

Proponowany projekt dotyczy strategii LTCC (jest to skrót od angielskiej nazwy *Logical Tunnel Capacity Control*) – nowatorskiej koncepcji strategii kierowania i protekcji ruchu, przeznaczonej dla sieci telekomunikacyjnych (głównie bezprzewodowych) charakteryzujących się zmienną przepływnością i dużymi zmianami zapotrzebowania. LTCC używa tuneli logicznych, takich jak wirtualne tunele LSP (*label switched paths*) realizowane w technice MPLS. Każde zapotrzebowanie ruchowe pomiędzy danymi parami węzłów ma do swojej dyspozycji zestaw tuneli i tych par węzłów, których (wirtualna) przepustowość jest dedykowana wyłącznie do obsługi strumienia pakietów rozpatrywanego zapotrzebowania. Przepustowość tuneli jest zmienna, regulowana w ich ramach poprzez odpowiednie zmniejszanie przepustowości nominalnej tuneli w odpowiedzi na fluktuacje przepływności.

Głównym celem badawczym projektu jest stworzenie podstaw teoretycznych niezbędnych dla efektywnego funkcjonowania strategii LTCC, co wymaga będzie rozwiązania następujących problemów naukowych:

1. Opracowanie i implementacja modeli matematycznych, wraz ze skutecznymi algorytmami ich rozwiązywania, służących do optymalizacji przepływności i czasu oraz przepustowości tuneli logicznych dla sieci stosujących LTCC.
2. Opracowanie modelu funkcjonalnego implementacji sieciowej strategii LTCC opartej na technice MPLS, wybranych protokołach ze stosu TCP/IP oraz wybranych mechanizmach sterowania dopuszczaniem pakietów do tuneli i ich rozdzielaniem pomiędzy tunele.
3. Opracowanie, zaprogramowanie i weryfikacja modelu symulacyjnego implementacji sieciowej LTCC dla wybranej architektury sieci telekomunikacyjnej. Model ten będzie stanowił *proof of concept* strategii LTCC.

Realizowane w projekcie badania podstawowe będą w pierwszym rzędzie dotyczyły sformułowanego powyżej Problemu 1, jako że opracowanie skutecznych modeli i algorytmów optymalizacyjnych jest warunkiem koniecznym efektywnego działania LTCC, tzn. maksymalizacji wielkości strumienia ruchu pakietowego zapotrzebowanych realizowanych w poszczególnych stanach dostępczości. Jest to problem obszerny i trudny, wymagający zastosowania teorii sieci przepływów wielotowarowych do sformułowania odpowiednich zadań optymalizacji sieci stosujących strategię LTCC, a następnie opracowania zaawansowanych, specjalizowanych metod i algorytmów programowania liniowego i programowania całkowitoliczbowego służących do rozwiązywania tych zadań. W programowaniu całkowitoliczbowym będziemy posługiwali się ogólnym podejściem, znanym jako *branch-and-price-and-cut* (czyli rozszerzeniem metody tzw. podziałów i ograniczeń o generację kolumn oraz generację płaszczyzn tnących, posługując się szybkimi heurystykami stochastycznymi). Stosowane będą również podejście znane w programowaniu liniowym jako optymalizacja odporna (*robust optimization*), wzbogacone o użycie afinicznych reguł decyzyjnych.

Rozwiązanie Problemu 2 polega będzie w głównej mierze na analizie i testowaniu wybranych protokołów TCP/IP oraz doborze odpowiednich mechanizmów dopuszczania pakietów do tuneli wirtualnych LSP (*packet admission control*) takich jak *leaky bucket* i inne mechanizmy związane z kształtowaniem strumienia ruchu (*traffic shaping*) oraz nadzorowania ruchu (*traffic policing*).

Z kolei do rozwiązania Problemu 3 użyjemy metody symulacyjnej.

Strategie kierowania i protekcji ruchu sieci telekomunikacyjnych (implementowane w systemach zarządzania) stanowią ich efektywność ruchową, która powinna być zapewniona we wszystkich stanach pracy sieci, co w przypadku LTCC oznacza wszystkie praktycznie występujące stany dostępczości. Właśnie to wymaganie uwzględnione w strategii LTCC sprawia, że naturalnym polem jej zastosowania są sieci bezprzewodowe, jako że są realizowane w technice bezprzewodowej mającej ze swej natury zmienną przepływność.

Szczególnym przypadkiem sieci bezprzewodowych, w których zastosowanie LTCC może przynieść znaczne korzyści, są sieci bezprzewodowe (WMN – *wireless mesh networks*). Sieci WMN składają się z ruterów IP oraz bram Internetowych, połączonych łączami bezprzewodowymi opartymi na radiowych (WiFi, WiMAX), mikrofalowych, bądź optycznych (FSO – *free space optical*) technikach transmisji. Sieci WMN stają się istotnym rozwiązaniem realizującym szerokopasmowy dostęp do Internetu, zarówno dla stałych jak i dla mobilnych użytkowników połączonych do ruterów. Spowodowane to jest faktem, że sieci WMN są tańsze oraz szybsze i prostsze w zastosowaniu niż ich odpowiedniki przewodowe. Jest tak np. w przypadku obszarów bez infrastruktury sieciowej, gdzie sieci WMN oparte na technice WiFi są w stanie zapewnić dostęp do Internetu całym zbiorowiskom mieszkalców pomimo tego, że tylko nieliczne węzły (bramy) mają bezpośredni dostęp do Internetu. Takie sieci są też przewidywane w zastosowaniach związanych z koncepcją *smart city*. Innym przykładem są sieci korporacyjne WMN instalowane w dużych miastach przy użyciu bezprzewodowych łącz optycznych FSO pomiędzy budynkami w linii widzenia urządzeń nadawczo-odbiorczych (*transceivers*) ustawionymi na dachach budynków. W sieciach WMN (i ogólnie w sieciach bezprzewodowych) przepływność jest w naturalny sposób zmienna i fluktuuje w zależności od warunków propagacji w kanale transmisyjnym, zależnych np. od zmieniających się warunków pogodowych, do których dostosowywane są schematy modulacji i kodowania transmisji warunkujące przepływność.

Dla zobrazowania roli komunikacji bezprzewodowej wystarczy powiedzieć, że w roku 2013 ogólna liczba abonentów telefonii komórkowej zrównała się z liczbą mieszkańców kuli ziemskiej, tj. ok. 7 miliardów ludzi (ródło: ITU World Telecommunications/ITC World Indicators Database), generujących bezprecedensowy wzrost ruchu telekomunikacyjnego do wartości 3 exabitów (tj. 3 milionów terabitów); co wiadczy o wykładniczym trendzie wzrostowym, który utrzymywał się w nadchodzących latach (ródło: Cisco VNI Mobile Forecast). Ten wzrost spowoduje znaczne zwiększenie ruchu przenoszonego również przez sieci WMN.

Uzasadnieniem badania nad LTCC jest wiedza o roli transmisji bezprzewodowej w telekomunikacji, rosnąca rola sieci WMN oraz nowatorski mechanizm proponowanej strategii, który bezpośrednio uwzględni chwilową przepływność – nieodłączne cechy sieci bezprzewodowych, jak dotychczas niewzięte pod uwagę w kierowaniu ruchem w takich sieciach. Dodatkowo, dzięki swojemu generycznemu charakterowi LTCC dostarcza rozwiązania, które jest potencjalnie implementowalne we wszystkich sieciach, w których fluktuacje pojemności są istotne oraz dostępny jest mechanizm tworzenia i utrzymywania tuneli logicznych.

Zasadniczym efektem projektu będzie opracowanie całościowej koncepcji strategii LTCC, biorąc pod uwagę zarówno teoretyczne

jak i praktyczne aspekty jej implementacji. Choć mechanizm reagowania na fluktuacje przepływności jest po raz pierwszy zawarty w TCP (podstawowym protokole regulującym przepływ strumienia ruchu pakietowego w sieciach IP), to w przypadku sieci ze zmienną przepływnością czas reakcji oraz skuteczność ruchów mechanizmu TCP jest niejasna. Badanie tej skomplikowanej kwestii nie jest jednak celem projektu – projekt skupia się na mechanizmie LTCC (jest to mechanizm regulowania przepustowości dedykowanych tuneli logicznych przenoszących zagregowane strumienie pakietów pomiędzy węzłami koniecznymi do zapotrzebowania ruchowego), który jest *de facto* komplementarny do TCP. Nieco zaskakujące jest, że (wg naszej wiedzy) opisany wyżej stosunkowo prosty mechanizm stosowany w LTCC nie przyciągał jak do tej pory uwagi społeczności badawczej. Ta obserwacja jest głównym motywacją proponowanych przez nas badań.

Podkreślamy, że chociażosięgnięcia na polu wielostanowej optymalizacji sieci związane z Problemem 1 są znaczne, dotychczasowe wyniki badań nie nadają się do naszych potrzeb z prostej przyczyny – badane stany były jak dotąd niemal wyłącznie ograniczone do całkowitych awarii (czyli do tego zwykle do awarii jednokrotnych, rzadko wielokrotnych), a więc w sposób nieadekwatny dla założonego w projekcie modelowania sieci bezprzewodowych w ich codziennym działaniu. Drugim istotnym brakiem dotychczasowych badań są nieodpowiednie strategie kierowania i protekcji ruchu będące ich przedmiotem, zakładające całkowite awarie (czyli). Według naszej wiedzy tylko strategia o nazwie *global rerouting* (GR) była badana w kontekście wielokrotnych cyfrowych awarii (czyli). W kontekście LTCC, strategia GR przewiduje, na wypadek awarii, rozłączenie wszystkich tuneli i ponowne ich odnowienie w dostępnym aktualnie przepływności (czyli). Co prawda dzięki temu GR prowadzi do najtańszych konfiguracji (czyli), jednak przez to staje się niepraktyczna ze względu na zbyt wielką liczbę tuneli, których przepustowość należy zmienić po zaistnieniu kolejnego stanu awarii sieci.

Koncepcja LTCC jest nowatorska, jako że w literaturze nie ma podobnych propozycji implementowalnych w praktyce, efektywnych strategii kierowania i protekcji ruchu, opartych na tunelach logicznych, zdolnych do reagowania na fluktuacje przepływności (czyli). Oryginalne będą również wyniki teoretyczne projektu, czyli nowe, zaawansowane modele i algorytmy optymalizacji sieci przepływów wielotowarowych.