeśli w grupie wspólnej jest co najmniej jedna wolna, ciągła długość fali. W przeciwnym przypadku trasa jest odrzucana. Użycie tego mechanizmu zakłada, że żądania wysokiego priorytetu korzystają w pierwszej kolejności ze wspólnej grupy fal.

Mechanizm weryfikacji liczby nośnych optycznych dostępnych w pierwszym łączu ścieżki (*flcap*)

W opisanym mechanizmie akceptacja, bądź też odrzucenie trasy następuje na podstawie analizy dostępnych zasobów w pierwszym należącym do niej łączu. W przypadku obsługi zgłoszenia wysokiego priorytetu trasa jest akceptowana jeśli zawiera co najmniej jedną wolną, ciągłą długość fali. Jest to warunek konieczny do zestawienia jakiegokolwiek połączenia, gdyż zakładamy, że węzły sieci nie dysponują możliwością konwersji długości fali. W przypadku obsługi zgłoszenia niskiego priorytetu trasa jest akceptowana, jeśli zawiera co najmniej jedną wolną, ciągłą długość fali i równocześnie w pierwszym łączu należącym do tej trasy liczba wolnych długości fal jest większa niż wartość parametru rezerwacyjnego T . W innych przypadkach trasa jest odrzucana.

Mechanizm weryfikacji liczby nośnych optycznych dostępnych w łączu (*lcap*)

W opisanym mechanizmie akceptacja, bądź też odrzucenie trasy następuje na podstawie analizy dostępnych zasobów w każdym należącym do niej łączu. W przypadku obsługi zgłoszenia wysokiego priorytetu trasa jest akceptowana, jeśli zawiera co najmniej jedną wolną, ciągłą długość fali. Jest to warunek konieczny do zestawienia jakiegokolwiek połączenia, gdyż zakładamy, że węzły sieci nie dysponują możliwością konwersji długości fali. W przypadku obsługi zgłoszenia niskiego priorytetu trasa jest akceptowana, jeśli zawiera co najmniej jedną wolną, ciągłą długość fali i równocześnie w każdym łączu należącym do tej trasy liczba wolnych długości fal jest większa niż wartość parametru T . W innych przypadkach trasa jest odrzucana.

Mechanizm weryfikacji liczby ciągłych nośnych optycznych w ścieżce (*pcap*)

W opisanym mechanizmie akceptacja bądź też odrzucenie trasy następuje na podstawie analizy liczby dostępnych ciągłych długości fal na zadanej trasie. W przypadku obsługi zgłoszenia wysokiego priorytetu trasa jest akceptowana, jeśli jest na niej co najmniej jedna wolna, ciągła długość fali. W przypadku obsługi zgłoszenia niskiego priorytetu trasa jest akceptowana, jeśli jest na niej więcej niż T wolnych, ciągłych długości fali. W innych przypadkach trasa jest odrzucana.

Mechanizm weryfikacji liczby ciągłych nośnych optycznych w sieci (*gcap*)

Jest to najbardziej skomplikowany z prezentowanych mechanizmów. Opisany mechanizm przykłada ogromną wagę do problemu ciągłości długości fali w sieci, biorąc pod uwagę nie tylko aktualnie rozważaną trasę, ale także potencjalne trasy, jakie mogą być użyte w przyszłości pomiędzy innymi węzłami. Ceną takiego rozwiązania jest znaczne skomplikowanie procedury zatwierdzania trasy, znaczny wzrost złożoności obliczeniowej i konieczność zapewnienia dodatkowych informacji ze strony płaszczyzny sygnalizacji.

Opisany mechanizm różni się także od poprzednio opisywanych tym, że akceptowana jest nie tyle trasa, co konkretna para (trasa, długość fali). Decyzja o akcep-

tacji jest podejmowana na podstawie całościowego obrazu wolnych zasobów w sieci. Stan ten musi być znany w momencie zestawiania ścieżki.

Zasadniczym celem działania opisywanego mechanizmu jest zapewnienie ciągłych nośnych optycznych na potrzeby przyszłych, nieznanymi żądań wysokiego priorytetu tak, aby po zestawieniu bieżącej ścieżki optycznej niskiego priorytetu pozostało pomiędzy każdą parą węzłów w sieci co najmniej T wolnych ciągłych nośnych optycznych (na najkrótszej ścieżce), przy czym T jest odpowiednio dobranym parametrem sieci. Zgłoszenia wysokiego priorytetu są dopuszczane bez dodatkowych testów, poza wymaganiami, by na rozważanej trasie była co najmniej jedna wolna, ciągła długość fali.

3.2 Mechanizmy, w których każda klasa żądań jest obsługiwana innym algorytmem doboru trasy albo innym podzbiorem potencjalnych tras

Jednym z możliwych wariantów realizacji takiego mechanizmu jest mechanizm doboru trasy, w którym zbiór ścieżek alternatywnych ma inną liczebność dla żądań niskiego a inną dla żądań wysokiego priorytetu. Taki mechanizm został użyty do badań opisanych w rozprawie. Początkowo planowano użycie zbioru ścieżek o rozłącznych zbiorach krawędzi, jednakże ze względu na to, że stopień węzła w przyjętych topologiach referencyjnych jest nierzadko mniejszy od 2, zbudowanie zbioru trzech rozłącznych ścieżek jest często niemożliwe. W konsekwencji użyto wariantu, który dopuszcza ponowne użycie danego łącza do konstrukcji kolejnej ścieżki alternatywnej, ale łącze to ma bardzo wysoki koszt.

3.3 Strategie

W rozprawie zaproponowano zestaw trzydziestu strategii, z których część jest oparta wyłącznie o mechanizm rezerwacji zasobów, przy czym wybór trasy jest dokonywany za pomocą algorytmu doboru trasy z 1, 2 lub 3 ścieżkami alternatywnymi, część zaś posługuje się jednocześnie mechanizmem rezerwacji zasobów i mechanizmem różnicowania korzystającym z różnej liczby ścieżek dla zgłoszeń należących do różnych klas.

W tym ostatnim przypadku rozważano następujące kombinacje liczby ścieżek alternatywnych dla zgłoszeń niskiego i wysokiego priorytetu: (1,2), (1,3) i (2,3). Dla skrótowego oznaczania strategii użyto notacji $altXY-Z$, gdzie X jest liczbą ścieżek alternatywnych dla zgłoszeń niskiego priorytetu, Y jest liczbą ścieżek alternatywnych dla zgłoszeń wysokiego priorytetu a Z jest skróconą nazwą mechanizmu rezerwacyjnego. Notacja $altXY$ jest używana w przypadku strategii opartych wyłącznie o różną liczbę ścieżek alternatywnych dla każdej klasy zgłoszeń.

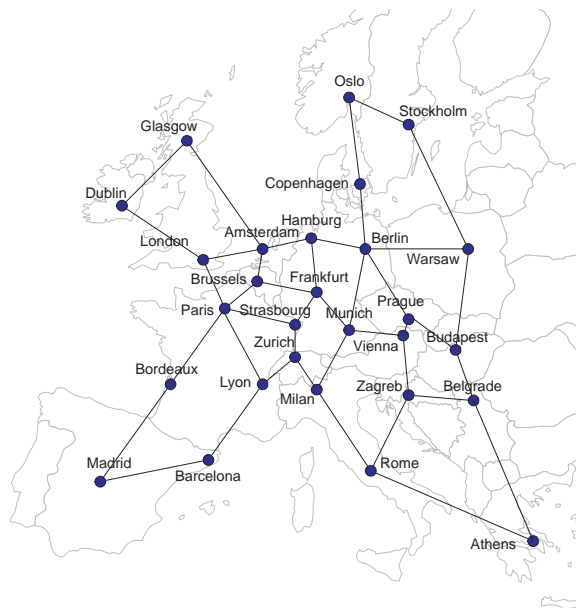
4 Narzędzia i metody oceny wydajności

Do oceny przedstawionych strategii użyto komputerowej symulacji zdarzeń dyskretnych. Celem przeprowadzonych symulacji była statystycznie wiarygodna ocena prawdopodobieństwa blokady zgłoszeń wysokiego i niskiego priorytetu uzyskiwanych przez badane strategie w różnych warunkach pracy sieci. Do badań użyto symulacji przedziałowej z nienakładającymi się przedziałami, co zmniejsza narzut obliczeniowy związany z fazą rozbiegową symulacji. Do obliczeń przedziałów ufności pokazanych na wykresach założono 95% poziom ufności. Szczegółowy opis przeprowadzonej oceny wiarygodności statystycznej, metod gromadzenia danych i sposobu prowadzenia symulacji znajduje się w rozprawie.

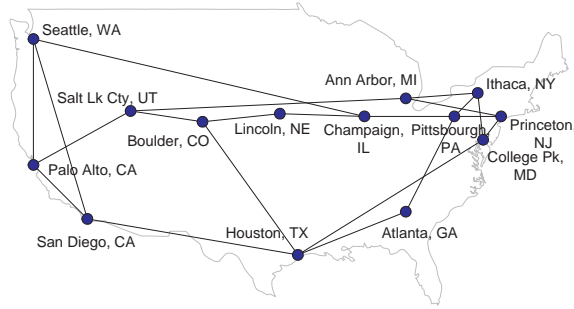
Środowisko symulacyjne zostało oparte na symulatorze OMNeT++ [22]. Całość kodu związanego z płaszczyzną sterowania symulowaną siecią oraz z generowaniem żądań została napisana samodzielnie przez autora w językach C++ oraz NED (wewnętrzny język opisu modułów symulatora OMNeT++). Obliczenia statystyczne były prowadzone w pakiecie statystycznym R [24], część zadań związanych z przetwarzaniem danych wykonano korzystając z bazy danych Postgres [23].

Symulacje zostały przeprowadzone w dwóch sieciach: 28-węzłowej sieci Pan-Europejskiej (Pan-EU) [10] pokazanej na Rys. 1 oraz w 14-węzłowej sieci NSF [15] pokazanej na Rys. 2. W obu sieciach założono, że każde łącze składa się z dwóch światłowodów przenoszących dane w przeciwnych kierunkach a każdy światłowod przenosi 80 długości fal. Założono ponadto, że sieć nie posiada możliwości konwersji długości fali. Do przydziału długości fali użyto algorytmu *First-Fit*.

W symulacji przyjęto model sieci ze scentralizowanym sterowaniem. Żądania zestawienia ścieżek optycznych są generowane losowo przez każdą parę węzłów ze średnią intensywnością 0,033 zgłoszenia na jednostkę czasu w sieci Pan-EU i 0,165 zgłoszenia na jednostkę czasu w sieci NSF. Średni czas życia ścieżki optycznej wynosi 10 jednostek czasu. Zastosowano wykładniczy rozkład czasu pomiędzy kolejnymi



Rysunek 1: Pan-Europejska sieć referencyjna.



Rysunek 2: Sieć referencyjna NSF.

żądaniami oraz wykładniczy rozkład czasu życia ścieżki optycznej. Całkowity ruch oferowany do sieci wynosi zatem, w podstawowym przypadku, $28 \times 27 \times 0.033 \times 10 = 249,48$ Erl w sieci Pan-EU i $14 \times 13 \times 0.165 \times 10 = 300,3$ Erl w sieci NSF. Dla potrzeb analizy zachowania sieci przy różnym obciążeniu ruch oferowany jest skalowany przez współczynnik przyjmujący wartość od 1,0 do 1,8. Wartość tego współczynnika jest używana w dalszej części tekstu jako wartość ruchu oferowanego. W zależności od analizowanego przypadku od 10 do 50% zgłoszeń jest zgłoszeniami wysokiego priorytetu.

5 Ocena wydajności strategii opartych na pojedynczym mechanizmie

Dla uzyskania wstępnego obrazu działania poszczególnych mechanizmów przeprowadzono badania strategii opartych o pojedynczy mechanizm różnicujący prawdopodobieństwo blokady pomiędzy zgłoszeniami niskiego i wysokiego priorytetu. W tej części badań przeanalizowano wpływ parametru rezerwacyjnego T na uzyskane prawdopodobieństwa blokady w określonym zakresie ruchu oferowanego. Na tej podstawie wyznaczono najmniejszą wartość parametru T wystarczającą do uzyskania prawdopodobieństwa blokady zgłoszeń wysokiego priorytetu mniejszego niż 0,005 przy zadanych parametrach ruchu oferowanego. W autoreferacie zaprezentowano jedynie wyniki¹ dotyczące wybranych mechanizmów uzyskane w sieci Pan-EU. Wyniki dla pozostałych mechanizmów oraz wyniki uzyskane w sieci NSF można znaleźć w rozprawie doktorskiej.

5.1 Strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby ciągłych nośnych optycznych w ścieżce (*pcap*)

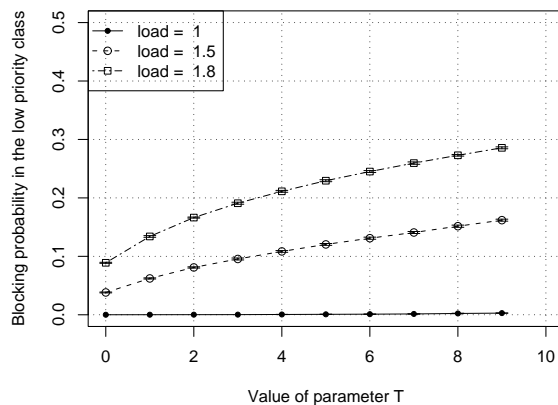
Strategia została przetestowana przy założeniu dwóch wariantów doboru trasy: pierwszy korzystał z jednej, najkrótszej ścieżki, drugi korzystał z trzech alternatywnych ścieżek.

Rysunki 3 i 4 przedstawiają prawdopodobieństwo blokady dla ruchu o niskim i wysokim priorytecie jako funkcję parametru T . Badanie przeprowadzono dla trzech

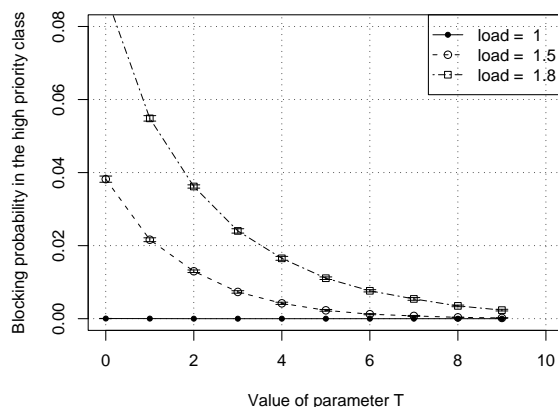
¹Przedziały ufności odpowiadające 95% poziomowi ufności zostały zaznaczone na wykresach, jednakże ich wielkość jest porównywalna z szerokością linii.

wartości ruchu oferowanego przy 50% udziale ruchu wysokiego priorytetu. Dobór trasy odbywał się wg najkrótszej ścieżki.

Przedstawione dane pozwalają na stwierdzenie, że opisana strategia zapewnia statystycznie istotne zróżnicowanie prawdopodobieństwa blokady zgłoszeń niskiego i wysokiego priorytetu. Stopień zróżnicowania może być regulowany za pomocą odpowiedniego doboru parametru T . Dla $T = 0$ zróżnicowanie nie występuje, dla $T \geq 8$ prawdopodobieństwo blokady zgłoszeń wysokiego priorytetu spada poniżej 0,005 (dla ruchu oferowanego o wartości 1,8). Zwiększanie wartości parametru T skutkuje pogarszaniem prawdopodobieństwa blokady dla zgłoszeń o niskim priorytecie.

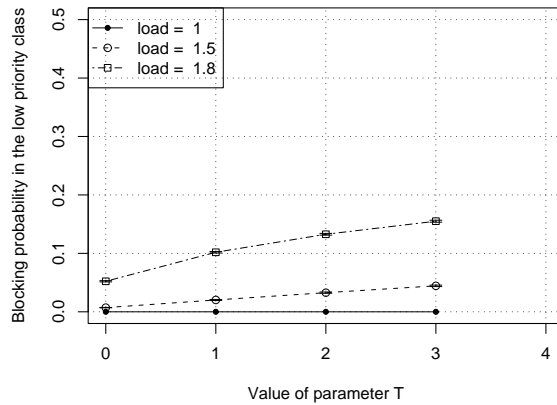


Rysunek 3: Strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby nośnych optycznych dostępnych w ścieżce, dobór trasy wg najkrótszej ścieżki, sieć Pan-EU. Prawdopodobieństwo blokady zgłoszeń niskiego priorytetu w funkcji parametru T dla trzech wartości ruchu oferowanego przy 50% udziale zgłoszeń wysokiego priorytetu.

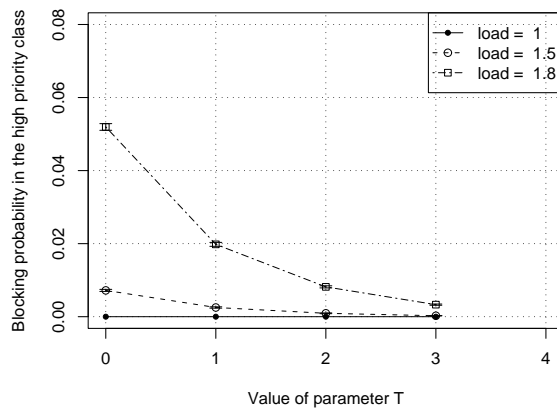


Rysunek 4: Strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby nośnych optycznych dostępnych w ścieżce, dobór trasy wg najkrótszej ścieżki, sieć Pan-EU. Prawdopodobieństwo blokady zgłoszeń wysokiego priorytetu w funkcji parametru T dla trzech wartości ruchu oferowanego przy 50% udziale zgłoszeń wysokiego priorytetu.

Rysunki 5 i 6 pokazują wyniki uzyskane przy założeniu, że dobór trasy dla zgłoszenia odbywa się przy użyciu trzech alternatywnych ścieżek. Założone prawdopodobieństwo blokady zgłoszeń wysokiego priorytetu (poniżej 0,005) jest uzyskiwane przy $T = 3$.



Rysunek 5: Strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby nośnych optycznych dostępnych w ścieżce, dobór trasy wg trzech alternatywnych ścieżek, sieć Pan-EU. Prawdopodobieństwo blokady zgłoszeń niskiego priorytetu w funkcji parametru T dla trzech wartości ruchu oferowanego przy 50% udziale zgłoszeń wysokiego priorytetu.

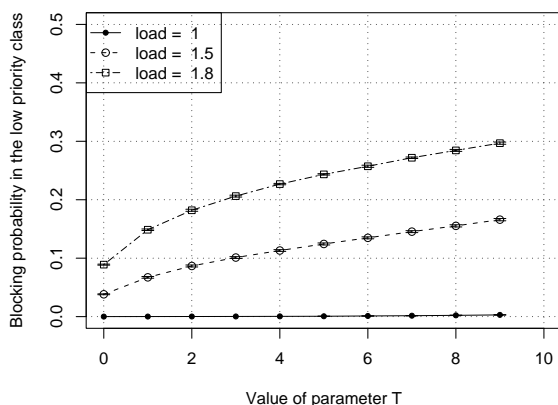


Rysunek 6: Strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby nośnych optycznych dostępnych w ścieżce, dobór trasy wg trzech alternatywnych ścieżek, sieć Pan-EU. Prawdopodobieństwo blokady zgłoszeń wysokiego priorytetu w funkcji parametru T dla trzech wartości ruchu oferowanego przy 50% udziale zgłoszeń wysokiego priorytetu.

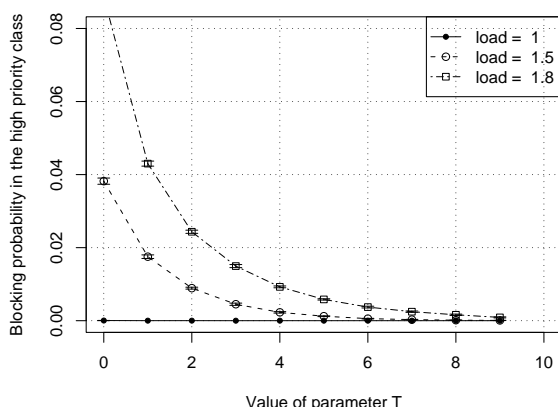
5.2 Strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby ciągłych nośnych optycznych w sieci (*gcap*)

Strategia została przetestowana przy założeniu dwóch wariantów doboru trasy: pierwszy korzystał z jednej, najkrótszej ścieżki, drugi korzystał z trzech alternatywnych ścieżek.

Rysunki 7 i 8 przedstawiają prawdopodobieństwo blokady dla ruchu o niskim i wysokim priorytecie jako funkcję parametru T . Badanie przeprowadzono dla trzech wartości ruchu oferowanego przy 50% udziale ruchu wysokiego priorytetu. Dobór trasy odbywał się wg najkrótszej ścieżki.



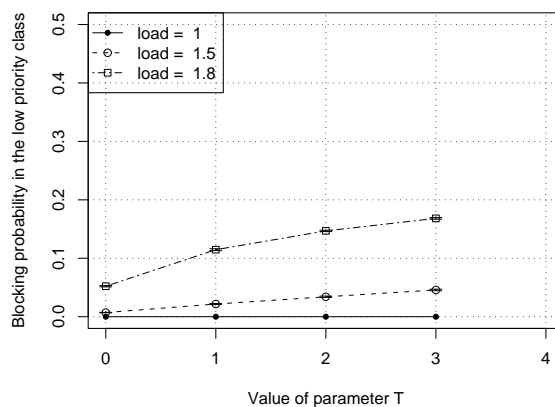
Rysunek 7: Strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby ciągłych nośnych optycznych dostępnych w sieci, dobór trasy wg najkrótszej ścieżki, sieć Pan-EU. Prawdopodobieństwo blokady zgłoszeń niskiego priorytetu w funkcji parametru T dla trzech wartości ruchu oferowanego przy 50% udziale zgłoszeń wysokiego priorytetu.



Rysunek 8: Strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby ciągłych nośnych optycznych dostępnych w sieci, dobór trasy wg najkrótszej ścieżki, sieć Pan-EU. Prawdopodobieństwo blokady zgłoszeń wysokiego priorytetu w funkcji parametru T dla trzech wartości ruchu oferowanego przy 50% udziale zgłoszeń wysokiego priorytetu.

Przedstawione dane pozwalają na stwierdzenie, że opisana strategia zapewnia statystycznie istotne zróżnicowanie prawdopodobieństwa blokady zgłoszeń niskiego i wysokiego priorytetu. Stopień zróżnicowania może być regulowany za pomocą odpowiedniego doboru parametru T . Dla $T = 0$ zróżnicowanie nie występuje, dla $T \geq 6$ prawdopodobieństwo blokady zgłoszeń wysokiego priorytetu spada poniżej 0,005 (dla ruchu oferowanego o wartości 1,8). Zwiększanie wartości parametru T skutkuje pogarszaniem prawdopodobieństwa blokady dla zgłoszeń o niskim priorytecie.

Rysunki 9 i 10 pokazują wyniki uzyskane przy założeniu, że dobór trasy dla zgłoszenia odbywa się przy użyciu trzech alternatywnych ścieżek. Założone prawdopodobieństwo blokady zgłoszeń wysokiego priorytetu (poniżej 0,005) jest uzyskiwane przy $T = 2$.



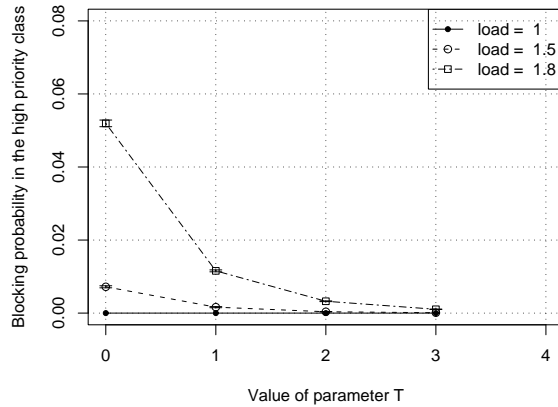
Rysunek 9: Strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby ciągłych nośnych optycznych dostępnych w sieci, dobór trasy wg trzech alternatywnych ścieżek, sieć Pan-EU. Prawdopodobieństwo blokady zgłoszeń niskiego priorytetu w funkcji parametru T dla trzech wartości ruchu oferowanego przy 50% udziale zgłoszeń wysokiego priorytetu.

6 Porównanie zaproponowanych strategii

W tej części pracy porównano ze sobą zaproponowane strategie. Piętnaście z nich jest opartych o mechanizm rezerwacji zasobów, przy czym wybór trasy jest dokonywany za pomocą algorytmu z 1, 2 lub 3 ścieżkami alternatywnymi, kolejne piętnaście posługuje się jednocześnie mechanizmem rezerwacji zasobów i mechanizmem różnicowania korzystającym z różnej liczby ścieżek dla zgłoszeń należących do różnych klas. W tym ostatnim przypadku rozważano następujące kombinacje liczby ścieżek alternatywnych dla zgłoszeń niskiego i wysokiego priorytetu: (1,2), (1,3) i (2,3).

Aby umożliwić porównanie strategii ze sobą, zdecydowano się na dobór parametru T w ściśle określony sposób. Przyjęto dwa założenia:

Założenie 1: Prawdopodobieństwo blokady zgłoszeń wysokiego priorytetu powinno być mniejsze niż 0,005 w każdym z założonych warunków pracy sieci.



Rysunek 10: Strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby ciągłych nośnych optycznych dostępnych w sieci, dobór trasy wg trzech alternatywnych ścieżek, sieć Pan-EU. Prawdopodobieństwo blokady zgłoszeń wysokiego priorytetu w funkcji parametru T dla trzech wartości ruchu oferowanego przy 50% udziale zgłoszeń wysokiego priorytetu.

Założenie 2: Parametr T powinien być niezależny od wybranych warunków pracy sieci.

Założone w symulacjach warunki pracy sieci obejmują skalowanie ruchu oferowanego w zakresie 1,0 – 1,8 z krokiem 0,1 oraz zmienny udział ruchu wysokiego priorytetu w zakresie 10% – 50% z krokiem 10%. Założenie 1 wynika z potrzeb operatorów sieci w zakresie dostępności usług wysokiego priorytetu. Zarówno graniczna wartość prawdopodobieństwa blokady zgłoszeń wysokiego priorytetu (0,005) jak też zakres zmienności ruchu zostały wybrane arbitralnie i powinny odpowiadać prognozowanej zmienności ruchu w sieci oraz kontraktom podpisanym z użytkownikami sieci.

Założenie 2 odzwierciedla potrzebę, by optymalizacja pracy sieci odbywała się stosunkowo rzadko, w porównaniu z szybkością zmian obciążenia sieci. Takie rozwiązanie jest wygodne dla operatora, gdyż nie wymaga obliczania właściwej wartości parametru T w krótkim czasie i jego szybkiej propagacji do wszystkich węzłów. Jest to potencjalny scenariusz dla sieci ASON ze zmiennym ruchem i ustalonymi parametrami pracy sieci.

Konsekwencją przyjęcia założeń 1 i 2 jest ograniczenie wartości parametru T od dołu, gdyż zwiększanie wartości parametru T powoduje wzrost ilości zasobów zarezerwowanych do obsługi zgłoszeń wysokiego priorytetu, a tym samym spadek prawdopodobieństwa blokady zgłoszeń w tej klasie. Jednocześnie, zwiększanie wartości parametru T powoduje pogorszenie prawdopodobieństwa blokady zgłoszeń niskiego priorytetu, co jest zjawiskiem niepożądanym. Wynika stąd, że wartość parametru T powinna zostać zminimalizowana tak, aby zapewnić możliwie najlepszą obsługę zgłoszeń niskiego priorytetu, przy zachowaniu właściwej jakości obsługi zgłoszeń wysokiego priorytetu. W rezultacie otrzymujemy dla każdej strategii tylko jedną, właściwą wartość parametru T . Zestawienie wartości parametru T dla analizowanych strategii przedstawiają Tabele 1 i 2. Nazwy *altXY* opisują użytą liczbę ścieżek dla

Tabela 1: Wartości parametru T przyjęte w dalszych badaniach dla sieci Pan-EU.

Scenariusz	alt11	alt12	alt13	alt22	alt23	alt33
gcap	6	2	1	3	2	2
pcap	8	3	2	4	3	3
lcap	25	17	14	20	17	18
pool	40	23	16	29	24	26
flcap	53	38	32	50	46	48

Tabela 2: Wartości parametru T przyjęte w dalszych badaniach dla sieci NSF.

Scenariusz	alt11	alt12	alt13	alt22	alt23	alt33
gcap	5	2	1	3	2	2
pcap	6	2	2	3	2	2
lcap	16	11	8	15	13	14
pool	32	17	12	23	20	22
flcap	30	17	12	30	26	30

obsługi zgłoszeń niskiego (X) i wysokiego (Y) priorytetu. Nazwy *flcap*, *lcap*, *pcap*, *gcap* oraz *pool* opisują analizowane strategie.

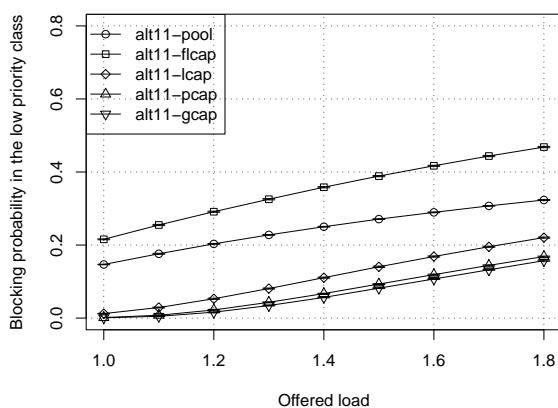
Założenia 1 i 2 mają jeszcze jedną implikację. Zgłoszenia wysokiego priorytetu są obsługiwane we właściwy sposób w każdym z założonych warunków pracy sieci. Jakość obsługi zgłoszeń wysokiego priorytetu można więc pominąć w dalszych dyskusjach, a skupić się na porównaniu prawdopodobieństwa blokady zgłoszeń niskiego priorytetu, gdyż to odzwierciedla koszt zapewnienia żądaniom wysokiego priorytetu właściwej jakości obsługi.

6.1 Porównanie strategii korzystających z jednakowej liczby ścieżek dla obsługi zgłoszeń obu klas

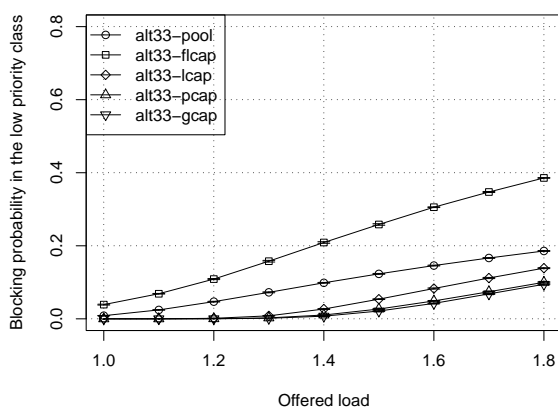
Rysunki 11 i 12 pokazują porównanie strategii korzystających z jednakowej liczby ścieżek dla obsługi zgłoszeń obu klas. Pokazano zależność prawdopodobieństwa blokady zgłoszeń niskiego priorytetu od wartości ruchu oferowanego, przy 20% udziale zgłoszeń wysokiego priorytetu.

Z porównania wynika, że strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby ciągłych nośnych optycznych dostępnych w sieci (*gcap*) oraz strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby ciągłych nośnych optycznych w ścieżce (*pcap*) są najbardziej obiecujące, gdyż oferują najniższe prawdopodobieństwa blokady dla ruchu niskiego priorytetu.

Strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby nośnych optycznych dostępnych w pierwszym łączu ścieżki (*flcap*) oraz strategia oparta na mechanizmie grupowania długości fal (*pool*) oferują najgorsze prawdopodobieństwa blokady. Dodatkowym argumentem przeciwko tym dwóm strategiom jest to, że prawdopodobieństwo blokady zgłoszeń niskiego priorytetu pozostaje wysokie nawet przy niewielkim obciążeniu sieci, co uniemożliwia operatorowi oferowanie niskiego prawdopodobieństwa blokady nawet poza godzinami szczytu. Strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby ciągłych nośnych optycznych dostępnych w sieci (*gcap*) oraz strategia oparta



Rysunek 11: Porównanie strategii przy doborze trasy wg najkrótszej ścieżki przy 20% udziale zgłoszeń wysokiego priorytetu. Prawdopodobieństwo blokady zgłoszeń niskiego priorytetu w zależności od wartości ruchu oferowanego dla sieci Pan-EU.

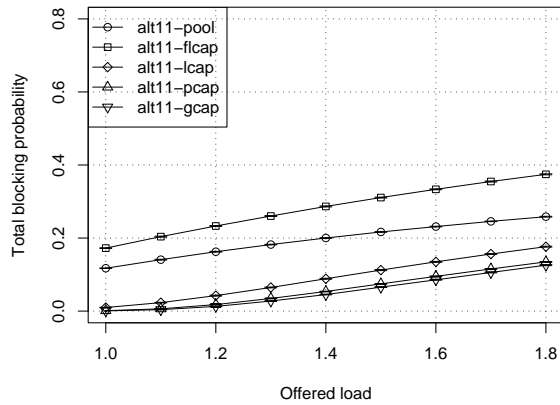


Rysunek 12: Porównanie strategii przy doborze trasy wg trzech alternatywnych tras przy 20% udziale zgłoszeń wysokiego priorytetu. Prawdopodobieństwo blokady zgłoszeń niskiego priorytetu w zależności od wartości ruchu oferowanego dla sieci Pan-EU.

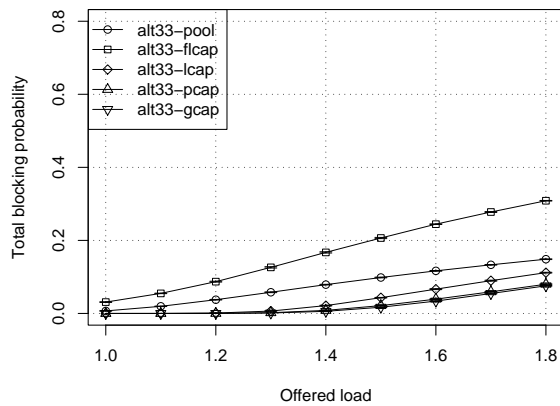
na mechanizmie weryfikacji liczby ciągłych nośnych optycznych w ścieżce (*pcap*) nie wykazują tej negatywnej cechy. Dla tych strategii prawdopodobieństwo blokady zgłoszeń niskiego priorytetu spada praktycznie do zera przy malejącym ruchu oferowanym.

Prawdopodobieństwo blokady zgłoszeń jest zdecydowanie wyższe przy zastosowaniu doboru trasy korzystającego z jednej ścieżki. Nie jest to nowa obserwacja, ale stanowi ona istotną wskazówkę, aby unikać tego wariantu doboru trasy przy projektowaniu sieci.

Dla uzyskania kompletnego obrazu działania sieci rysunki 13 – 16 pokazują całkowite prawdopodobieństwo blokady w sieci oraz stopień wykorzystania zasobów sieciowych dla analizowanych strategii.



Rysunek 13: Porównanie strategii przy doborze trasy wg najkrótszej ścieżki przy 20% udziale zgłoszeń wysokiego priorytetu. Prawdopodobieństwo blokady zgłoszeń w zależności od wartości ruchu oferowanego dla sieci Pan-EU.

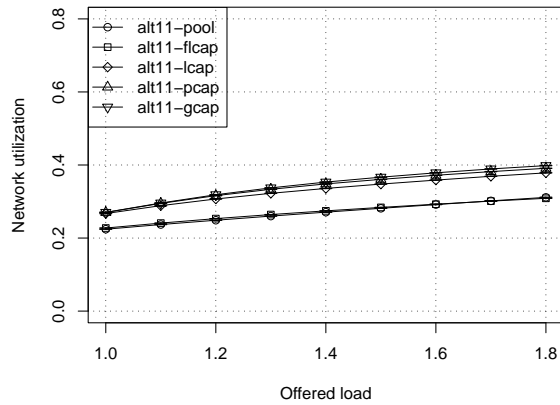


Rysunek 14: Porównanie strategii przy doborze trasy wg trzech alternatywnych tras przy 20% udziale zgłoszeń wysokiego priorytetu. Prawdopodobieństwo blokady zgłoszeń w zależności od wartości ruchu oferowanego dla sieci Pan-EU.

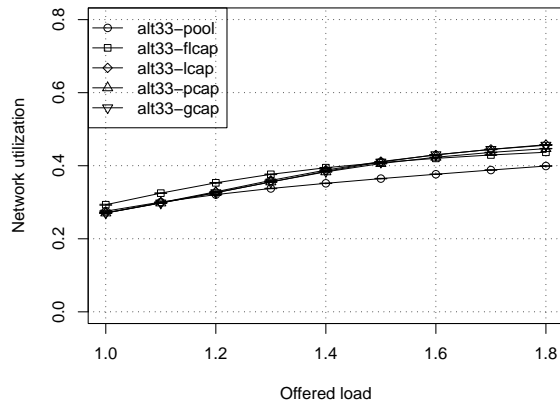
6.2 Porównanie strategii korzystających jednocześnie z dwóch mechanizmów różnicowania

Kolejnym etapem jest porównanie strategii korzystających jednocześnie z dwóch mechanizmów różnicowania oraz ocena zysku płynącego z takiego dodatkowego różnicowania. Tabele 3 i 4 pokazują zestawienie prawdopodobieństwa blokady zgłoszeń niskiego priorytetu dla wszystkich rozważanych strategii w sieciach Pan-EU i NSF. Wyniki uzyskano zakładając, że ruch oferowany ma wartość 1,4 a zgłoszenia wysokiego priorytetu stanowią 20% ogólnej liczby zgłoszeń.

W ogólnym przypadku nie ma jednoznacznej odpowiedzi na pytanie, czy wprowadzenie różnej liczby ścieżek dla obsługi zgłoszeń należących do różnych klas niesie ze sobą korzyści. Zależy to od zastosowanej strategii. Strategia oparta na mecha-



Rysunek 15: Porównanie strategii przy doborze trasy wg najkrótszej ścieżki przy 20% udziale zgłoszeń wysokiego priorytetu. Stopień wykorzystania zasobów sieciowych w zależności od wartości ruchu oferowanego dla sieci Pan-EU.



Rysunek 16: Porównanie strategii przy doborze trasy wg trzech alternatywnych tras przy 20% udziale zgłoszeń wysokiego priorytetu. Stopień wykorzystania zasobów sieciowych w zależności od wartości ruchu oferowanego dla sieci Pan-EU.

nizmie weryfikacji liczby nośnych optycznych dostępnych w pierwszym łączy ścieżki (*flcap*) działa zdecydowanie lepiej przy zastosowaniu doboru trasy wg najkrótszej ścieżki dla zgłoszeń niskiego priorytetu i doboru trasy korzystającego z trzech alternatywnych ścieżek dla zgłoszeń wysokiego priorytetu.

Z drugiej strony, Strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby ciągłych nośnych optycznych dostępnych w sieci (*gcap*) oraz strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby ciągłych nośnych optycznych w ścieżce (*pcap*) działają najlepiej przy zastosowaniu doboru trasy korzystającego z trzech alternatywnych ścieżek dla zgłoszeń obu klas. Wprowadzenie w tym przypadku ograniczonej liczby ścieżek dla zgłoszeń niskiego priorytetu prowadzi do degradacji prawdopodobieństwa blokady.

Dla ułatwienia porównania wyniki z Tabel 3 i 4 zostały zaprezentowane w formie

Tabela 3: Prawdopodobieństwo blokady zgłoszeń niskiego priorytetu w sieci Pan-EU dla rozważanych strategii. Ruch oferowany ma wartość 1,4 a zgłoszenia wysokiego priorytetu stanowią 20% ogólnej liczby zgłoszeń.

Scenariusz	alt11	alt12	alt13	alt22	alt23	alt33
<i>gcap</i>	0,057	0,038	0,033	0,015	0,012	0,007
<i>pcap</i>	0,067	0,042	0,038	0,019	0,016	0,010
<i>lcap</i>	0,111	0,055	0,041	0,043	0,026	0,027
<i>pool</i>	0,250	0,128	0,088	0,128	0,093	0,099
<i>flcap</i>	0,358	0,168	0,118	0,235	0,159	0,209

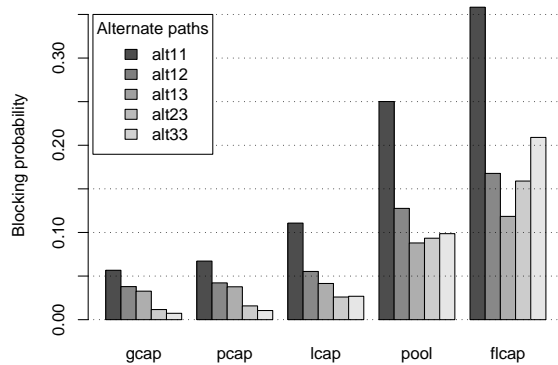
Tabela 4: Prawdopodobieństwo blokady zgłoszeń niskiego priorytetu w sieci NSF dla rozważanych strategii. Ruch oferowany ma wartość 1,4 a zgłoszenia wysokiego priorytetu stanowią 20% ogólnej liczby zgłoszeń.

Scenariusz	alt11	alt12	alt13	alt22	alt23	alt33
<i>gcap</i>	0.033	0.021	0.018	0.005	0.004	0.002
<i>pcap</i>	0.038	0.021	0.021	0.006	0.004	0.002
<i>lcap</i>	0.067	0.038	0.025	0.024	0.015	0.013
<i>pool</i>	0.201	0.084	0.056	0.088	0.066	0.070
<i>flcap</i>	0.174	0.060	0.034	0.145	0.093	0.154

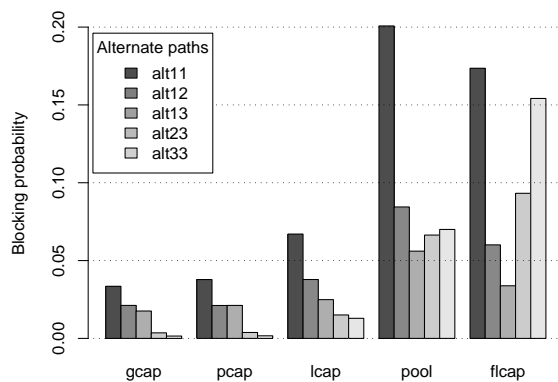
graficznej na rys. 17 i 18, przy czym z porównania usunięto dla przejrzystości wyniki odpowiadające doborowi trasy z dwoma ścieżkami alternatywnymi w obu klasach zgłoszeń.

Analizując przedstawione wykresy dla strategii opartej o mechanizm weryfikacji liczby nośnych optycznych dostępnych w pierwszym łączy ścieżki (*flcap*) przy doborze trasy wg mechanizmów alt11, alt12 alt13, tj. przy jednej ścieżce dla obsługi zgłoszeń niskiego priorytetu i wzrastającej liczbie ścieżek dla obsługi zgłoszeń wysokiego priorytetu można zaobserwować wzrost wydajności pracy sieci (spadek prawdopodobieństwa blokady). Jednakże analizując sekwencję alt13, alt23, alt33, czyli rosnącą liczbę ścieżek obsługujących zgłoszenia niskiego priorytetu przy ustalonej liczbie ścieżek obsługujących zgłoszenia wysokiego priorytetu, obserwujemy spadek wydajności pracy sieci. Może to być uznane za przesłankę do stwierdzenia, że strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby nośnych optycznych dostępnych w pierwszym łączy ścieżki (*flcap*) chroni zasoby w nieefektywny sposób. Zwiększanie liczby alternatywnych ścieżek dla zgłoszeń niskiego priorytetu zwiększa ich szanse na obsługę i w konsekwencji powoduje zmniejszenie zasobów dostępnych dla zgłoszeń wysokiego priorytetu. To pociąga za sobą konieczność zwiększenia wartości parametru T (por. Tabele 1 i 2) a w konsekwencji zmniejszenie ilości zasobów dostępnych dla zgłoszeń niskiego priorytetu. Nieefektywna strategia będzie rezerwować dużo zasobów, gdyż nie jest z nich w stanie skorzystać w efektywny sposób. Spowoduje to spadek ogólnej wydajności sieci.

Strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby ciągłych nośnych optycznych dostępnych w sieci (*gcap*) oraz strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby ciągłych nośnych optycznych w ścieżce (*pcap*) nie wykazują takiego zachowania. Prawdopodobieństwo blokady zgłoszeń niskiego priorytetu maleje wraz ze wzrostem



Rysunek 17: Prawdopodobieństwo blokady zgłoszeń niskiego priorytetu w zależności od zastosowanej strategii przy ruchu oferowanym 1,4 i 20% udziale zgłoszeń wysokiego priorytetu. Sieć Pan-EU.

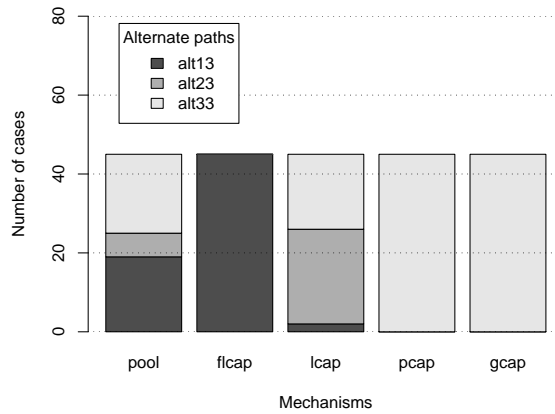


Rysunek 18: Prawdopodobieństwo blokady zgłoszeń niskiego priorytetu w zależności od zastosowanej strategii przy ruchu oferowanym 1,4 i 20% udziale zgłoszeń wysokiego priorytetu. Sieć NSF.

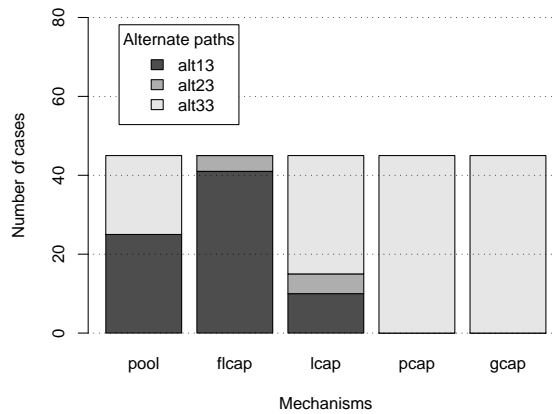
liczby alternatywnych ścieżek. Najlepszy wynik jest osiągnięty gdy zgłoszenia obu klas mają do dyspozycji maksymalną liczbę alternatywnych ścieżek. Pozostałe strategie plasują się pomiędzy opisanymi wcześniej.

W kolejnym zestawieniu porównano liczbę przypadków (odpowiadających kombinacji wartości ruchu oferowanego i procentowego udziału liczby zgłoszeń wysokiego priorytetu w ruchu oferowanym), w których dany wariant doboru trasy był najlepszy przy zadanym mechanizmie różnicowania opartym o rezerwację zasobów. Wyniki zostały przedstawione na rysunkach 19 i 20.

Z porównania wynika, że dla strategii opartej o mechanizm weryfikacji liczby ciągłych nośnych optycznych dostępnych w sieci (*gcap*) oraz strategii opartej o mechanizm weryfikacji liczby ciągłych nośnych optycznych w ścieżce (*pcap*) najlepsze



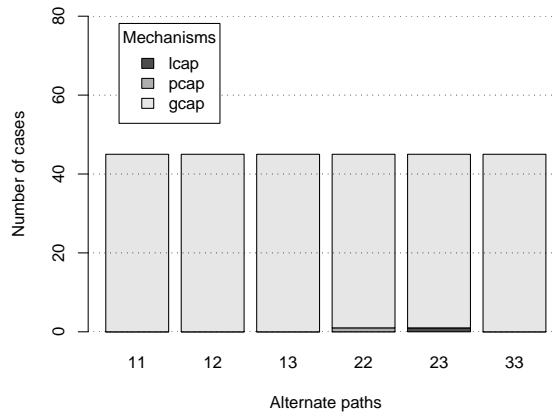
Rysunek 19: Liczba przypadków, w których dany wariant doboru trasy był najlepszy w sieci Pan-EU. Warianty alt11, alt12 i alt22 nie były najlepsze w żadnym przypadku i zostały pominięte.



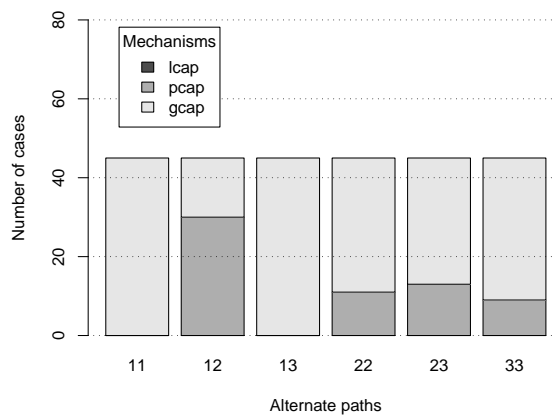
Rysunek 20: Liczba przypadków, w których dany wariant doboru trasy był najlepszy w sieci NSF. Warianty alt11, alt12 i alt22 nie były najlepsze w żadnym przypadku i zostały pominięte.

wyniki osiąga się przy algorytmie doboru trasy korzystającym z trzech alternatywnych ścieżek dla każdej klasy ruchowej. Dla strategii opartej o mechanizm weryfikacji liczby nośnych optycznych dostępnych w łączy (*lcap*) oraz dla strategii opartej na grupowaniu długości fal (*pool*) nie ma jednoznacznego wyniku. Dla strategii opartej o mechanizm weryfikacji liczby nośnych optycznych dostępnych w pierwszym łączy (*flcap*) najlepsze rezultaty osiąga się przy doborze trasy korzystającym z jednej ścieżki dla zgłoszeń niskiego priorytetu oraz z trzech ścieżek dla zgłoszeń wysokiego priorytetu.

Kolejne porównanie strategii odpowiada na pytanie, która strategia jest najlepsza przy założonym wariancie doboru trasy. Wyniki zostały przedstawione na rysunkach 21 i 22.



Rysunek 21: Liczba przypadków, w których dana strategia była najlepsza przy zadanym wariacie doboru trasy w sieci Pan-EU. Strategie oparte na mechanizmach *pool* i *flcap* nie były najlepsze w żadnym przypadku i zostały pominięte.

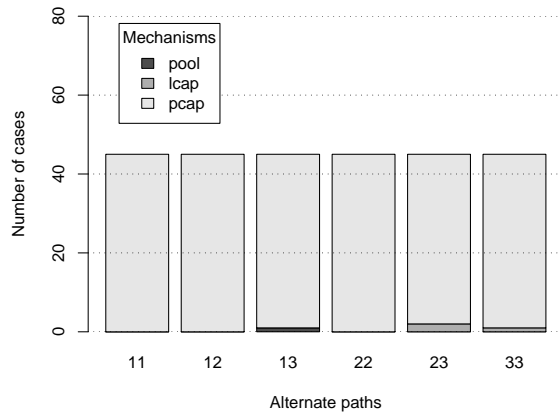


Rysunek 22: Liczba przypadków, w których dana strategia była najlepsza przy zadanym wariacie doboru trasy w sieci NSF. Strategie oparte na mechanizmach *pool* i *flcap* nie były najlepsze w żadnym przypadku i zostały pominięte.

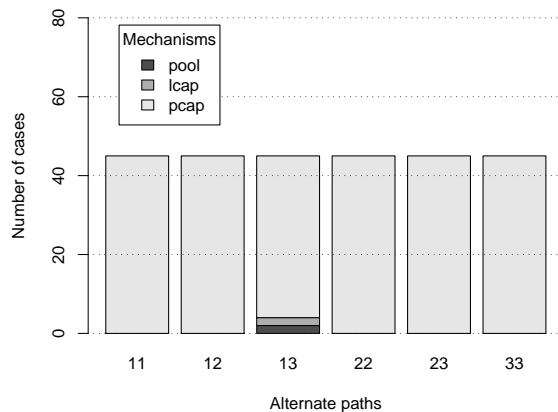
W większości przypadków najlepsze rezultaty osiągnęła strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby ciągłych nośnych optycznych dostępnych w sieci (*gcap*), drugie miejsce zajęła strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby ciągłych nośnych optycznych w ścieżce (*pcap*).

Strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby ciągłych nośnych optycznych dostępnych w sieci (*gcap*) może jednak być zbyt wymagająca z punktu widzenia złożoności obliczeniowej i ilości informacji potrzebnych do jej działania. Stąd przygotowano kolejne porównanie, w którym ta strategia została pominięta. Porównanie to przedstawiają rysunki 23 i 24.

Przedstawione zestawienia pozwalają przypuszczać, że strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby ciągłych nośnych optycznych dostępnych w sieci (*gcap*)



Rysunek 23: Liczba przypadków, w których dana strategia była najlepsza przy zadanym wariancie doboru trasy w sieci Pan-EU przy wyłączeniu strategii *gcap* z porównania. Strategie oparte na mechanizmach *pool* i *lcap* nie były najlepsze w żadnym przypadku i zostały pominięte.



Rysunek 24: Liczba przypadków, w których dana strategia była najlepsza przy zadanym wariancie doboru trasy w sieci NSF przy wyłączeniu strategii *gcap* z porównania. Strategie oparte na mechanizmach *pool* i *lcap* nie były najlepsze w żadnym przypadku i zostały pominięte.

oraz strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby ciągłych nośnych optycznych w ścieżce (*pcap*) będą najlepsza, spośród przedstawionych, z dowolnie wybranym algorytmem doboru trasy.

Końcowe zestawienie pokazuje liczbę przypadków, w których pojedynczy mechanizm lub kombinacja mechanizmów jest najlepsza (Tabela 5).

Wynik tego porównania jest jednoznaczny. Strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby ciągłych nośnych optycznych dostępnych w sieci (*gcap*) połączona z algorytmem doboru trasy korzystającym z trzech alternatywnych ścieżek dla zgłoszeń w każdej klasie była najlepsza we wszystkich analizowanych przypadkach. Jednakże ze względu na sygnalizowane wcześniej potencjalne problemy ze złożonością

Tabela 5: Liczba przypadków w których dana kombinacja mechanizmów była najlepsza.

Sieć	Strategia	Liczba przypadków
PanEU	alt33-gcap	45
NSF	alt33-gcap	36
	alt33-pcap	9

Tabela 6: Liczba przypadków w których dana kombinacja mechanizmów była najlepsza. Strategie oparte na mechanizmie *gcap* nie były uwzględniane w porównaniu.

Sieć	Strategia	Liczba przypadków
PanEU	alt33-pcap	44
	alt33-lcap	1
NSF	alt33-pcap	45

obliczeniową i ilością informacji wymaganej do działania, strategia ta może nie być preferowana przez operatora sieci. Stąd dodatkowe zestawienie wyników, wykonane bez uwzględniania tej strategii. Jego wynik prezentuje Tabela 6.

Wynik ten jest również jednoznaczny. Strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby ciągłych nośnych optycznych w ścieżce (*pcap*) połączona z algorytmem doboru trasy korzystającym z trzech alternatywnych ścieżek dla zgłoszeń w każdej klasie była najlepsza w zdecydowanej większości analizowanych przypadków.

Podsumowując, strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby ciągłych nośnych optycznych dostępnych w sieci (*gcap*) oraz strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby ciągłych nośnych optycznych w ścieżce (*pcap*) są zdecydowanymi kandydatami do wdrożenia w sieciach optycznych z gwarancją jakości usług. Jakość obsługi oferowana przez obie strategie jest zbliżona, co pozwala przypuszczać, że preferowaną strategią będzie strategia oparta na mechanizmie weryfikacji liczby ciągłych nośnych optycznych w ścieżce (*pcap*), ze względu na znacznie mniejsze wymagania. Pozostałe strategie nie są dobrymi kandydatami do implementacji w sieciach optycznych z gwarancją jakości usług, gdyż oferują znacznie gorszą jakość obsługi.

7 Podsumowanie

Celem rozprawy było zbadanie możliwości różnicowania jakości obsługi GoS w sieciach optycznych za pomocą odpowiednich strategii doboru trasy. W pracy zaproponowano sześć mechanizmów różnicujących, z których pięć bazowało na rezerwacji zasobów a jeden na różnej liczbie ścieżek alternatywnych dla różnych klas zgłoszeń. Mechanizmy zostały skonstruowane tak, aby możliwe było ich użycie zarówno w środowisku scentralizowanym jak też rozproszonym. W rozprawie przedstawiono szczegółowe algorytmy działania poszczególnych mechanizmów oraz oszacowania ich złożoności obliczeniowej.

Mechanizmy te następnie przebadano w środowisku symulacyjnym opartym na symulatorze OMNeT++, uwzględniając w ocenie wyników zagadnienia związane z wiarygodnością statystyczną. Symulacje przeprowadzono w dwóch sieciach refe-

rencyjnych: Pan-EU oraz NSF. Każdy z zaproponowanych mechanizmów był w stanie zapewnić zróżnicowane prawdopodobieństwo blokady zgłoszeń należących do różnych klas.

W oparciu o przedstawione mechanizmy zbudowano zestaw strategii, część z nich używała tylko jednego mechanizmu, część jednocześnie dwóch mechanizmów. Celem tej części pracy było wyłonienie mechanizmu, lub kombinacji mechanizmów, jakie są najbardziej obiecujące z punktu widzenia zastosowania w przyszłych sieciach optycznych. Zaproponowane strategie zostały przebadane w środowisku symulacji komputerowej w kilkudziesięciu scenariuszach różniących się ruchem oferowanym i proporcjami intensywności zgłoszeń niskiego i wysokiego priorytetu.

Najlepsze okazały się strategie oparte na mechanizmach *gcap* i *pcap*, przy czym pierwszy z nich był nieco lepszy pod względem uzyskiwanych wyników ale charakteryzował się znacznie większą złożonością obliczeniową i wymaganiami stawianymi płaszczyźnie sygnalizacji sieci. Oba wspomniane mechanizmy okazywały się najlepsze w połączeniu z każdym testowanym wariantem liczby ścieżek alternatywnych. Najlepsze rezultaty uzyskano dla maksymalnej rozpatrywanej liczby ścieżek alternatywnych, jednakowej dla obu klas. Wprowadzenie różnicowania przez zapewnienie każdej klasie zgłoszeń innej liczby ścieżek alternatywnych skutkowało obniżeniem wydajności sieci.

Różnicowanie jakości obsługi GoS jest pierwszym krokiem do gwarantowania jakości usług GoS, które pozwalają operatorom sieci na oferowanie usług dostosowanych do potrzeb klientów, przy jednoczesnym zapewnieniu efektywnego użycia zasobów sieciowych. Wraz ze wzrostem potrzeb operatorów i użytkowników należy się spodziewać wzrostu złożoności mechanizmów GoS w sieci tak, aby były one w stanie poradzić sobie ze wzrastającą liczbą klas zgłoszeń i wzrastającą nieprzewidywalnością zachowań użytkowników. Spodziewanym kierunkiem rozwoju mechanizmów GoS w sieci jest także wzrost precyzji w kontroli GoS, w tym uwzględnienie dodatkowych parametrów takich jak czas zestawienia połączenia czy też sprawiedliwość w przydziale zasobów pomiędzy różnymi komunikującymi się parami węzłów. Jest to spodziewany kierunek dalszych badań w tej dziedzinie.

7.1 Najważniejsze osiągnięcia

Najważniejsze osiągnięcia pracy można streścić w następujących punktach:

1. W rozprawie wprowadzono klasyfikację mechanizmów różnicowania jakości obsługi GoS na mechanizmy, które rezerwują zasoby sieci dla przyszłych żądań wysokiego priorytetu; mechanizmy, w których każda klasa żądań jest obsługiwana innym algorytmem doboru trasy albo innym podzbiorem potencjalnych tras oraz mechanizmy, w których istniejące ścieżki niskiego priorytetu mogą być rozłączane, jeśli jest to konieczne dla obsługi żądania wyższego priorytetu.
2. Zaproponowano zestaw pięciu mechanizmów które rezerwują zasoby sieci dla przyszłych żądań wysokiego priorytetu oraz mechanizm który używa różnej liczby ścieżek alternatywnych dla różnych klas żądań. W rozprawie przedstawiono szczegółowe algorytmy działania poszczególnych mechanizmów dostosowane do sieci ze sterowaniem scentralizowanym oraz do sieci ze sterowaniem

rozproszonym. Dodatkowo oszacowano złożoność obliczeniową przedstawionych mechanizmów.

3. Korzystając z symulatora OMNeT++ zbudowano narzędzie symulacyjne do oceny poszczególnych mechanizmów.
4. Szczegółowo oceniono jakość działania poszczególnych mechanizmów za pomocą komputerowej symulacji zdarzeń dyskretnych.
5. Oceniono zasadność stosowania jednocześnie dwóch mechanizmów do zapewnienia jakości obsługi w sieci i wskazano mechanizmy, które najlepiej realizują postawione przed nimi zadanie.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że teza wskazana na początku rozprawy: ***“Istnieje możliwość różnicowania prawdopodobieństwa blokady zgłoszeń w sieciach optycznych przez zastosowanie strategii doboru trasy charakteryzujących się umiarkowaną złożonością”*** została udowodniona.

Literatura

- [1] P. Ashwood-Smith, ed., L. Berger, ed., “Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Signaling Constraint-based Routed Label Distribution Protocol (CR-LDP),” RFC 3472, January 2003.
- [2] L. Berger, “Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Signaling Resource ReserVation Protocol-Traffic Engineering (RSVP-TE) Extensions,” RFC 3473, January 2003.
- [3] A. Birman, A. Kershenbaum, “Routing and wavelength assignment methods in single-hop all-optical networks with blocking,” *The Conference on Computer Communications, IEEE INFOCOM '95*, Boston, Massachusetts, Vol. 1, pp. 431 – 438, 2 – 6 April, 1995.
- [4] Y. Chen, M. Hamdi, D. H. K. Tsang, “Proportional QoS over WDM Networks: Blocking Probability,” *Sixth IEEE Symposium on Computers and Communications, ISCC '01*, Hammamet, Tunisia, pp. 210 – 215, 3 – 5 July 2001.
- [5] I. Chlamtac, A. Ganz, G. Karmi, “Lightpath Communications: An approach to high bandwidth optical WAN's,” *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 40, pp. 1171 – 1182, July 1992.
- [6] P. Cholda, K. Wajda, A. Jajszczyk, J. Tapolcai, T. Cinkler, S. Bodamer, D. Colle, G. Ferraris, “Considerations about service differentiation using a combined QoS/QoR approach,” *The 5th International Workshop on Design of Reliable Communication Networks, DRCN '05*, Island of Ischia, Italy, 16-19 October 2005.
- [7] ITU-T Rec. ITU-T G.8080/Y.1304, “Architecture for the automatically switched optical network (ASON)”.

- [8] A. Jukan, G. Franzl, “Path selection methods with multiple constraints in service-guaranteed WDM networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 12, No. 1, pp. 59 – 72, February 2004.
- [9] H. Kogelnik, “High-capacity optical communications: personal recollections,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 6, No. 6, pp. 1279 – 1286, November/December 2000.
- [10] A. Kuchar, “Achievements of COST 266 Action and further prospects in research of advanced infrastructure for photonic networks,” *The 6th International Conference on Transparent Optical Networks, IEEE ICTON '04*, Wroclaw, Poland, Vol. 1, pp. 37 – 42, 4 – 8 July 2004.
- [11] K. C. Lee, V. O. K. Li, “A wavelength-convertible optical network,” *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 11, No. 5 – 6, pp. 962 – 970, May-June 1993.
- [12] T. H. Maiman, “Stimulated optical radiation in ruby masers,” *Nature*, Vol. 187, pp. 493 – 494, 1960.
- [13] E. Mannie, Ed. “Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture,” RFC 3945, October 2004.
- [14] A. Mokhtar, M. Azizoglu, “Adaptive wavelength routing in all-optical networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 6, pp. 197 – 206, April 1998.
- [15] R. Ramaswami, K. Sivarajan, “Design of Logical Topologies for Wavelength-Routed Optical Networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 14, pp. 840 – 851, June 1996.
- [16] A.L. Schawlow, and C.H. Townes, “Infrared and Optical Masers,” *Physical Review*, Vol. 112, Issue 6, pp. 1940 – 1949, 1958.
- [17] A. Szymanski, A. Lason, J. Rzasas and A. Jajszczyk, “Grade-of-Service-based Routing in Optical Networks” *IEEE Communications Magazine*, Vol. 45, No. 2, pp. 82 – 87, February 2007.
- [18] A. Szymanski, A. Lason, J. Rzasas and A. Jajszczyk, “Performance Evaluation of the Grade-of-Service-based Routing Strategies for Optical Networks” *IEEE International Conference on Communications, ICC '08*, Beijing, China, pp. 5252 – 5257, 19 – 23 May 2008.
- [19] A. Szymanski, A. Lason, J. Rzasas and A. Jajszczyk, “Route Management Strategies for Grade of Service Differentiation in Optical Networks,” *IEEE International Conference on Communications, ICC '06*, Istanbul, Turkey, pp. 2453 – 2458, 11 – 15 June 2006.
- [20] A. Szymański, A. Lasoń, J. Rząsa, A. Jajszczyk, “Strategie zarządzania doborem trasy umożliwiające różnicowanie jakości obsługi w przełączanych sieciach optycznych”, *Przegląd Telekomunikacyjny, Wiadomości Telekomunikacyjne*, Vol. 80, Iss. 2–3, pp. 64–67, 2007.

- [21] T. Tachibana, S. Kasahara, "QoS-Guaranteed Wavelength Allocation for WDM Networks with Limited-Range Wavelength Conversion," *IEICE Transactions on Communications*, Vol. E87-B, No. 6, pp. 1439 – 1450, June 2004.
- [22] A. Varga, "Using the OMNeT++ discrete event simulation system in education," *IEEE Transactions on Education*, Vol. 42, No. 4, pp. 11, November 1999.
- [23] "PostgreSQL: The world's most advanced open source database, " <http://www.postgresql.org> (Online, last visited 18.11.2008).
- [24] "The R Project for Statistical Computing," <http://www.r-project.org> (Online, last visited 18.11.2008).
- [25] H. Zang, J.P. Jue, B. Mukherjee, "A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks," *Optical Networks Magazine*, Vol. 1 No. 1, pp. 47 – 60, January 2000.
- [26] H. Zang, J. P. Jue, L. Sahasrabudde, R. Ramamurthy, and B. Mukherjee, "Dynamic lightpath establishment in wavelength-routed WDM networks," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 39, No. 9, pp. 100 – 108, September 2001.