

# Testiranje PLC komunikacije i analiza QoS parametara

---

**Tunuković, Tomislav**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:802235>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-12**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**TESTIRANJE PLC KOMUNIKACIJE I ANALIZA QoS  
PARAMETARA**

**Diplomski rad**

**Tomislav Tunuković**

**Osijek, 2016.**



**ETFOS**  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET OSIJEK



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

## Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Osijek, 2016.

Odboru za završne i diplomske ispite

### Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Tomislav Tunuković
<b>Studij, smjer:</b>	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnike, Komunikacije i informatika
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	D-856, 2014./2015.
<b>Mentor:</b>	Prof.dr.sc. Drago Žagar, dipl.ing.
<b>Sumentor:</b>	Goran Horvat, mag.ing.el.
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	
<b>Član Povjerenstva:</b>	
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Testiranje PLC komunikacije i analiza QoS parametara
<b>Primarna znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektrotehnika</b>
<b>Sekundarna znanstvena grana (ili polje) rada:</b>	<b>Komunikacije i informatika</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	U radu je potrebno analizirati mogućnosti primjene PLC komunikacije, prezentirati i usporediti postojeća rješenja te analizirati i testirati parametre kvalitete usluge PLC komunikacije. U laboratoriju je potrebno uspostaviti testnu PLC mrežu te ispitati parametre kvalitete usluge pomoću odgovarajućih programskih alata.
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):</b>	
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: Jasnoća pismenog izražavanja: Razina samostalnosti:

Potpis sumentora:

Potpis mentora:

Dostaviti:

1. Studentska služba

U Osijeku, 2016. godine

Potpis predsjednika Odbora:

**ETFOS**

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET OSIJEK

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA****Osijek, 2016.****Ime i prezime studenta:**

Tomislav Tunuković

**Studij :**

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnike, Komunikacije i informatika

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

D-856, 2014./2015.

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom:

Testiranje PLC komunikacije i analiza QoS parametara

izrađen pod vodstvom mentora

**Prof.dr.sc****Drago Žagar**

i sumentora

**Goran Horvat**  
**mag.ing.el.**

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

## Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. PLC KOMUNIKACIJA .....	2
2.1. Svojstva elektroenergetskog sustava .....	2
2.1.1. Visokonaponska mreža .....	3
2.1.2. Srednjenaponska mreža.....	4
2.2. Temeljni princip rada PLC komunikacije .....	4
2.3. Tehnički opis PLC komunikacije .....	6
2.3.1. OFDM modulacija.....	6
2.5. Problemi kod PLC komunikacije .....	7
3. KVALITETA USLUGE U IP MREŽAMA.....	8
3.1. Mehanizmi posluživanja i raspoređivanja paketa .....	9
3.1.1. FIFO (engl. <i>First In First Out</i> ).....	9
3.1.2. CBQ (engl. <i>Class Based Queuing</i> ).....	9
3.1.3. FQ (engl. <i>Fair Queuing</i> ) .....	10
3.1.4. PQ (engl. <i>Priority Queuing</i> ).....	10
3.2. Upravljanje redovima čekanja.....	10
3.2.1. Drop Tail .....	11
3.2.2. AQM (engl. <i>Active Quene Managment</i> ) .....	11
3.3. Kontrola toka i protokoli za izbjegavanje zagušenja .....	12
3.3.1. TCP (engl. <i>Transmission Control Protocol</i> ) .....	13
3.3.2. UDP (engl. <i>User Datagram Procotol</i> ) .....	13
3.3.3. RTP (engl. <i>Real Time Protocol</i> ).....	14
3.3.4. RTCP (engl. <i>Real Time Control Protocol</i> ).....	14
3.3.5. ECN (engl. <i>Explicit Congestion Notification</i> ).....	14
3.4. Oblikovanje prometa .....	15
3.4.1. Klasifikacija prometa .....	16
3.4.2. Označavanje paketa.....	17
3.4.3. Upravljanje prometom.....	17
4. QOS PODRŠKA U PLC KOMUNIKACIJI.....	18
4.1. PLC MAC protokoli za QoS podršku .....	19
4.1.1. „Token passing“ metoda .....	19
4.1.2. CSMA/CA.....	20
4.1.3. TCP/IP.....	22
5. TESTIRANJE PLC KOMUNIKACIJE I ANALIZA KVALITETE USLUGE .....	26
5.1. Testna PLC i WiFi mreža.....	26

5.2. PRTG Network monitor i PRTG Remote probe programski alati .....	27
5.2.1. Instalacija PRTG Network monitora.....	27
5.3. Testiranje kvalitete usluge na UDP protokolu .....	29
5.3.1. Opis mjerenih parametara .....	34
5.3.2. Rezultati mjerenja QoS parametara PLC mreže .....	35
5.3.3. Rezultati mjerenja QoS parametara WiFi mreže.....	39
5.3.4. Usporedba rezultata PLC i WiFi mreže .....	43
6. ZAKLJUČAK .....	46
LITERATURA.....	47
SAŽETAK.....	48
ABSTRACT .....	48
ŽIVOTOPIS .....	49
PRILOZI.....	50
Tehnički podaci korištenih PLC uređaja.....	50
Tehnički podaci korištenog bežičnog usmjerivača TP link TL - WR841N.....	51

## 1. UVOD

Širokopojasna komunikacija putem elektroenergetske mreže (engl. *PLC - Power Line Communications*) predstavlja tehnologiju koja omogućava umrežavanja u lokalnom okruženju, ali i rješenje problema širokopojasnog pristupa u sredinama gdje ne postoji adekvatna širokopojasna infrastruktura. Pristup širokopojasnim uslugama putem elektroenergetske mreže spajanjem na kućnu utičnicu električne instalacije sve do sada je predstavljao izazov na kojeg nije bilo pravog odgovora. Nakon deregulacije energetske i telekomunikacijskog tržišta i sve većim porastom korisnika i njihovih zahtjeva, došlo je do potrebe za alternativnim i brzim prijenosom podataka. Elektroenergetska mreža nudi idealno rješenje zahvaljujući gustoj i rasprostranjenoj infrastrukturi u odnosu na telekomunikacijske tvrtke. Gotovo svako kućanstvo je povezano sa elektroenergetskom mrežom pa čak i najmanje sredine u odnosu na telekomunikacijsku infrastrukturu, što dovodi do zaključka, gledano sa financijskog stajališta, da je isplativije iskoristiti postojeću infrastrukturu za pristup širokopojasnim uslugama nego ulagati u izgradnju nove (posebice ako se radi o sredinama sa malo korisnika, što je za telekomunikacijske tvrtke ne isplativo ulaganje u infrastrukturu). Cijela infrastruktura od davatelja usluga pa sve do kućne elektroinstalacije postoji i spremna je za korištenje bez daljnjih ulaganja. Korisnicima se nudi nova usluga elektroenergetske mreže koja sadrži veliki potencijal i koja bi u budućnosti mogla biti značajna i profitabilna [1].

Veliki problem u PLC komunikaciji je sposobnost pružanja kvalitete usluge (engl. *QoS – Quality of Service*) kod prijenosa multimedije i korištenja stvarno-vremenskih aplikacija kao što je „*live video streaming*“. Ovaj diplomski rad se bavi tom problematikom kao i analizom i testiranjem QoS parametara (gubitak paketa, kašnjenje paketa i kolebanje kašnjenja) na UDP protokolu. Ispitivanje se obavlja na testnoj PLC mreži postavljenoj u laboratoriju. Mjere se gubitak paketa, kašnjenje i kolebanje kašnjenja paketa te se rezultati uspoređuju sa postojećom širokopojasnom uslugom. Rad se sastoji od uvodnog poglavlja u kojemu je kratko prezentirana tematika i zadatak diplomskog rada, poglavlja koje opisuje PLC tehnologiju, poglavlja koje prezentira QoS te poglavlja u kom je opisano testiranje PLC komunikacije i mjerenje QoS parametara na navedenoj testnoj mreži, komentari dobivenih rezultata i usporedba sa postojećim rješenjima i zaključka temeljenog na dobivenim podacima

## 2. PLC KOMUNIKACIJA

Korištenje elektroenergetske mreže za komunikaciju nije novina, postoji od 50 – ih godina prošlog stoljeća. Zbog male brzine prijenosa i niske funkcionalnosti nikada nije smatrana ozbiljnim tehnološkim rješenjem telekomunikacija. Novi modulacijski postupci te općenit tehnološki napredak posljednjih godina zahtjeva ponovnu evaluaciju PLC-a. Današnja tehnologija omogućuje PLC komunikaciju putem niskonaponske i srednje naponske mreže i pruža izvrsne tržišne mogućnosti. Današnja napredna obrada signala dovela je do velikih brzina prijenosa informacije koja se mjeri u stotinama megabita u sekundi, čak i u lošijim uvjetima prijenosa kao što su energetske vodovi u stambenim četvrtima. Realizacija PLC komunikacije ovisi o arhitekturi elektroenergetske mreže, primjerice u Europi se može više desetaka kućanstava posluživati jednim niskonaponskim kabelom. Glavni problemi, vezani za ostvarivanje PLC komunikacije su visoko gušenje kabela i višestruke varijantne refleksije od priključaka pojedinih kućanstava čak i pojedinih utičnica unutar jednog kućanstva te interferencija sa postojećim komunikacijama [3].

Neke od primjena PLC komunikacije :

- spajanje PC – a, mobitela i ostalih uređaja na Internet jednostavnim uključanjem u utičnicu kućne elektroinstalacije
- udaljeni nadzor i upravljanje kućanskim uređajima koji su opremljeni mogućnošću upravljanja putem interneta (engl. *Internet enabled*)
- više parametarski sustavi za sigurnosni nadzor
- očitavanje brojila putem interneta (kvalitetna i precizna naplata energenata)
- drastično smanjenje žica i kabela koje koristimo za povezivanje uređaja [4]

### 2.1. Svojstva elektroenergetskog sustava

Naponske razine povezane transformatorima su projektirane na način da se gubici električne energije svedu na minimum pri frekvencijama od 50 Hz. Transformatori su prepreka za protok informacija i predstavljaju separaciju za prijenos informacija pri visokim frekvencijama. Upravo ove činjenice sugeriraju potrebu za odgovarajućom hijerarhijskom strukturom za planiranje komunikacijskog sustava [1].



### 2.1.1. Visokonaponska mreža

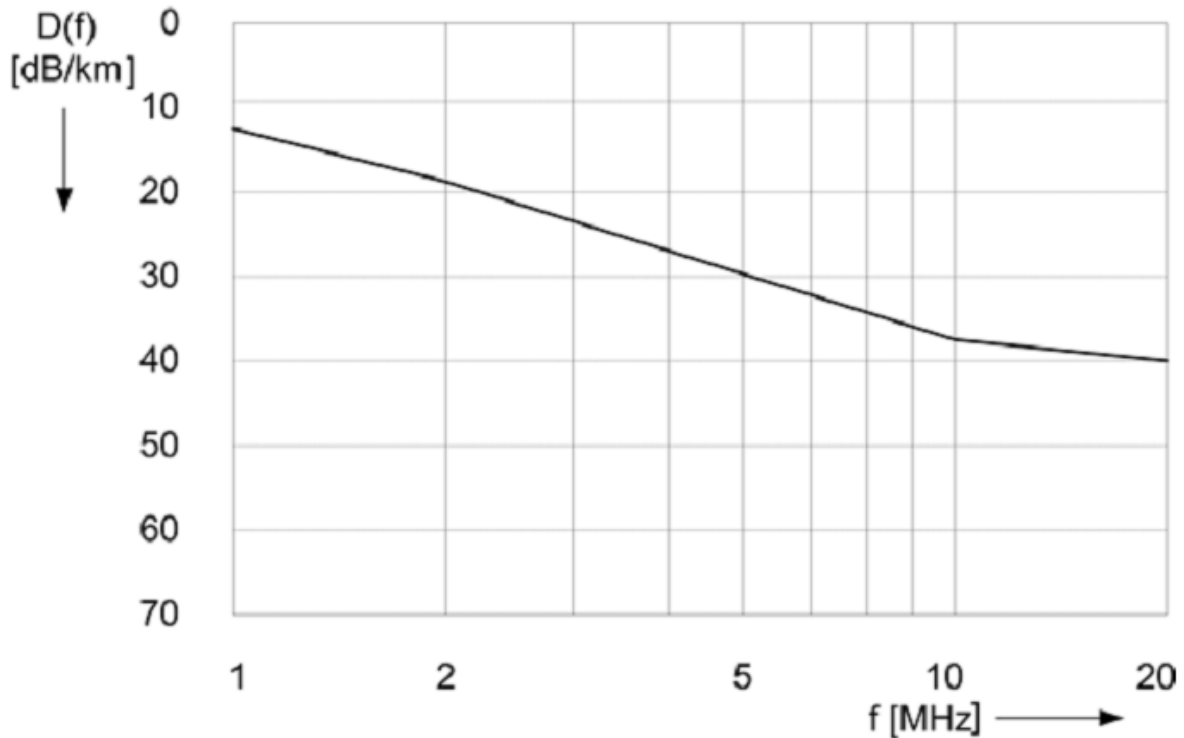
Visokonaponska mreža služi za prijenos električne energije na velike udaljenosti. Iako su prijenos visokofrekventnih signala i prijenos električne energije dalekovodom vrlo slični procesi, postoje velike razlike u svojstvima dalekovoda na različitim frekvencijama. Na primjer za 380 kilovoltni trofazni dalekovod dužine 500 km gušenje signala iznosi približno 6 dB. Iznenadujuće mala, ova brojka se ne uzima u obzir kod projektiranja sustava budući da postoji čitav niz fizikalnih utjecaja (inje, led, magla, gusti snijeg itd.) koji utječu na gušenje signala. Pored gušenja zbog gubitaka radne snage treba povesti računa i oko utjecaja zemlje na gušenje te o dielektričnim gubicima. Gušenje zbog utjecaja zemlje raste s frekvencijom. Tablica 2.1.1.1. prikazuje gušenje na 100 km dalekovoda u ovisnosti o frekvenciji i odnosu udaljenosti vodiča od zemlje/međusobna udaljenost vodiča = 3.5.

D na 100 km dalekovoda	f (kHz)
6.12 dB	200
9.25 dB	300
12.39 dB	400

**Tablica 2.1.1.1.** Gušenje u ovisnosti o frekvenciji prijenosa informacija [1].

### 2.1.2. Srednjenaponska mreža

Raspon vodova srednjenaponske mreže kreće se između 5 i 25 km, dok su za niskonaponsku mrežu tipične vrijednosti 100 do 1000 m. Gušenje im je iznenađujuće nisko i praktički zanemarivo. Istraživanja pokazuju da prigušenje u niskonaponskim kablovima ne dostiže kritične vrijednosti za frekvencije do 20 MHz, duljine kabela do jednog kilometra (Slika 2.1.2.1.) [1].



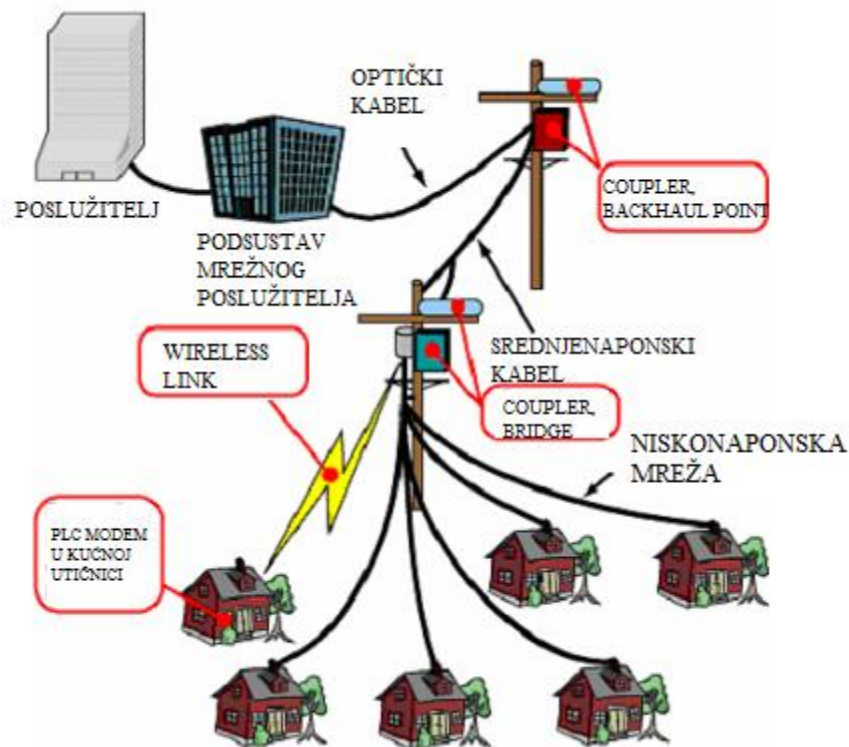
Slika 2.1.2.1. Gušenje po kilometru za četverožilne kablove [1].

## 2.2. Temeljni princip rada PLC komunikacije

Kasnih 80 – ih godina uočeno je da fiksna telefonija koristi samo mali dio raspoloživog spektra koji se može prenositi bakrenom paricom što dovodi do razvoja DSL – a i većih brzina prijenosa uz korištenje šireg spektra. Frekvencija napona elektroenergetske mreže je 50 Hz što ostavlja praktično cijeli raspoloživi spektar ne iskorišten. Logično rješenje je bilo da se slobodni spektar iskoristi za druge namjene - prijenos informacija slobodnim frekvencijama. Prijenos informacija elektroenergetskim vodovima narušava kvalitetu signala, posebno ako se radi o visokonaponskom vodu. Visoki naponi i velike udaljenosti unose snažan šum u signal [1].

U realnoj mreži se teži tome da se preskoče visokonaponski vodovi. To se postiže korištenjem optičkih vodova za prijenos informacija, čije korištenje ne zahtjeva velika dodatna ulaganja budući da gotovo sve kompanije za distribuciju električne energije duž visokonaponskih vodova ugrađuju

i optičke kablove. Na niskonaponskim i srednje naponskim vodovima postoji problem prigušenja signala zbog čega se moraju koristiti pojačivači signala (engl. *repeater*). Nakon što signal stigne do odredišta potrebno ga je dovesti do kućanstva, žično ili bežično. U većini slučajeva se koristi žica zbog svoje pouzdanosti i jednostavnosti, koristi se poseban modem koji se uključuje u kućnu utičnicu električne energije. Drugo manje zastupljeno rješenje je korištenje bežične veze (npr. IEEE 802.11b). U tom se slučaju bazna postaja postavlja na mjesto spoja srednje i visokonaponske mreže, tada se korisnici spajaju putem standardnih IEEE 802.11b uređaja. Slika 2.2.1. pokazuje arhitekturu PLC sustava [1].



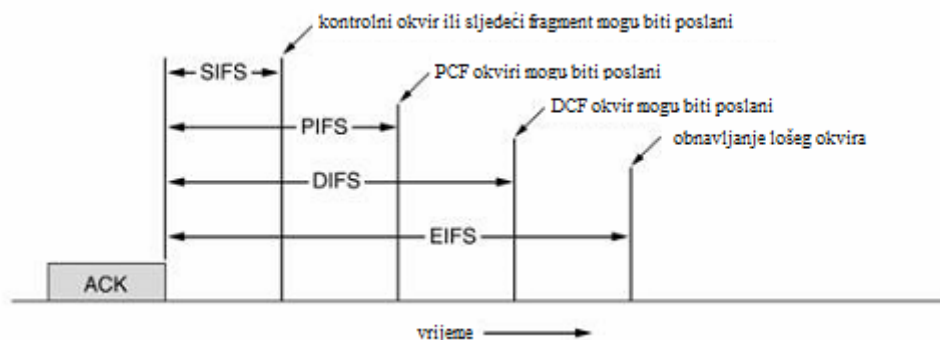
Slika 2.2.1. Arhitektura PLC komunikacije [2].

## 2.3. Tehnički opis PLC komunikacije

Postoje dva glavna pristupa za implementaciju fizičkog sloja PLC-a. CDMA (engl. *Code Division Multiple Access*) koji se koristi u sustavima mobilne telefonije i raznim „spread spectrum“ varijantama, te OFDM (engl. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) koji se koristi u IEEE 802.11a tehnologiji. Oba imaju povoljne karakteristike za implementaciju fizičkog sloja PLC-a, ali se u praksi pokazalo da CDMA postiže veće brzine prijenosa dok je OFDM bolji kod prijenosa zašumljenim linijama. OFDM je češće upotrebljavan zbog velike otpornosti na pogreške. Kod dizajniranja MAC (engl. *Medium Access Control*) pod sloja podatkovnog sloja važno je zadovoljiti ova dva kriterija: 1. nema ograničenja udaljenosti između čvorova

2. više čvorova može istovremeno odašiljati podatke.

Ovi kriteriji eliminiraju CSMA/CD (engl. *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*) protokol koju se koristi u Ethernet tehnologiji. Vrlo često se upotrebljava CSMA/CA (engl. *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) protokol koji se koristi u IEEE 802.11 tehnologiji (Slika 2.3.1.) [4].



**Slika 2.3.1.** Grafički prikaz izbjegavanja kolizije kod CSMA/CA protokola u IEEE 802.11 tehnologiji [2].

### 2.3.1. OFDM modulacija

OFDM je modulacijska tehnika sa više nosilaca koji se koriste u sustavima digitalnog audio prijenosa, sustavima za brzi prijenos podataka telefonskom linijom koja je ujedno predviđena za digitalnu televiziju. OFDM je modulacijska tehnika nastala iz tehnike frekvencijskog skakanja. Ima malu spektralnu gustoću snage što znači da je raspoloživa snaga transmisije raspoređena na široki frekvencijski spektar, ima mnogo manju osjetljivost na smetnje u usporedbi sa konvencionalnim uskopojasnim modulacijskim tehnikama. Podaci se prenose tehnikom paralelnog frekvencijskog multipleksa pri čemu se dijeli raspoloživi frekvencijski pojas na veliki

broj pod kanala središnjih frekvencija. Velika prednost OFDM – a nad modulacijom frekvencijskog skakanja je u tome što se podaci prenose na više paralelnih nosilaca pa se time ostvaruje veća brzina modulacije [1].

## **2.5. Problemi kod PLC komunikacije**

Realizacija PLC komunikacije se suočava sa nekoliko ozbiljnih problema kao što su premošćivanje energetskih transformatora, prigušenje (ne prilagođenost vodova prijenosu informacije na visokim frekvencijama), sigurnost. Transformatori su projektirani za transformaciju napona koji su frekvencije 50 Hz, dok se informacije šalju signalima više desetaka megaherca; takvi signali nemaju nikakvu šansu prolaska kroz transformator i potrebno ih je premostiti. Cijena premošćivanja transformatora varira od države do države zbog razlika u energetskim mrežama i može biti poprilično skup zahvat. Kućanstva koriste niskonaponsku mrežu tako da informacijski signal mora proći kroz transformator između srednjenaponske i niskonaponske mreže. Broj kućanstava koje napaja pojedini transformator također varira od države do države npr. u SAD-u transformator napaja desetak kućanstava, u Japanu se ta brojka kreće oko tridesetak kućanstava dok u Europi prelazi više stotina kućanstava. Ova činjenica je utjecala na to da se u Europi komercijalno koristi PLC tehnologija dok je u SAD-u još u povojima [5].

Prijenos podataka vodičem koji nije predviđen za tu upotrebu nailazi na probleme jakih gušenja VF (visokofrekventnih) signala i snažan šum zato što se vodiči ponašaju kao antene. Razvijeni su razni alati za detekciju i ispravak pogreške, ali jedan problem je ostao ne rješiv. Vodiči nisu oklopljeni i ponašaju se kao antene. PLC radi na frekvencijama koje koriste i kratkovalni radio i jedan dio VHF područja. Na taj način PLC komunikacija može onemogućiti korištenje servisa koji se služe tim frekvencijama. Interferencija je najveći razlog slabo rasprostranjenog korištenja PLC komunikacije. Zanimljiv primjer obustave projekta PLC komunikacije zbio se 1998. godine u Velikoj Britaniji. Projekt je obustavljen zato što su stupovi javne rasvjete bili baš te visine da se kod vođenja VF signala PLC komunikacije ponašaju kao odašiljačke antene u pojasu 2 – 10 MHz. Interferencijom su bili pogođeni BBC World Service, kontrola leta, radio amateri pa čak i komunikacijska logistika britanske obavještajne službe [6].

Sljedeći problem je sigurnost. Koristi se dijeljeni medij pa je tim olakšana upotreba raznih „sniffer“ alata za kriptanalizu. Jedan te isti niskonaponski signal dolazi do više kućanstava što također doprinosi problemu sigurnosti. [2] Jedno od predloženih rješenja problemu interferencije je korištenje mikrovalnih frekvencija. Na taj način bi se izbjeglo ometanje radio amatera sa prihvatljivom brzinom prijenosa koja se kreće oko 200 Mbps [2].

### 3. KVALITETA USLUGE U IP MREŽAMA

Kako je promet, vrste usluga i broj korisnika IP prometa u stalnom porastu nastala je potreba za definicijom kvalitete usluge. Kvaliteta usluge (engl. *Quality of Service - QoS*) je sposobnost IP mreže da poboljša kvalitetu mrežnog prometa. QoS zauzima vrlo visoku ulogu u tehnologiji paketno orijentiranih mreža. Ovo poglavlje daje osvrt na mehanizme koji se koriste u paketno orijentiranim mrežama, koji imaju ulogu garantiranja određene razine usluge. Kod prioritiziranja usluga koriste se različiti mehanizmi za upravljanje i raspoređivanje redovima čekanja. Mehanizmi kvalitete usluge pružaju sljedeće usluge: kontrola resursa, upravljanje zagušenjima, efikasno korištenje mrežnih resursa itd.. Cilj mreže i njenih usluga je postizanje željene korisničke procjene (engl. *Quality of Experience - QoE*), a QoS je glavni alat za postizanje tog cilja. Potrebno je osigurati kvalitetu usluge s kraja na kraj (slika 3.1.) i pri tome glavnu ulogu imaju mehanizmi za osiguranje mrežnih parametara kao što su DiffServ (engl. *Differentiated Services*) i IntServ (engl. *Integrated Services*). Za osiguranje kvalitete usluge potrebna je kontrola zagušenja i pristupa, odgovarajući protokoli i upravljanje resursima. Postoje različite vrste kvalitete usluge, a neke od njih su svojstvena i procijenjena. Svojstvena kvaliteta usluge ovisi o mreži i opisuje se pomoću objektivnih parametara (opseg, kašnjenje, kolebanje kašnjenja i gubici). Navedeni parametri se svrstavaju u ključne indikatore performansi (engl. *Key Performance Indicators*), a pošto utječu na zadovoljstvo korisnika predstavljaju tehničku interpretaciju kvalitete usluge [9].



Slika 3.1. Kvaliteta usluge s kraja na kraj [10].

### 3.1. Mehanizmi posluživanja i raspoređivanja paketa

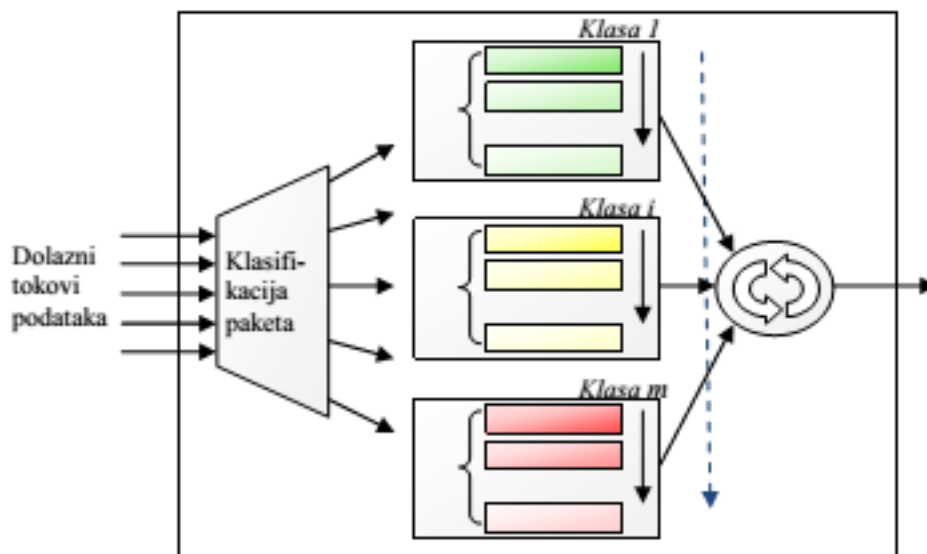
Raspoređivanje paketa (engl. *Scheduling*) se izvršava mehanizmima koji kontroliraju pakete koji se isporučuju u izlazne tokove. Dolazni promet se zadržava u redovima čekanja koji se sastoje od više raspoređivača i redova [9].

#### 3.1.1. FIFO (engl. *First In First Out*)

FIFO je jednostavan mehanizam raspoređivanja paketa u mreži koji podrazumijeva da su svi paketi u istom redu čekanja i kreću se po pravilu prvi paket koji je došao u red čekanja, prvi ga i napušta. FIFO je jednostavan algoritam, male cijene implementacije, ali pruža slabiju kvalitetu usluge zato što su tokovi ovisni jedni o drugima, što znači da se povećanje intenziteta prometa u jednom toku negativno reflektira i na ostale. FIFO ne osigurava garanciju za kašnjenje i dostupni opseg mreže s kraja na kraj [9].

#### 3.1.2. CBQ (engl. *Class Based Queuing*)

CBQ je tehnika posluživanja u kojoj se paketi razvrstavaju po klasama i dodjeljuju redovima čekanja koji odgovaraju određenoj klasi. Svakom redu se dodjeljuje određeni udio izlaznog opsega. Izlazno posluživanje se vrši RR (engl. *Round Robin*) tehnikom koja radi na način ako zadatak nije izvršen u zadanom vremenskom intervalu, on se prekida i vraća nazad u red čekanja. To se ponavlja sve dok se zadatak ne izvrši. Da bi se izbjeglo kašnjenje prometa sa visokim prioritetom potrebno je vremensko raspoređivanje prometa koje je omogućeno WRR (engl. *Weighted Round Robin*) algoritmom (slika 3.1.2.1.) koji prioritiziranom prometu dodjeljuje težinski faktor.



Slika 3.1.2.1. WRR algoritam [9].

WRR je zapravo unaprijeđena verzija RR algoritma, ako su svi paketi iste veličine RR vremenski raspoređivač prenosi jednak broj paketa od svakog korisnika. Da bi se osigurao jednak pristup ulazno-izlaznom međusklopu za protok podataka za sve korisnike, raspoređivač proračunava garantiranu brzinu koju bi trebao dobiti svaki korisnik, te šalje promet svakog korisnika u kratkom vremenskom intervalu i prelazi na sljedećeg. Kad dođe do zadnjeg korisnika, vraća se na početak i na prvog korisnika te ponavlja postupak [9].

### **3.1.3. FQ (engl. *Fair Queuing*)**

FQ je tehnika posluživanja u kojoj su paketi raspoređeni po tokovima i dodijeljeni redovima čekanja odgovarajućim tokovima. Također se naziva „flow based queuing“. FQ mehanizmi pokušavaju otkriti zagušenja ili opseg koji je proporcionalan težinama svih aktivnih tokova. Ukoliko tok ne koristi sav dodijeljeni opseg, on se dodjeljuje tokovima kojima fali opsega proporcionalno njihovim težinama. FQ garantira tokovima njihov rezervirani opseg i pruža im uslugu dodjele dodatnog opsega ukoliko im je potreban. Postoje različiti mehanizmi dodjele kao što su: min-max fair sharing, model fluida, generalizirano dijeljenje procesora, weighted fair queuing itd [9].

### **3.1.4. PQ (engl. *Priority Queuing*)**

PQ znači da se paketi klasificiraju i spremaju u redove čekanja prema različitim prioritetima. Pojedini redovi čekanja imaju viši prioritet od ostalih, a unutar takvih se paketi poslužuju FIFO mehanizmom. Klijeent određene razine se poslužuje tek nakon što je poslužen klijeent većeg prioriteta ili se koristi pre - empti mehanizam što znači da klijeent višeg prioriteta prekida izvršenje usluge nižem prioritetu. Da bi se izbjeglo dugo čekanje korisnika sa nižim prioritetima koristi se mehanizam dinamički prioritet [9].

## **3.2. Upravljanje redovima čekanja**

Redovima čekanja upravljaju mehanizmi koji odlučuju dali će paket bit stavljen na čekanje ili odbačen. Upravljanje redovima se može ostvariti na više načina i mehanizmi se obično razlikuju po kriterijima odbacivanja paketa [9].

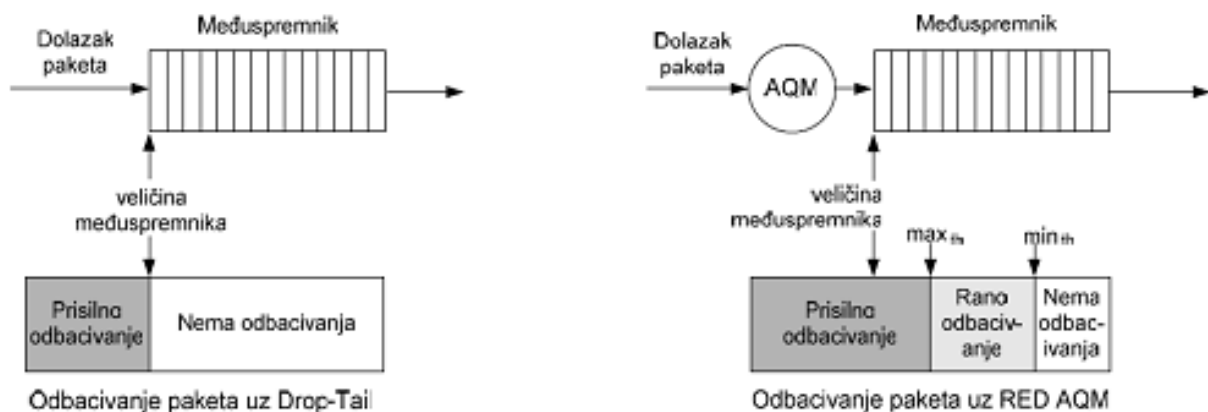


### 3.2.1. Drop Tail

Drop tail je jednostavna tehnika prema kojoj će se u slučaju da dolazni promet prelazi kapacitet odlaznog kanala, red čekanja će se puniti dok se ne iskoristi cijeli kapacitet, a svi ostali dolazni paketi se odbacuju. U slučaju TCP prometa, ako dođe do odbacivanja paketa svi TCP izvori smanjuju brzinu slanja. Nakon nekog vremena TCP izvori ponovno povećavaju brzinu do sljedećeg zagušenja i takva radnja se naziva globalna TCP sinkronizacija [9].

### 3.2.2. AQM (engl. *Active Queue Management*)

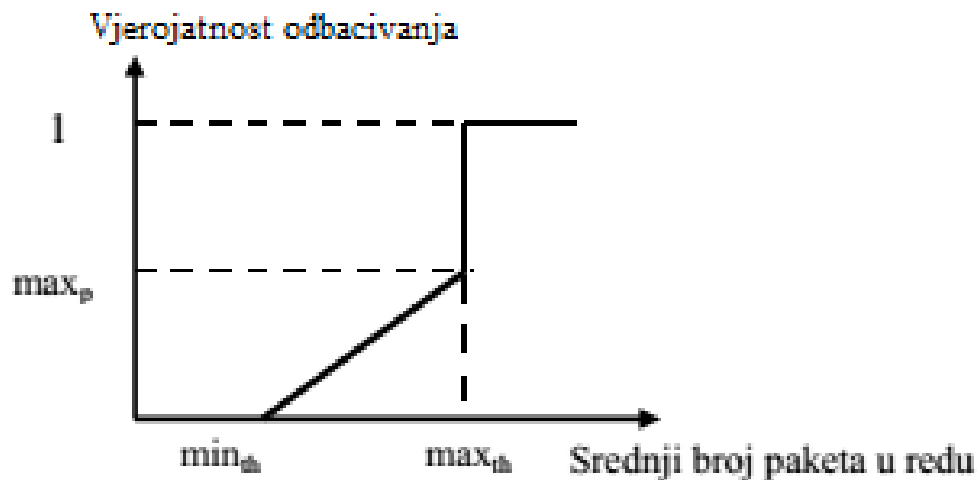
AQM mehanizam služi kako bi se uspostavio optimalni odnos između smanjenja izgubljenih paketa i smanjenja kašnjenja u repovima čekanja. Kad se red čekanja napuni može doći do dugih perioda zagušenja, što je naročito izraženo u slučaju prometa sa naglim povećanjem intenziteta zvanim „burst promet“. AQM kao kriterij ne koristi fiksnu veličinu maksimalnog kapaciteta reda čekanja, već daje rješenje problema prilagodbenim smanjenjem srednje popunjenosti reda čekanja i obuhvaća nekoliko različitih implementacija. Najkorištenija verzija AQM mehanizma je takozvana RED (engl. *Random Early Detection*) tehnika ili slučajna preventivna detekcija.



Slika 3.2.2.1. Grafički prikaz odbacivanja paketa uz Drop Tail i AQM [9].

RED je najefikasniji pri radu sa protokolima kojima je gubitak paketa znak za zagušenje. Promatra se opterećenje na čvorovima mreže, ako dođe do povećanja prometa RED izvrši stohastičko odbacivanje paketa. Ova tehnika podrazumijeva da se odbacuju paketi koji su tek pristigli prema probabilističkom zakonu temeljenom na prosječnoj veličini reda čekanja jer ne pravi razliku među pojedinim tokovima. RED tehniku karakterizira održavanje male prosječne popunjenosti reda čekanja, dok njegova fizička duljina ostaje dovoljno velika da bi se kompenzirali povremeni burst – ovi. Postave se dva praga za srednju veličinu reda, jedan prag određuje srednju vrijednost ispod koje nijedan paket neće biti odbačen (minimalni prag -  $min_{th}$ ), a drugi određuje veličinu iznad

koje se svi paketi odbacuju (maksimalni prag -  $max_{th}$ ). Za red čekanja koji se nalazi između ove dvije vrijednosti, vjerojatnost odbacivanja je proporcionalna srednjoj veličini reda (Slika 3.2.2.2.). Efikasnost RED – a ovisi o tome kako su podešeni određeni relevantni parametri.



Slika 3.2.2.2. Vjerojatnost odbacivanja paketa u RED – u [9].

Kada popunjenost reda čekanja prijeđe vrijednost  $max_{th}$ , RED se ponaša kao standardni Drop Tail tako da se uspješno kompenziraju kratkotrajni burst – ovi. Ova tehnika nailazi na probleme kod CBR prometa kao što je audio streaming, njegovo korištenje zahtijeva velike redove čekanja za kompenzaciju kolebanja kašnjenja koji sa svoje strane uvode veliko kašnjenje. Postoje razne RED varijacije zato što ne postoji jedan fiksni skup vrijednosti parametara koji radi dobro za sve tipove prometa i scenarije zagušenja. Neke od RED varijacija su Flow RED, Gentle RED, Weighted RED itd.. Modifikacije RED – a se temelje na analizi i promatranju većeg broja parametara tako da nisu svi primjenjivi u realnim okruženjima [9].

### 3.3. Kontrola toka i protokoli za izbjegavanje zagušenja

Potreba za kontrolom toka se javlja zbog ograničenih resursa, odnosno kapaciteta komunikacijskog kanala i brzine prijemnika. Kontrola toka je jedna od metoda kontrole zagušenja. Zadatak mehanizama kontrole toka je da prilagodi brzinu slanja podataka predajnika trenutno dostupnim mrežnim resursima. Ovisno o trajanju zagušenja razlikuju se: trenutno, privremeno, periodičko i permanentno zagušenje. Kontrola toka je osnovni mehanizam za izbjegavanje zagušenja kod podatkovnog prometa, a kontrola pristupa kod neelastičnog stvarno-vremenskog prometa. Ovisno o izboru kriterija algoritmi za kontrolu toka se mogu grupirati kao prozorski i algoritmi brzine prijenosa, algoritmi s implicitnom i eksplicitnom dojavom zagušenja, „hop by hop“ i algoritmi s kraja na kraj, algoritmi predajnika, prijemnika i čvorišta itd. [9].

### **3.3.1. TCP (engl. *Transmission Control Protocol*)**

TCP protokol omogućuje pouzdani prijenos podataka i uključuje mehanizme za izbjegavanje zagušenja u mreži. Postoje tri temeljna algoritma na kojima se temelji rad TCP protokola, a to su: spori start, izbjegavanje zagušenja, i brzo ponovno slanje. Navedeni algoritmi vrijede samo za temeljni TCP protokol, takozvani „Tahoe TCP“, dok se ostalim varijantama TCP-a dodaju razna poboljšanja. Ovi algoritmi se implementiraju kako bi se izbjeglo pogrešno zaključivanje o gubitku paketa do kojeg dolazi ako segmenti na prijemnik stižu u izmijenjenom redosljedju. Paketi koji pristižu na taj način se prihvaćaju u red čekanja i više ne koriste resurse mreže pa izvor ne bi trebao djelovati mehanizmom spori start koji je indikator zagušenja. Brzo ponovno slanje omogućava da se ne čeka istek vremena retransmisije RTO (engl. *Retransmission Timeout*) intervala kako bi se poslao valjani segment. Ovaj algoritam omogućuje da se umjesto pokretanja sporog starta nakon primitka ponovljenih potvrda nastavi sa izbjegavanjem zagušenja. Tako se povećava iskoristivost mrežnih resursa zato što se ne čeka na istek vremenskog brojača te ponovnog slanja. RTO procjena se vrši na temelju uzimanja RTT (engl. *Round Trip Time*) vremenskih uzoraka. RTO je dio mehanizma spori start koji upravlja prozorom zagušenja. Ako ACK potvrda ne stigne unutar RTO intervala, procjena RTO tajmera se mora poduplati. Udvostručenje RTO tajmera je vrlo bitan mehanizam kod pojava naglih RTO promjena čiji cilj je sprečavanje nepotrebnih retransmisija i izazivanje „pada“ mreže (svi paketi napuštaju mrežu i ona ostaje ne iskorištena). Usmjeravanje prometa u paketskim mrežama je pomoćni postupak izbjegavanju zagušenja, dok je kontrola toka glavni mehanizam. Bit prozorske kontrole toka je ta da se ograniči broj paketa koje može poslati izvor. Kod svakog gubitka paketa veličina prozora se smanjuje za pola i ovaj algoritam se naziva algoritam inkrementalnog povećanja i multiplikativnog smanjenja AIMD - a (engl. *Additive increase/multiplicative - decrease*) [9].

### **3.3.2. UDP (engl. *User Datagram Protocol*)**

UDP je razvijen za prijenos kratkih poruka za koje je TCP nepraktičan i kompleksan. UDP je pogodan za stvarno-vremenske aplikacije zato što uvodi manje kašnjenje i kolebanje kašnjenja u usporedbi sa TCP-om zbog nepostojanja mehanizma retransmisije. Zbog svoje bez konekcijske prirode nema potrebu za uspostavljanjem konekcije prije slanja paketa pa to omogućava UDP – u postizanje manjeg kašnjenja u usporedbi sa TCP-om. UDP nije pogodan za prijenos i to mu je glavni problem, pogodan je za prijenos aplikacija u realnom vremenu zato što kod većine ovakvih aplikacija nisu svi podaci važni da bi se ostvarila određena razina zadovoljstva korisnika (slučajevi gdje gubitak paketa nije prioritetan faktor za ostvarivanje određene razine kvalitete usluge) [9].

### **3.3.3. RTP (engl. *Real Time Protocol*)**

RTP je transportni protokol koji podržava prijenos u realnom vremenu, a razvijen je u cilju nadopune nedostataka UDP protokola. Usluge koje pruža RTP su: vremenska rekonstrukcija, otkrivanje izgubljenih paketa, sigurnost i identifikacija sadržaja. RTP je pogodan za više odredišno slanje. RTP omogućuje osnovne funkcionalnosti potrebne za prijenos stvarno-vremenskog prometa u paketskim mrežama kao što su vremensko označavanje, prepoznavanje vrste prometa, numeriranje paketa unutar niza itd.. Svi nabrojani mehanizmi se implementiraju u RTP zaglavlje. Vremensko označavanje je najvažniji podataka za stvarno-vremenske aplikacije. Predajnik upisuje trenutak uzorkovanja prvog uzorka, a nakon što je paket primljen prijemnik koristi vremenske oznake kako bi rekonstruirao podatke. Identifikacija sadržaja određuje format sadržaja, tip kompresije i kodiranja. U određenom trenutku prijensa izvor može slati samo jednu vrstu sadržaja, UDP ne isporučuje pakete vremenskim redoslijedom kako su poslani pa se koristi numeriranje paketa za pravilno slaganje na prijemu. Numeriranje također služi kao mehanizam za otkrivanje gubitaka paketa. Identifikacija izvora omogućuje aplikaciji na prijemniku da odredi sa kojeg izvora dolaze podaci (koristi se u video konferencijama) [9].

### **3.3.4. RTCP (engl. *Real Time Control Protocol*)**

RTCP je kontrolni protokol predviđen za rad zajedno sa RTP-om. Glavna uloga ovog protokola je nadzor kvalitete usluge i kontrola zagušenja, on daje povratnu informaciju aplikaciji o kvaliteti prijensa podataka [9].

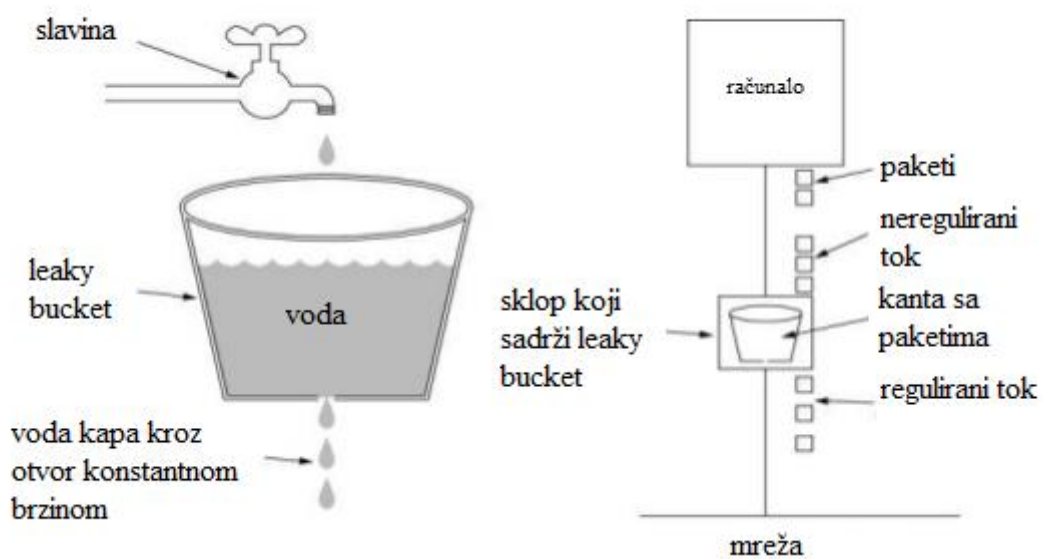
### **3.3.5. ECN (engl. *Explicit Congestion Notification*)**

ECN su metode razvijene u cilju izbjegavanja kašnjenja zbog retransmisije paketa nakon zagušenja. Uvodi markiranje paketa prije nego se odbace u cilju upozorenja na potencijalno zagušenje. Kontrola zagušenja se implementira na mrežnom sloju zato što se markiranje vrši u dijelu ToS polja IP paketa. Obavijest o zagušenju dolazi sa usmjerivača do izvora paketa u vremenu jednog RTT intervala koje je većinom kraće od RTO intervala. Kada primi označeni paket predajnik sa ECN mehanizmom reagira smanjenjem stvaranja prometa (isti slučaj kao da je registrirao odbacivanje paketa) [9].

### 3.4. Oblikovanje prometa

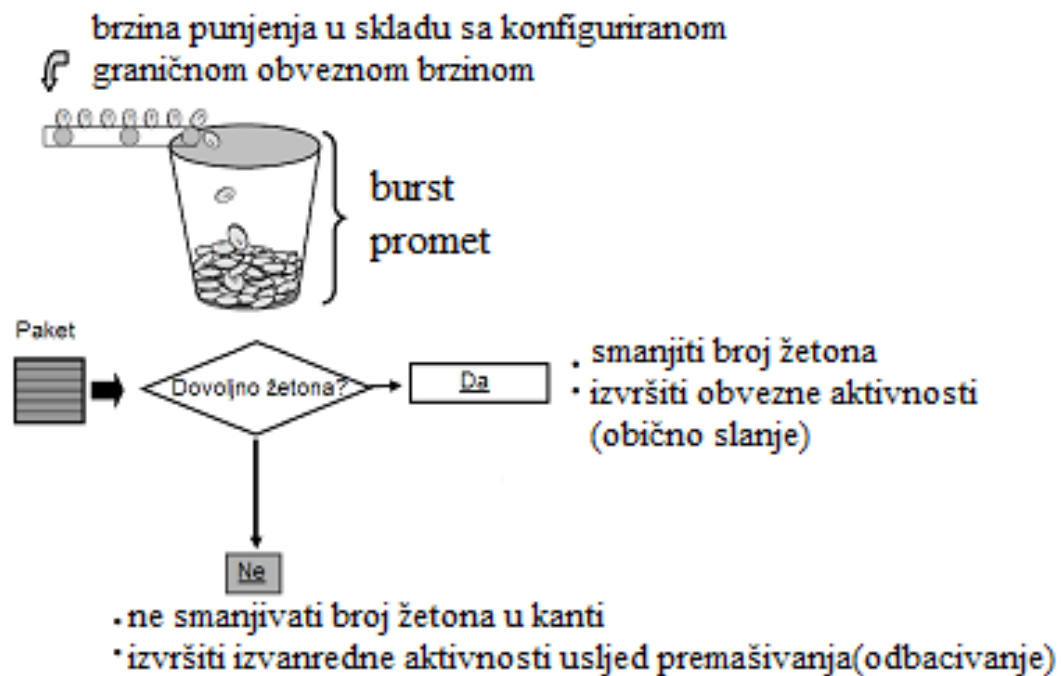
Oblikovanje prometa je zapravo kontrola brzine i količine prometa koji ulazi u mrežu. Obično se odvija između predajnika podataka i čvorova na rubu mreže. Ograničenje prometa (engl. *traffic policing*) predstavlja mehanizam koji ograničava propusni opseg za određeni tip prometa. Glavne metode oblikovanja prometa su „Token bucket“ i „Leaky bucket“.

Leaky bucket metoda (slika 3.4.1.) održava odlazni promet na konstantnoj brzini bez obzira na brzinu dolaznog prometa. Svi paketi koji „preliju“ leaky bucket se odbacuju. Izlazna brzina i veličina leaky bucket-a se mogu podešavati.



Slika 3.4.1. Figurativni prikaz leaky bucket metode [9].

Token bucket metoda omogućava izlaznim paketima da napuštaju token bucket onom brzinom kojom i pristižu, ali samo u slučaju da nisu potrošeni svi žetoni. Žetoni se generiraju fiksnom brzinom i spremaju u token bucket sve dok se on ne napuni. Troše se prilikom izlaza paketa iz token bucket-a. Na ovaj način je omogućeno da se i burst promet propušta, ali on troši više žetona.



Slika 3.4.2. Token bucket ograničavač brzine [9].

Svaki žeton je zapravo paket informacije (bajt informacije), ovisi o proizvođaču. Usmjerivač vrši prosljeđivanje paketa i istovremeno uklanja žetone iz kante jednakom brzinom kojom se paketi prosljeđuju. Za razliku od Leaky bucket metoda Token bucket nema plan odbacivanja paketa, već ostavlja redu čekanja da odluči o tome. Parametri koji karakteriziraju Token bucket su promjenjiva veličina žetonskog „lijevka“ i brzina generiranja žetona. Token bucket se može koristiti zajedno sa Leaky bucket metodom, npr. promet se prvo oblikuje Token bucket metodom a potom se Leaky bucket metodom ukloni neželjeni burst promet [9].

### 3.4.1. Klasifikacija prometa

Klasifikacija prometa se može obavljati na razini toka ili na razini paketa. Mehanizmi zaduženi za klasifikaciju prometa provjeravaju predodređena polja u zaglavlju paketa i određuju kojem toku pripada određeni paket [9].

### **3.4.2. Označavanje paketa**

Označavanje paketa se radi promjenom vrijednosti određenog polja u zaglavlju paketa koje je standardizirano za različite implementacije mreža. Označavanje se vrši prema specifičnoj klasi usluge koju zahtijevaju. Paketi se označavaju na izvoru informacije ili na nekom čvoru mreže. Kriterij za označavanje se mora dinamički podešavati ovisno o promjenama stanja u mreži, a za dinamičku konfiguraciju može se koristiti RSVP protokol [9].

### **3.4.3. Upravljanje prometom**

Upravljanje prometom rade mehanizmi koji određuju da li promet između dva čvora na određenom toku odgovara dogovorenoj razini usluge (SLA). Paketi koji ne odgovaraju dogovorenom SLA se odbacuju [9].

## 4. QOS PODRŠKA U PLC KOMUNIKACIJI

QoS je skup mehanizama koji računalnim mrežama omogućuju pružanje bolje usluge za izabranu mrežnu tehnologiju (Ethernet, IP, 802.3 itd.). QoS pruža poboljšane mrežne servise kao što su rezervirani propusni opseg, minimiziranje gubitaka paketa, oblikovanje i prioritiziranje prometa, upravljanje i izbjegavanje zagušenja. Osnovne karakteristike kojima QoS definira kvalitetu usluge su kašnjenje, kolebanje kašnjenja (jitter) i gubitak paketa [7].

Kašnjenje je definirano kao vrijeme potrebo da paket dođe od izvora do odredišta. Sastoji se od fiksnog i promjenjivog kašnjenja. Kolebanje kašnjenja ili jitter je razlika u vremenima kašnjenja paketa u istom toku. Gubitak paketa je postotak paketa koji ne stižu do odredišta, potiče od grešaka u mreži, oštećenih paketa te naročito zagušenih mreža. Mnogi paketi koji se izgube u optimiziranim mrežama se namjerno uklone da bi se spriječila zagušenja. Za mnoge TCP/IP bazirane prometne tokove kao što su servisi za udaljeni pristup datotekama inzistiranje na malom postotku gubitka paketa nema smisla jer će TCP/IP mehanizam retransmisije kad - tad omogućiti stizanje paketa. Kod UDP prometa koji koriste stvarno-vremenske aplikacije retransmisija nije moguća i samim time tolerancija gubitaka paketa mora biti minimalna. Postoje tri modela QoS-a (best - effort, integrated services, differentiated services). Izabrani QoS model mora biti usklađen sa zahtjevima koje podržava mreža, isto tako i sa integracijom raznovrsnih mrežnih aplikacija [7]. PLC mreže moraju osigurati garanciju kvalitete usluge. Elektroenergetska mreža je „neprijateljsko“ okruženje komunikaciji i prijenosu podataka. PLC uređaji bi trebali raditi sa malim snagama signala kako ne bi prelazili granice regulative Europske unije (CENELEC EN 50065), koja ih obavezuje na korištenje frekvencijskog spektra od 9 kHz do 140 kHz. Smetnje kao što su obojeni pozadinski šum, uskopojasni šum i impulsni šum kojeg uzrokuje paljenje i gašenje svih uređaja u električnoj mreži. Dvije modulacijske tehnike CDMA i OFDM, su izvrsno rješenje za prije navedene probleme. Upravo zbog te činjenice se većina današnjih PLC tehnologija fokusira na dizajniranje prikladnih MAC pod slojeva. Većina današnji stvarno-vremenskih aplikacija koristi navedeni standardni Internet protokol. Očigledno je da sam MAC protokol nije dovoljan da bi se osigurala QoS usluga s kraja na kraj, stoga je važno uzeti u obzir performanse TCP/IP protokola preko PLC MAC sloja. Adresiranje TCP performansi sa PLC-om kao podmrežom je težak zadatak. Visoka varijabilnost i nepredvidive razine impedancije, gušenja i šum signala vode do niskih brzina prijenosa i lošoj kvaliteti signala. PLC sustavi implementiraju dinamično upravljanje kanalima kako bi se vremenski prilagodila kvaliteta PLC kanala što vodi većim brzinama prijenosa. Uz ove činjenice procjena vremena odgovora poruke koju zahtijevaju



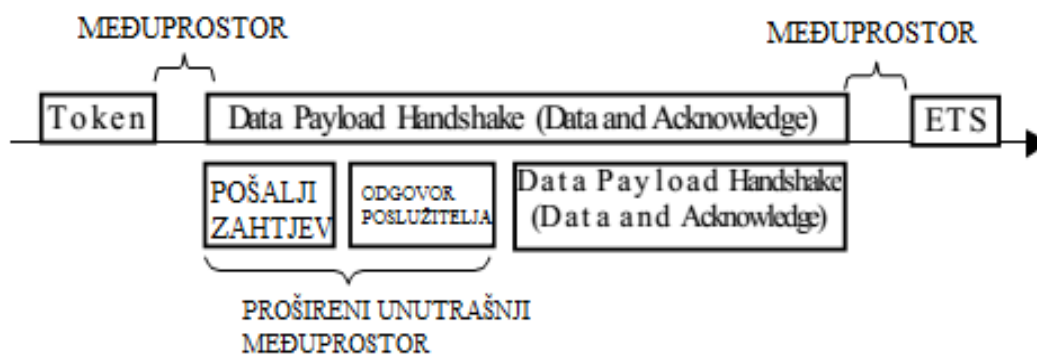
stvarno-vremenske aplikacije postaje relativno teška. Istovremeno postotak izgubljenih paketa i ne točno vrijeme retransmisije (RTO) smanjuju performanse TCP-a [8].

#### **4.1. PLC MAC protokoli za QoS podršku**

Postoje dvije mogućnosti organizacije srednjeg pristupnog sloja, statička i dinamička. Statički pristup rezervacije je prikladan za kontinuirani promet, ali ne i za „praskavi“ promet koji je tipičan kod prijenosa podataka u kućnim mrežama. Dinamičke pristupne sheme prikladne su za prijenos podataka i u nekim slučajevima bi trebale omogućiti drugačiju kvalitetu usluge, onu koja nije najbolje moguće da bi osigurali zadovoljavajuću kvalitetu prijenosa vremenski kritičnom prometu. Generalno postoje dvije grupe pristupnih dinamičkih protokola: skup protokola bez kolizije (engl. *token passing*) i konkurirajući bazirani protokoli (CSMA/CA) [8].

##### **4.1.1. „Token passing“ metoda**

Zbog prijenosa podataka PLC mrežom koja je po prirodi visoko šumovita i prepuna smetnji, mogućnost gubitka tokena je vrlo visoka. Zbog toga je centralizirani „token passing“ (engl. *Centralized Token Passing - CTP*) pouzdaniji od distribuiranog „token passing – a“. U CTP-u postoji aktivni MAC poslužitelj koji je na neki način središnja upravljačka jedinica distribucije tokena koja ima funkciju arbitraže zahtjeva tokena. Sistematski dodjeljuje tokene onim aktivnim stanicama koje žele transmitirati. Da bi se povećala efikasnost mreže sustav omogućava ne aktivnim stanicama da se isključe iz sheme upravljanja tokenima. Ako u sustavu ne postoji prijenos određenog vremenskog perioda on automatski prelazi u „tihi“ način rada i tako u cijelosti eliminira prolaz tokena zajedno sa MAC poslužiteljem. Kada jedna od stanica poželi transmitirati nakon nekog vremena, ona detektira da u sustavu ne postoji aktivni MAC poslužitelj. Prvo je potrebno da si dodjeli ulogu MAC poslužitelja prije transmisije kako bi sustav ponovno postao aktivan i kako bi počeo retransmisiju informacije. Kada druge stanice detektiraju aktivni MAC poslužitelj moraju poslati zahtjev poslužitelju i čekati njegov odgovor. Nakon što poslužitelj prihvati zahtjev stanice, ta stanica može transmitirati paket nakon što joj se dodjeli token. CTP vremensko upravljanje protokolom prikazano je na slici 4.1.1.1. [8].



Slika 4.1.1.1. CTP vremensko upravljanje [8].

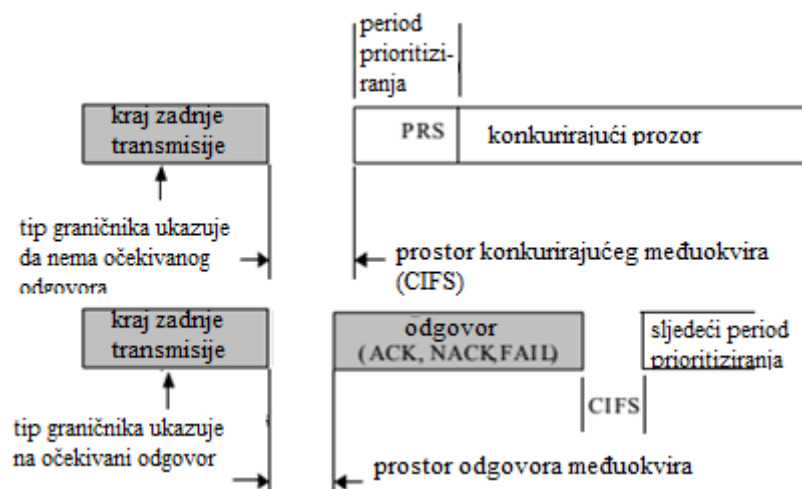
Klijent definira QoS zahtjeve u trenutku kada pošalje naredbu sa zahtjevom, tako pružajući svoju odredišnu adresu i određene QoS zahtjeve (npr. vrijeme života, trajanje, prioritet i profil). Nakon toga aktivni MAC poslužitelj prema zahtjevima klijenata izradi prioritiziran plan upravljanja. CTP protokol nudi drugačiju razinu prioritiziranja podataka koju zahtjeva aplikacija pokrenuta na određenoj stanici. Prioritete koristi aktivni MAC poslužitelj kako bi odlučio koji klijent (višeg prioriteta) je uključen u plan upravljanja i koji je isključen (niski prioritet). Kada je iskorištena maksimalna propusnost sustav će odbijati daljnje zahtjeve da bi se izbjeglo zagušenje [8].

Vrijeme života ukazuje na dužinu vremena unutar kojeg klijentska stanica želi ostati u planu upravljanja aktivnog MAC poslužitelja bez upotrebe tokena. To je inicijalna vrijednost korištena da se odredi „starost“ određene stanice koja je izvan plana upravljanja. MAC poslužitelj bi trebao minimizirati nepotreban promet tokena. Resursi sustava i njegova propusnost se koriste kako bi se upravljalo aktivnim korisnicima i kako bi se povećao kapacitet i performans cjelokupnog sustava. Profili su važna prednost mehanizma kvalitete usluge, oni predstavljaju tri bitna atributa: latenciju, konkurentnost i propusnost. Aktivni MAC poslužitelj je dodijeljen planu upravljanja tokenima koje pruža svim nisko-latentnim korisnicima garantiranu uslugu za njihove stvarno-vremenske aplikacije. Ako se dostigne vrh popunjenosti profila što znači da su zauzeti svi resursi sustava, odbijaju se svi zahtjevi nadolazećih korisnika bili oni istog ili nižeg prioriteta, a ako poslužitelj zaprimi zahtjev od klijenta višeg prioriteta sustav će ga prihvatiti i dalje mu garantirajući najbolju uslugu, ali će otkazati uslugu klijentu sa najmanjim prioritetom u sustavu [8].

#### 4.1.2. CSMA/CA

CSMA/CA se prvobitno koristio u IEEE 802.11 tehnologiji, kasnije je unaprijeđen i koristi se u većini PLC protokola. PLC koristi i fizički i virtualni sloj nosilaca (engl. *PCS – physical carrier sense* i *VCS – virtual carrier sense*) kako bi zaključio koja od stanica transmitira. PSC je dio fizičkog sloja. Kada se otkrije polje kontrolnog okvira paketa, MAC utvrđuje VSC koji prati

očekivano trajanje zauzetosti kanala zapisano u kontrolnim poljima okvira. Medijski pristup se temelji na nasumičnom konkurirajućem prozoru sa eksponencijalnim prilagođavanjem prijenosa (engl. *Backoff*), slično kao kod Ethernet-a. Da bi stanica transmitirala mora „poznavati“ medij, kako bi odlučila dali neka od ostalih stanica transmitira. Ako je medij u stanju mirovanja okvir se trenutno transmitira, a ako je medij aktivan, medijski pristup određuje konkurirajući prozor koristeći nasumično „backoff“. Sve stanice će se pozvati na proceduru nasumičnog backoff-a kada je paket predviđen za transmisiju, a medij prijenosa je zauzet. Prateći prioritet vremena rješavanja svaka stanica nasumično izabire transmisijski odsječak u konkurirajućem prozoru. „Backoff“ tajmer će se smanjiti za jedan za svaki vremenski odsječak za koji se otkrije da je u stanju mirovanja. Kada „Backoff“ tajmer poprimi vrijednost nula, stanica može transmitirati. Za razliku od konvencionalnih žičnih Ethernet stanica; stanica ne može detektirati koliziju dok transmitira. Ako transmisijska stanica ne dobije ACK paket od primarne stanice dolazi do kolizije. Da bi se ispunili QoS zahtjevi protokol koristi nekoliko razina prioritiziranih planova upravljanja kašnjenjem za različite tipove podataka. Također koristi „segment bursting“ i pristup bez natjecanja kako bi pružio nisku razinu kašnjenja i kolebanja kašnjenja. Slika 4.1.2.1. grafički prikazuje princip rada CSMA/CA protokola u „Homeplug“ PLC uređaju [8].



**Slika 4.1.2.1.** Princip rada CSMA/CA

Konkurirajućem prozoru prethodi vremenski period rješavanja prioriteta koji sužava izbor stanica na one sa najvećim prioritetom. Kada jedan čvor završi prijenos drugi čvor sa paketima se predodredi za transmisiju i signalizira dugim čvorovima svoj prioritet. Čvor sa najvišim prioritetom ima najmanje vrijeme čekanja dok čvor sa najnižim prioritetom ima najduže vrijeme čekanja. To znači da različiti prioriteti imaju različito maksimalno „backoff“ vrijeme. Samo onaj čvor koji zadovolji sve uvjete ostvaruje pristup prijenosnom mediju. CSMA/CA je konkurirajući protokol što znači da nema ne determinističku latenciju. PLC protokol koristi „segment bursting“

način zajedno sa ne konkurirajućim načinom rada kako bi ostvario najbolje moguće uslugu i nisku latenciju. Zbog vremenski varijabilne karakteristike šuma i prigušenja elektroenergetske mreže PLC koristi vrlo kratke pakete podataka. „Segment bursting“ način omogućava da se svi paketi unutar jednog bloka transmitiraju „back to back“ sve dok ih ne prekine veći prioritet okvira tako omogućavajući okvirima većeg prioriteta da „uskoće“ između sporih transmisijskih segmenata. Ekstenzija „segment bursting“ mehanizma pruža bez konkurencijski pristup prijenosnom mediju na način da čvor konkurira sa najvećim prioritetom. Jednom kada čvor ostvari pristup prijenosnom mediju, on ostaje u njegovoj kontroli. Bez konkurencijski način rada sadrži popis svih MAC adresa i broj adresa koje se nalaze na listi. Na listi može biti više adresa ili nijedna adresa. Ako se koristi bez konkurencijski način rada koji na listi ima samo svoju adresu, takav čvor može implementirati jednostavni „poll and response“ pristupni mehanizam. Ako na listi postoji više MAC adresa koristi se „token passing“ metoda. Kombinirajući oba mehanizma (engl. *poll and response* i *token passing*), čvor može ostvariti pristupni mehanizam koji koristi prednosti od oba i tako omogućiti suradnju više logičnih mreža [8].

#### **4.1.3. TCP/IP**

Većina aplikacija radi preko standardnog TCP/IP protokola stoga bi garancija kvalitete usluge trebala biti osigurana na TCP razini. IP sloj se koristi samo za Internet adresiranje i ne utječe niti na pouzdanost niti na kašnjenja u mreži, dok korištenje TCP-a može utjecati na kašnjenje zato što on koristi ACK i ARQ kao i MAC sloj. Na nesreću TCP je dizajniran i optimiziran za žične mreže u kojima nastaju gubici paketa većinom zbog zagušenja nego zbog transmisijskih pogrešaka. To dovodi u pitanje pouzdanost TCP-a kao protokola u PLC mrežama, pošto u njima većina gubitaka nastaje transmisijskim pogreškama i „sporim startom“ što dovodi do smanjene propusnosti. Aplikacije koje rade preko UDP/IP/PLC nemaju takvih problema. Činjenica je da TCP pogrešno protumači gubitak paketa kao znak zagušenja što prisili TCP da odustane od danje transmisije, smanji prozor zagušenja i kao rezultat dobije drastično manju propusnost. Ovo je postala najveća mana TCP-a u PLC-u. Konekcija ostaje u dugim periodima mirovanja u kojima pošiljalatelj u stanju mirovanja čeka „timeout“, kada je paket konačno retransmisiran prozor zagušenja se smanji na jedan segment što smanjuje propusnost sve dok se prozor ne vrati na optimalnu veličinu. Unaprijeđeni TCP protokol naziva TCP Westwood (TCPW) ima bolju politiku kod gubitaka paketa uzrokovanih pogreškom. TCPW je dizajniran za bežične mreže, čiji problemi su slični onima u PLC komunikaciji. Ključna inovativna ideja je da se kontinuirano mjeri „packet error rate“ pošiljalatelja nadzirući postotak vraćenih ACK-ova. Procjena utemeljena na tom mjerenju se koristi za izračun prozora zagušenja i sporog starta nakon toga [8].

TCP implementira pouzdanu isporuku podataka tako što retransmitira segmente koji nisu prihvaćeni unutar određenog retransmisijskog timeout intervala (RTO). Da bi se osiguralo da se paketi koji su trenutno u prijenosu ne retransmisiraju prerano, TCP uzima u obzir i „smoothed round-trip“ vrijeme estimacije i linearnu devijaciju za svoj timeout algoritam. Točna dinamička determiniranost prikladnog RTO-a je esencijalna za dobre performanse TCP-a. RTO se računa na temelju varijacije izmjerenog „round-trip“ vremena (RTT) (vrijeme između slanja segmenta i primitka njegove potvrde). Precizna i točna procjena RTT-a su nužni za prilagodbu promjenjivih uvjeta prometa i kako bi se izbjegla nestabilnost sustava poznata kao „congestion collapse“. [8]

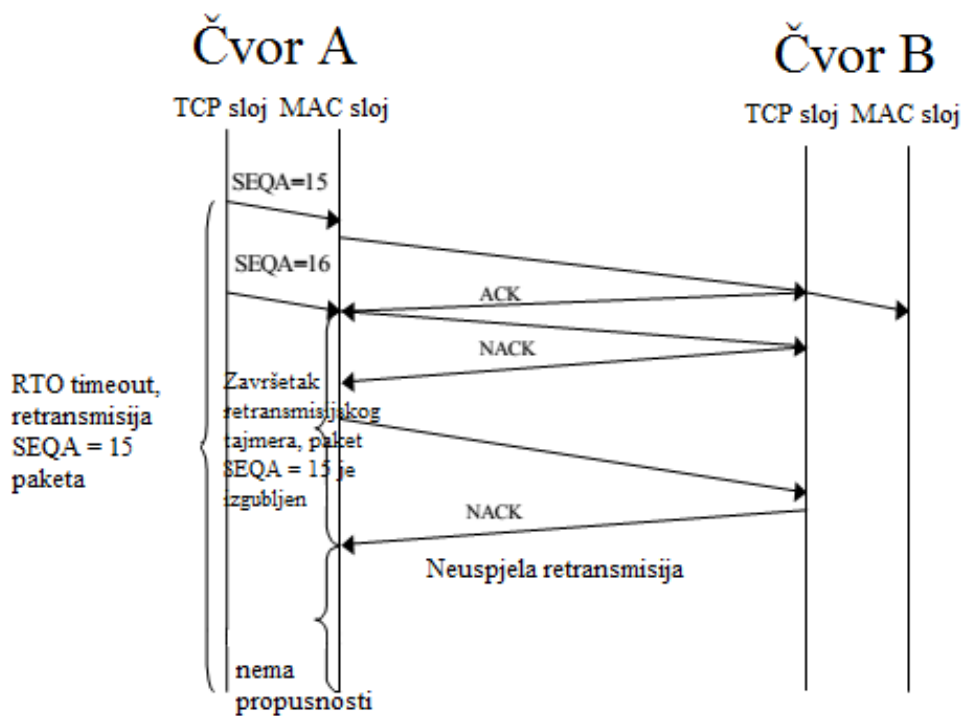
MAC protokol koristi ARQ mehanizam u borbi sa visokim bit error-om. Broj retransmisija varira, a uz to i menadžment kanala uzrokuje dodatne varijacije. Prilagodba kanala se povremeno pojavljuje, temeljena ili na MAC timeout-u ili na detekciji promjena unutar kanalnih prijenosnih funkcija. Prema informacijama dobivenih iz stvarno-vremenskih mjerenja kvalitete kanala, pošiljalatelj će prema tome podesiti „bit-time“ ili „symbol-time“ modulacijski plan zajedno sa kodovima za ispravljanje pogrešaka kanala i odabir kanala. Prema Inari protokolima računamo efektivni bit rate MAC sloja različitim modulacijama i FEC rate – om prikazano na slici 4.1.3.1. Bit rate je promjenjiv što vodi ka promjenjivom RTT-u TCP pošiljalatelja i problemu konfiguracije RTO-a [8].

Stanje	Bit rate po kanalu	Broj kanala	Efektivni MAC sloj bit rate
Korišteni loši kanali	56 Kbps	8	0.448 Mbps
Korišteni dobri kanali	302 Kbps	120	36.24 Mbps

**Slika 4.1.3.1.** Inari efektivni bit rate MAC sloja [8].



2. Velika RTO procjena – kada tajmer retransmisije MAC sjednice dostigne maksimalno vrijeme, ona proglaši neuspjeh i odbaci paket koji je od tog trenutka izgubljen. RTO ne ističe što znači da pošiljalatelj još uvijek čeka ACK paketa kako bi prilagodio veličinu prozora. Čekanje se nastavlja dok RTO ne istekne, time smanjujući propusnost mreže. Primjer problema je prikazan slikom 4.1.3.3.. Paket SEQA = 16 je poslan nakon SEQA = 15 paketa, ali ova transmisija je neuspjeh. Primatelj na MAC sloju šalje NACK pošiljalatelju upit za ponovnom transmisijom okvira. MAC sloj nekoliko puta pokušava retransmisirati okvir. Nakon što je isteklo vrijeme MAC sloj odustaje od retransmisije, dok pošiljalatelj ostaje u stanju mirovanja i čeka ACK do isteka RTO. Propusnost je jednaka nuli u tom trenutku [8].



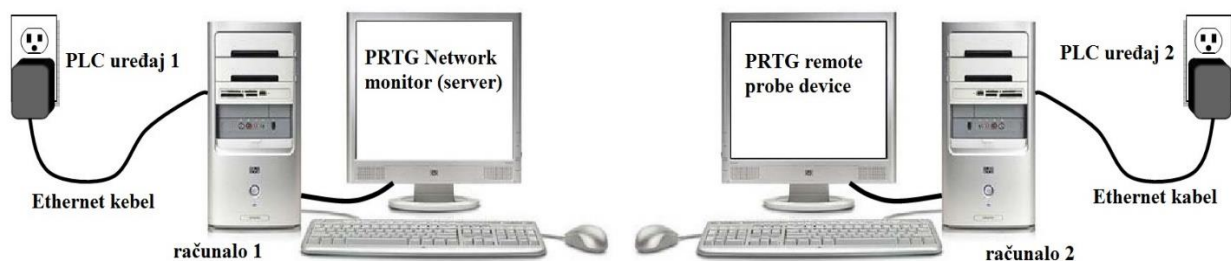
Slika 4.1.3.3. Problem velikog RTO [8].

## 5. TESTIRANJE PLC KOMUNIKACIJE I ANALIZA KVALITETE USLUGE

Testiranje PLC komunikacije se radi na postavljenoj PLC mreži unutar kućanstva kako bi dobili što realnije rezultate mjerenja. Instaliranu PLC mrežu analizira PRTG Network monitor, besplatni programski alat. Nakon izvršenih mjerenja i analiza, ponavljaju se mjerenja na WiFi kućnoj mreži kako bi usporedili dobivene rezultate i donijeli zaključke.

### 5.1. Testna PLC i WiFi mreža

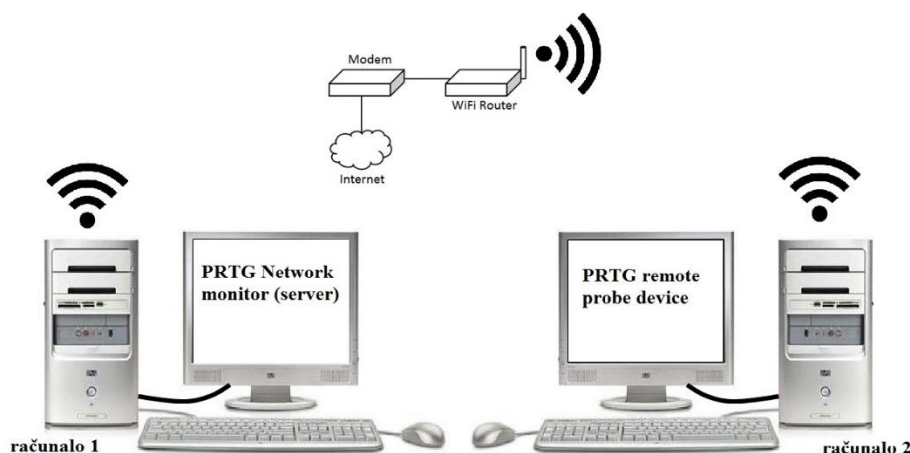
Testna PLC mreža (slika 5.1.1.) se sastoji od dva PLC uređaja (AUSO Power Line Communication) i dva računala. Računala su povezana sa PLC uređajima Ethernet kabelom, a PLC – ovi su uključeni u kućne utičnice elektroenergetske mreže. Jedno računalo je postavljeno kao poslužitelj i na njega se instalira PRTG programski alat, dok je drugo računalo postavljeno tako da bude udaljeni testni čvor (engl. *remote probe device*). PRTG analizira QoS parametre mreže.



**Slika 5.1.1.** Figurativni prikaz testne PLC mreže

Nakon što se testira PLC mreža, isključe se PLC uređaji i računala se umreže putem WiFi mreže (slika 5.1.2.). Oba računala ostaju u istim ulogama, jedno kao poslužitelj i drugo kao udaljeni testni čvor. PRTG-om se analizira QoS i prikupljaju podaci.





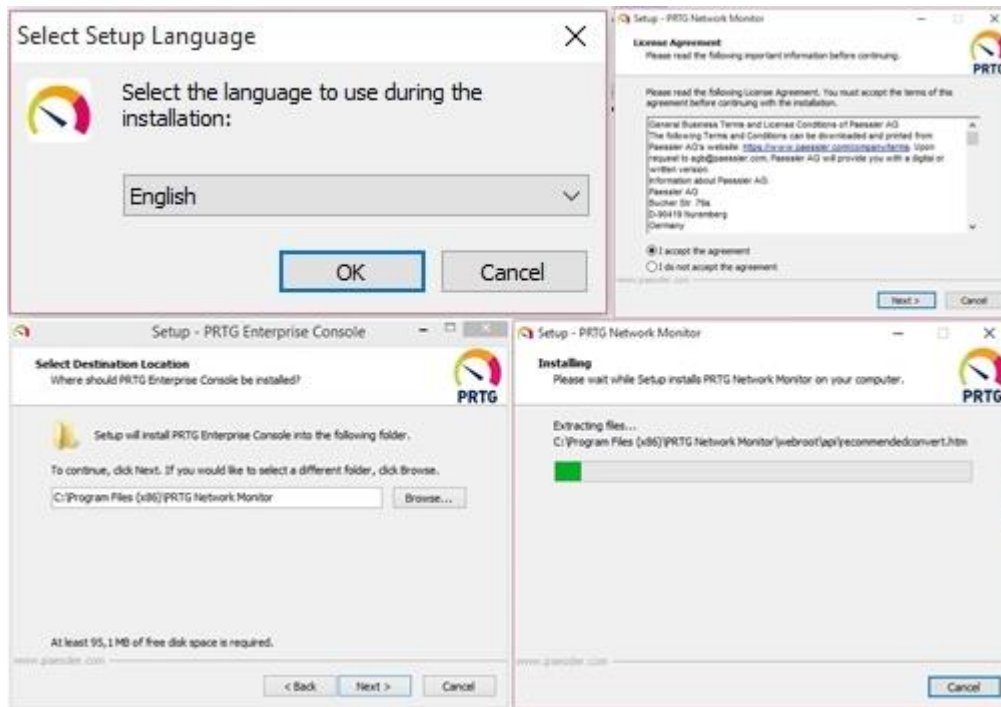
**Slika 5.1.2.** Figurativni prikaz testne WiFi mreže

## **5.2. PRTG Network monitor i PRTG Remote probe programski alati**

PRTG Network monitor i PRTG Remote probe su besplatni programski alati dostupni za preuzimanje na <https://www.paessler.com/prtg/download>. PRTG nudi rješenje za profesionalni stalni nadzor mreže. Nakon instalacije i pokretanja automatski pronalazi sve uređaje i čvorove na mreži. Nadzire sve mrežne parametre i alarmira mrežnog administratora ukoliko neki segment mreže ne radi ili pokazuje grešku. Također nadzire tko i kada koristi internetsku mrežu, prikuplja sve podatke i pohranjuje ih u bazu podataka radi mogućnosti kasnijeg pristupa informacijama. Unutar alata je sadržano više od sto različitih senzora za nadzor lokalne internetske mreže. Jedan od senzora je QoS senzor koji na odabranoj mreži, između dva unaprijed odabrana čvora testira i analizira QoS parametre. Instalacija i konfiguracija PRTG-a je objašnjena u sljedećim poglavljima.

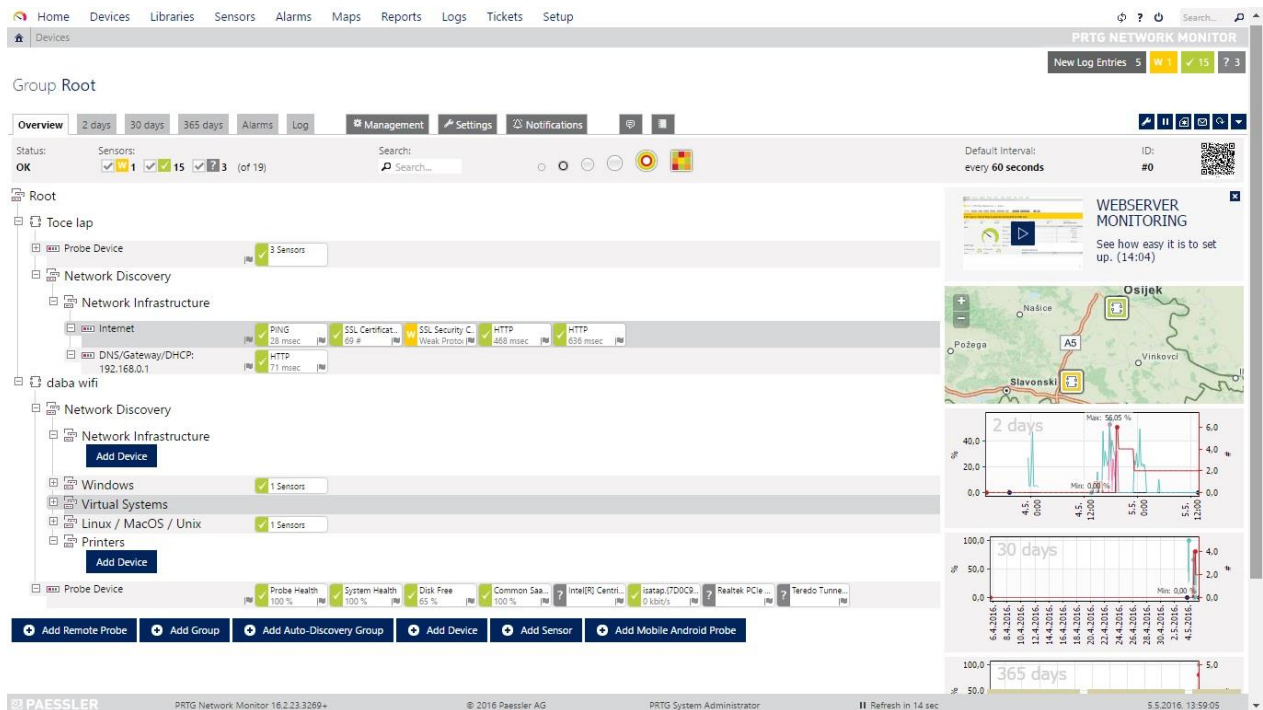
### **5.2.1. Instalacija PRTG Network monitora**

Instalacija PRTG-a je laka i slična instalaciji drugih Windows aplikacija. Nakon otvaranja preuzete datoteke, dvoklikom na instalacijsku aplikaciju se pokreće instalacija. U prvom koraku odabiremo jezik instalacije (slika 5.2.1.1.). Nakon odabranog željenog jezika instalacije, klikom na gumb OK se pokreće sljedeći korak instalacije, čarobnjak za instalaciju (slika 5.2.2.1.).



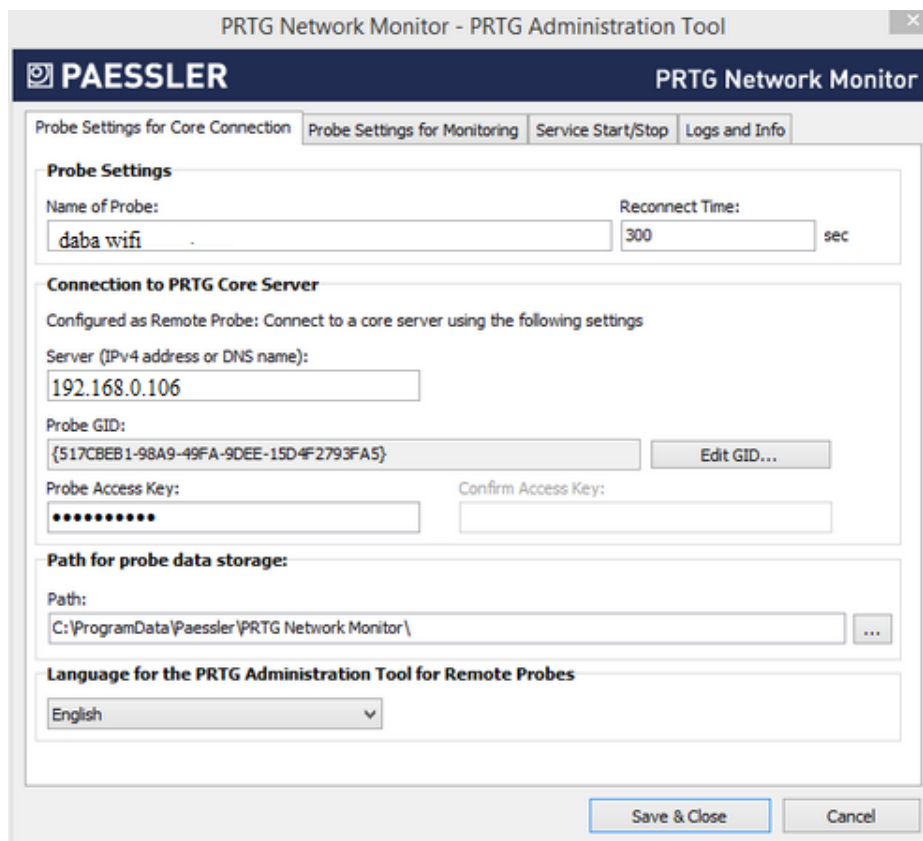
Slika 5.2.1.1. Korak 1 - 4

Nakon završetka instalacije potrebno je pokrenuti i konfigurirati PRTG alat. Kod prvog pokretanja PRTG sam skenira lokalnu mrežu na koju je spojen i prikazuje sve uređaje i korisnike u mreži (slika 5.2.1.2.).



Slika 5.2.1.2. Skenirana mreža sa svim uređajima unutar mreže

PRTG remote probe alat se instalira na računalo spojeno na mrežu koje će se ponašati kao udaljeni testni čvor na koju će se slati UDP paketi. Nakon instalacije alat se sam pokreće i traži konfiguraciju (slika 5.2.1.3.), potrebno je upisati ime testnog čvora i IP adresu računala koje je u ulozi PRTG poslužitelja (u ovom slučaju 192.168.0.106).

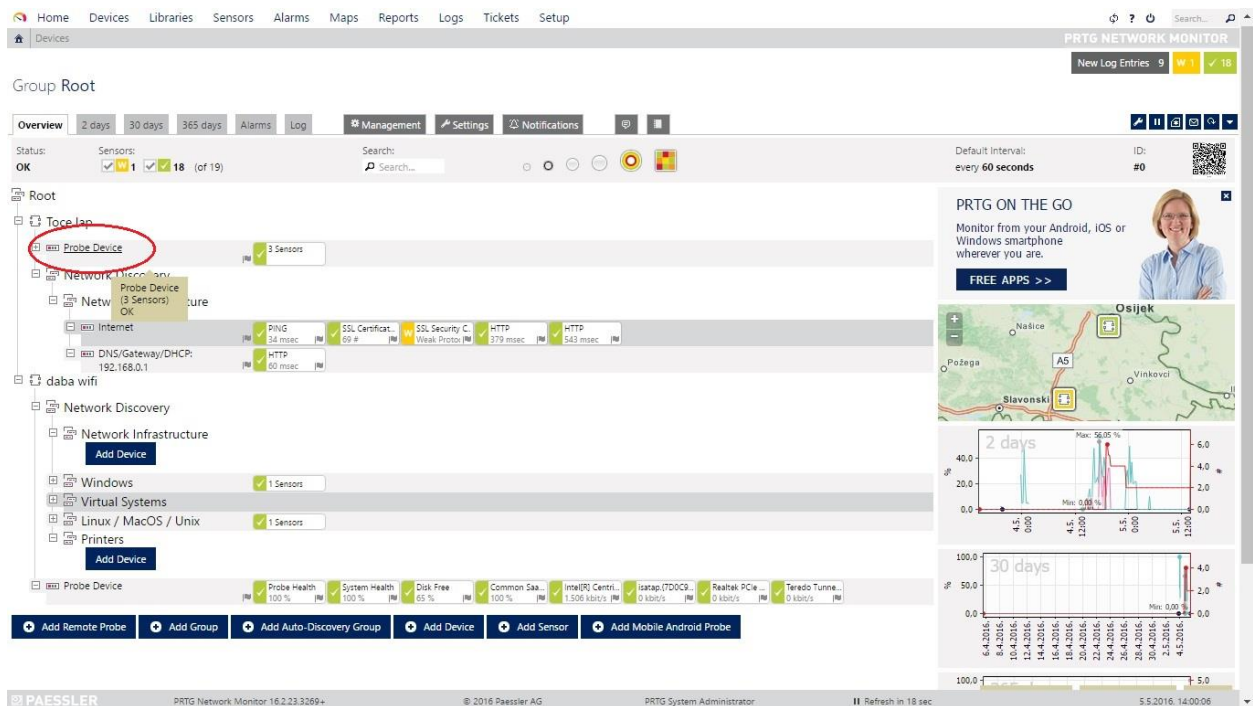


The screenshot shows the 'PRTG Network Monitor - PRTG Administration Tool' window. The title bar includes the Paessler logo and the text 'PRTG Network Monitor'. The window has four tabs: 'Probe Settings for Core Connection', 'Probe Settings for Monitoring', 'Service Start/Stop', and 'Logs and Info'. The 'Probe Settings for Monitoring' tab is active. The 'Probe Settings' section contains a text box for 'Name of Probe' with the value 'daba wifi' and a 'Reconnect Time' spinner box set to '300' seconds. The 'Connection to PRTG Core Server' section is titled 'Configured as Remote Probe: Connect to a core server using the following settings'. It includes a 'Server (IPv4 address or DNS name)' text box with '192.168.0.106', a 'Probe GUID' text box with a GUID value and an 'Edit GUID...' button, and 'Probe Access Key' and 'Confirm Access Key' text boxes with masked characters. The 'Path for probe data storage' section has a 'Path' text box with 'C:\ProgramData\Paessler\PRTG Network Monitor\' and a browse button. The 'Language for the PRTG Administration Tool for Remote Probes' section has a dropdown menu set to 'English'. At the bottom right are 'Save & Close' and 'Cancel' buttons.

Slika 5.2.1.3. Konfiguracija PRTG remote probe

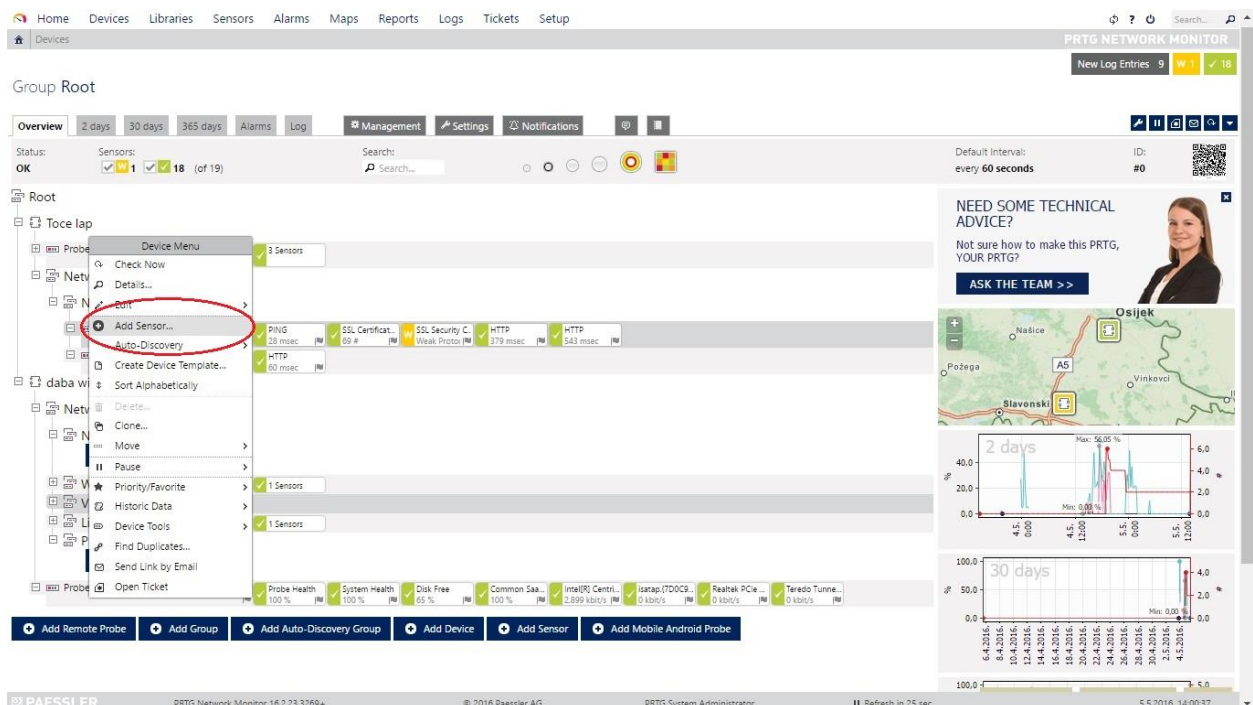
### 5.3. Testiranje kvalitete usluge na UDP protokolu

Mjerenje parametara kvalitete usluge se odvija između dva mrežna čvora. Prvi korak je da se na dva računala instaliraju potrebni PRTG programski alati (jedno računalo je PRTG poslužitelj, a drugo udaljeni testni čvor). Računala se povezuju PLC uređajima, a za drugo mjerenje WiFi mrežom. Sljedeći korak je instalacija QoS senzora. Senzor se instalira na testni čvor lokalne mreže (slika 5.3.1.).



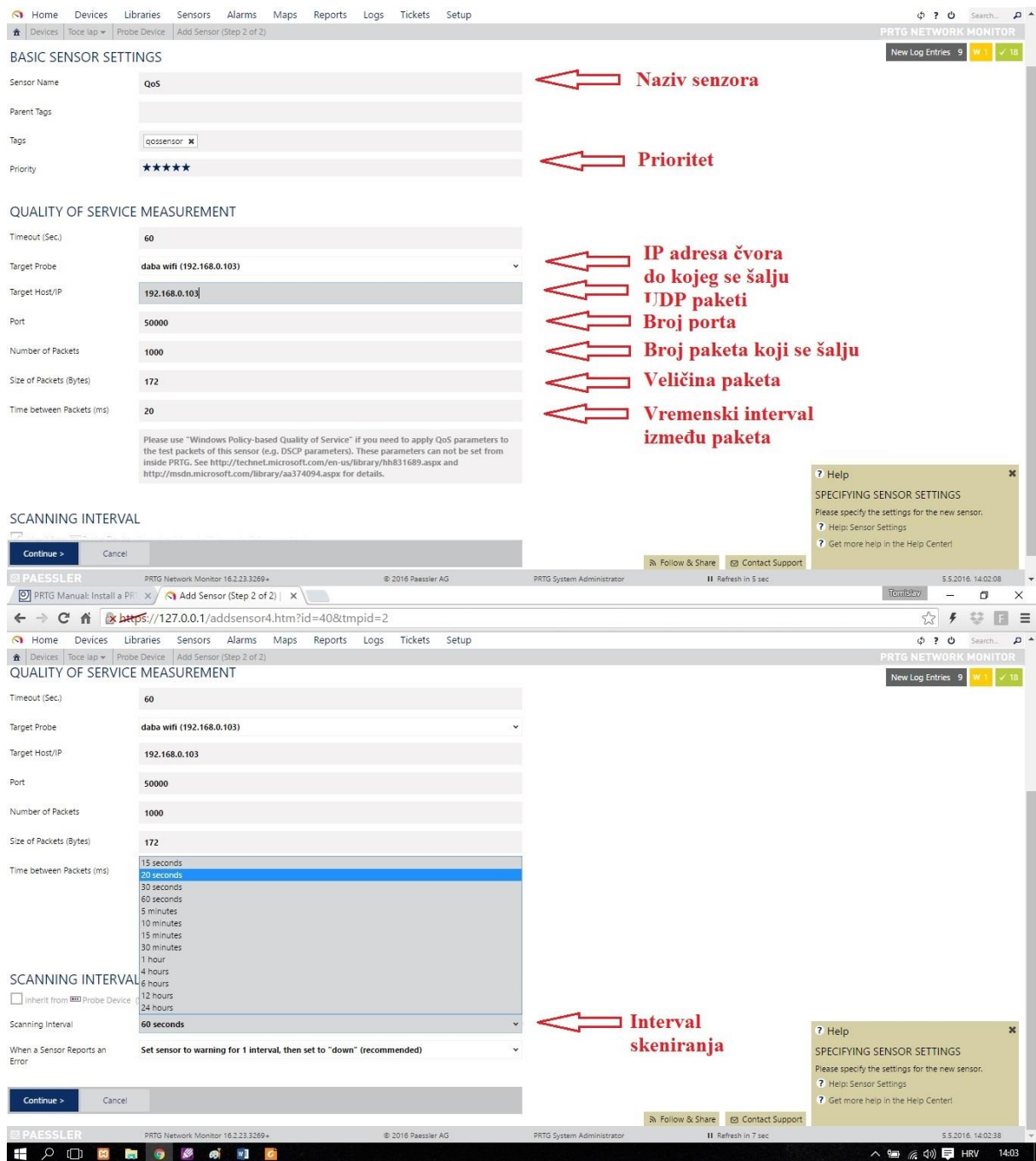
Slika 5.3.1. Testni čvor na kojeg se instalira QoS senzor

Desnim klikom na testni čvor, otvara se padajući izbornik u kojem treba odabrati opciju „Add Sensor“ (slika 5.3.2.).



Slika 5.3.2. „Add Sensor“ opcija

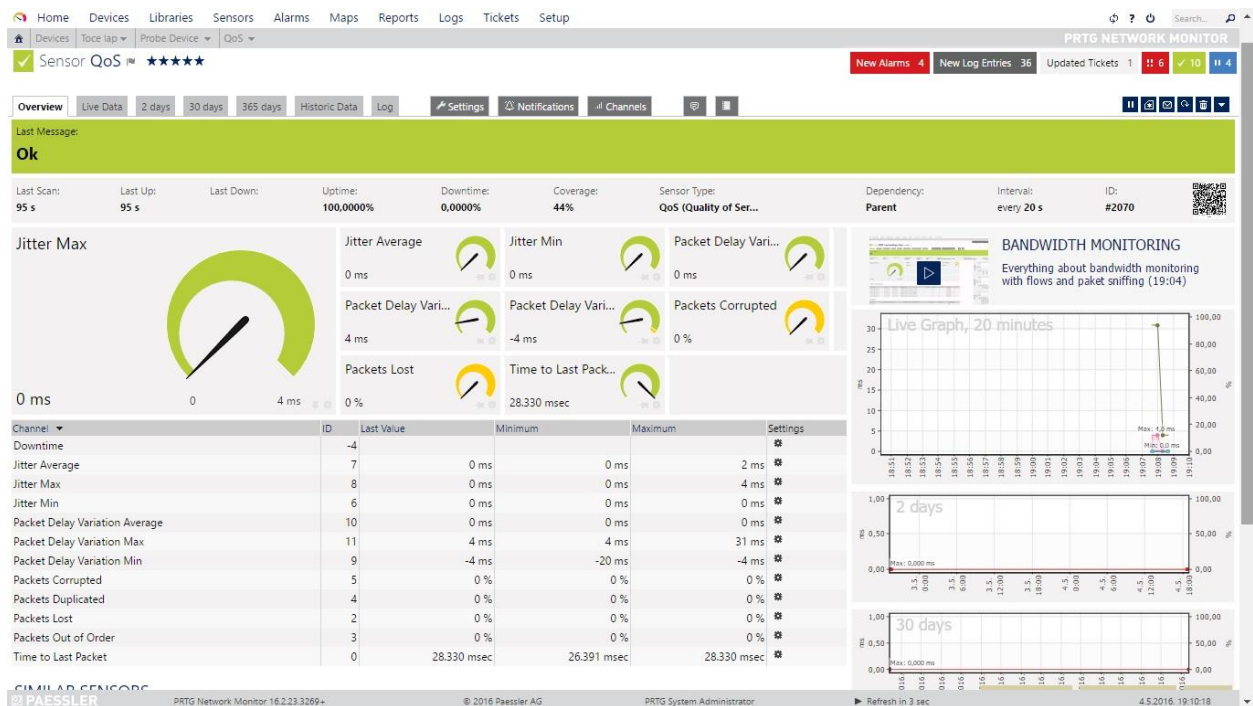
Nakon odabira opcije „Add Sensor“ otvara se izbornik sa sensorima unutar kojeg je potrebno odabrati QoS senzor. Senzor je dodan na testni čvor, ali ga je potrebno konfigurirati kako bi pravilno radio i krenuo bilježiti podatke. Kod konfiguracije je potrebno upisati naziv senzora, odabrati njegov prioritet, upisati IP adresu udaljenog testnog čvora do kojeg se šalju UDP paketi (u ovom slučaju je to računalo na kojeg je instaliran alat PRTG Remote probe). Nadalje potrebno je odabrati UDP ulazno-izlazni međusklop za protok podataka (engl. *port*) koji mora biti otvoren i slobodan na oba računala, odabrati broj paketa koji se šalju, njihovu veličinu i vrijeme između paketa. Interval skeniranja postaviti na 20 sekundi zato što se šalje 1000 paketa razmaka 20 mili sekundi (slika 5.3.3.).



Slika 5.3.3. Konfiguracija QoS senzora

Senzor je pravilno konfiguriran ako krene sa očitanjem podataka i ako pokazuje zeleno obojenu statusnu traku na kojoj je ispisano „Ok“. Grafičko sučelje QoS senzora (slika 5.3.4.) se može konfigurirati prema željama korisnika, moguće je birati parametre za prikaz, odabirati boju i debljinu linije kojom se grafički prikazuju na pripadajućem grafu i sl. Postoji mogućnost namještanja upozorenja kao na primjer ako se izgubi više od 30% paketa pojavi se žuto obojeno upozorenje na statusnoj traci.





Slika 5.3.4. Grafičko sučelje QoS senzora

Slika 5.3.4. prikazuje sučelje se sastoji od grafičkih pokazatelja koji prikazuju pojedinu izmjerenu vrijednost, padajućih izbornika sa raznim opcijama, tablicom očitanih vrijednosti i grafova koji u stvarnom vremenu crtaju izmjerene parametre (graf koji prikazuje 20 minuta očitavanja, 2 dana i 30 dana).

Senzor radi na principu da šalje seriju od 1000 UDP paketa prema udaljenom testnom uređaju koje prikuplja podatke (kašnjenje, minimalno, prosječno i maksimalno kolebanje kašnjenja, gubitak paketa te broj oštećenih paketa ) i šalje ih nazad poslužitelju gdje se obrađuju, grafički i tablično prikazuju. Paketi se šalju sa vremenskim razmakom od 20ms, svaki paket je veličine 172 Byte-a i šalju se kroz ulazno-izlazni međusklop za protok podataka brojčane oznake 50000 koji je u ovom slučaju bio slobodan i na odašiljačkoj i na prijemnoj strani. Interval skeniranja podataka se ponavlja svakih 20 sekundi. Prva se očitavanja prikazuju nakon 20 sekundi i tokom sljedećih dvadeset minuta se prikupljaju u tablicu i grafički prikazuju na grafu.

### 5.3.1. Opis mjerenih parametara

U testnom okruženju će se mjeriti sljedeći parametri: kašnjenje paketa, gubitak paketa, broj oštećenih paketa te minimalno, prosječno i maksimalno kolebanje kašnjenja.

- a) **Kašnjenje paketa** je količina vremena potrebna da paket prođe mrežom do odredišta i iskazana je u milisekundama. Svaki element mreže pridonosi ukupnom kašnjenju paketa, uključujući vatrozide, usmjeritelje i preklopnike. Kašnjenje ne ovisi samo o mrežnim uređajima, već i o postavkama kao što su postavke pristupne liste, metode klasifikacije prometa i modove prijenosa.
- b) **Gubitak paketa** je broj paketa koji nisu stigli na odredište iskazan u postotcima. U većini slučajeva uzrok gubitku paketa su zagušenja u mreži što za korisnika znači manju brzinu i propusnost mreže. Gubitak paketa se može mjeriti kao postotak gubitka okvira koji su trebali biti prosljeđeni mrežom, ali nisu.
- c) **Broj oštećenih paketa** se iskazuje u postotcima i predstavlja pakete koji su stigli na odredište nepotpuni ili oštećeni tijekom prijenosa mrežom. Ukoliko se otkriju oštećeni paketi, od izvorišta se traži njihovo ponovno slanje.
- d) **Kolebanje kašnjenja** nastaje zbog varijacija u međudolaznim vremenima paketa iste sesije. Kolebanje kašnjenja je prvenstveno uzrokovano razlikama u čekanjima u redu za susjedne pakete iste sesije kao i prolaskom paketa različitim putovima i čvorištima. Određeni tipovi prometa, posebno stvarno-vremenski promet kao što je govor, ne toleriraju velike varijacije u kašnjenju. Razlike u vremenima dolazaka paketa na odredište se manifestiraju kratkim prekidima u komunikaciji. PRTG programski alat računa kolebanje kašnjenja u milisekundama prema RFC3550 [12]. Kolebanje kašnjenja PRTG programskim alatom se računa prema sljedećoj formuli:

$$J(i) = J(i - 1) + |D(i - 1, i)| - \frac{J(i-1)}{16} \quad (5 -$$

gdje je: J kolebanje kašnjenja koje se konstantno računa sa svakim pristiglim paketom na odredište koristeći razliku D od paketa do prethodnog paketa  $i - 1$  redosljedom dolaska paketa (ne nužno u nizu) [11].

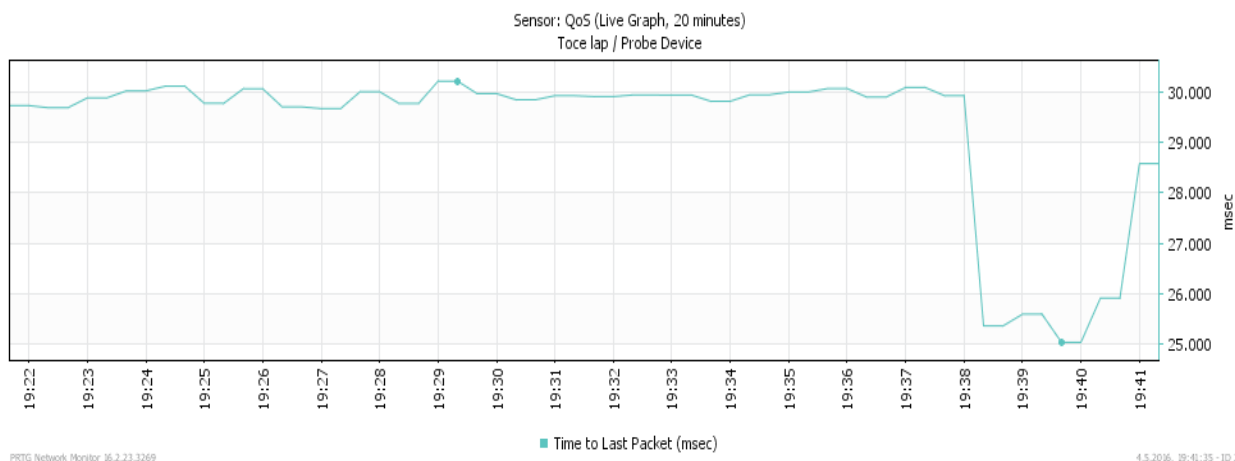


### 5.3.2. Rezultati mjerenja QoS parametara PLC mreže

Tablica 5.3.2.1. Rezultati mjerenja QoS parametara u PLC mreži

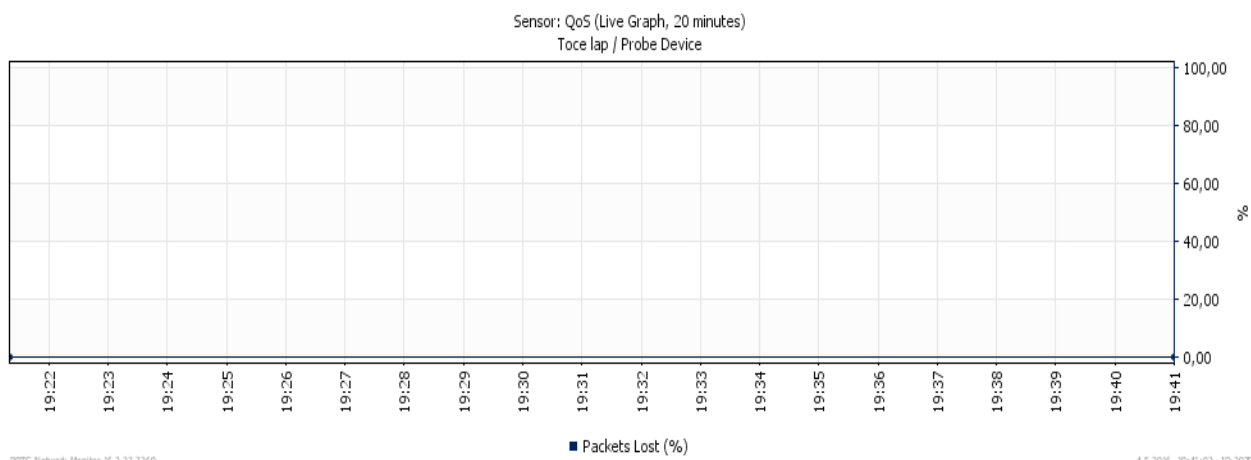
Date Time	Time to Last Packet	Packets Lost	Packets Corrupted	Jitter Min	Jitter Average	Jitter Max
<b>Averages</b>	29.817 msec	0 %	0 %	0 ms	0,10 ms	1 ms
Date Time ▲	Time to Last Packet	Packets Lost	Packets Corrupted	Jitter Min	Jitter Average	Jitter Max
4.5.2016. 19:37:04	30.083 msec	0 %	0 %	0 ms	0 ms	0 ms
4.5.2016. 19:36:24	29.893 msec	0 %	0 %	0 ms	0 ms	0 ms
4.5.2016. 19:35:44	30.061 msec	0 %	0 %	0 ms	0 ms	0 ms
4.5.2016. 19:35:04	29.993 msec	0 %	0 %	0 ms	0 ms	0 ms
4.5.2016. 19:34:24	29.938 msec	0 %	0 %	0 ms	0 ms	0 ms
4.5.2016. 19:33:44	29.810 msec	0 %	0 %	0 ms	0 ms	0 ms
4.5.2016. 19:33:04	29.934 msec	0 %	0 %	0 ms	0 ms	0 ms
4.5.2016. 19:32:24	29.935 msec	0 %	0 %	0 ms	0 ms	0 ms
4.5.2016. 19:31:44	29.903 msec	0 %	0 %	0 ms	0 ms	0 ms
4.5.2016. 19:31:04	29.920 msec	0 %	0 %	0 ms	0 ms	0 ms
4.5.2016. 19:30:24	29.840 msec	0 %	0 %	0 ms	0 ms	0 ms
4.5.2016. 19:29:44	29.962 msec	0 %	0 %	0 ms	0 ms	0 ms
4.5.2016. 19:29:04	30.207 msec	0 %	0 %	0 ms	2 ms	4 ms
4.5.2016. 19:28:24	29.767 msec	0 %	0 %	0 ms	0 ms	0 ms
4.5.2016. 19:27:44	29.999 msec	0 %	0 %	0 ms	0 ms	0 ms
4.5.2016. 19:27:04	29.665 msec	0 %	0 %	0 ms	1 ms	2 ms
4.5.2016. 19:26:24	29.699 msec	0 %	0 %	0 ms	0 ms	0 ms
4.5.2016. 19:25:44	30.057 msec	0 %	0 %	0 ms	0 ms	0 ms
4.5.2016. 19:25:03	29.770 msec	0 %	0 %	0 ms	0 ms	0 ms
4.5.2016. 19:24:23	30.108 msec	0 %	0 %	0 ms	0 ms	2 ms
4.5.2016. 19:23:43	30.015 msec	0 %	0 %	0 ms	0 ms	5 ms
4.5.2016. 19:23:03	29.877 msec	0 %	0 %	0 ms	0 ms	4 ms
4.5.2016. 19:22:23	29.682 msec	0 %	0 %	0 ms	0 ms	0 ms
4.5.2016. 19:21:43	29.725 msec	0 %	0 %	0 ms	0 ms	2 ms
4.5.2016. 19:21:03	29.858 msec	0 %	0 %	0 ms	0 ms	4 ms
4.5.2016. 19:20:23	29.778 msec	0 %	0 %	0 ms	0 ms	5 ms
4.5.2016. 19:19:43	29.454 msec	0 %	0 %	0 ms	0 ms	0 ms
4.5.2016. 19:19:03	29.796 msec	0 %	0 %	0 ms	0 ms	4 ms
4.5.2016. 19:18:23	27.978 msec	0 %	0 %	0 ms	0 ms	0 ms
4.5.2016. 19:17:43	29.809 msec	0 %	0 %	0 ms	0 ms	4 ms

U tablici 5.3.2.1. su sadržani rezultati mjerenja QoS parametara PLC mreže tokom 20 minuta. Mjereni su sljedeći parametri: kašnjenje paketa (engl. *time to last packet*), izgubljeni paketi (engl. *packets lost*), oštećeni paketi (engl. *packets corrupted*), minimalno, prosječno i maksimalno kolebanje kašnjenja (engl. *jitter min.*, *average* i *max.*). Uz rezultate mjerenja su priložene i odgovarajuće mjerne jedinice. Dodatno je u tablici prikazan podatak prosjeka svih pojedinačnih mjerenja.



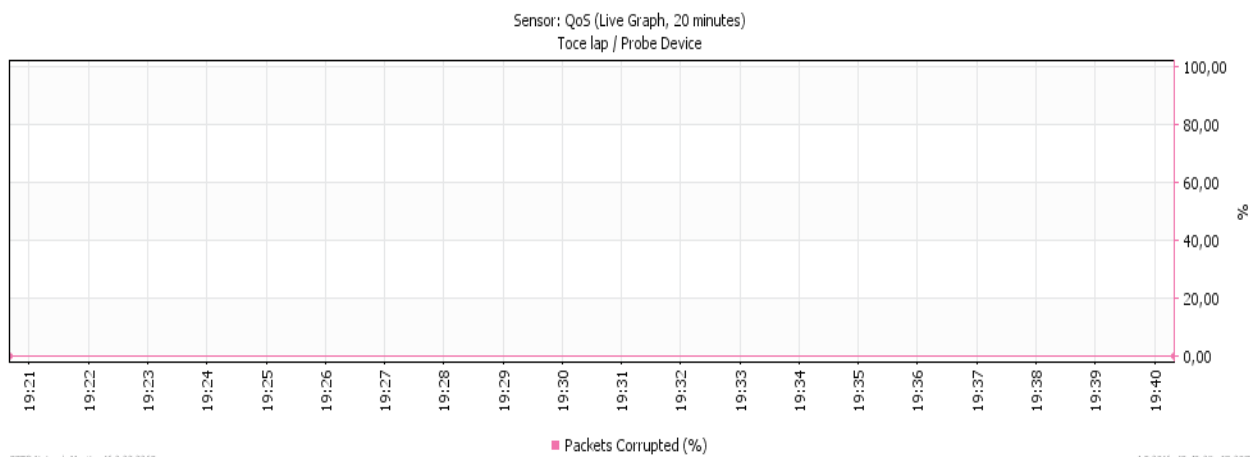
**Slika 5.3.2.1.** Kašnjenje paketa

Slika 5.3.2.1. prikazuje grafički prikaz kašnjenja paketa. Na osi apcisa (x os) je prikazano vrijeme unutar kojeg se mjerila navedena vrijednost (19:22h do 19:41h), a na osi ordinata (y os) je vrijednost intervala vremena do zadnjeg paketa (25 ms do 30 ms). Vidljivo iz grafa vrijednost je relativno jednaka i kreće se oko 30 milisekundi. U vremenu od 19:39h do 19:41h je vidljiv značajan pad vrijednosti sa 30 ms na 25 ms što upućuje na poboljšanje kvalitete usluge u mreži. Maksimalna izmjerena vrijednost je 30,083ms, dok je minimalna vrijednost 25 ms.



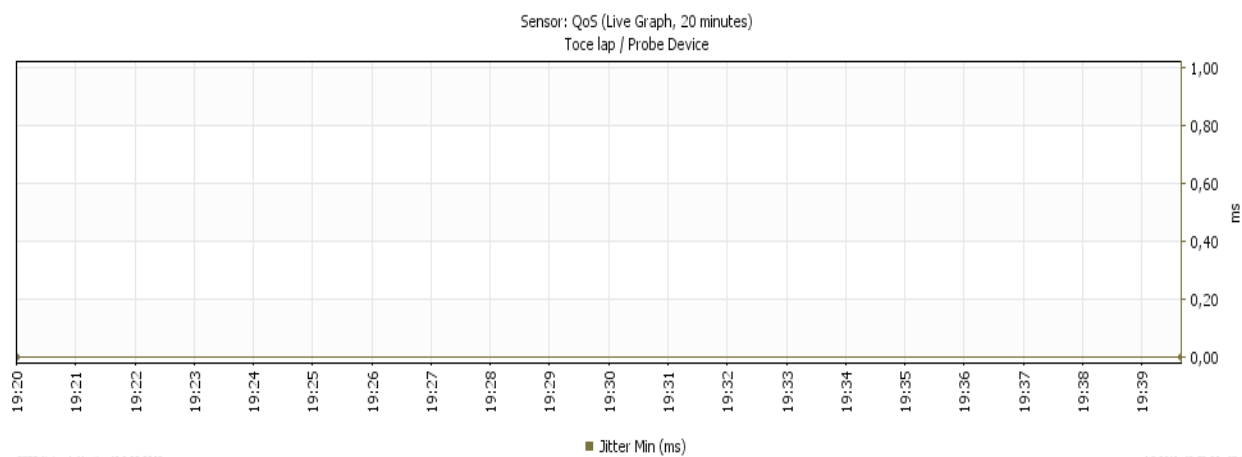
**Slika 5.3.2.2.** Izgubljeni paketi

Na slici 5.3.2.2. je graf koji prikazuje izgubljene pakete u intervalu od 20 minuta. Na x osi je vrijeme unutar kojeg je izvršeno mjerenje (19:22h do 19:41h), a na y osi je izmjerena vrijednost prikazana u postotcima. Iz grafa je vidljivo da u mreži nema gubitaka paketa tokom mjerenja što upućuje na visoku razinu kvalitete usluge u mreži.



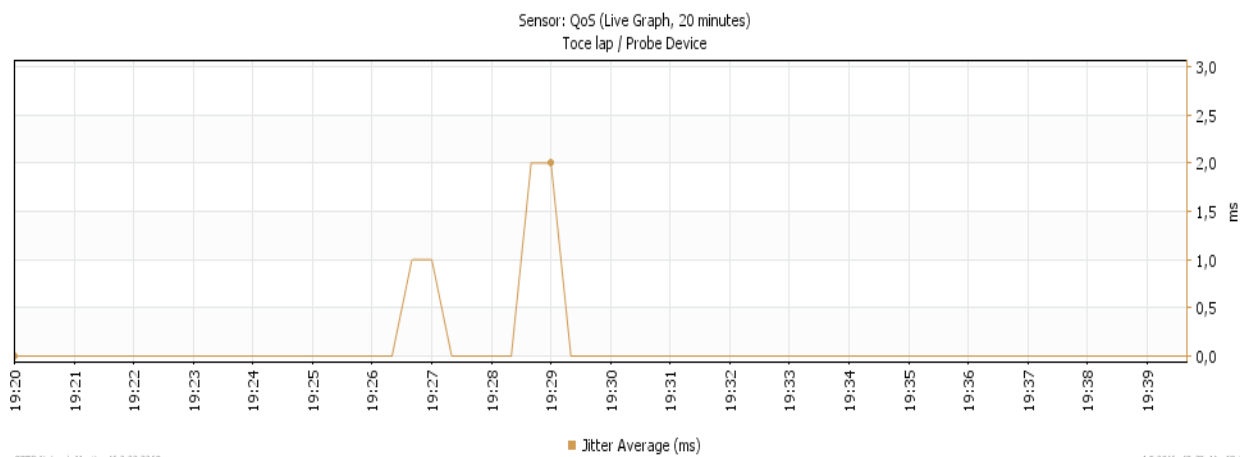
**Slika 5.3.2.3.** Oštećeni paketi

Slika 5.3.2.3. Prikazuje graf mjerenja oštećenih paketa u PLC mreži. Na x osi je prikazan vremenski interval unutar kojeg je izvršeno mjerenje (u satima), a na y osi je prikazana izmjerena vrijednost u postocima. Iz grafa je vidljivo da tokom mjerenja nije bilo oštećenih paketa što upućuje na visoku razinu kvalitete usluge u mreži.



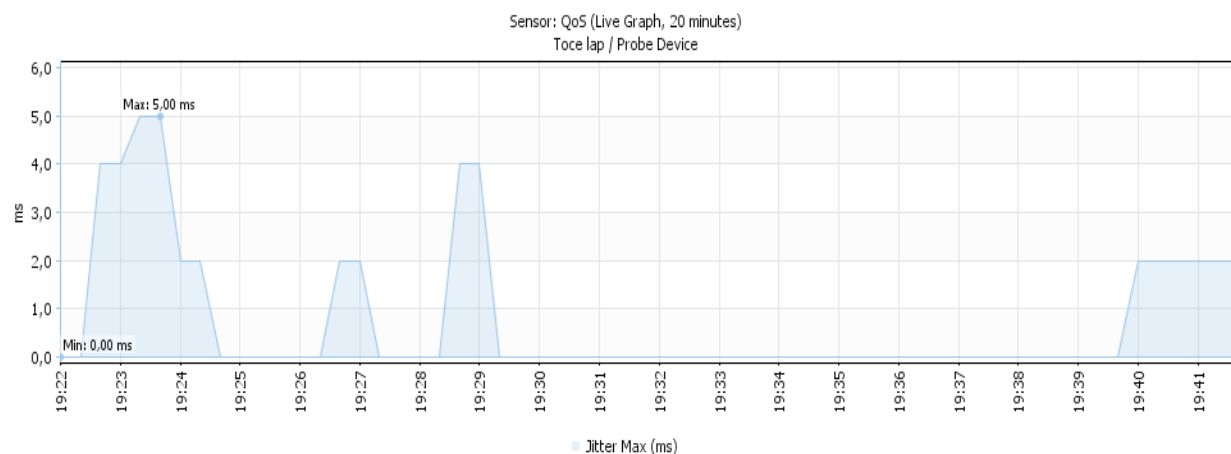
**Slika 5.3.1.4.** Minimalno kolebanje kašnjenja

Na slici 5.3.2.4. je graf koji prikazuje minimalno kolebanje kašnjenja u mreži. Na x osi je vremenski interval unutar kojeg je izvršeno mjerenje, dok je na y osi izmjerena vrijednost u milisekundama. Vidljivo je da je minimalno kolebanje 0 ms.



**Slika 5.3.2.5.** Prosječno kolebanje kašnjenja

Slika 5.3.2.5. Prikazuje prosječno kolebanje kašnjenja. Na osi  $x$  je vremenski interval mjerenja, a na  $y$  osi je izmjerena vrijednost prikazana u milisekundama. Vrijednost je konstantno jednaka nuli, osim u dva slučaja kada se penje na vrijednosti od 1 ms i 2 ms.



**Slika 5.3.2.6.** Maksimalno kolebanje kašnjenja

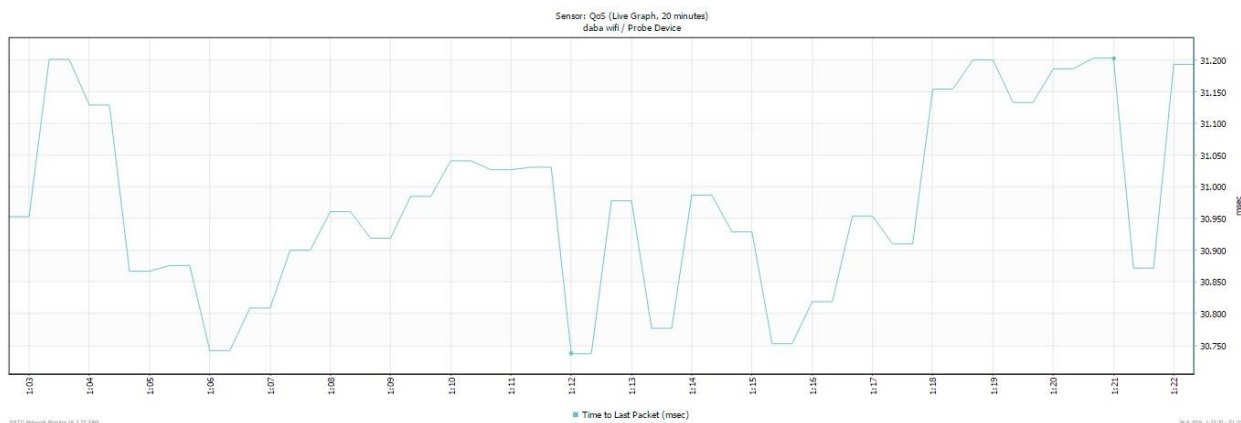
Na slici 5.3.2.6. je prikazano maksimalno kolebanje kašnjenja, što je jedan od važnijih parametara kod mjerenja kvalitete usluge. Na  $x$  osi je vremenski interval mjerenja, dok je na  $y$  osi rezultat mjerenja u milisekundama. Vrijednost je velik dio vremena jednaka nuli sa par iznimki. U početku mjerenja se naglo penje sa nule na 5 ms, što je ujedno i maksimalna izmjerena vrijednost. Ovakav nagli rast upućuje na moguće zagušenje u mreži. Vidljivo iz grafa vrijednost je sa 5ms s vremenom opala na 0 ms. Mehanizmi za izbjegavanje zagušenja pravovremeno reagiraju i sprečavaju moguće zagušenje.

### 5.3.3. Rezultati mjerenja QoS parametara WiFi mreže

Tablica 5.3.3.1. Rezultati mjerenja QoS parametara WiFi mreže

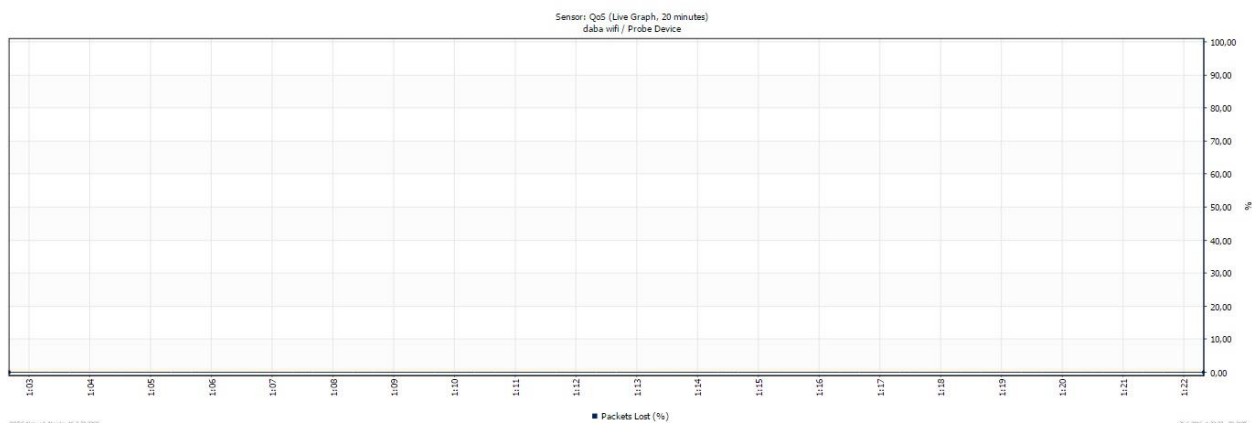
Date Time	Time to Last Packet	Packets Lost	Packets Corrupted	Jitter Min	Jitter Average	Jitter Max
<b>Averages</b>	30,971 msec	0 %	0 %	0,07 ms	5 ms	16 ms
1 to 30 of 30						
Date Time	Time to Last Packet	Packets Lost	Packets Corrupted	Jitter Min	Jitter Average	Jitter Max
26.6.2016. 1:21:28	30,672 msec	0 %	0 %	1 ms	12 ms	48 ms
26.6.2016. 1:20:48	31,203 msec	0 %	0 %	0 ms	4 ms	9 ms
26.6.2016. 1:20:08	31,186 msec	0 %	0 %	1 ms	11 ms	50 ms
26.6.2016. 1:19:28	31,133 msec	0 %	0 %	0 ms	3 ms	6 ms
26.6.2016. 1:18:48	31,200 msec	0 %	0 %	0 ms	9 ms	52 ms
26.6.2016. 1:18:08	31,154 msec	0 %	0 %	0 ms	7 ms	10 ms
26.6.2016. 1:17:28	30,910 msec	0 %	0 %	0 ms	1 ms	3 ms
26.6.2016. 1:16:48	30,954 msec	0 %	0 %	0 ms	4 ms	10 ms
26.6.2016. 1:16:08	30,819 msec	0 %	0 %	0 ms	4 ms	9 ms
26.6.2016. 1:15:28	30,753 msec	0 %	0 %	0 ms	3 ms	9 ms
26.6.2016. 1:14:48	30,929 msec	0 %	0 %	0 ms	4 ms	13 ms
26.6.2016. 1:14:07	30,967 msec	0 %	0 %	0 ms	4 ms	8 ms
26.6.2016. 1:13:27	30,777 msec	0 %	0 %	0 ms	3 ms	7 ms
26.6.2016. 1:12:47	30,976 msec	0 %	0 %	0 ms	5 ms	11 ms
26.6.2016. 1:12:07	30,737 msec	0 %	0 %	0 ms	2 ms	8 ms
26.6.2016. 1:11:27	31,031 msec	0 %	0 %	0 ms	4 ms	9 ms
26.6.2016. 1:10:47	31,027 msec	0 %	0 %	0 ms	5 ms	11 ms
26.6.2016. 1:10:07	31,041 msec	0 %	0 %	0 ms	8 ms	14 ms
26.6.2016. 1:09:37	30,965 msec	0 %	0 %	0 ms	3 ms	17 ms
26.6.2016. 1:08:57	30,919 msec	0 %	0 %	0 ms	9 ms	48 ms
26.6.2016. 1:08:17	30,961 msec	0 %	0 %	0 ms	6 ms	11 ms
26.6.2016. 1:07:37	30,900 msec	0 %	0 %	0 ms	6 ms	13 ms
26.6.2016. 1:06:57	30,809 msec	0 %	0 %	0 ms	5 ms	12 ms
26.6.2016. 1:06:17	30,742 msec	0 %	0 %	0 ms	8 ms	10 ms
26.6.2016. 1:05:37	30,876 msec	0 %	0 %	0 ms	4 ms	11 ms
26.6.2016. 1:04:57	30,867 msec	0 %	0 %	0 ms	4 ms	9 ms
26.6.2016. 1:04:17	31,129 msec	0 %	0 %	0 ms	1 ms	7 ms
26.6.2016. 1:03:37	31,201 msec	0 %	0 %	0 ms	9 ms	16 ms
26.6.2016. 1:02:56	30,953 msec	0 %	0 %	0 ms	9 ms	21 ms
26.6.2016. 1:02:16	31,110 msec	0 %	0 %	0 ms	6 ms	21 ms

U tablici 5.3.3.1. su sadržani rezultati mjerenja QoS parametara WiFi mreže tokom 20 minuta. Mjereni su sljedeći parametri: kašnjenje paketa (engl. *time to last packet*), izgubljeni paketi (engl. *packets lost*), oštećeni paketi (engl. *packets corrupted*), minimalno, prosječno i maksimalno kolebanje kašnjenja (engl. *jitter min.*, *average* i *max.*). Uz rezultate mjerenja su priložene i odgovarajuće mjerne jedinice. Dodatno je u tablici prikazan podatak prosjeka svih pojedinačnih mjerenja.



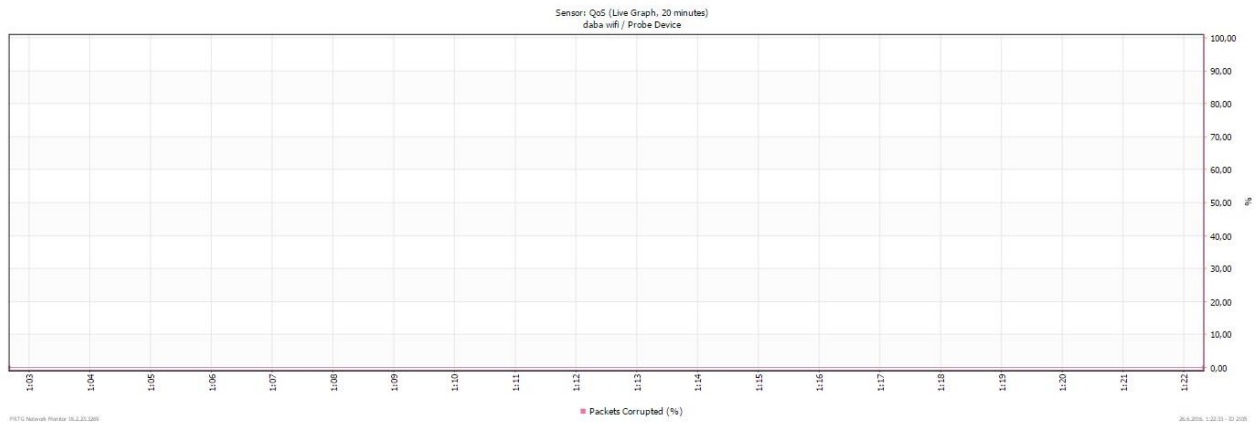
**Slika 5.3.3.1.** Kašnjenje paketa

Na slici 5.3.3.1. je graf koji prikazuje izmjerenu vrijednost vrijeme do zadnjeg paketa. Na x osi je vrijeme unutar kojeg je rađeno mjerenje (od 01:03h do 01:22h), dok je na y osi izmjerena vrijednost prikazana u milisekundama. Vidljivo je iz grafa da je vrijednost promjenjiva, ali se kreće u intervalu od 30,75 ms do maksimalnih 31,20 ms. Prosječna vrijednost je 30,971 ms.



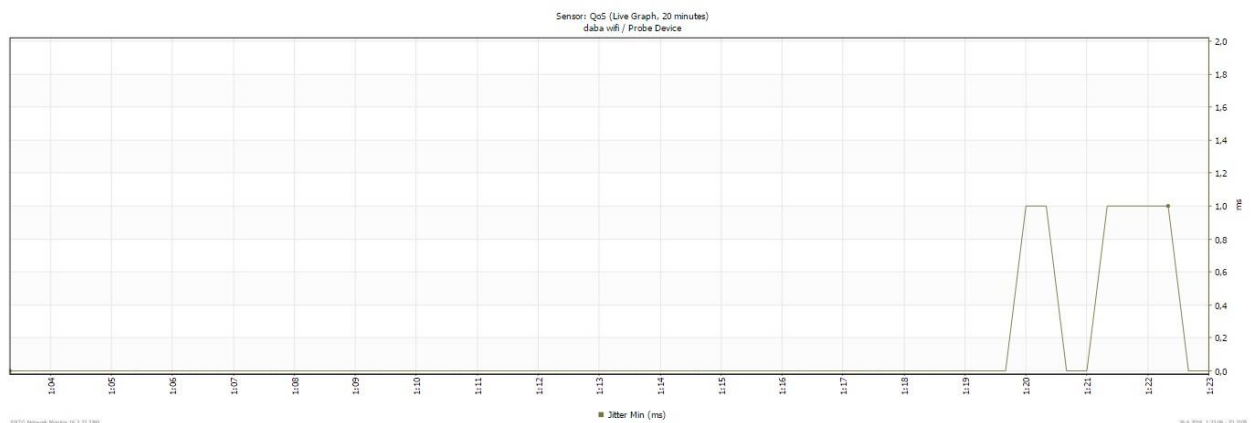
**Slika 5.3.3.2.** Izgubljeni paketi

Graf prikazan slikom 5.3.3.2. pokazuje mjerenje izgubljenih paketa u vremenskom intervalu od 01:03h do 01:22h. Gubitak paketa je prikazan u postocima. Iz grafa je vidljivo da je gubitak paketa bio jednak nuli svo vrijeme mjerenja što ukazuje na visoku razinu kvalitete usluge u mreži.



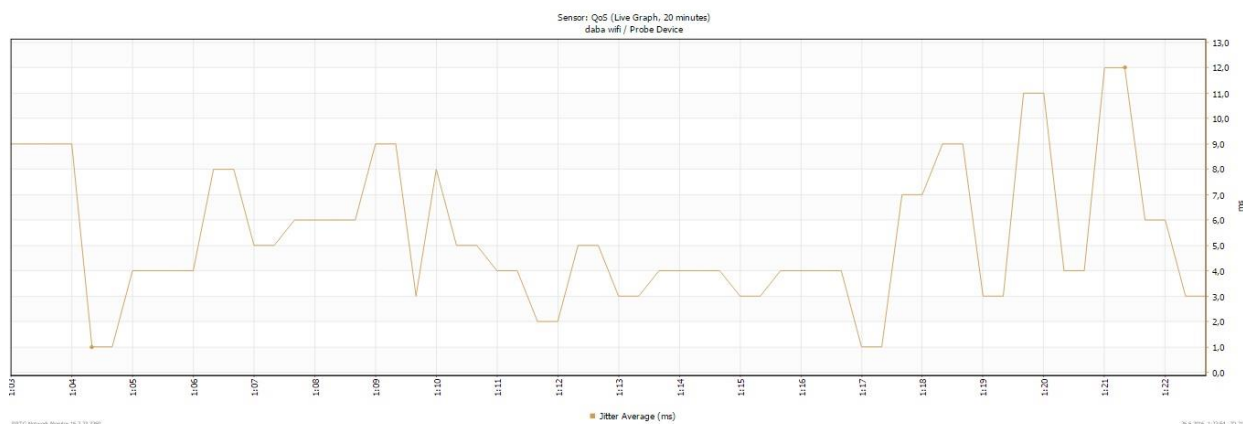
**Slika 5.3.3.3.** Oštećeni paketi

Slika 5.3.3.3. prikazuje graf sa mjerenjima oštećenih paketa. Na x osi je vremenski interval mjerenja, a na y osi je postotak oštećenih paketa. Tokom mjerenja nije bilo oštećenih paketa.



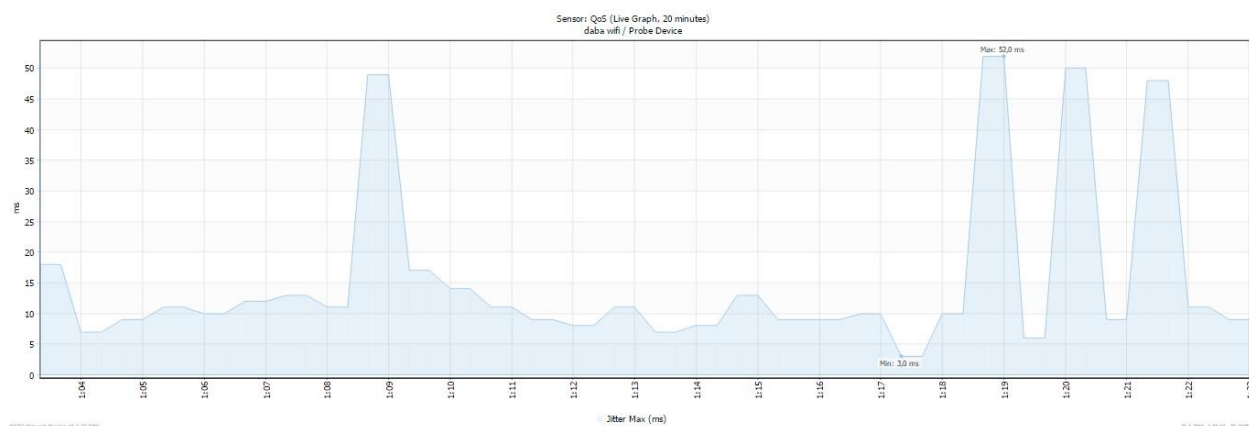
**Slika 5.3.3.4.** Minimalno kolebanje kašnjenja

Graf na slici 5.3.3.4. pokazuje minimalno izmjereno kolebanje kašnjenja (engl. *jitter*). Izmjerena vrijednost je prikazana u milisekundama. Vrijednost je konstantno bila jednaka nuli sa iznimkom u dva vremenska intervala gdje ta vrijednost raste na 1 ms, što je neznatan porast i ne utječe na kvalitetu usluge u mreži.



**Slika 5.3.3.5.** Prosječno kolebanje kašnjenja

Na slici 5.3.3.5. je graf koji prikazuje prosječno kolebanje kašnjenja, što je bitan parametar kada se razgovara o kvaliteti usluge u mreži. Vidljivo je iz grafa da se vrijednost konstantno mijenja, a kreće se u rasponu od 1 ms do 12 ms. Minimalna izmjerena vrijednost je 1 ms, a maksimalna 12 ms. Ovi rezultati pokazuju visoku razinu kvalitete usluge u mreži.

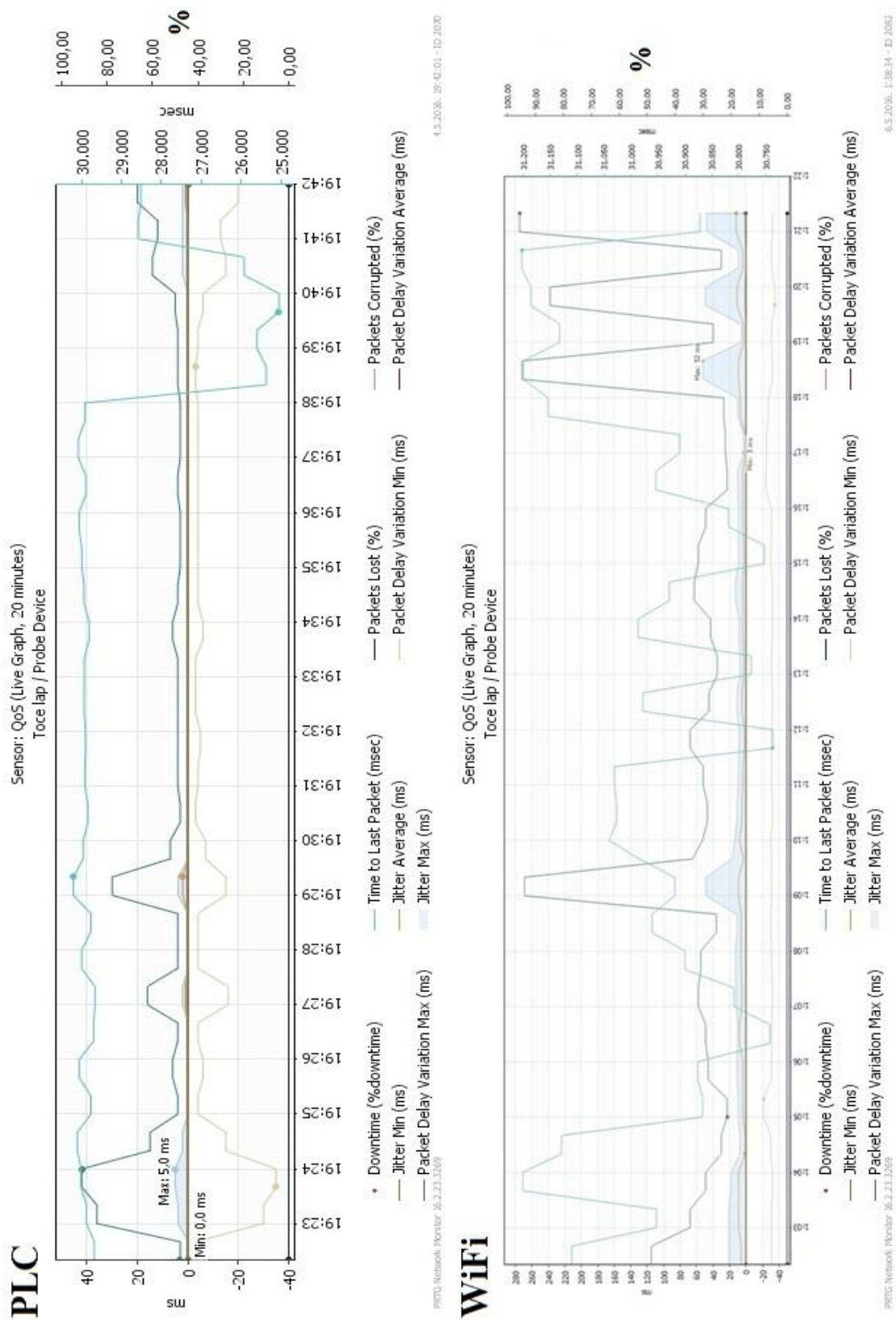


**Slika 5.3.3.6.** Maksimalno kolebanje kašnjenja

Slika 5.3.3.6. prikazuje maksimalno kolebanje kašnjenja, izmjereno u WiFi mreži. Rezultati mjerenja su izraženi u milisekundama. Minimalna izmjerena vrijednost je 3 ms, a maksimalna je 52 ms. Kolebanje kašnjenja od 52 ms je relativno veliko i može uzrokovati lošije performanse mreže.



### 5.3.4. Usporedba rezultata PLC i WiFi mreže



Slika 5.3.4.1. Usporedni prikaz grafova sa svim mjerenim vrijednostima

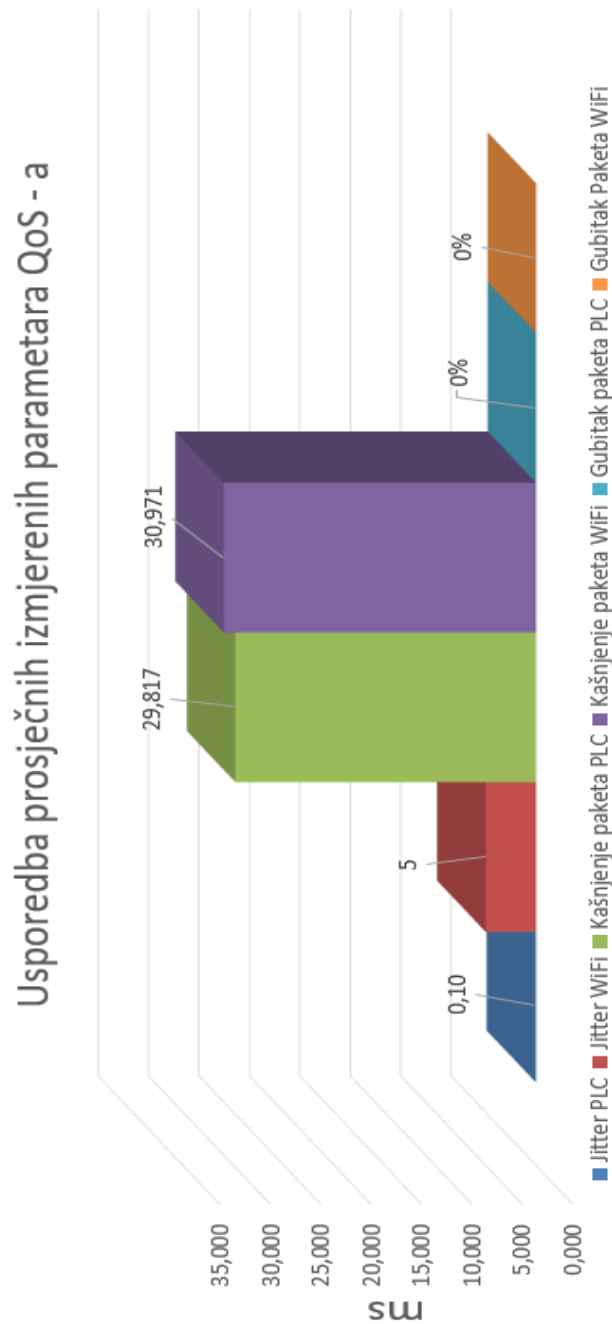
Slika 5.3.4.1. prikazuje usporedni prikaz grafa svih mjerenja na PLC mreži i grafa sa svim mjerenjima na WiFi mreži. Vidljivo je da su rezultati približno jednaki što ukazuje da obje testirane mreže imaju visoku razinu kvalitete usluge. Iako nisu značajne, postoje razlike između ove dvije mreže, i one odlučuju o tome koja mreža je postigla bolji rezultat na mjerenju. Kod usporedbe se uzimaju tri glavna faktora (gubitak paketa, kašnjenje i kolebanje kašnjenja) koji definiraju kvalitetu usluge kod paketno baziranih mreža.

Promatrajući rezultate za gubitak paketa, u obje testne mreže ne dolazi do gubitka paketa tokom dvadeset minutnog mjerenja.

Što se tiče kašnjenja paketa, lošiji rezultat je ostvarila WiFi mreža sa rezultatom od 30,971 ms usporedno s 29,817 ms kod PLC-a.

PLC testna mreža je ostvarila bolji rezultat kod mjerenja kolebanja kašnjenja. Prosječno izmjereno kolebanje kašnjenja kod PLC-a je 0,10ms, što je znatno manje od 5ms prosječnog kolebanja kašnjenja kod WiFi mreže.

U ovom testnom okruženju, PLC komunikacija se pokazala kao bolje rješenje ostvarivši relativno bolje rezultate. Mjerenja su rađena na UDP protokolu zato što se on koristi za prijenos multimedijских podataka mrežom.



**Slika 5.3.4.2.** Prosječne vrijednosti izmjerenih parametara QoS-a

Slika 5.3.4.2. grafički prikazuje prosječne izmjerene vrijednosti kolebanja kašnjenja, kašnjenja paketa te gubitka paketa kod obje testne mreže. Ovakav grafički prikaz pojednostavljeno prikazuje glavne razlike u kvaliteti usluge PLC i WiFi mreže.

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu su uspoređene razine kvalitete usluge PLC i WiFi mreže. Za svaku mrežu pojedinačno je mjerena razina kvaliteta usluge koja je određena kašnjenjem paketa, gubitkom paketa, kolebanjem kašnjenja itd.. Za mjerenje ovih parametara se koristio QoS senzor sadržan unutar PRTG Network Monitor programskog alata.

Na temelju obavljenih mjerenja u ovome radu može se zaključiti da je PLC komunikacija ostvarila usporednu razinu kvalitete usluge u odnosu na kućnu WiFi mrežu. Budućnost PLC komunikacije leži u povezivanju kućanskih uređaja na Internet te u automatizaciji kućanstva. Još jedna od mogućih primjena PLC komunikacije je u industriji distribucije energenata, točnije za udaljena očitavanja brojila potrošnje električne energije. Za takvu vrstu komunikacije se koriste niže frekvencije pa stoga ne dolazi do problema interferencije.

PLC komunikacija nije novost na tržištu. Prvi patenti su stvoreni 1899-ih godina, no tek unazad desetak godina postoji kvalitetni dvosmjerni prijenos podataka koji svojim performansama konkurira DSL tehnologiji. Glavni argument za korištenje PLC tehnologije je sveprisutnost elektroenergetske mreže zbog čega bi PLC komunikaciju bilo jednostavno i jeftino implementirati, koristeći već postojeću infrastrukturu.

Glavni problem široko pojasne PLC komunikacije je interferencija. Činjenica je da prijenosni elektroenergetski vodovi nisu predviđeni za prijenos informacija, nisu oklopljeni i ponašaju se kao velike antene i ometaju okolno frekvencijsko područje.

Korištenje PLC komunikacije kao lokalne širokopolasne usluge će u budućnosti nalaziti široku primjenu, ponajprije u ruralnim područjima. Gotovo svako kućanstvo je povezano na elektroenergetsku mrežu i samim time mu se može omogućiti pristup širokopolasnim uslugama.

## LITERATURA

- [1] Zdravko Jadrijević, Komunikacija putem elektroenergetske mreže, HEP Distribucija d.o.o. DP Elektrodalmacija Split,  
<http://www.eihp.hr/~gmajstro/CIGRE%202003-Power%20line%20communication.pdf>
- [2] Ivan Dokmanić, Broadband over powerlines, Seminarski rad iz kolegija Sustavi za praćenje i vođenje procesa
- [3] P.S. Henry, Interference Characteristics of Broadband Powerline Communication Systems Using Aerial Medium Voltage Wires , IEEE Communications Magazine, strana 92 – 98, Travanj 2005.
- [4] LU LiPing, Performances and Quality of Service of PLC Networks for MV and LV Distribution Systems Thesis, Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine 22. November 2006.  
[http://docnum.univ-lorraine.fr/public/INPL/2006\\_LU\\_L.pdf](http://docnum.univ-lorraine.fr/public/INPL/2006_LU_L.pdf)
- [5] Broadband powerline communication systems: A background brief Australian Communications Authority, Rujan 2003.
- [6] B. Fox, Power line telecoms: Data over the mains, Personal Computer World, Ožujak 2004.
- [7] Zoran , Pavle Vuletić. Slavko Gajin, Kvalitet servisa Quality of Service – QoS, ETF, Katedra za računarsku tehniku i informatiku <http://rti.etf.bg.ac.rs/rti/ir4roi/Prezentacije/05%20-%20QoS.pdf>
- [8] Liping Lu, Ye-Qiong Song, Gangyan Li, Quality of Service Support in PowerLine Communication networks, HAL Id: inria-00107722, Submitted on 19. Oct. 2006.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/inria-00107722/document>
- [9] Alem Čolaković dipl.ing. saob. i kom. Kratak pregled nekih od osnovnih QoS mehanizama u paketskim mrežama, A short overview of some of the basic QoS mechanisms in packet networks, [https://www.academia.edu/20066626/Kratak\\_pregled\\_nekih\\_od\\_osnovnih\\_QoS\\_mehanizama\\_u\\_paketskim\\_mre%C5%BEama](https://www.academia.edu/20066626/Kratak_pregled_nekih_od_osnovnih_QoS_mehanizama_u_paketskim_mre%C5%BEama)
- [10] Davor Lešnjaković, Upravljanje QoS u IP mreži, seminarski rad, Osijek 2015.
- [11] H. Schulzrinne, RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications, July 2003.  
<https://www.ietf.org/rfc/rfc3550.txt>
- [12] PRTG Network Monitor User Manual, Paessler AG, May 2016.  
<http://download-cdn.paessler.com/download/prtgmanual.pdf>

## SAŽETAK

Širokopolasna komunikacija putem elektroenergetske mreže (engl. *PLC - Power Line Communications*) predstavlja tehnologiju koja omogućava umrežavanja u lokalnom okruženju, ali i rješenje problema širokopolasnog pristupa u sredinama gdje ne postoji adekvatna širokopolasna infrastruktura. Pristup širokopolasnim uslugama putem elektroenergetske mreže spajanjem na kućnu utičnicu električne instalacije uvijek je predstavljao izazov. Glavni problem korištenja elektroenergetske mreže za prijenos podataka je interferencija, to je ujedno i glavni razlog ne upotrebe ove vrste komunikacije. Lokalno umrežavanje, unutar kućanstva koristeći PLC komunikaciju dovodi u pitanje razinu kvalitete usluge. Ovaj rad se bavi testiranjem i analizom QoS parametara. Kvaliteta usluge je mjerena pomoću QoS senzora sadržanog unutar PRTG Network monitor besplatnog programskog alata. U testnom okruženju mjereni su parametri: kašnjenje paketa, gubitak paketa, kolebanje kašnjenja (engl. *jitter*), itd.. Analizom izmjerenih rezultata je zaključeno da PLC komunikacija pruža visoku razinu kvalitete usluge, usporednu s WiFi mrežom.

**Ključne riječi:** širokopolasna komunikacija, elektroenergetska mreža, PLC, WiFi, QoS, kvaliteta usluge, PRTG Network monitor

## ABSTRACT

Broadband communication over power line network (PLC – power line communication) is a technology that provides networking in a local environment, but also solve the problem of broadband access in areas where there is no adequate broadband infrastructure. Access to broadband services via the electricity network by connecting to a household outlet wiring has always been a challenge. The main problem of using electric power network for data transmission is interference, it is also the main reason for not using this type of communication. Local networking within the household using PLC communication brings in the question of quality of service level. This paper deals with its testing and analysis of QoS parameters. Quality of service is measured by the QoS sensor contained within PRTG Network Monitor, free software tool. Measured parameters in the test environment are: packet delay, packet loss, jitter, etc .. The analysis of the measured results concluded that the PLC communication provides a high level quality of service, even comparative with local WiFi network.

**Key words:** broadband communication, power line network, PLC, WiFi, QoS, quality of service, PRTG Network monitor

## ŽIVOTOPIS

Tomislav Tunuković rođen 8. srpnja 1991. godine u Slavonskom Brodu od oca Tomislava i majke Ružice r. Valjak. Osnovnu školu završio u Vrpolju, a srednju elektrotehničku u Tehničkoj školi u Slavonskom Brodu, smjer tehničar za elektroniku, gdje pokazuje interes za rad na računalu i rad sa računalnim programima. Vrlo dobro vlada alatima Microsoft Office™ (Word™, Excel™ i PowerPoint™) i odlično poznaje računalne mreže. Nakon državne mature upisao je studij Elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku smjer komunikacije i informatika. Ima položen vozački ispit B kategorije, služi se engleskim jezikom.

## PRILOZI

### Tehnički podaci korištenih PLC uređaja

Brend: AUSO

Model: PLC 300

Maksimalna ostvariva brzina prijenosa: 200Mbit

Korisnički podesiva QoS: 16 razina

Podržava EMC standarde

Sučelje: 10 Base-T/100Base-TX Auto MDI/MDI-X

Napajanje: 110~240V AC (US Plug)

Dimenzije: 3.74in x 2.56in x 2.36in

Težina: 14.82oz



**Slika 1.** Korišteni AUSO PLC uređaj



## Tehnički podaci korištenog bežičnog usmjerivača TP link TL - WR841N

Karakteristike sklopovlja:

Sučelje: 4 x 10/100Mbps LAN PORTS

1 x 10/100Mbps WAN PORT

Antena: 2 x 5dBi fiksna omni-direkciona antena

Vanjski izvor napajanja: 9VDC / 0.6A

Wireless standardi: IEEE 802.11n, IEEE 802.11g, IEEE 802.11b

Dimenzije: 192 x 134 x 33 mm

Wireless karakteristike:

Frekvencija: 2.4 - 2.4835 GHz

Stopa signala: 11n: Up to 300 Mbps (dynamic)

11g: Up to 54 Mbps (dynamic)

11b: Up to 11 Mbps (dynamic)

Osjetljivost prijemnika: 270M: -70dBm@10% PER

130M: -74dBm@10% PER

108M: -74dBm@10% PER

54M: -77dBm@10% PER

11M: -87dBm@8% PER

6M: -90dBm@10% PER

1M: -98dBm@8% PER

Snaga odašiljača: CE: <20 dBm

FCC: <30 dBm

Zaštita wireless mreže: 64/128/152-bit WEP / WPA / WPA2,WPA-PSK / WPA2-PSK



**Slika 2.** Korišteni WiFi usmjerivač