



**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

**WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI,
INFORMATYKI I ELEKTRONIKI**

Zwiększanie niezawodności sieci GMPLS przez modyfikację płaszczyzny sterowania

Autoreferat rozprawy doktorskiej

mgr inż. Paweł Różycki

Promotor:

prof. dr hab. inż. Andrzej Jajszczyk

Akademia Górniczo-Hutnicza
Katedra Telekomunikacji

RZESZÓW 2010

Wstęp

Wymagania jakie użytkownicy stawiają operatorom powodują, że obok szerokiego pasma coraz częściej ważną staje się możliwość dynamicznego zarządzania zasobami oferując przy tym wysoką jakość i określając restrykcyjne parametry niezawodnościowe. Technologią, która może sprostać tym wymaganiom jest opracowywane przez IETF uogólnione wieloprotokołowe przełączanie etykiet GMPLS (*Generalized Multiprotocol Label Switching*). Technologia ta jest uogólnieniem na różne techniki przełączania dobrze znanej techniki MPLS. Umożliwia to wykorzystanie sprawdzonych mechanizmów i protokołów, które jednak muszą być rozszerzone o właściwości, które pozwolą na efektywne działanie w nowych warunkach. Warto zaznaczyć, że mechanizmy sygnalizacyjne GMPLS są rekomendowane przez ITU-T jako podstawowa implementacja sygnalizacji dla nowotworzonego standardu ASON (*Automatically Switched Optical Networks*).

Najważniejszym założeniem nowej techniki jest wprowadzenie niezależnych płaszczyzn funkcjonalnych odpowiedzialnych za realizację poszczególnych zadań:

- **płaszczyzny danych** odpowiedzialnej za transmisję danych użytkownika, którą mogą tworzyć różne technologie telekomunikacyjne takie jak OTN, SDH, IP;
- **płaszczyzny sterowania** odpowiedzialnej za sygnalizację, która jest zaimplementowana jako sieć IP.

Płaszczyzny te mogą być fizycznie odseparowane, co oznacza, że sieć sygnalizacyjna może mieć topologię inną niż topologia płaszczyzny danych. W przypadku gdy topologie obu płaszczyzn są takie same mówimy o architekturze symetrycznej, w przeciwnym wypadku mamy do czynienia z architekturą asymetryczną. W kontekście tej pracy architektura to jednak nie tylko topologia czy też symetryczność płaszczyzn, ale także zaimplementowane mechanizmy.

Rozpatrując zagadnienia niezawodnościowe w sieciach GMPLS należy pamiętać, że sieć sygnalizacyjna oraz sieć transmisji danych są rozłączne, w szczególności mogą być fizycznie odseparowane. Pociąga to za sobą konsekwencje w postaci konieczności uwzględnienia tej niezależności przy projektowaniu mechanizmów zabezpieczających odpowiednią jakość usług. Należy pamiętać, że uszkodzenie w płaszczyźnie danych nie musi oznaczać uszkodzenia w płaszczyźnie sterowania i odwrotnie, uszkodzenie łącza sygnalizacyjnego między węzłami nie musi oznaczać, że usługa nie może być w dalszym ciągu realizowana między tymi węzłami.

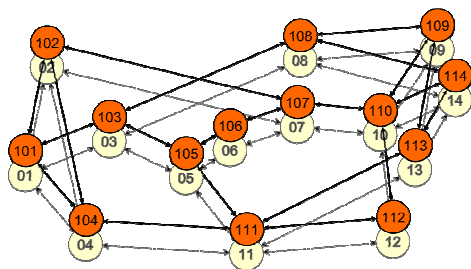
Symetryczność lub asymetryczność sieci może mieć wpływ na jej funkcjonowanie. Ma to oczywiście znaczenie dla procesu zestawiania nowych połączeń, ale z punktu widzenia użytkownika o wiele bardziej istotny niż czas ustanowienia połączeń, jest czas po jakim usługa zerwana na skutek awarii zostanie przywrócona. Czas ten jest oznaczony jako TTR (*Time To Recover*), a wartość średnia tego czasu to wspomniane już MTTR.

Wpływ architektury płaszczyzny sterowania na niezawodność

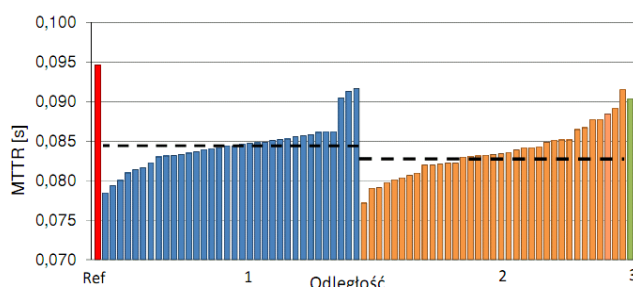
W celu potwierdzenia istnienia wpływu topologii płaszczyzny sterowania na niezawodność sieci GMPLS przeprowadzono symulację sieci NSFNET (rysunek 1) z różnymi wariantami topologii płaszczyzny sterowania. Za parametr mierzony przyjęto wartość MTTR. Do przeprowadzenia symulacji użyto narzędzia opracowanego przez autora i opisanego w rozprawie.

Symulację przeprowadzono dla sieci z płaszczyzną sterowania symetryczną względem topologii płaszczyzny danych oraz dla płaszczyzny sterowania zmodyfikowanej przez dodanie dodatkowego łącza między wybranymi węzłami. Wyniki przedstawione na rysunku 2 pokazują zależność zmierzonego czasu MTTR od odległości między węzłami które zostały połączone. Wskazuje to, że zmniejszenie czasu przywrócenia usługi nie zależy wyłącznie od tego jak odległe węzły zostaną bezpośrednio połączone. Można zatem

przypuszczać, że niektóre węzły są ważniejsze od innych i połączenie właśnie tych węzłów pozwoli zwiększyć niezawodność sieci.



Rysunek 1. Sieć NSFNET z odseparowanymi płaszczyznami danych i sterowania



Rysunek 2. Zależność czasu MTTR od odległości między węzłami bezpośrednio połączonymi

Węzły dominujące

Problem wyszukania węzłów, które mają największe znaczenie w danej sieci jest znany z teorii grafów jako problem zbioru dominującego DS (*Dominating Set Problem*). Definiuje on zbiór dominujący węzłów D w grafie $G(V,E)$, gdzie V to zbiór wierzchołków a E to zbiór krawędzi, taki że każdy węzeł należy do D lub jest sąsiadem któregoś z węzłów należących do D .

Definicja zbioru węzłów dominujących powoduje, że w dużych grafach zbiór taki może zawierać bardzo dużą liczbę węzłów. Najłatwiejszym sposobem na zmniejszenie liczby węzłów jest zmiana warunku odnalezienia zbioru węzłów dominujących przez zwiększenie dopuszczalnej odległości od węzłów dominujących. Wprowadzając parametr k określający maksymalną odległość węzłów od węzła dominującego można w łatwy sposób wprowadzić definicję problemu wyszukiwania zbioru k -dominującego k -DS (*k-dominating nodes set*), która określa zbiór węzłów dominujących D w ten sposób, że wszystkie węzły należą do D lub są odległe od węzła dominującego o k lub mniej. Parametr k może być przy tym zależny od wielkości grafu lub wymagań stawianych rozwiązaniu. Należy przy tym zauważyć, że problem k -DS dla $k = 1$ redukuje się do klasycznego problemu DS.

Problem wyszukiwania zbiorów dominujących jest problemem NP-zupełnym i jako taki może być rozwiązywany przy użyciu algorytmów heurystycznych. W rozprawie zaproponowano kilka prostych algorytmów tego typu do rozwiązania przedstawionego problemu. Przykład takiego algorytmu został przedstawiony poniżej:

Algorytm GA (*Greedy Algorithm*) dla k -DS

- Krok 1. Każdemu z węzłów nadaj unikalny identyfikator ID .
- Krok 2. Zdefiniuj pusty zbiór tzw. węzłów „pokrytych” S oraz pusty zbiór węzłów dominujących D .
- Krok 3. Dla każdego węzła i nie należącego do D i nie należącego do S , wyznacz liczbę węzłów $N(i,k)$ odległych o k lub mniej od węzła i , które nie należą do D i nie należą do S .
- Krok 4. Odszukaj węzeł n o największej wartości $N(n,k)$, który nie należy do D ani nie należy do S ; w przypadku kilku węzłów spełniających kryterium wybierz ten z mniejszym ID ;
 - a) znaleziony węzeł n dodaj do zbioru węzłów dominujących D ;
 - b) do zbioru S dodaj wszystkie węzły odległe o k lub mniej od węzła n i nie należące ani do zbioru D ani do zbioru S .
- Krok 5. Powtarzaj Kroki 3-4 aż wszystkie węzły zostaną przypisane do zbioru D lub do zbioru S (zbiór D spełni warunki odnalezienia zbioru dominującego k -DS).

Zaproponowane algorytmy zostały użyte do wyznaczenia zbiorów węzłów k -dominujących dla czterech sieci znanych z wielu publikacji związanych z analizą optycznych sieci rozległych: NSFNET, Nobel_UE, Cost266 oraz US Long Haul. Na potrzeby badań topologie zostały uzupełnione o arbitralnie przyjęte przepływności łączy oraz opóźnienia proporcjonalne do geograficznych odległości między miastami, które te sieci modelowały.

Tabela 1. Węzły dominujące rozważanych topologii wyznaczone algorytmami k -DS

Topologia	Algorytm	Węzły dominujące obliczone algorytmem k -DS		
		$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$
NSFNET	BA	1,2,3,4,5,10,11	3,5,11	1
	EA	1,6,8,10,11	7,8,11	1
	GA1	1,5,8,10,13	7,8,11	1
	GA2	1,5,9,10	1,11	1
	GA3	1,6,8,10,11	7,8,11	10
	GA4	1,3,5,10,11	10,11	10
	HE	1,4,5,9,10,11	10,11	11
Long Haul	BA	1,2,3,4,5,8,10,12,15,16,17,20,22,25	4,8,12,16,17,25	8,12,16
	EA	1,4,7,10,12,15,20,22,24	4,14,16,23	1,12,14
	GA1	1,5,7,10,12,19,22,24	4,14,16,23	2,12,18
	GA2	1,5,6,10,12,19,22,23	4,14,16,21	2,10,12
	GA3	1,5,7,10,12,19,22,24	4,14,16,23	2,12,18
	GA4	1,5,8,10,12,19,22,25	4,15,16,22	4,12,16
	HE	4,5,8,10,12,15,17,20,22,25,27	4,16,17,25	8,16
Nobel UE	BA	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17 18,19,20,21,22,23,24,27	3,5,9,10,11,12,13,14,15,16,22	5,9,11,12,16,22
	EA	2,4,6,9,12,14,17,18,19,25,27	1,6,14,16,18	3,16
	GA1	1,6,9,12,14,18,19,23,25,29	1,6,14,16,18	3,16
	GA2	1,6,9,14,15,16,23,24,25	1,10,14,16,18	3,16
	GA3	1,6,9,12,14,18,19,23,25,28	1,6,14,16,18	3,16
	GA4	1,6,9,10,14,16,20,21,23,24	4,10,14,16,18	14,16
	HE	3,4,8,9,10,14,15,16,17,18,20,21,22,24	4,9,13,14,16,22	9,14,16
Cost 266	BA	2,4,5,6,8,9,12,13,14,15,16,18,19,20,21, 22,23,24,25,26,27,28,29,30,32,34	4,5,8,13,15,18,19,20,25,26,29	8,13,18,20,24,25,29
	EA	2,4,6,12,13,15,22,23,26,28,31,33,35,37	2,13,18,29,31,37	2,20,27,31
	GA1	2,4,7,12,13,17,22,26,27,31,33,34	2,13,18,26,34	4,20,31
	GA2	1,4,7,12,13,17,18,22,26,32,34	4,13,18,24,26	4,16,20
	GA3	2,4,6,12,13,15,22,23,26,28,31,33,35,37	2,13,18,26,34	4,20,31
	GA4	4,5,12,13,15,18,19,23,26,29,30,34	4,13,18,26,28	4,20,26
	HE	4,5,9,13,14,15,16,18,19,20,26,27,28,29,30,36	4,13,18,20,26,29	13,18,29

W tabeli 1 przedstawiono węzły dominujące wyznaczone zaprezentowanymi w rozprawie algorytmami. Zgodnie z założeniami, wyznaczone w ten sposób węzły powinny odgrywać bardziej istotną rolę w sieci od pozostałych węzłów, co oznacza, że przez te węzły będzie poprowadzonych więcej połączeń niż przez inne węzły w tej sieci. Aby sprawdzić czy jest tak istotnie, poddano analizie wyniki symulacji sieci NSFNET. Tabela 2 przedstawia ile ścieżek zostało zestawianych przez każdy z węzłów. Istotniejszy przy tym wydaje się wynik otrzymany dla ścieżek podstawowych, gdyż ścieżki zabezpieczające, jako rozłączne ze ścieżkami podstawowymi, nie są wyznaczane w sposób optymalny. Dane te potwierdzają, że połączenia są zestawiane częściej przez węzły wyznaczone przez algorytmy k -DS niż przez pozostałe węzły. Najczęściej w ścieżkach pojawiają się węzły 11, 3, 10, 7, 8, 5 i 1, co odpowiada wszystkim węzłom wyznaczonym przez wszystkie rozpatrywane algorytmy dla $k = 2$, natomiast węzeł 12, przez który poprowadzona jest najmniejsza liczba ścieżek, nie został wyznaczony jako węzeł dominujący przez żaden algorytm. Analogiczne dane dotyczące sieci Nobel_UE, US Long Haul, i Cost266 zostały przedstawione w rozprawie.

Tabela 2. Liczba ścieżek realizowana przez poszczególne węzły w sieci NSFNET

Węzeł	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Ścieżek podstawowych	56	54	96	52	70	19	91	77	55	96	137	14	56	26
Ścieżek zabezpieczających	153	130	192	130	211	73	151	107	147	198	257	102	146	86
Suma	209	184	288	182	281	92	242	184	202	294	394	116	202	112

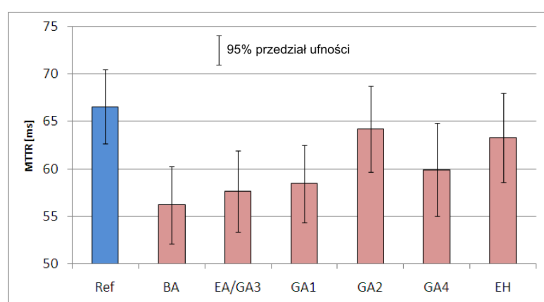
Jak wspomniano, zwiększenie liczby bezpośrednich połączeń między węzłami w płaszczyźnie sterowania może zmniejszyć czas potrzebny na przywrócenie usług, zwiększając tym samym niezawodność sieci. Zastosowanie algorytmów k -DS pozwala znaleźć węzły dominujące w grafie będącym modelem sieci. Jak wykazano, węzły te pełnią kluczową rolę w sieci i to właśnie przez nie realizowana jest największa liczba połączeń. Węzły owe powinny być zatem brane pod uwagę jako te, które połączone w płaszczyźnie sterowania zwiększą niezawodność całej sieci. Aby potwierdzić słuszność tej tezy przeprowadzono szereg symulacji.

Na potrzeby dalszych analiz spośród przedstawionych sieci wybrano dwie: NSFNET oraz Nobel_UE, przy czym sieć płaszczyzny sterowania została rozbudowana o dodatkowe połączenia między węzłami dominującymi wyznaczonymi przy pomocy poszczególnych algorytmów. Należy tutaj zauważyć, że w zależności od wielkości sieci oraz zastosowanego algorytmu, a także parametru k , liczba wyznaczonych węzłów dominujących może być bardzo różna. Łatwo zauważyć, że ze zwiększeniem liczby k zmniejsza się

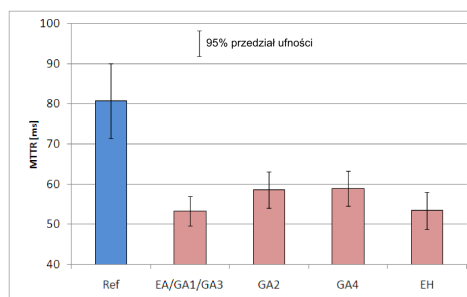
liczba wyznaczonych węzłów dominujących. Przykładowo, dla sieci NSFNET i parametru $k = 1$ algorytmy wyznaczają od czterech do siedmiu węzłów, podczas gdy dla sieci Nobel_UE te same algorytmy wyznaczają nawet 25 węzłów (algorytm BA). Podobnie dla $k = 3$ wszystkie algorytmy wyznaczają tylko jeden węzeł dominujący w sieci NSFNET podczas gdy dla sieci Nobel_UE od dwóch do sześciu. Chcąc modyfikować płaszczyznę sterowania przez bezpośrednie łączenie węzłów dominujących należy zauważyć, że zbyt duża liczba takich węzłów będzie oznaczała bardzo dużą liczbę dodatkowych łączy, co może być nieuzasadnione ekonomicznie. Zbyt mała liczba węzłów spowoduje z kolei bardzo małą liczbę dodatkowych łączy w płaszczyźnie sterowania co będzie oznaczało niewielką poprawę niezawodności sieci.

Przedstawione wyniki wskazują, że liczba węzłów dominujących zależy od wartości parametru k , ale także od zastosowanego algorytmu. Należy jednak zauważyć, że o ile liczba węzłów dominujących wyznaczona algorytmem BA jest duża, to ich liczba wyznaczona przez pozostałe algorytmy jest podobna. Zależność liczby węzłów dominujących od wartości k jest trudna do oszacowania tym bardziej, że wydaje się, iż zależy ona nie tylko od liczby węzłów oraz liczby połączeń między nimi, ale także od topologii. Wystarczy porównać wyniki dla topologii Nobel_UE i Long Haul. Obie te sieci mają tę samą liczbę węzłów i zbliżoną liczbę łączy, jednak zależność liczby węzłów dominujących od wartości parametru k jest odmienna. Dla $k = 2$, liczba węzłów wyznaczona dla sieci Nobel_UE jest większa od liczby węzłów dla sieci Long Haul, podczas gdy dla $k = 3$ to liczba węzłów dominujących dla sieci Long Haul jest większa.

Symulacji poddano sieć NSFNET z topologiami płaszczyzny sterowania wyznaczonymi algorytmami dla $k = 1$, oraz sieć Nobel_UE dla $k = 2$. Dodatkowo, dla każdej sieci przeprowadzono symulację dla symetrycznej architektury płaszczyzny sterowania – wyniki tych symulacji zostały potraktowane jako punkt odniesienia i oznaczone przez *Ref.* Ze względu na bardzo dużą liczbę łączy dodatkowych w płaszczyźnie sterowania z badań symulacyjnych wyłączono algorytm BA dla sieci Nobel_EU. Wyniki zostały przedstawione na rysunkach 3 i 4.



Rysunek 3. Wyniki symulacji dla topologii NSFNET, $k = 1$



Rysunek 4. Wyniki symulacji dla topologii Nobel_UE, $k = 2$

Przedstawione wyniki potwierdzają, że dodatkowe łącza w płaszczyźnie sterowania pozwalają zmniejszyć parametr MTTR, a zatem zwiększyć niezawodność sieci. Jak można się było spodziewać, wielkość MTTR zależy od topologii, a więc od tego, które węzły w płaszczyźnie sterowania są ze sobą połączone. Jest jednak istotne nie tylko jak dużo łączy znajduje się w płaszczyźnie sterowania, ale także które węzły zostaną bezpośrednio połączone. Wyniki otrzymane dla topologii Nobel_UE pokazują, że topologia oparta na algorytmach EA/GA1/GA3 daje lepsze wyniki niż topologia oparta na algorytmach GA2 oraz GA4, mimo że we wszystkich tych przypadkach liczba łączy w płaszczyźnie sterowania była taka sama. Wartość MTTR dla topologii opartej na algorytmach EA/GA1/GA3 jest zbliżona do wartości tego parametru otrzymanego dla topologii opartej na algorytmie HE, mimo że topologia ta ma więcej dodatkowych łączy, co powinno przekładać się na lepsze parametry niezawodnościowe.

Również w przypadku topologii NSFNET algorytm HE uzyskał wynik jedynie nieznacznie lepszy niż algorytm GA2 i znacznie gorszy od GA4, mimo że topologia z nim związana miała znacznie więcej łączy w płaszczyźnie sterowania niż pozostałe (z wyjątkiem topologii opartej na algorytmie BA).

Węzły dominujące w grafach ważonych

Podobne analizy przeprowadzono dla sieci modelowanych jako grafy ważne. Wyznaczenie węzłów dominujących wymagało wprowadzenia do przedstawionych algorytmów pewnych modyfikacji

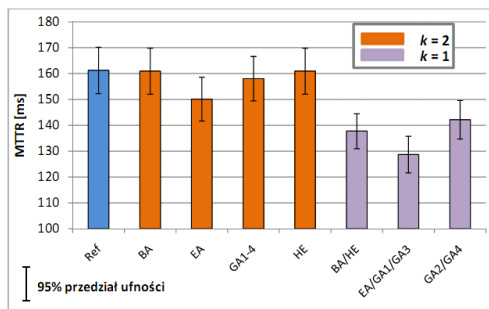
uwzględniających wagi w grafie. Chcąc zachować to samo kryterium wyboru węzłów dominujących, adaptacja przedstawionych algorytmów do wyznaczania węzłów dominujących w grafach ważonych k -WDS (k -Weighted Dominating Set) sprowadzać się może do określenia sposobu wyznaczania liczby, na podstawie której będzie podejmowana decyzja o przypisaniu danego węzła do zbioru węzłów dominujących. Ponieważ trasy ścieżek są wyznaczone korzystając z algorytmów rutingu, które używają metryk, kryterium wyboru również powinno być powiązane z metryką. Proponuje się zatem aby wartość ta była dana wzorem:

$$p_{i,k} = T_i \sum_{j \in T(i)} \left(\frac{1}{M_{i,j}} + I p_{j,(k-1)} \right)$$

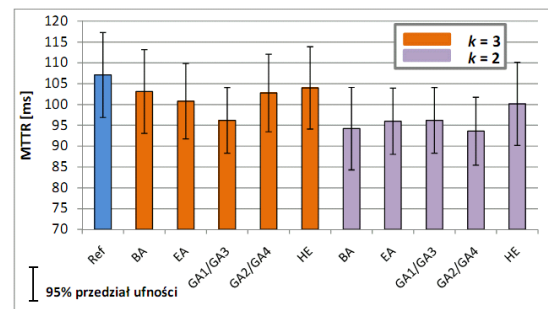
gdzie:

- $M_{i,j}$ – metryka łącząca między węzłami i i j ,
- $T(n)$ – zbiór sąsiadów węzła n ,
- I – współczynnik określający wpływ węzłów sąsiednich na dany węzeł.

Wyniki symulacji, przedstawione dla sieci NSFNET (dla $k = 1$ i $k = 2$) oraz dla sieci Nobel_UE (dla $k = 2$ i $k = 3$) przedstawiono odpowiednio na rysunkach 5 i 6.



Rysunek 5. Wyniki symulacji dla sieci NSFNET modelowanej jako gań ważony



Rysunek 6. Wyniki symulacji dla sieci Nobel_UE modelowanej jako gań ważony

Zbiory węzłów dominujących wyznaczone przez poszczególne algorytmy są do siebie zbliżone jednak nie są takie same. Wyniki symulacji nie pozwalają przy tym określić, że któryś z algorytmów jest zdecydowanie lepszy od innych. Stąd proponuje się, aby spośród wyznaczonych węzłów wybrać te, które w rozwiązaniach pojawiają się najczęściej. W analizie tej uwzględniono także te wyniki dla takich k większych od 3, dla których otrzymano więcej niż jeden węzeł dominujący. W przypadku sieci NSFNET maksymalna wartość k wynosi 3, dla sieci Nobel_UE oraz US Long Haul wartość ta wynosi 4, a dla Cost266 – 6. Na tej podstawie można wyznaczyć zbiór węzłów dominujących niezależny od wartości k , co w połączeniu z uzasadnioną ekonomicznie liczbą węzłów w danej sieci może dać satysfakcjonujące rozwiązanie i stanowić podstawę dla uwzględniania przedstawionych w pracy wyników w pracach projektowych.

Jako kryterium przyjęto, że liczba dodatkowych łączy nie może być większa niż połowa liczby łączy topologii symetrycznej. Biorąc to pod uwagę, do zbioru węzłów dominujących można zaliczyć:

- dla sieci NSFNET 6 węzłów: 10, 1, 3, 5, 9, 7;
- dla sieci US Long Haul 8 węzłów: 16, 1, 22, 8, 4, 14, 15, 25;
- dla sieci Nobel_UE 7 węzłów: 12, 6, 24, 25, 14, (4, 9, 16);
- dla sieci Cost266 9 węzłów: 18, 15, 23, 13, 26, 19, 20, 28, 29.

Węzły zostały podane w kolejności częstotliwości ich występowania w rozwiązaniach. W nawiasach podano węzły, które wystąpiły tak samo często.

Analizy dla ruchu niejednorodnego

Dotychczasowe analizy koncentrowały się na topologii sieci. Istotny wpływ na jej funkcjonowanie, w szczególności na ogólny poziom niezawodności przez nią oferowanej, ma jednak także struktura ruchu. Ruch generowany przez każdy z węzłów można opisać jako pewną wielkość przypisaną węzłowi. Wielkość jest związana z ruchem, którego źródłem jest węzeł. Zakładając, że intensywność ruchu w sieci jest

zazwyczaj opisywana jako macierz T , w której elementy $t_{i,j}$ są intensywnością ruchu między węzłami i oraz j , rozkład ruchu generowanego przez poszczególne węzły można opisać jako:

$$T_n = \sum_{i=1}^N t_{n,i} / \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N t_{i,j}$$

Dla tak zdefiniowanego parametru określającego ruch z danego węzła można tak zmodyfikować problemy k -DS i k -WDS, aby uwzględniały intensywność ruchu.

W rozprawie przeprowadzono odpowiednie analizy wyznaczając węzły dominujące dla sieci modelowanych jako grafy ważone i jako grafy nieważone dla ruchu niejednorodnego oraz przeprowadzono symulacje ograniczając się do topologii NSFNET. Podobnie jak poprzednio wykonano także analizę statystyczną otrzymanych wyników. Pozwoliła ona określić węzły najczęściej wyznaczane do zbioru węzłów dominujących.

Podsumowanie

Badania zrealizowane w ramach niniejszej rozprawy miały na celu wykazać, że modyfikacja płaszczyzny sterowania w sieci GMPLS może prowadzić do zwiększenia niezawodności sieci. Owa modyfikacja może być przy tym oparta na znanym z teorii grafów problemie wyszukiwania zbiorów dominujących.

W celu realizacji tego zadania została zaproponowana pewna metodologia analizy sieci oparta na zastosowaniu algorytmów wyszukiwania zbiorów węzłów dominujących w grafie. Analizy zostały poparte doświadczeniami symulacyjnymi przeprowadzonymi narzędziem przygotowanym przez autora.

Rozważono modele sieci o różnym stopniu ogólności – od grafów nieważonych, przez grafy, w których z wagami na krawędziach skojarzone były rzeczywiste parametry łączy (przepływność, opóźnienie), po sieci obsługujące ruch niejednorodny.

Mimo zastosowania bardzo prostych algorytmów wyszukiwania węzłów dominujących w grafie, otrzymane wyniki wydają się być satysfakcjonujące i mogą być punktem odniesienia dla dalszych badań. Być może algorytmy bardziej złożone i bardziej zorientowane na rozwiązanie postawionego zadania pozwoliłyby uzyskać lepsze wyniki.

Przedstawiona metoda modyfikacji płaszczyzny sterowania polega na dodawaniu łączy do płaszczyzny sterowania co ma zwiększyć niezawodność. W tym kontekście warto również przyrzeć się możliwości usuwania z płaszczyzny sterowania tych łączy, które rzadko uczestniczą w przesyłaniu wiadomości sygnalizacyjnych.

Biorąc powyższe pod uwagę można stwierdzić (co stanowi tezę rozprawy), że:

Wybrane algorytmy wyszukiwania zbioru dominującego pozwalają zmodyfikować płaszczyznę sterowania GMPLS w taki sposób, że zwiększa się niezawodność sieci.

Wybrane publikacje

1. A. Jajszczyk, P. Rozycki, Recovery of the Control Plane after Failures in ASON/GMPLS Networks, *IEEE Network*, vol. 20 no. 1, Jan/Feb 2006.
2. P. Rozycki, J. Korniak, A. Jajszczyk, Failure Detection and Notification in GMPLS Control Plane, *IEEE International Conference on Communication ICC 2007*, presented at The Workshop on GMPLS Performance Evaluation: Control Plane Resilience, 24 June 2007, Glasgow, W. Brytania
3. P. Rozycki, J. Korniak, A. Jajszczyk, GMPLS Network Reliability Enhancement by Using the Dominating Nodes Approach, *IEEE International Conference on Communications ICC 2009*, June 2009 Dresden, Germany