

Implementacja punktu dostępu do sieci standardu IEEE 802.11 ze wsparciem jakości świadczonych usług

Marek Natkaniec, Mariusz Witosz, Katarzyna Kosek-Szott, Szymon Szott, Andrzej R. Pach, Andrzej Staniszewski

(e-mail: {natkaniec, kosek, szott, pach, staniszewski}@kt.agh.edu.pl; mwitosz@gmail.com)

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Katedra Telekomunikacji

STRESZCZENIE

W artykule zaprezentowano sposób implementacji mechanizmów zapewniania jakości świadczonych usług w projektowanym punkcie dostępu do sieci bezprzewodowej standardu IEEE 802.11. Zaprezentowano trzy sposoby zapewnienia QoS: dla warstwy łącza danych (przy użyciu funkcji EDCA standardu IEEE 802.11), dla warstwy sieciowej (przy użyciu dyscyplin kolejkowych) oraz schemat łączony. Użycie tych mechanizmów w punkcie dostępu do sieci bezprzewodowej umożliwi zarówno poprawę jak i kontrolę jakości świadczenia usług w sieciach standardu IEEE 802.11.

Słowa kluczowe: sieci WLAN, punkt dostępu, jakość obsługi, funkcja EDCA, mechanizmy kolejkowania

ABSTRACT

Implementation of Access Point of IEEE 802.11 Standard with QoS Support

The paper is related to the implementation of mechanisms for providing QoS in access point based on IEEE 802.11 standard. Three different methods for providing QoS are showed: for the data link layer (using IEEE 802.11 function), for the network layer (using queuing disciplines), and for the both mentioned layers (using hybrid solution). These mechanisms allow for improving and proper control of services provisioning in IEEE 802.11 wireless local area networks.

Key words: WLAN networks, access point, quality of service, EDCA function, queuing disciplines

1. Wstęp

Lokalne sieci bezprzewodowe pozwalają na tworzenie infrastruktury sieciowej bez stosowania sieci stałych. Jednakże całkowita przepustowość sieci bezprzewodowej standardu IEEE 802.11 [1] jest bardzo ograniczona w porównaniu z sieciami standardu IEEE 802.3 [2]. Dodatkowo zawodność transmisji bezprzewodowej powoduje degradację osiąganych parametrów transmisji. Wymagania użytkowników sieci rosną natomiast w miarę rozwoju Internetu, ponieważ jest on coraz częściej wykorzystywany do komunikacji głosowej i wideo.

W przypadku zastosowania sieci standardu IEEE 802.11 w charakterze punktów dostępu (*Access Point*, AP) do Internetu w miejscu publicznym, konieczne staje się stosowanie zabezpieczeń sieci i mechanizmów kontroli jakości usług (*Quality of Service*, QoS). Jedynie w ten sposób można zapewnić wszystkim użytkownikom możliwość poprawnego korzystania z sieci. W artykule przedstawiono sposób realizacji systemu QoS dla AP standardu IEEE 802.11. AP zbudowany został w oparciu o układ scalony wyprodukowany przez firmę Atheros. Wspiera on funkcję dostępu do medium EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*) standardu IEEE 802.11 oraz działa w systemie operacyjnym Linux. Zastosowane mechanizmy pozwalają na kontrolę parametrów QoS w warstwie łącza danych oraz war-

stwie sieciowej modelu OSI/ISO. Możliwe jest wykorzystanie jednego z trzech dostępnych schematów pracy AP:

- wykorzystanie funkcji EDCA – zapewnienie QoS w warstwie łącza danych,
- wykorzystanie dyscyplin kolejkowych – zapewnienie QoS w warstwie sieciowej,
- wykorzystanie obu mechanizmów.

AP ma interfejs graficzny umożliwiający użytkownikowi prostą konfigurację parametrów bez wnikania w szczegóły implementacyjne i mechanizmy systemu operacyjnego. Zestaw oferowanych opcji jest na tyle ograniczony i przejrzysty, aby możliwa była sprawna konfiguracja prostej sieci bezprzewodowej, nawet przez niedoświadczonego użytkownika. Mechanizmy zapewnienia QoS są pogrupowane względem warstwy modelu OSI/ISO.

Artykuł posiada następującą strukturę: Rozdział 2 opisuje zastosowane dyscypliny kolejkowe oraz funkcję dostępu do medium EDCA standardu IEEE 802.11. W rozdziale 3 i 4 przedstawiono sposób zapewnienia QoS w warstwie łącza danych, odpowiednio w kierunku do i od abonenta. Sposób zapewnienia QoS w warstwie sieciowej został opisany w rozdziale 5. Schemat mieszany przedstawiono w rozdziale 6. Praca została podsumowana w rozdziale 7.

2. Dyscypliny kolejkowe i EDCA

Bardzo popularną metodą zapewnienia QoS jest użycie dyscyplin kolejkowych. Dyscypliny kolejkowe są algorytmami decydującymi o kolejności transmisji pakietów. W przypadku klasowych dyscyplin kolejkowych wszystkie pakiety, skierowane przez jądro systemu operacyjnego do wysłania, szeregowane są do odpowiednich klas ruchu sieciowego. Dyscyplina kolejkowa przetwarza kolejno wszystkie klasy ruchu transmitując pakiety należące do tej klasy. To, ile pakietów zostanie wysłane, zależy od parametrów przypisanych klasie – pozostałe oczekują na transmisję w następnych cyklach działania algorytmu.

Dyscypliny kolejkowe korzystają z klasyfikatorów (reguł klasyfikacji pakietów) w celu przyporządkowania ruchu sieciowego do odpowiednich klas. Klasyfikatory oferują wiele różnych metod klasyfikacji, jednak najczęściej wykorzystywane są reguły działające na podstawie adresu docelowego MAC. Mechanizm dyscyplin kolejkowych jest silnie rozwiniętym narzędziem, szeroko rozpowszechnionym i wykorzystywanym, ma jednak wadę. Nie jest możliwe sterowanie ruchem sieciowym w węzłach końcowych sieci. Dyscypliny kolejkowe AP sterują ruchem do abonenta. Wzrost wymagań względem parametrów transmisji ruchu sieciowego od abonenta, spowodowany rozwojem technologii multimedialnych, pociąga za sobą konieczność stosowania mechanizmów kontroli ruchu sieciowego w węzle sieci. Możliwa jest także częściowa kontrola tego ruchu w AP, jednak wydajność takiego rozwiązania jest znacznie niższa niż w przypadku kontroli u abonenta.

Funkcja EDCA standardu IEEE 802.11 jest częściowym rozwiązaniem problemu sterowania ruchem sieciowym od abonenta. Standard nie pozwala co prawda sterować ruchem sieciowym w sposób tak dokładny jak dyscypliny kolejkowe, jednak w odróżnieniu od dyscyplin kolejkowych jest mechanizmem rozproszonym, działającym w AP i węzłach klienckich.

Dużą niedogodnością w stosowaniu funkcji EDCA jest brak możliwości sterowania transmisją każdego klienta sieci z osobna, ponieważ wartości parametrów przypisywane klientom są wspólne. Ogranicza to możliwości różnicowania ruchu sieciowego. Dodatkowo, funkcja EDCA obejmuje tylko warstwę dostępu do medium MAC (*Medium Access Control*), nie definiuje więc parametrów transmisji, tj. minimalnej i maksymalnej przepustowości oraz opóźnienia transmisji.

Pakiety przekazywane do buforów urządzenia wspierającego EDCA trafiają przed wysłaniem do jednej z kilku kolejek. Funkcja EDCA definiuje 4 kolejki transmisyjne o zróżnicowanych priorytetach. Priorytety kolejek różnią się między sobą. Ramki zaklasyfikowane do kolejki o wyższym priorytecie będą miały pierwszeństwo nad ramkami zaklasyfikowanym do kolejki o niższym priory-

tecie. Reguły klasyfikacji nie są objęte standardem IEEE 802.11. Nazwy kolejek stanowią propozycję, jakie ramki powinny być do nich klasyfikowane:

- AC_VO (*Voice*) – dane głosowe, wymagające minimalnych opóźnień, kolejka o najwyższym priorytecie.
- AC_VI (*Video*) – dane wymagające dużej przepustowości i małych opóźnień.
- AC_BE (*Best Effort*) – dane przesyłane bez gwarancji QoS.
- AC_BK (*Background*) – dane o najniższym priorytecie.

W ramach EDCA standard IEEE 802.11 definiuje dwa uzupełniające się mechanizmy uzyskiwania dostępu do medium:

- Globalny wewnątrz całej sieci – zapewnia, że ramki transmitowane z kolejki o wyższym priorytecie i/lub lepszych parametrach jednego z węzłów sieci będą transmitowane przed ramkami wychodzącymi z kolejki o niższym priorytecie i/lub gorszych parametrach innego węzła sieci.
- Lokalny wewnątrz interfejsu sieciowego – zapewnia, że ramki transmitowane z kolejki o wyższym priorytecie będą transmitowane przed ramkami wychodzącymi z kolejki o niższym priorytecie. Transmisje pakietów według priorytetu kolejki EDCA zapewnione są przez algorytm rozstrzygania wewnętrznych kolizji. Zadaniem tego algorytmu jest pobieranie w pierwszej kolejności do transmisji ramek o najwyższym priorytecie.

Parametry kolejek EDCA przesyłane są przez AP w ramach typu *Beacon*, *Probe Response* i *Association Response*. W przypadku nieotrzymania zestawu parametrów EDCA, węzeł sieci powinien przyjąć wartości podane przez standard. Natomiast po otrzymaniu uaktualnionych wartości konfiguracyjnych każdy węzeł sieci powinien zmodyfikować parametry swoich kolejek. Aby uzyskać możliwość sterowania parametrami kolejek każdego węzła sieci z osobna, należy zrezygnować z rozsyłania ramek *Beacon* lub zrezygnować z umieszczania parametrów kolejek EDCA w ramach *Beacon*. Konieczne jest zmodyfikowanie mechanizmów funkcji EDCA w taki sposób, aby możliwe było przydzielenie różnym węzłom sieci odmiennych parametrów EDCA (czyli CWmin, CWmax, TXOP oraz AIFS). Pozwoli to zróżnicować QoS dla różnych klientów sieci.

Ruch sieciowy wychodzący z AP powinien być klasyfikowany do różnych kolejek funkcji EDCA, na podstawie wartości pola TOS (*Type of Service*) oraz adresu docelowego MAC. W przypadku ruchu do abonenta, standardowe parametry kolejek AP są wspólne, jednak zdefiniowanie reguł klasyfikacji pozwoli zróżnicować ruch wychodzący z AP do różnych węzłów sieci.

3. QoS w warstwie łącza danych w kierunku do abonenta

Sterownik MadWifi [3] implementuje mechanizm klasyfikacji pakietów do kolejek transmisyjnych EDCA na podstawie wartości pola TOS. Odwzorowanie to jest zapisane na stałe w kodzie sterownika. Podczas tej klasyfikacji nie uwzględnia się adresu docelowego MAC. Mechanizm klasyfikacji został przesunięty do *ebtables* [4]. Zadaniem *ebtables* jest etykietowanie pakietu, poprzez ustawienie wartości pola MARK do zdefiniowanego wzorca (na podstawie adresu MAC i wartości pola TOS):

- 0x01: dla pakietów kierowanych do kolejki AC_VO,
- 0x02: dla pakietów kierowanych do kolejki AC_VI,
- 0x04: dla pakietów kierowanych do kolejki AC_BK,
- 0x08: dla pakietów kierowanych do kolejki AC_BE.

W sterowniku MadWifi zaimplementowane zostało odwzorowanie, które na podstawie wartości pola MARK kieruje pakiety do odpowiedniej kolejki transmisyjnej EDCA. Rysunek 1 przedstawia mechanizm przetwarzania pakietu przez reguły *ebtables*. Dokładniejszy opis narzędzia *ebtables* znajduje się w rozdziale 5.

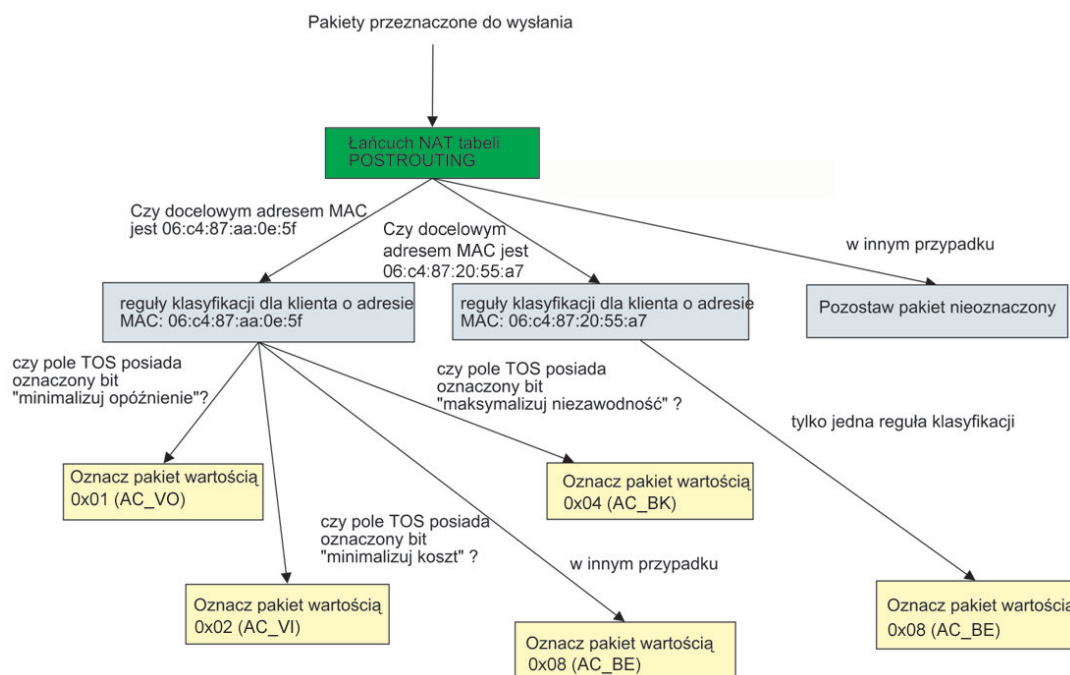
Pakiety do wysłania przetwarzane są w łańcuchu POSTROUTING tabeli NAT (*Network Address Translation*). Stosowane są dwa stopnie klasyfikacji. Pierwszy stopień klasyfikacji dokonywany jest na podstawie adresu docelowego MAC. Pakiety niezaklasyfikowane przekazywane są dalej do transmisji bez zmiany pola MARK. Drugi stopień klasyfikacji to klasyfikacja na pod-

stawie wartości pola TOS nagłówka IP. Jeżeli pakiet nie zostanie zaklasyfikowany za pomocą żadnej reguły, uruchamiana jest reguła domyślna zdefiniowana osobno dla każdego adresu docelowego MAC, która powoduje przypisanie pakietu do kolejki AC_BE.

Obie reguły klasyfikacji ustalane są przez użytkownika systemu z poziomu interfejsu graficznego użytkownika. W przypadku braku definicji reguł wykorzystane zostaną domyślne reguły klasyfikacji. Na rysunku 1 zdefiniowano reguły TOS dla pierwszego adresu docelowego MAC: „minimalizuj opóźnienie” (*Minimize Delay*), „maksymalizuj niezawodność” (*Maximize Reliability*), „minimalizuj koszt” (*Minimize Monetary-Cost*). Dla drugiego adresu docelowego MAC obecna jest jedynie domyślna reguła klasyfikacji. Mechanizm kierowania pakietów do odpowiednich kolejek transmisyjnych w sterowniku MadWifi został zmodyfikowany w taki sposób, aby na podstawie wartości pola MARK pakiety były umieszczane w odpowiednich kolejkach transmisyjnych EDCA. Schemat pozwala na kierowanie pakietów tego samego typu (tj., generowanych przez te same aplikacje ale do różnych klientów) do różnych kolejek transmisyjnych EDCA. Umożliwia to uzyskanie różnych parametrów transmisji.

4. QoS w warstwie łącza danych w kierunku od abonenta

Sterownik MadWifi umożliwia ustawienie parametrów kolejek transmisyjnych funkcji EDCA osobno dla AP



Rys. 1. Proces etykietowania pakietów na podstawie zawartości pola TOS oraz adresu docelowego MAC

i klientów. Jednakże parametry te muszą być wspólne dla wszystkich klientów. Funkcjonalność ta została rozszerzona w taki sposób, aby możliwe było ustawienie parametrów kolejek transmisyjnych dla każdego klienta z osobna. Ramki *Probe Response* i *Association Response* wysyłane są na adres konkretnego urządzenia jako odpowiedź na ramki *Probe Request* i *Association Request*. Aby umożliwić ustawienie osobnych parametrów kolejek dla różnych klientów, należy uniemożliwić AP rozsyłanie wartości domyślnych w ramach *Beacon*, a ramki *Probe Response* i *Association Response* wypełniać regułami charakterystycznymi dla danego klienta. Wyłączenie periodycznego rozsyłania ramek *Beacon* wydaje się być potencjalnym rozwiązaniem, ponieważ ramki *Beacon* postrzegane są jako zagrożenie bezpieczeństwa sieci, marnowanie przepustowości oraz zasobów urządzeń. Konstrukcja sterownika MadWifi sprawia, że nie można zastosować tego rozwiązania, ponieważ poprawne działanie sterownika jest uzależnione od periodycznego wysyłania ramek *Beacon*.

Rozwiązaniem alternatywnym jest zezwolenie na transmisję ramek *Beacon*, z wyłączeniem przesyłania parametrów kolejek EDCA wewnątrz tych ramek. Wadą tego rozwiązania jest uzależnienie od poprawnej implementacji sterownika. Nieprawidłowe działanie sterownika w urządzeniu użytkownika może spowodować, że sterownik MadWifi nie będzie w stanie zmienić ustawień domyślnych parametrów EDCA. W systemie zdefiniowane zostały trzy zestawy parametrów:

- zestaw wartości parametrów kolejek EDCA dla AP,
- zestaw domyślnych wartości parametrów kolejek EDCA dla klientów sieci – używany, jeżeli nie zdefiniowano reguł indywidualnych klienta,
- zestawy reguł indywidualnych klienta – wartości z tego zestawu pełnią rolę nadrzędną nad wartościami domyślnymi.

Wartości indywidualne klientów ustawia się poprzez interfejs graficzny użytkownika. Użytkownik systemu może więc na przykład zdefiniować specyficzne reguły tylko dla jednej kolejki EDCA, pozostawiając domyślne wartości parametrów dla pozostałych kolejek. Sterownik MadWifi odpowiadając na ramkę *Probe Request* lub *Association Request* odczyta odpowiednią strukturę, odnajdując ją najpierw na liście poprzez porównanie adresów docelowych MAC, a następnie, na jej podstawie, wypełni ramkę *Probe Response* lub *Association Response*.

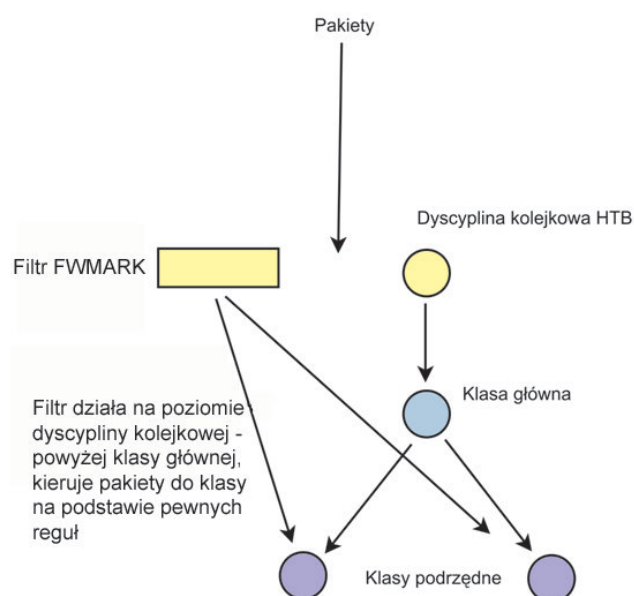
5. QoS w warstwie sieciowej w kierunku do abonenta

Ruch sieciowy wychodzący z AP powinien być klasyfikowany na podstawie adresu docelowego MAC. W sys-

temie należy w tym celu zdefiniować przynajmniej dwie klasy ruchu sieciowego: klasę główną (przez którą przepływa cały ruch sieciowy) oraz klasę domyślną (do której trafia ruch nie zaklasyfikowany do żadnej z pozostałych klas). W zaimplementowanym rozwiązaniu wykorzystano algorytm HTB (*Hierarchical Token Bucket*) jako metodę kolejkowania pakietów.

Algorytm HTB, w odróżnieniu od zwykłego *Token Bucket*, wprowadza hierarchię klas. Klasy tworzą strukturę drzewa. Dobrym przykładem jest hierarchia, w której korzeń drzewa stanowi klasę zbiorczą – oznaczającą cały transmitowany ruch sieciowy. Drugi poziom hierarchii tworzą węzły oznaczające ruch sieciowy transmitowany do pewnego użytkownika sieci. Trzeci poziom hierarchii (liście) to ruch sieciowy konkretnego protokołu (np. HTTP, FTP, rozmowa Skype) konkretnego użytkownika sieci. Ponadto, w odróżnieniu od *Token Bucket*, w HTB żetony (*token*) mogą być pożyczone od klasy nadrzędnej w hierarchii. Każda z klas może pożyczyć tylko tyle żetonów od klasy nadrzędnej, aby ich suma wraz z żetonami własnymi była mniejsza bądź równa wartości maksymalnej *ceil*. To, ile uda się pożyczyć żetonów od klasy nadrzędnej zależy, od tego, ile pożyczyła ona innym swoim klasom podrzędnym. Klasyfikowanie pakietów dokonuje się na samej górze hierarchii klas, tj. w korzeniu drzewa hierarchii. W proponowanym rozwiązaniu używany jest filtr FWMARK, który klasyfikuje pakiety na podstawie wartości pola MARK. Wartość pola MARK ustalana jest przez *ebtables*.

Narzędzie *ebtables* jest zbiorem konfigurowalnych reguł pozwalających modyfikować zawartość pakietu oraz odrzucać dany pakiet. Reprezentacja pakietu war-



Rys. 2. Reguły współdziałania filtra klasyfikującego FWMARK z dyscypliną kolejkową HTB

stwy łączy danych została rozszerzona w systemie Linux o dodatkowe pola, które są widoczne tylko podczas przetwarzania tego pakietu w stosie sieciowym. Przy wysyłaniu pakietu pola te są ignorowane. Narzędzie *ebtables* ma wbudowaną operację *mark*. Jej parametrem jest liczba całkowita, którą oznaczony zostanie pakiet. Oznaczenie to może zostać wykorzystane w sterowniku IEEE 802.11 w celu klasyfikacji pakietu do odpowiedniej kolejki transmisyjnej. Narzędzie *ebtables* posiada też wbudowany wzorec TOS, co pozwala etykietować pakiety. Narzędzie jest wbudowane w jądro systemu Linux. Sterowanie regułami *ebtables* możliwe jest przy użyciu komend z linii poleceń.

Użytkownik systemu ma możliwość ustawienia poprzez interfejs graficzny następujących parametrów usługi:

- *rate*: przepustowość gwarantowana,
- *ceil*: maksymalna dostępna przepustowość,
- *burst*: minimalna gwarantowana ilość bajtów, jaka może być wysłana przez klasę HTB w jednym cyklu bez przejścia do obsługi kolejnej klasy,
- *cburst*: maksymalna możliwa ilość bajtów, jaka może być wysłana przez klasę HTB bez przejścia do obsługi kolejnej klasy.

Hierarchia klas została przedstawiona na rysunku 3. Hierarchia jest jednostopniowa. Pakiety klasyfikowane są do klas HTB na podstawie adresu docelowego MAC. Przez klasę główną *root* przepływa cały ruch sieciowy kierowany do wszystkich klientów sieci. Wartości parametrów *rate* oraz *ceil* tej klasy powinny być równe maksymalnej dostępnej przepustowości na interfejsie IEEE 802.11. Wartość ta zależna jest od liczby klientów sieci oraz warunków radiowych i powinna zostać wyznaczona eksperymentalnie.

Klasa domyślna *default* jest wykorzystywana do transmisji pakietów do klientów, dla których nie zdefiniowano żadnych reguł. Klasa ta powinna mieć ustawione niskie wartości parametrów *rate* i *ceil*. W przypadku

klientów, dla których zdefiniowano odpowiednie reguły, pakiety są klasyfikowane na podstawie wartości pola MARK. Wartość pola MARK ustawiana jest przez reguły *ebtables* w łańcuchu POSTROUTING tabeli NAT – analogicznie jak w przypadku klasyfikacji do kolejek EDCA.

6. Schemat mieszany

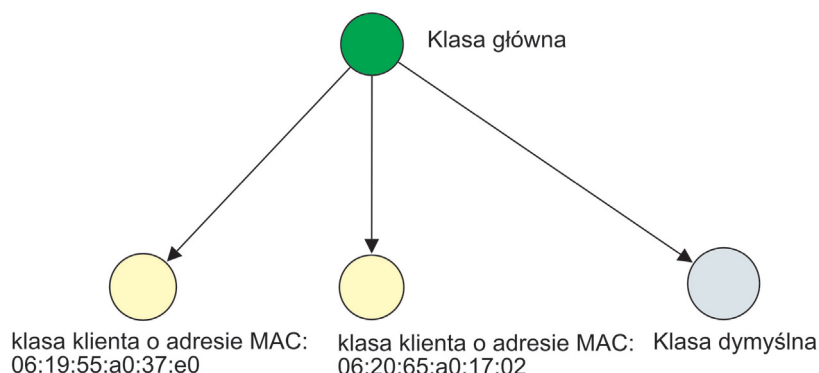
Hierarchia klas ruchu dyscypliny kolejkowej powinna zostać rozszerzona o dodatkowy poziom, realizowany za pomocą kolejek sprzętowych EDCA. Reguły klasyfikacji ruchu powinny być takie same jak w przypadku użycia jedynie kolejek EDCA. Należy tak konstruować mechanizmy QoS, aby nie marnować zasobów sieci. Przepustowości, które zostały przydzielone danemu użytkownikowi, a które nie zostały przez niego zajęte, powinny zostać rozdzielone pomiędzy innych aktywnych użytkowników. Zagadnienie to jest szczególnie ważne w przypadku algorytmów kolejkowania działających w warstwie sieciowej.

Ruch sieciowy od abonenta kontrolowany jest w sposób analogiczny jak w przypadku podejścia z wykorzystaniem funkcji EDCA – poprzez odpowiednie sterowanie parametrami kolejek transmisyjnych.

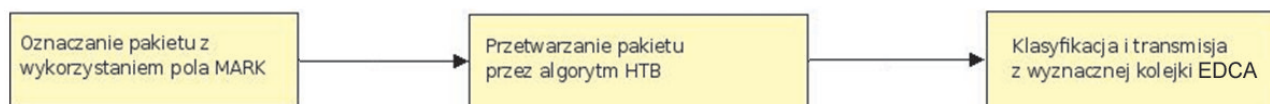
W celu zapewnienia QoS dla ruchu do abonenta wykorzystane zostaną zarówno kolejki transmisyjne EDCA, jak i dyscyplina kolejkowa HTB. Rysunek 4 przedstawia operacje wykonywane na każdym pakiecie IP podczas przetwarzania w omawianym schemacie.

Użytkownik systemu, poprzez interfejs graficzny, definiuje kolejno:

- reguły klasyfikacji pakietów do odpowiednich kolejek EDCA na podstawie wartości pola TOS,
- parametry dyscypliny kolejkowej HTB dla klienta,
- parametry dyscypliny kolejkowej HTB dla klas odpowiadających poszczególnym kolejkom EDCA.

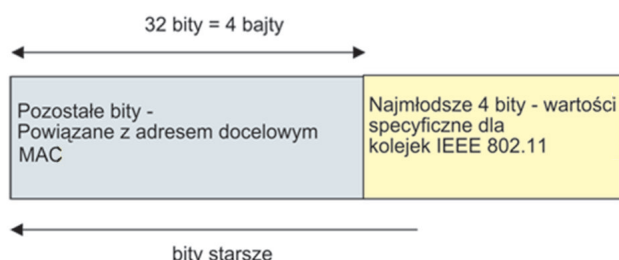


Rys. 3. Hierarchia klas dyscypliny kolejkowej HTB



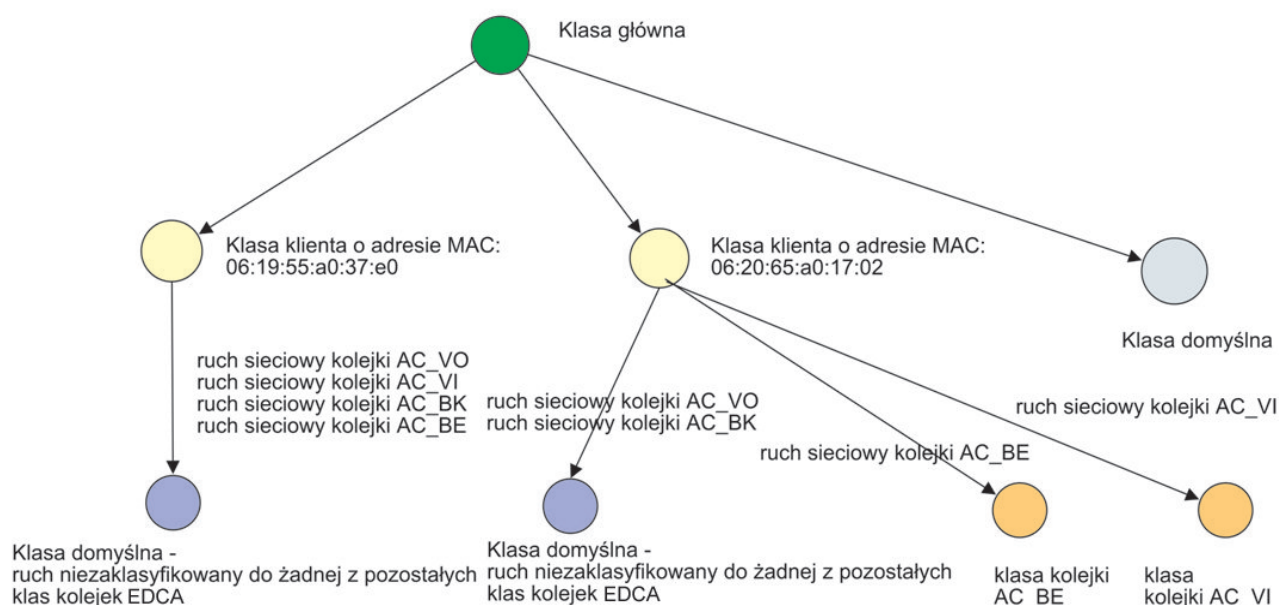
Rys. 4. Przetwarzanie pakietów kierowanych do abonenta w schemacie mieszanym

Mechanizm etykietowania pakietów z wykorzystaniem pola MARK pozostaje ten sam, jednak zmienia się format tego pola (rys. 5). Cztery pierwsze bity zostaną wykorzystane na oznaczenie kolejki transmisyjnej, do której powinien trafić pakiet. Pozostałe bity zawierać będą identyfikator klienta – równoznaczny z identyfikatorem klasy HTB odpowiadającej temu klientowi.



Rys. 5. Format pola MARK w schemacie mieszanym

Struktura klas HTB i filtrów jest odmienna w stosunku do schematu z dyscyplinami kolejkowymi, ponieważ wprowadzono dodatkowy poziom. Do każdej klasy klienta (powiązanej z adresem docelowym MAC) przyporządkowano od 1 do 5 klas podrzędnych. Zawsze jest to przynajmniej jedna klasa – klasa domyślna, przez którą przepływa ruch nieprzydzielony do żadnej z pozostałych klas. Pozostałe cztery klasy odpowiadają kolejkom EDCA, dla których zdefiniowano reguły HTB. Rysunek 6 przedstawia pełną strukturę klas HTB.



Rys. 6. Struktura klas HTB w schemacie mieszanym

Definicja reguł klasyfikacji do kolejki EDCA na podstawie wartości pola TOS jest niezależna od definicji reguł HTB dla tej kolejki. Możliwa jest więc sytuacja gdy użytkownik nie zdefiniuje odwzorowania TOS, ale zdefiniuje regułę HTB lub odwrotnie. W obydwu przypadkach ruch trafi do kolejki domyślnej.

7. Podsumowanie

W artykule przedstawiono sposób realizacji systemu konfiguracji parametrów ruchu zaproponowany dla AP standardu IEEE 802.11. System umożliwia zapewnienie QoS według trzech poniższych schematów:

- Zapewnienie jakości usług w warstwie sieciowej za pomocą algorytmu kolejkowania HTB. Schemat ten dotyczy jedynie ruchu kierowanego do abonenta. Niestety wykorzystanie tego schematu uniemożliwia sterowanie urządzeniami użytkowników.
- Zapewnienie jakości usług w warstwie łącza danych za pomocą kolejek EDCA. W ruchu od abonenta transmisja sterowana jest ustawieniami parametrów tych kolejek. Parametry kolejek przesyłane są w ramach zarządzających *Probe Response* i *Association Response*. Są one kierowane do każdego klienta niezależnie. W ruchu do abonenta transmisja sterowana jest poprzez klasyfikację pakietów do odpowiednich kolejek transmi-

syjnych EDCA na podstawie zawartości pola TOS i adresu docelowego MAC.

- Zapewnienie jakości usług w warstwie sieciowej i łącza danych z wykorzystaniem dyscyplin kolejkowych i EDCA. Jest to schemat mieszany. W ruchu od abonenta implementacja będzie analogiczna do przypadku drugiego; w ruchu do abonenta transmisja jest sterowana poprzez klasyfikację pakietów do odpowiednich klas algorytmu HTB (pierwszy poziom), a następnie do odpowiednich kolejek transmisyjnych EDCA (drugi poziom) na podstawie zawartości pola TOS i adresu docelowego MAC.

Dalsze prace będą się koncentrowały na ukończeniu implementacji oraz przeprowadzeniu serii testów potwierdzających poprawność działania zaproponowanych mechanizmów QoS w AP, a także porównaniu wszystkich trzech schematów QoS. Dodatkowym celem jest poprawa parametrów sieciowych poprzez od-

powiedni dobór parametrów kolejek transmisyjnych EDCA. W tym celu wykonane zostaną testy sprawdzające wpływ ustawień poszczególnych parametrów na wartości szybkości transmisji i opóźnienia.

Literatura

- [1] IEEE Std 802.11-2007, IEEE Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Spec., 2007
 - [2] IEEE 802.3-2005 IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks—Specific requirements Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications, 2005
 - [3] MADWiFi – Multiband Atheros Driver for WiFi, (2008), <http://madwifi.org>
 - [4] <http://ebtables.sourceforge.net>
-