

Usługa VoIP – czynniki wpływające na jakość transmitowanego głosu

Michał Gartkiewicz

Na podstawie prac prowadzonych w IE przedstawiono najważniejsze wymagania stawiane sieciom realizującym usługę VoIP. Wyszczególniono aspekty techniczne związane z przesyłaniem pakietów głosowych w sieci danych. Omówiono problemy dotyczące zaadaptowania protokołu IP do usługi VoIP. Opisano czynniki wpływające na jakość głosu przesyłanego w sieci danych i zaproponowano ogólny proces testowania jakości głosu w sieciach o ustalonej charakterystyce ruchu.

protokół IP, usługa głosowa w sieciach IP (VoIP), jakość usługi (QoS)

Wprowadzenie

W ostatnich latach jedną z najbardziej obiecujących technik dla rynku informatycznego, a następnie telekomunikacyjnego, jest transmisja głosu w sieci wykorzystującej protokół internetowy IP (*Internet Protocol*), zwana usługą VoIP (*Voice over IP*). Głównym założeniem takiej komunikacji jest integracja transmisji głosu i danych, wskutek czego powstaje jedna uniwersalna sieć do przenoszenia danych multimedialnych. Siecią umożliwiającą świadczenie usługi VoIP może być publiczna sieć Internet lub zarządzane sieci IP. Obecnie, ze względu na brak mechanizmów zapewnienia jakości transmisji w sieci Internet, lepszym rozwiązaniem do implementacji usługi VoIP są sieci o zamkniętej strukturze – zarządzane sieci IP. Przy budowie takich sieci wykorzystuje się przede wszystkim techniki komutacji pakietów, np. ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) lub FR (*Frame Relay*). Porównanie możliwości obu sieci zostało przedstawione w tablicy 1 [4].

Tabl. 1. Różnice między zarządzanymi sieciami IP a siecią Internet

Parametry	Internet	Zarządzane sieci IP
Dostęp	Otwarty – nieograniczony dostęp i wykorzystywanie	Zamknięty – ograniczony dostęp i wykorzystywanie
Funkcjonalność i kreowanie usług	Na brzegach sieci przez użytkowników lub niezależną trzecią stronę	Wewnątrz lub na brzegu sieci, ale tylko przez operatora
Taryfikacja	Abonament lub natężenie ruchu	Możliwość wykorzystania różnych trybów taryfikacji
Połączenie na poziomie IP	Dowolne wzajemne połączenia	Niewielkie możliwości dowolnych wzajemnych połączeń
Adresowanie	Publiczny, ogólnosiwiatowy system	Możliwe wewnętrzne, prywatne adresowanie
Jakość usług	Nie zarządzana	Zarządzana w celu zapewnienia określonego poziomu usług

Możliwość wykorzystania sieci IP do przenoszenia głosu stała się interesująca dla wielu firm i organizacji zajmujących się telekomunikacją. Początkowo prace nad usługą VoIP skupiały się głównie na obniżeniu wysokich kosztów rozmów w publicznych sieciach telefonicznych. Obecnie usługa VoIP jest również postrzegana jako alternatywa tradycyjnych sieci z komutacją łączy. Operatorzy sieci telekomunikacyjnych przenoszą stopniowo ruch głosowy z sieci telekomunikacyjnej użytku publicznego PSTN (*Public Switching Telephone Network*) do sieci IP, głównie ze względu na możliwość korzystania z pojedynczej infrastruktury sieci, łatwą integrację usług głosowych z systemami informatycznymi, a także łatwe skalowanie sieci.

Ocenia się, że obsługa ruchu głosowego w sieci IP jest tańsza niż w sieci z komutacją łączy, ponieważ zastosowanie odpowiednich algorytmów kodowania głosu umożliwia lepsze wykorzystanie dostępnego pasma, bez znaczącej utraty jakości transmitowanego głosu. W sieci IP cyfrowa postać głosu podlega znaczącej kompresji i jest przenoszona w pakietach przez sieci IP. Wykorzystując to samo pasmo, sieć ta może obsłużyć dużo więcej połączeń głosowych niż sieć z komutacją łączy. Dzięki oszczędnościom, uzyskanym z wykorzystania sieci IP, ceny połączeń mogą być tańsze.

Jakość głosu

Realizowana z zastosowaniem protokołu IP usługa VoIP umożliwia przesyłanie głosu w postaci pakietów w sieci z komutacją pakietów. W porównaniu z dotychczasową techniką przenoszenia sygnału, postać cyfrowa sygnału zawarta w pakietach pozwala na nieporównywalnie łatwiejsze sposoby rejestracji i przetwarzania, skuteczniejszą kompresję oraz łatwiejsze transportowanie. Szczególnie ważną właściwością cyfrowej reprezentacji sygnału jest możliwość regeneracji treści użytkowej sygnału mowy bez wzmacniania szumów kanału z jego otoczenia, wraz z możliwością kompensacji echa. Cały etap przetwarzania analogowego sygnału akustycznego składa się z cyfryzacji, kompresji i formowania do postaci pakietów IP, które następnie są transmitowane przez sieci IP.

Usługa przesyłania głosu w postaci pakietów w sieci IP wymaga zmiany wcześniej przyjętych założeń dotyczących protokołu IP. Został on bowiem zaprojektowany do przenoszenia danych, zapewnia więc tylko usługę *best effort* (o najwyższej możliwej jakości), nie gwarantując poprawności realizacji usług w czasie rzeczywistym. W przypadku transmisji danych brak mechanizmów zapewnienia jakości transmisji w globalnej sieci IP ma stosunkowo niewielkie znaczenie. Istnieje możliwość uszeregowania pakietów danych odebranych w niewłaściwej kolejności, a uszkodzone lub utracone fragmenty informacji mogą zostać powtórnie przesłane. Użytkownik nawet może nie zauważyć ewentualnego opóźnienia przychodzących pakietów.

Zupełnie inaczej wygląda sytuacja w przypadku transmisji głosu, dla której jakość usługi ma zasadnicze znaczenie. Nie ma tu możliwości, aby uszkodzone lub utracone pakiety głosowe były retransmitowane w akceptowalnym czasie. Aby usługa VoIP była przyjęta przez użytkowników, występujące opóźnienia pakietów nie mogą być zbyt duże. Nadmierne stosowanie mechanizmu buforowania pakietów w punkcie docelowym, w celu przywrócenia właściwej ich kolejności, będzie powodowało, że pakiety głosowe staną się bezużyteczne.

Dla skutecznego wdrożenia usługi VoIP w istniejących sieciach danych najistotniejsze jest zapewnienie właściwej jakości głosu. Znane są różne mechanizmy, które umożliwiają uzyskanie poziomu niezawodności i jakości mowy porównywalnej z wynikami otrzymywanymi w sieci telekomunikacyjnej użytku publicznego PSTN/ISDN z komutacją łączy.

Czynniki wpływające na jakość przesyłanego głosu

Transmitowany w sieci danych pakiet głosowy podlega wielu niekorzystnym zjawiskom, które mogą wpływać na jakość głosu postrzeganą przez użytkownika końcowego.

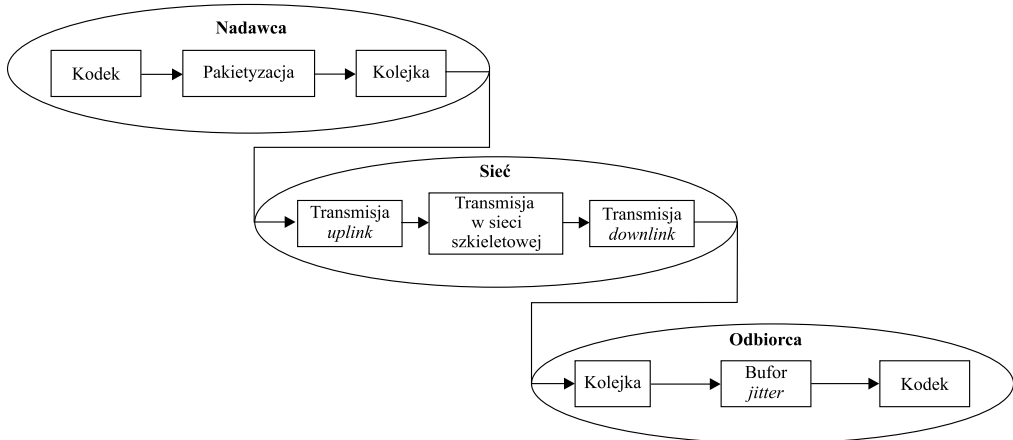
Warto zatem przedstawić zagadnienia teoretyczne dotyczące różnych czynników, wpływających na jakość głosu przenoszonego w sieci danych, a mianowicie: opóźnienie, wariację opóźnienia (*jitter*) oraz utratę pakietów.

Opóźnienie

Komunikacja telefoniczna jest bardzo wrażliwa na występujące opóźnienia w łańcuchu połączeniowym. Dla użytkowników odczuwalne staje się opóźnienie łączne w obie strony RTD (*Round Trip Delay*) przekraczające 250 ms. Zgodnie z zaleceniem ITU-T G.114 [3], wartość opóźnienia w jednym kierunku (*one-way delay*) powinna wynosić nie więcej niż 150 ms, co umożliwia zachowanie pożądanej jakości głosu. Przekroczenie tej wartości utrudnia podtrzymywanie rozmowy, a przy wartości opóźnienia RTD ok. 500 ms komunikacja telefoniczna staje się już praktycznie niemożliwa. Dla porównania warto dodać, że opóźnienie w granicach $150 \div 500$ ms występuje w komunikacji wykorzystującej łącza satelitarne.

Zupełnie inaczej jest w przypadku transmisji danych, dla których opóźnienie nie ma już tak istotnego wpływu. Dodatkowe opóźnienie ok. 200 ms podczas przesyłania informacji w formie poczty elektronicznej lub przeglądania stron w sieci Internet nie jest dostrzegalne przez użytkownika końcowego.

Rozważając zagadnienie opóźnienia podczas przesyłania głosu, trzeba wziąć pod uwagę opóźnienie wnoszone przez różne elementy w sieci (rys. 1).



Rys. 1. Elementy składające się na opóźnienie podczas transmisji głosu w sieciach IP

Spośród wszystkich elementów, które składają się na ogólną wartość opóźnienia, należy wyróżnić te związane ze stałym oraz zmiennym opóźnieniem. Przykładowo, podczas transmisji w sieci szkieletowej następuje ustalone opóźnienie, które wynika z odległości między punktami końcowymi

(czas propagacji). Natomiast zmienne opóźnienie zależy od warunków panujących w sieci i ich zmian w czasie.

Na ogólne opóźnienie dla jednego kierunku transmisji wpływają niżej wymienione czynniki.

- **Czas propagacji**, czyli czas wymagany do przesłania sygnału między dwoma punktami końcowymi sieci danych, który wynika z fizycznej długości drogi transmisyjnej.
- **Opóźnienie transportu**, tzn. opóźnienie, które powodują poszczególne urządzenia znajdujące się w sieci (np. rutery, ściany ogniowe), czyli opóźnienie w sieci szkieletowej. Wraz ze zwiększaniem się napływającego ruchu i pojawiającym się natłokiem w sieci, wartość opóźnienia transportu rośnie. W ogólności, aby ją zminimalizować, dąży się do zmniejszenia liczby urządzeń sieciowych, przez które przechodzą pakiety na trasie między punktami końcowymi. Niektórzy usługodawcy sieciowi umożliwiają ustalanie ograniczenia opóźnienia od końca do końca w zarządzanych przez siebie sieciach szkieletowych. Alternatywnie, istnieje też możliwość negocjowania lub przyznania dla transmisji głosu priorytetu wyższego niż dla transmisji danych.
- **Opóźnienie pakietyzacji**, czyli czas, który wynika z przetwarzania sygnałów analogowych na pakiety cyfrowe i odwrotnie (opóźnienie wnoszone przez kodeki). Opóźnienie pakietyzacji jest związane z wykorzystywanym przez kodeki algorytmem kompresji. Na przykład, kodek G.723 dodaje stałe opóźnienie o wartości 30 ms. Jeśli dodatkowo zostanie dołożone opóźnienie wynikające z przejścia danych przez bramę medialną, to całkowite opóźnienie wnoszone przez jeden kodek wyniesie $32 \div 35$ ms. Przy wyborze kodeka należy pamiętać, że zmniejszenie opóźnienia może wpłynąć niekorzystnie na jakość głosu lub spowodować zwiększenie zapotrzebowania na szerokość pasma.
- **Opóźnienie, wynikające z zastosowania bufora jitter**, który ma niwelować wariację opóźnień między poszczególnymi pakietami, a także odtwarzać właściwą kolejność pakietów po stronie odbiorczej.

W tablicy 2 przedstawiono typowe wartości składowych opóźnień, a w tablicy 3 zamieszczono zestawienie wartości opóźnień dla kodeków stosowanych w sieci VoIP.

Tabl. 2. Typowe wartości elementów składowych opóźnienia w sieciach rozległych

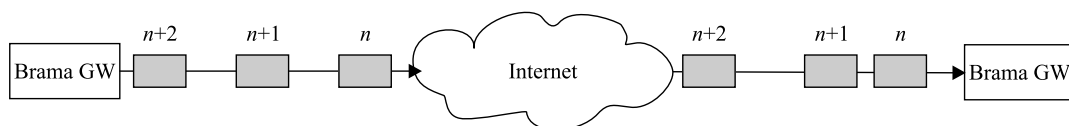
Czynnik	Stałe opóźnienie [ms]	Zmienne opóźnienie
Kodek (G.729)	25	
Pakietyzacja	Wyżej uwzględnione	
Kolejkowanie		Zależy od łącza <i>uplink</i> (kilka ms)
Sieć	50	Zależy od przeciążenia w sieci
Wariacja opóźnienia	50	
Suma	125	

Tabl. 3. Zestawienie jednokierunkowych opóźnień dla różnych kodeków

Kodek	Nominalna szybkość danych [kbit/s]	Opóźnienie pakietyzacji [ms]
G.711	64,0	1,0
G.729	8,0	25,0
G.723.1m	6,3	67,5
G.723.1a	5,3	67,5

Wariacja opóźnienia

Wcześniej opisane opóźnienie wpływa na długość czasu transmitowania w sieci pakietu głosowego. Regularność, z jaką przychodzą pakiety głosowe jest natomiast kontrolowana przez obserwację wariacji opóźnień. Zakłada się, że typowe źródła głosu generują pakiety ze stałą szybkością. Jednak ze względu na wnoszone przez sieć opóźnienie, które może być różne dla różnych pakietów, pakiety nadawane w równych odstępach czasowych przez stronę nadawczą mogą przybywać do strony odbiorczej w sposób nieregularny. Sytuację tę zobrazowano na rys. 2.



Rys. 2. Zjawisko nieregularnego przybycia pakietów do strony odbiorczej (wariacja opóźnienia)

Ze względu na algorytm dekompresji, który wymaga stałych odstępów czasowych między pakietami, problem ten na ogół jest rozwiązywany przez zaimplementowanie po stronie odbiorczej bufora *jitter*. Bufor ten opóźnia przychodzące pakiety w celu przekazania ich do części zajmującej się dekompresją w stałych odstępach czasowych. Stosowanie bufora *jitter* umożliwia również detekcję ewentualnych błędów przez kontrolę kolejności pakietów w protokole RTP (*Real Time Protocol*).

Wartość wariacji opóźnienia oblicza się na podstawie odstępów czasowych między kolejnymi odebranymi pakietami (*inter-arrival time*). Najczęściej w tym celu podaje się dwie wartości: przeciętny czas *inter-arrival* oraz standardowe odchylenie. W najlepszym przypadku średni czas *inter-arrival* będzie bardzo zbliżony do odstępów czasowych między emitowanymi pakietami po stronie nadawczej, a standardowe odchylenie będzie niskie.

Przy określaniu wariacji opóźnienia dla strumieni audio jest ważne, aby wziąć pod uwagę trzy zjawiska:

- eliminację okresów ciszy (*silence suppression*),
- utratę pakietu (*packet loss*),
- błędy sekwencji (*out of sequence errors*).

Mechanizm eliminacji ciszy jest wykorzystywany przez kodeki w celu zredukowania liczby wysyłanych pakietów. W ten sposób można zaoszczędzić nawet do 50% dostępnego pasma. Po zaistniałym okresie ciszy w następnym pakiecie RTP ustawia się odpowiedni bit (*silence suppression bit*), którego wartość jest uwzględniana podczas określania wartości wariacji opóźnienia.

W przypadku utraty pakietu czas *inter-arrival* między dwoma kolejnymi pakietami będzie duży, nawet jeśli w sieci nie wystąpiła wariacja opóźnienia. Przy jej obliczaniu, w celu uzyskania poprawnych wyników, należy zatem wziąć pod uwagę wymienione zjawiska, kontrolując kolejność pakietów i uwzględniając ewentualną utratę pakietów.

Aby skompensować wahania warunków w sieci, wielu operatorów implementuje bufor *jitter* w bramach GW (*Gateway*), obsługujących przesyłanie głosu. Umożliwia on oczekiwanie w pewnym

przedziale czasu na spóźnione lub brakujące pakiety głosowe, aby potem, po skompletowaniu odpowiedniej liczby pakietów, dokonać ich dekompresji. Mechanizm ten służy do utrzymania odpowiedniej jakości konwersji głosu i umożliwia sterowanie jakością. Zwiększa się dzięki temu odporność kodeka na utratę pakietu lub opóźnienie pakietów oraz na inne czynniki związane z transmisją. Niestety jest i wada takiego rozwiązania, a mianowicie bufor *jitter* może wprowadzać znaczne opóźnienie. Rozmiar bufora można konfigurować i powinien on być optymalizowany dla podanych warunków sieciowych. Zazwyczaj jego wartość jest ustawiona jako wielokrotność oczekiwanego czasu między odebraniem kolejnych pakietów (*inter-arrival time*), aby zmagazynować całkowitą liczbę pakietów.

Utrata pakietów

Zakłócenia transmitowanego sygnału, pochodzące od urządzeń znajdujących się w sieci, pojawiają się z wielu powodów. Przykładowo, zakłócenia te mogą wynikać z zastosowania kodeków lub z utraty datagramów RTP.

Z uwagi na kompresję sygnału na jakość sygnałów akustycznych dużo większy wpływ mają kodeki o niskiej przepływności niż kodeki o wysokiej przepływności. W tabelicy 4 przedstawiono zależność między stosowanym kodekiem i parametrem *R-Degradation*. Parametr ten wskazuje utratę wartości parametru *R*, który określa jakość przesyłanego głosu dla modelu E (E-Model wg zalecenia ITU-T G.107^①).

Tabl. 4. Wpływ kodeków na jakość sygnałów akustycznych

Kodek	Nominalna szybkość danych [kbit/s]	Wartość parametru <i>R-Degradation</i>
G.711	64,0	0
G.729	8,3	11
G.723.1m	6,3	15
G.723.1a	5,3	19

Utrata pakietu jest zjawiskiem powszechnie występującym w sieciach pakietowych, przyczyny mogą być różne; np. przeciążone łącza, nadmierna liczba kolizji w sieci lokalnej, czy też błędy medium fizycznego. Zbyt duże zmiany opóźnienia również powodują odrzucanie pakietów, ponieważ przychodzą one na wejście bufora *jitter* w niewłaściwej kolejności. Wszystkie te negatywne czynniki mają bezpośredni wpływ na jakość sygnału użytkowego, nie jest bowiem możliwe retransmitowanie utraconych pakietów (mimo iż każdy datagram RTP, przekazywany za pomocą protokołu czasu rzeczywistego, zawiera numer sekwencji).

Należy liczyć się z dwoma rodzajami utraty datagramów RTP. Jednym z nich jest przypadkowa utrata jednego lub kilku datagramów, np. w sytuacji wystąpienia natłoku w sieci. W tym przypadku spadek jakości transmisji jest praktycznie niezauważalny dla użytkownika. Drugi rodzaj utraty datagramów dotyczy sytuacji, w której jest tracona cała grupa kolejnych datagramów. W tym przypadku jakość sygnału użytkowego może pogorszyć się w sposób znaczący, zwłaszcza gdy jest stosowany algorytm kodowania głosu o wysokim stopniu kompresji.

^① ITU-T Rec. G.107 (03-2003): *The E-Model, a computational model for use in transmission planning.*

W kodekach audio jest uwzględniana możliwość utraty pakietu, zwłaszcza że datagramy RTP są transmitowane z wykorzystaniem protokołu UDP (*User Datagram Protocol*), pozbawionego mechanizmów niezawodnościowych. Typowy kodek wykonuje jedną z kilku funkcji, które sprawiają, że przypadkowa utrata pakietu będzie niedostrzegalna dla użytkownika. Przykładowo, kodek może wykorzystać wcześniejszy pakiet, odebrany bezpośrednio przed utratą pakietu. Aby wyeliminować zakłócenia w strumieniu audio, można dodatkowo zastosować bardziej wyszukane metody w kodeku po stronie odbiorczej.

Utrata pakietu zaczyna być poważnym problemem, jeśli procent straconych pakietów przewyższa pewien próg lub kiedy jest tracona jednocześnie i w sposób przypadkowy duża liczba pakietów. W tych sytuacjach nawet najlepszy kodek nie będzie w stanie ukryć przed użytkownikiem powstałej straty, bowiem znacznie pogorszy się wtedy jakość głosu. Dlatego jest istotne, aby znać procent pakietów utraconych, a także wiedzieć, czy były one pogrupowane w serie pakietów.

Polepszenie jakości głosu można uzyskać przez:

- redukcję ogólnego opóźnienia dla każdego kierunku transmisji,
- redukcję zmian w opóźnieniu,
- redukcję przyczyn utraty pakietów (w szczególności grupy pakietów).

Rekapitułując, opóźnienie wynikające z pakietyzacji i z zastosowania bufora *jitter* jest określone podczas instalacji sprzętu VoIP. Na tym etapie ważną decyzją jest wybór odpowiedniego kodeka i rozmiaru bufora *jitter*. Pozostałe składniki opóźnienia mogą być natomiast regulowane w trakcie eksploatacji sieci. Przykładowo, opóźnienie transportu jest składnikiem podlegającym największym zmianom i może być przedmiotem regulacji w czasie eksploatacji. W tym przypadku należy określić opóźnienie występujące na każdym odcinku sieci w warunkach małego obciążenia, jak również w warunkach dużego obciążenia i ewentualnie przedsięwziąć kroki zapobiegawcze, w celu zmniejszenia opóźnienia w sytuacji natłoku.

Testowanie jakości połączeń VoIP

Jednym z ważnych czynników, wpływających na jakość połączeń jest całkowite przeciążenie występujące w sieci. Gdy jego wartość jest wysoka, wzrasta jednocześnie wartość wariacji opóźnienia oraz prawdopodobieństwo utraty pakietu. Przykładowo, w tradycyjnej sieci Ethernet większe obciążenie powodowało większą liczbę kolizji. Nawet jeśli pakiety, które uległy kolizjom, zostały ostatecznie wysłane, to – ze względu na wcześniej nieudane próby – wzrastała wartość wariacji opóźnienia. Po przekroczeniu pewnego poziomu kolizji w istotny sposób wzrastała liczba traconych pakietów.

W przypadku dobrze zaprojektowanej sieci, czyli z uwzględnieniem przeciążenia w sieci, nie jest wymagana bieżąca ingerencja operatora. Jednak nawet w zatłoczonych sieciach, niekiedy jest możliwe wykorzystywanie schematu ustalania priorytetów na podstawie numerów portów lub wartości pola *Precedence* (w bajcie ToS – *Type of Service*) w nagłówku protokołu IP. Metody te umożliwiają zapewnienie wyższego priorytetu dla przesyłanego głosu niż pakietów z danymi. Dzięki temu nie dochodzi do znaczącego pogorszenia jakości przesyłanych danych, natomiast zdecydowanie wzrasta jakość przesyłanego głosu. Jeszcze innym sposobem jest zastosowanie protokołów rezerwujących pasmo, np. protokołu RSVP (*Resource Reservation Protocol*).

Znanych jest wiele różnych technicznych rozwiązań pomiarów przeciążenia w sieci i liczby występujących kolizji. W sieciach o ustalonej charakterystyce ruchu (np. firmowej sieci rozległej) proces testowania jakości głosu można podzielić na następujące etapy:

- 1) generowanie jednego połączenia – określenie jakości głosu dla jednego połączenia dla obu kierunków transmisji;
- 2) generowanie wielu połączeń – określenie jakości głosu dla każdego połączenia;
- 3) generowanie wielu połączeń w warunkach dużego obciążenia sieci – określenie jakości głosu dla każdego połączenia w warunkach dużego ruchu.

W pierwszym etapie testowania można uzyskać odpowiedź na pytanie, jak sieć obsługuje jedno połączenie VoIP. Jeśli ocena wskazuje, że jakość usługi jest niska, należy proces testowania zatrzymać i podjąć działania naprawcze, np. wymienić urządzenia. Natomiast jeśli ocena jest pozytywna, należy przejść do etapu sprawdzenia reakcji sieci na wiele jednoczesnych połączeń.

Opisany proces powinien być kontynuowany aż do uzyskania oceny wskazującej na akceptowalną jakość głosu i możliwość instalacji sprzętu VoIP.

Podsumowanie

W dobie społeczeństwa informacyjnego usługa VoIP sprzyja podstawowym jego założeniom, związanym z powstawaniem wielousługowych platform wykorzystujących konwergentne sieci szkieletowe z protokołem IP. Integracja transmisji głosu i danych umożliwia zbudowanie jednej uniwersalnej sieci do przenoszenia różnego rodzaju ruchu. Dąży się do tego, aby usługa VoIP łączyła w sobie elastyczność i efektywność sieci transmisji danych z funkcjonalnością oraz niezawodnością sieci telefonicznych.

Przenoszenie informacji głosowych w pakietach danych wiąże się niestety z występowaniem wielu niekorzystnych zjawisk, które mogą wpływać na jakość głosu postrzeganą przez użytkownika końcowego. Dlatego obecnie najważniejsze jest stworzenie niezawodnych mechanizmów zapewnienia jakości transmisji w sieci IP przez:

- zmniejszenie opóźnień, jakie obecnie występują przy transmisji danych;
- zmniejszenie wartości wariacji opóźnień;
- eliminację utraty lub zakłóceń pakietów głosowych.

Bibliografia

- [1] Agam O.: *Voice over IP testing – a practical guide*. RADCOM, 2001
- [2] Boger Y.: *Fine-tuning voice over packet services*. VP Business Development, RADCOM, 2000
- [3] ITU-T Rec. G.114 (05-2003): *One-way transmission time*
- [4] *Opracowanie koncepcji sieci telekomunikacyjnej nowej generacji opartej na technologii IP, do realizacji usług głosowych (VoIP) w krajowej sieci użytku publicznego*. Warszawa, Instytut Łączności, 2002
- [5] Percy A.: *Understanding latency in IP telephony*. Tech. Rep., Brooktrout Technology, 1998

- [6] Stephenson A.: *QoS: the IP solution; delivering end-to-end quality of service for the future of IP*. Lucent Technologies, WAN Systems Group, 1999
- [7] Walker J.: *A handbook for successful VoIP deployment: network service testing QoS and more*. NetIQ Corporation, 2000
- [8] Walker J., Hichs J.: *Evaluating data networks voice over IP*. NetIQ Corporation, 2001

Michał Gartkiewicz



Mgr inż. Michał Gartkiewicz (1977) – absolwent Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej (2003); pracownik Instytutu Łączności w Warszawie (od 2002); zainteresowania naukowe: technologia VoIP, sieci bezprzewodowe, systemy SDH.
e-mail: M.Gartkiewicz@itl.waw.pl