

# Analiza čekanja u čvoru paketne mreže s disciplinom FIFO

---

**Strikinac, Filip**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:016546>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-31**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -  
Institutional Repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

**Filip Strikinac**

**ANALIZA ČEKANJA U ČVORU PAKETNE MREŽE S  
DISCIPLINOM POSLUŽIVANJA FIFO**

**ZAVRŠNI RAD**

**Zagreb, Rujan 2016.**

Zagreb, 20. travnja 2016.

Zavod: **Zavod za informacijsko komunikacijski promet**  
Predmet: **Tehnologija telekomunikacijskog prometa**

## ZAVRŠNI ZADATAK br. 3771

Pristupnik: **Filip Strikinac (0135225671)**  
Studij: **Promet**  
Smjer: **Informacijsko-komunikacijski promet**

Zadatak: **Analiza čekanja u čvoru paketske mreže s disciplinom FIFO**

### Opis zadatka:

Analizirati izvore kašnjenja paketa na svakom čvoru mreže i parametre koji utječu na čekanje.  
Prikazati modele za određivanje čekanja u čvoru paketske mreže s disciplinom posluživanja FIFO i objasniti njihovu primjenjivost.  
Odrediti prosječno čekanje paketa u čvoru paketske mreže: za simulirani skup dolazaka paketa i veličina paketa te korištenjem analiziranih modela posluživanja.

Zadatak uručen pristupniku: 4. ožujka 2016.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

---

izv. prof. dr. sc. Štefica Mrvelj

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

ZAVRŠNI RAD

**ANALIZA ČEKANJA U ČVORU PAKETNE MREŽE S  
DISCIPLINOM POSLUŽIVANJA FIFO**

**QUEUING DELAY ANALYSES FOR PACKET-  
SWITCHED NETWORKS WITH FIFO SERVICE  
DISCIPLINE**

**Mentor:** Izv. prof. dr. sc. Štefica Mrvelj  
**Student:** Filip Strikinac  
**JMBG:** 0135225671

**Zagreb, Rujan 2016.**

## Sažetak

U radu je prikazana analiza čekanja paketa u čvorovima paketne mreže sa disciplinom posluživanja FIFO (*First in First out*). Opisani su i analizirani svi razlozi zbog kojih se paketi zadržavaju u čvoru. Postoje četiri izvora kašnjenja, a to su: procesiranje u čvoru, čekanje na prijenos, propagacija i prijenos. Načinjena je numerička analiza utjecaja pojedinih parametara, kao što su prometno opterećenje, duljina paketa i distribucija duljine paketa te broj poslužitelja, na čekanje u čvoru paketne mreže.

### **Ključne riječi:**

kašnjenje, FIFO, paket, eksponencijalna, deterministička razdioba,

## Summary

The paper describes the waiting packets in a packet-switch network with FIFO (First In First Out) service discipline. Also, described and analyzed all the reasons why the packages remain in the node. Presents a numerical analysis of the impact of certain parameters, such as traffic load, packet length distribution and packet length and the number of servers, on hold in node packet network.

### **Key words:**

Delay, FIFO, the package, exponential distribution, deterministic distribution,

## SADRŽAJ:

1. UVOD .....	- 1 -
2. KAŠNJENJE U PAKETNIM MREŽAMA (ČETIRI IZVORA KAŠNJENJA..... NA SVAKOME ČVORU) .....	- 3 -
2.1. Procesiranje u čvoru .....	- 5 -
2.2. Čekanje prijenaosa na odlazni link .....	- 6 -
2.3. Propagacija .....	- 8 -
2.4. Prijenos.....	- 10 -
2.4.1. Konekcijske mrežne usluge.....	- 10 -
2.4.2. Bezkonekcijske mrežne usluge .....	- 12 -
3. ANALIZA PARAMETARA KOJI UTJEČU NA ČEKANJE U ČVORU.....	- 14 -
PAKETNE MREŽE .....	- 14 -
3.1. Kapacitet odlaznog linka .....	- 16 -
3.2. Duljina paketa .....	- 17 -
3.3. Intenziteti dolazaka paketa u čvor .....	- 21 -
4. MODELI ZA ODREĐIVANJE ČEKANJA U ČVORU PAKETSKE MREŽE S.....	- 22 -
DISCIPLINOM POSLUŽIVANJA FIFO .....	- 22 -
4.1. M/M/1.....	- 23 -
4.2. M/M/m .....	- 24 -
4.3.M/D/1 .....	- 25 -
5. ODREĐIVANJE PROSJEČNOG ČEKANJA PAKETA U ČVORU.....	- 27 -
PAKETSKE MREŽE .....	- 27 -
5.1. Određivanje parametara dobrote sustava prema modelu M/M/1 .....	- 27 -
5.2. Određivanje parametara sustava prema modelu M/M/m .....	- 29 -
5.3. Određivanje parametara sustava prema modelu M/D/1 .....	- 37 -
6. ZAKLJUČAK .....	- 40 -

POPIS LITERATURE .....	- 42 -
POPIS SLIKA .....	- 43 -
POPIS TABLICA.....	- 44 -

## 1. UVOD

Korištenje komutiranih telefonskih (i rjeđe telegrafskih) kanala prvi je i relativno jednostavan način prijenosa podataka između udaljenih računala. Sve do uvođenja paketnih mreža podatkovne (računalne) komunikacije na veće udaljenosti bile su realizirane najčešće komutiranim telefonskim kanalima (konekcijom) s korištenjem odgovarajućeg modema kao sučelja između telefonske utičnice i računala (podatkovnog termina DTE). Sam termin DTE označava uređaj na podatkovnoj vezi koji šalje i prima podatke i omogućuje kontrolne funkcije za komunikaciju podacima prema protokolima. Računalna spajanje obavljalo se nakon relativnog dugog biranja (*dialing*) i uspostavljanja konekcije uz ograničen kapacitet prijenosa i bez mrežnih funkcija korekcije pogrešaka. Takav način rada danas se ne upotrebljava kao što se nekada upotrebljavao.

Paketni mod razvijen je prvenstveno s ciljem da učinkovitije zadovolji prometne zahtjeve vezane za podatkovnu komunikaciju između udaljenih računalnih terminala. Prve međunarodne norme za javnu podatkovnu mrežu CCITT - (Consultative Committee for International Telephony and Telegraphy) (ITU-T - Telecommunication Standardization Sector) specificirane su 1976. g. (kasnije su više puta nadopunjavane). Koncept paketne mreže razradio je tijekom 60-ih Paul Baran i njegov tim u RAND korporaciji. Temeljna zamisao u specifikaciji paketnog moda bila je korištenje mrežnog kanala samo kad je stvarno potreban prijenos (u kratkim vremenskim intervalima) kontrolom i ispravljanjem pogrešaka u prijenosu (tada su se koristili nepouzdana analogni transmisijski sustavi). To je zahtijevalo da korisničke informacije budu podijeljene u pakete (obično duljine 128 ili 256 okteta) koje su „u skokovima“ transportirane do odredišta. Naslov diplomskog rada je: Analiza čekanja u čvoru paketne mreže s disciplinom posluživanja FIFO. Rad je podijeljen u šest cjelina:

1. Uvod
2. Kašnjenje u paketnim mrežama (četiri izvora kašnjenja na svakome čvoru)
3. Analiza parametara koji utječu na kašnjenje u čvoru paketne mreže
4. Modeli za određivanje čekanja u čvoru paketne mreže s disciplinom posluživanja FIFO
5. Određivanje prosječnog čekanja paketa u čvoru paketne mreže
6. Zaključak



U drugom poglavlju definirana su četiri izvora kašnjenja paketa na svakome čvoru: procesiranje u čvoru, čekanje na prijenos (odlazni link), propagacija i prijenos.

U trećem poglavlju analizirani su tri parametra koji utječu na kašnjenje u čvoru paketne mreže: kapacitet odlaznog linka, duljina paketa, intenzitet dolazaka paketa. Utjecaj svakog parametra prikazan je zasebno.

U četvrtom poglavlju prikazani su modeli za određivanje zadržavanja paketa u čvoru paketne mreže s disciplinom posluživanja FIFO (First In First Out): M/M/1, M/M/m, M/D/1. Mogućnost primjene određenog modela na čvor paketne mreže ovisi o razdiobi međudolaznih vremena paketa, razdiobi vremena posluživanja na linku i broju poslužitelja.

U petom poglavlju provedena je numerička analiza utjecaja duljina paketa i prometnog opterećenja na čekanje na prijenos u čvoru i ukupno vrijeme zadržavanja paketa u čvoru. Rezultati analize za tri različita sustava (M/M/1, M/D/1 i M/M/m) prikazani su grafički i tablično.

## 2. KAŠNJENJE U PAKETNIM MREŽAMA (ČETIRI IZVORA KAŠNJENJA NA SVAKOME ČVORU)

Kašnjenje (*delay*) je vrijeme koje je potrebno paketu da se prenese od izvora do odredišta. Telefonija je primjer mrežne usluge u stvarnome vremenu, koja je jako osjetljiva na kašnjenje. Ukoliko je kašnjenje paketa u telefoniji veće od 100 ms (milisekunda), paketi ne dolaze pravovremeno na odredište (mogućnost gubitka paketa na odredištu), te razgovor postaje ne razumljiv. Ukoliko je kašnjenje veće od 200 ms, kvaliteta usluge je neprihvatljiva i razgovor nije moguć [1].

Postoje brojni čimbenici koji utječu na veličinu kašnjenja, a oni su kašnjenje zbog: kodiranja i dekodiranja, komprimiranja i dekomprimiranja, paketizacije i depaketizacije, prijenosa na linku, propagacije, usmjeravanja u čvorovima i čekanja u međuspremnicima.

Navedeni čimbenici imaju različite utjecaje na ukupno kašnjenje paketa od izvora do odredišta. Komponente kašnjenja svakog paketa mogu se razvrstati u tri skupine. U prvu skupinu ubrajaju se komponente koje se odnose na kašnjenje na predajnom terminalu, a to su: kodiranje, paketizacija i izlazno čekanje. Navedene komponente kodiraju i pretvaraju paket u oblik pogodan za prijenos u sustav, zatim se šalje od predajnog terminala dalje u sustav. Ukoliko se na izlazu nalaze više paketa jedan iza drugog, dolazi do tzv. izlaznog čekanja.

Komponente druge skupine su komponente koje utječu na kašnjenje u mreži. One se odnose na transmisiju na izvorištu, odredištu, te u samoj jezgri mreže. Transmisija je termin koji se koristi za prijenos paketa u nekom sustavu, u obliku prihvatljivom za prijenos sustavom, te se prenosi određenim medijem.

Komponente treće skupine su komponentama koje uzrokuju kašnjenje na odredišnom terminalu, a to su: ulazni red čekanja, međuspremnik za uklanjanje varijacija (*jitter*) i dekodiranje (obrnuti proces od kodiranja). Također, kao i kod predajnog terminala, ukoliko se na odredišnom terminalu nalaze više paketa jedan za iza drugog, dolazi do ulaznog reda čekanja [1].

Varijacija kašnjenja definira se kao razlika u kašnjenju između susjednih paketa iste sesije. Potrebno je razlikovanje pojam *jitter* od pojma varijacije kašnjenja. Pod pojmom varijacije razumijeva se mjera koja govori o tome kolika varijacija je uočena u promatranom vremenskom razdoblju, za razliku od *jittera* koji mjeri varijacije kašnjenja između uzastopnih paketa jedne sesije. Mjere *jittera* ovisiti će o frekvenciji kojom se paketi šalju i fokusiraju se isključivo na kratkoročne efekte. Nasuprot tomu, varijacije kašnjenja su neosjetljive na frekvenciju paketa i mjere kratkoročne i dugoročne varijacije. Zbog toga se varijacija kašnjenja čini boljim izborom. *Jitter* je prvenstveno uzrokovan razlikama u čekanjima u redu za susjedne pakete iste sesije kao i prolaskom paketa različitim putovima i čvorištima.

Postoje komponente kašnjenja koje su fiksne i komponente koje su varijabilne. Komponente koje se odnose na kašnjenja u mreži teško se mogu predvidjeti jer ovise o trenutačnom opterećenju čvorova kao i o performansama mrežnih elemenata. Na varijabilnost određenih komponenata utječu različito vrijeme čekanja u čvorovima mreže i duljina paketa koja je različita za pojedine aplikacije, a i iste aplikacije mogu imati različite duljine paketa.

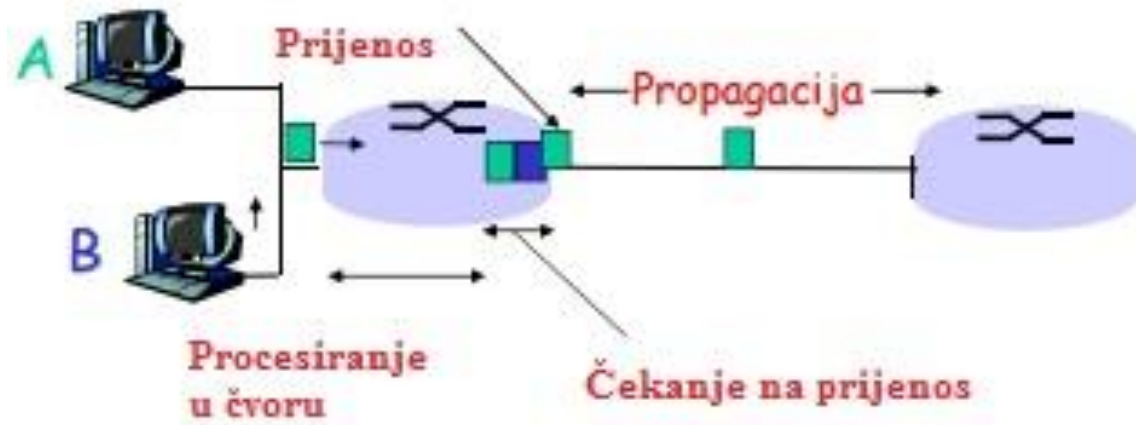
Različite vrste aplikacija zahtijevaju različite mrežne kapacitete i kvalitetu usluge. S obzirom na zahtjeve pojedinih vrsta aplikacija generalno mogu biti podijeljene u kategorije: aplikacije za prijenos podataka, govorne aplikacije i video aplikacije. Opširniji opis veličina paketa za pojedine aplikacije nalazi se pod poglavljem broj 3.

Iz [2] je vidljivo kako se mnogi pristupi za rješavanje problema kašnjenja paketa oslanjaju na raspoređivanje paketa, na primjer EDF (*Earliest Deadline First*)<sup>1</sup>. Međutim, sortiranje paketa može rezultirati povećanjem troškova i modificiranjem provedbe, jer mnogi standardi za raspoređivanje paketa podržavaju samo FIFO (*First in First out*)<sup>2</sup> model posluživanja. Stoga, FIFO model čekanja paketa je pogodan za izračunavanje najgoreg slučaja kašnjenja paketa.

---

<sup>1</sup> Algoritam koji procesima (zadacima) dodjeljuje prioritete. Proces koji je najbliži završetku procesa koji se izvršava, biti će idući odrađen.

<sup>2</sup> Model posluživanja kod kojeg se poslužuju paketi koji su prvi stigli (prvi ušao prvi izašao)



Slika 1. Četiri izvora kašnjenja na svakome čvoru

Izvor: [2]

Na slici 1. prikazana su četiri izvora kašnjenja koja obuhvaćaju sve prethodno navedene razloge zašto se paketi zadržavaju (eng. *delay*) od izvora do odredišta. Ukupno kašnjenje predstavlja sumu svih tih kašnjenja:

- $d_{proc}$  – procesiranje u čvoru (nekoliko mikrosekundi ili manje)
- $d_{queue}$  - kašnjenje uslijed čekanja na prijenos (zavisi o zagušenju)
- $d_{trans}$  – vrijeme prijenosa (značajno na linkovima malih kapaciteta)
- $d_{prop}$  - vrijeme propagacije (nekoliko mikrosekundi do nekoliko stotina milisekundi).

$$d_{uk} = d_{proc} + d_{queue} + d_{prop} + d_{trans} \quad (1)$$

## 2.1. Procesiranje u čvoru

Procesiranje se ubraja pod fiksno kašnjenje, a pod njega spada: kodiranje, dekodiranje, *jitter* i paketizacija.

Kašnjenje prisutno kod kodiranja je vrijeme potrebno za kodiranje paketa i uvijek ovisi o veličini paketa koji se kodira. Što je veći paket, to je veće kašnjenje. Tipično kašnjenje za kodiranje iznosi između 10 i 30 ms.

Iduće kašnjenje je kašnjenje prisutno kod dekodiranja, a to je vrijeme koje je potrebno da se paket dekodira i počne koristiti. Vrijeme kašnjenja za dekodiranje je uvijek minimalno.

„Paketizacijsko“ kašnjenje je prouzrokovano vremenom potrebnim da se paketi ispune potrebnim podacima. Generalno, što su veći paketi, to je potrebno i više vremena da se oni napune. Ovaj problem javlja se također i na prijamoj strani zbog toga što se pristupnik mediju (*MG-Media Gateway*) mora maknuti i ponovno dalje procesirati pakete.

IP uređaji koriste takozvane *jitter* buffers za uklanjanje kratkoročnog kašnjenja zbog varijacije dolazaka paketa iz primljenog paketnog toka. Umetanjem odgode, sustav je u mogućnosti postaviti pravilan poredak paketa prije njihovog dekodiranja i korištenja. *Jitter* buffers su često prilagodljivi, te njihovo kašnjenje može biti do nekoliko stotina ms.

Ukupno kašnjenje procesiranja u čvoru može biti minimalno od 10 do 20 ms, a moguće je i veliko kašnjenje od nekoliko stotina ms. Ukoliko dođe do velikog kašnjenja, sustav registrira gubitak paketa [1].

## 2.2. Čekanje prijenosa na odlazni link

Kao što je objašnjeno u [3], čekanje na prijenos započinje kada paketi koji trebaju biti obrađeni i poslani dolaze brže nego je to moguće obraditi. Iz toga proizlazi da što je veći broj paketa i njihova veličina, to će kašnjenje biti veće. Što dovodi do klasičnog čekanja na prijenos.

Idealno bi bilo kada bi se održavalo prometno opterećenje jednakim prijenosom kapaciteta odlaznog linka. U praksi je to gotovo neizvedivo. Razlog tome je nepredvidljivost dolaska paketa koji trebaju biti obrađeni i poslani od linka u daljnji sustav, a i sam kapacitet odlaznog linka nije uvijek stabilan. Prosječno kašnjenje i paketi koji čekaju na obradu i slanje mogu se najjednostavnije opisati po formuli  $1/(\mu-\lambda)$  gdje je  $\mu$  stopa usluge (broj paketa u sekundi koje odlazni link može poslati), a  $\lambda$  je dolazna brzina (prosječna brzina paketa koji dolaze na odlazni link).

Na primjer, ako je brzina usluge 10 paketa po sekundi (brzina usluge je stabilna), a brzina dolaska paketa 5 paketa po sekundi. Iz čega slijedi da je prosječno očekivano kašnjenje jednako  $1/(10-5)$ , odnosno 0,2 sekundi (200 ms). Iako se koristi samo 50 % brzine usluge, prosječno kašnjenje je neprihvatljivo za glasovnu komunikaciju, odnosno prijenos glasa. Ako je brzina dolaska paketa 9 paketa po sekundi, prosjek očekivanog kašnjenja je 1 sekunda. Dok je za brzinu dolaska 9,5 paketa po sekundi, prosjek očekivano kašnjenje penje se na 2 sekunde. U slučaju da je brzina dolaska 9,9 paketa po sekundi, prosjek kašnjenja penje se na čak 10 sekundi. Rezultati dobiveni formulom prikazani su u tablici 1.

$$Tq = 1 / (\mu - \lambda) \quad (2)$$

**Tablica 1.** Prikaz prosječnog kašnjenja ovisno o brzini usluge i brzini dolaska paketa

brzina usluge pak/s ( $\mu$ )	brzina dolaska paketa pak/s ( $\lambda$ )	prosječno kašnjenje (s)
10	5	0,2
10	9	1
10	9,5	2
10	9,9	10

Izvor [3]

Kašnjenje u paketnoj mreži najbolje se može opisati prosjekom. Ako je ukupna prosječna stopa izlaska paketa jednaka stopi ulaska paketa, nastati će gomilanje na odlaznom linku što će prouzročiti prepunjenje odlaznog linka.

Stopa usluga ovisna je o brzini prijenosa paketa i prosječne očekivane veličine paketa. To se prikazuje formulom,

$$\mu = C / p \quad (3)$$

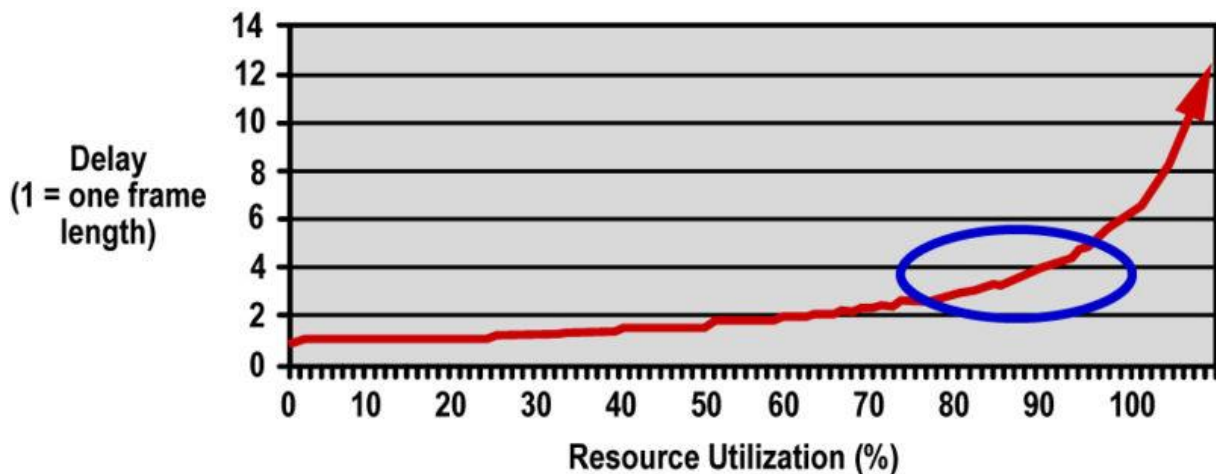
gdje je C brzina prijenosa paketa, a p prosječna veličina paketa. Što dovodi do zanimljivog efekta, što je veći omjer između prosječne veličine paketa i ukupne brzine prijenosa, to je veći postotak opterećenja koji link može podržati bez neprihvatljivog kašnjenja.

Na primjer, 10 Mb/s za prijenos paketa čija je prosječna veličina 10 000 bita (1250 Byte). Stopa usluga ( $\mu$ ) će biti 10 000 000 / 10 000 odnosno 10 000 paketa u sekundi. Ako je brzina dolaska je 500 paketa po sekundi, onda se očekuje prosječno kašnjenje je  $1 / (1000-500)$  ili  $1/500$ , što daje kašnjenje od 0,002 sekundi ili 2 milisekunde. Ako su paketi smanjeni na 1 000 bitova (125 Byte), onda stopa usluga postaje 10 000 paketa u sekundi. Ako trenutno

postoji 5 000 paketa koji dolaze u sekundi, prosječna odgoda je  $1 / (10\ 000 - 5\ 000)$  ili  $1/5\ 000$ , odnosno kašnjenje je 0,0002 sekundi ili 0,2 milisekundi.

Što dovodi do velikih problema za mrežne programere. Najpogodnija situacija je kada bi kapacitet odlaznog linka bio velik, a paketi što manji. Paketi koje prenose govorne usluge vrlo su mali kako bi se smanjilo moguće kašnjenje. Također, bitno je napomenuti da se mreža nikada ne može u potpunosti iskoristiti. Uvijek je potrebno imati dio slobodnog linka ukoliko dođe do iznenadnog povećanja dolaska paketa. Na taj način umanjuje se iznenadno kašnjenje.

Sofisticirane tehnike koje služe za upravljanje redovima čekanja teško mogu osigurati minimalna kašnjenja za visoko prioritetni promet. Kašnjenje paketa ovisno o prometnom opterećenju prikazano je na slici 2.



*Slika 2. Prikaz kašnjenja na prijenos, [3]*

### 2.3. Propagacija

U [4] objašnjeno je propagacijsko kašnjenje kao vrijeme potrebno električnom (ili fotonskom) signalu da savlada duljinu vodiča od točke A do točke B. Brzina ovih signala uvijek je manja od brzine svjetlosti. Propagacijsko kašnjenje uvijek postoji, ali do izražaja najviše dolazi kod velikih udaljenosti.

Propagacijske poruke sa mehanizmom kodiranja uključuje kašnjenje, koje se sastoji od kašnjenja prijenosa po kanalu i kašnjenja prilikom procesiranja u čvorovima. Danas procesiranje u čvorovima može biti dominantan faktor u ukupnom kašnjenju pri slanju poruka kroz mrežu. Zato je poželjno da mehanizmi kodiranja pri mrežnom kodiranju budu

primijenjeni jednostavnim i brzim elektronskim kodovima, stog mrežni kodovi moraju biti praktični.

Propagacijsko kašnjenje najbolje je prikazati na primjeru prijenosa paketa veličine 100 Byte (primjer je izrađen i pojašnjen prema [5]). Sustav se sastoji od dvije točke, odnosno od odlaznog terminala i dolaznog terminala. Terminali su udaljeni 10 km te se paket prenosi svjetlovodnim vodičima brzine  $2,9 \cdot 10^8$  m/s. Odlazni link ima mogućnost obrade paketa 500 KB/s. Uz sve te parametre propagacijsko kašnjenje iznosi 0,03 ms. Sada je postavljen primjer prema kojemu se uspoređuju rezultati koji će se dobiti mijenjanjem parametara (duljina paketa, propagacija, veličina paketa i obrada podataka).

Ukoliko se propagacija vodiča smanji na  $2 \cdot 10^8$  m/s, a ostali parametri ostaju isti, propagacijsko kašnjenje se povećava te iznosi 0,05 ms. Ukoliko se zadržava propagaciju vodiča na  $2,9 \cdot 10^8$  m/s, a povećamo duljinu između terminala na 100 km, propagacijsko kašnjenje se povećava te iznosi 0,34 ms. Ukoliko se mijenja veličina paketa koji se prenosi na 500 Byte, propagacijsko kašnjenje ostaje jednako te iznosi 0,03 ms. Ukoliko se promijeni mogućnost obrade paketa na 1 MB/s, propagacijsko kašnjenje također ostaje isto i iznosi 0,03 ms. Rezultati su prikazani u tablici 2.

**Tablica 2.** Rezultati propagacijsko kašnjenja

Duljina prijenosa Km	Propagacija m/s	Veličina paketa Byte	Obrada paketa KB/s	PROPAGACIJSKO KAŠNJENJE (ms)
10	$2,9 \cdot 10^8$	100	500	<b>0,03</b>
10	$2 \cdot 10^8$	100	500	<b>0,05</b>
<b>100</b>	$2,9 \cdot 10^8$	100	500	<b>0,34</b>
10	$2,9 \cdot 10^8$	<b>500</b>	500	<b>0,03</b>
10	$2,9 \cdot 10^8$	100	<b>1024</b>	<b>0,03</b>

Izvor [5]

Iz rezultata zaključuje se da propagacijsko kašnjenje ovisi o propagaciji vodiča i duljini prijenosa. Ako je propagacija vodiča manja, propagacijsko kašnjenje biti će veće. Kod duljine prijenosa situacija je obrnuta. Propagacijsko kašnjenje povećava se ako se povećava duljina prijenosa. Bitno je napomenuti kako propagacijsko kašnjenje ne ovisi o veličini paketa koji se prenosi i o brzini obrade paketa. Navedena dva parametara mogu se povećati ili smanjiti, no propagacijsko kašnjenje se neće promijeniti.



## 2.4. Prijenos

U [6] definirano je sljedeće: kašnjenje na prijenosu je kružno kašnjenje za IP paket u IP mreži. Kašnjenje je moguće mjeriti pomoću alata „ping“ ili protokola kao što je RTCP (*Real Time Control Protocol*). Neke IP mreže koriste pakete za transport glasa sa većim prioritetom od paketa drugog tipa. Stoga, kašnjenja koja mjeri „ping“ ili RTCP mogu biti različita od stvarnog kašnjenja glasovnog paketa.

Kašnjenje na prijenosu u mreži sastoji se od kašnjenja na samom prijenosu i kašnjenja zbog čekanja u redu koje nastaje zbog putovanja paketa različitim rutama, switches-ima i ostalim hardware-ima koji se nalaze u mreži. Postoji određena minimalna razina kašnjenja koja ovisi o vremenu potrebnom za prijenos paketa kroz link. Zbog toga je dodano više razina varijabli kašnjenja zbog zagušenja mreže. Kašnjenje na prijenosu je u rasponu od nekoliko ms do nekoliko stotina ms.

Ako je IP uređaj spojen preko DSL<sup>3</sup>, kablovskog modema ili digitalne mreže niske brzine, onda zagušenja koja nastaju kašnjenjem mogu biti izrazito značajna. Obično je potrebno 100 ms za slanje maksimalne veličine IP paketa kanalom kapaciteta 128 kb/s. Znači, ako se odvija prijenos glasa i podataka na istom linku, prijenos glasa može biti značajno odgođen zbog prijenosa podataka. Isto tako može uzrokovati visoku razinu *jittera*. Zbog kašnjenja na prijenosu moguće je značajno narušavanje kvalitete komunikacije. Visoke razine kašnjenja mogu dovesti do gubitka paketa, te korisnik kojemu se šalju paketi neće dobiti potpuni informacijski sadržaj paketa.

Prema [1] definirana je podjela mrežne paketne usluge prema načinu usmjeravanja paketa kroz mrežu: konekcijske mrežne usluge CONS (*Connection Oriented Network services*) i bezkonekcijske mrežne usluge CLNS (*Connection Line Network services*).

### 2.4.1. Konekcijske mrežne usluge

Konekcijske mrežne usluge dijele se u dvije skupine virtualnih kanala. Konekcijske mrežne usluge s komutiranim virtualnim kanalima SVC (*Switched Virtual Circuit*) i usluge s permanentnim (stalnim virtualnim kanalima PVC (*Permanent Virtual Circuit Service*)) [6].

---

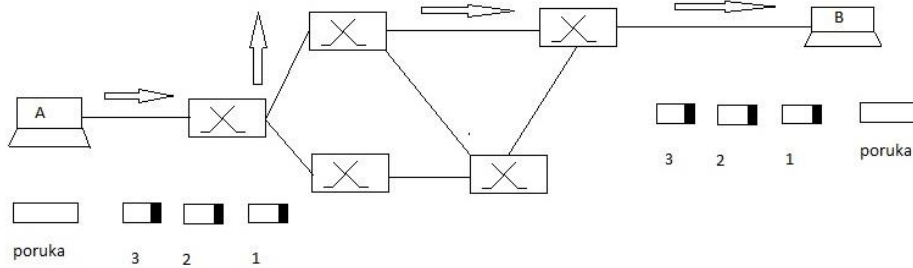
<sup>3</sup> Digitalna pretplatnička linija

Kod konekcijski orijentiranog prijenosa uspostavlja se virtualni kanal između proizvoljnih točaka (sučelja korisnik-mreža) što dijelom sličí uspostavljanju telefonskog komutiranog kanala. Paketi putuju mrežom koristeći isti put (virtualni kanal) koji se uspostavlja na zahtjev korisnika (pozivom SVC) ili na dulje vrijeme ka PVC. Temeljno svojstvo CONS načina prijenosa je korištenje jednog puta (rute) kroz mrežu i sekvencijalno pristizanje paketa redoslijedom otpremanja.

Proces prijenosa kod SVC mrežne usluge u osnovnom opisu može se analizirati kroz tri faze. Prva faza je uspostavljanje konekcije (*Connection set-up*) u kojoj se prvi pozivni paket šalje s kompletnom adresom. Adresne informacije u obliku broja logičkog kanala LCN (*Logical Channel Number*) pohranjuju se u svakome čvorištu na putu do odredišta. Na taj način uspostavljena je virtualna konekcija između izvorišta i odredišta. Druga faza je transmisija podataka (*Data transmission*) u kojoj se šalju se paketi s korisničkim sadržajem (*payload*) koji imaju samo LCN (tj. Nemaju kompletnu adresu). Svaki čvor vrši rutiranje tako da očita LCN i temeljem toga ga dalje usmjeravaju. Dok je treća faza raskidanje (oslobađanje, *Release*) u kojoj se šalje paket raskidanja konekcije koji briše adresne informacije privremeno pohranjene u čvorovima i tako raskida virtualnu konekciju [1].

Kod permanentne virtualne konekcije (PVC) nema prve faze, odnosno ta je konekcija uvijek raspoloživa korisniku. PVC uspostavlja mrežni operator na dulje vrijeme tako da se logički brojevi koji označavaju PVC kanale pridružuju određenom korisniku. To znači da davatelj mrežne usluge pridružuje određen fiksni broj virtualnih kanala korisniku tako da svaki osigurava konekciju s drugim sučeljem korisnik/mreža.

Pojednostavljen prikaz konekcijski orijentirane mrežne usluge CONS u paketnoj mreži dan je na slici 3. Detaljniji sustavni opis postupaka uspostavljanja veze temelji se na odgovarajućim ST dijagramima stanja i prijelaza koji su definirani za konekcijski protokol.



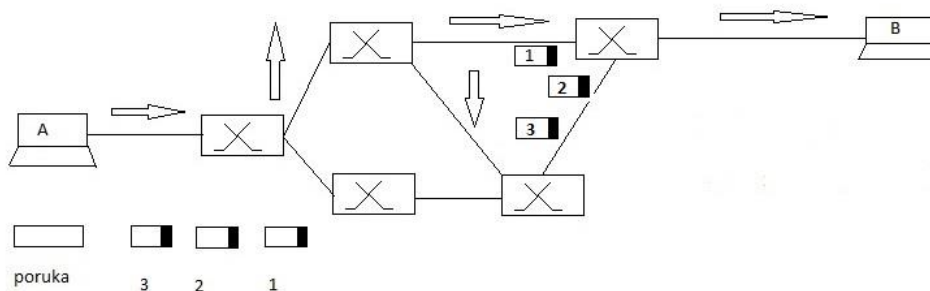
**Slika 3.** Konekcijski orijentirana mreža usluga (CONS)

Izvor [1]

### 2.4.2. Bezkonekcijske mrežne usluge

Kod bezkonekcijskog prijenosa svaki je paket opremljen adresom i numeriran tako da može biti usmjeravan različitim putovima do odredišta. Što znači da paketi koji pripadaju istoj izvorišnoj poruci ne moraju stići na odredišni (pristupni) čvor onim redoslijedom kojim su odaslani niti se jamči pouzdan prijenos (bez pogreške). Ako se krajnjim korisnicima nudi konekcijski orijentirana usluga i pri tome rabe „inertni“ datagram prijenosa u mreži, tada odredišni komutirani čvor mora imati i funkcionalnosti pohranjivanja sa premještanjem (*reorder*) i otkrivanjem pogrešaka.

Proces prijenosa (*transfer process*) za CLNS uslugu je u osnovi jednofazni, odnosno sadrži samo transmisiju podataka (*data transmission*) budući da se ne uspostavlja virtualna konekcija od kraja do kraja. Način bezkonekcijskog prijenosa paketa, odnosno datagrama mreža usluga ilustrirana je na slici 4 [1].



**Slika 4.** Bezkonekcijski način prijenosa paketa (datagram mrežna usluga)

Izvor [1]

Bezkonekcijski način prijenosa ili „*datagram mod*“ pogodan je za među mrežni rad (*Interworking*) bez obzira na to jesu li pojedine mreže VC ili datagram tipa. Komparacija

temeljenih svojstava konekcijskih (SVC i PVC) i bezkonekcijskih (datagrama) usluga dana je u tablici 3.

**Tablica 3. Komparacija SVC, PVC i DG**

<b>PVC</b>	<b>SVC</b>	<b>DG</b>
Virtualna konekcija uspostavljena je unaprijed (na dulje vrijeme)	Virtualna konekcija (uspostavlja se prije svake komunikacije)	Ne uspostavlja se virtualna konekcija
Paketi ne moraju biti adresirani	Potpuno adresiranje je potrebno samo tijekom uspostavljanja konekcije	Svaki paket mora imati potpunu adresu
Rutiranje je unaprijed postavljeno	Rutiranje se postavlja tijekom uspostave konekcije	Svaki paket neovisno je rutiran
Kontrola tijeka prometa "od-čvora-do-čvora" kao i "od-kraja-do-kraja"	Kontrola tijeka prometa "od-čvora-do-čvora" kao i "od-kraja-do-kraja"	Izvodi se kontrola tijeka prometa samo "od-čvora-do-čvora"
Očuvan je redoslijed paketa ( <i>sequencing</i> )	Očuvan je redoslijed paketa ( <i>sequencing</i> )	Paketi se isporučuju na određite neovisno o početku odašiljanja ( <i>no-sequencing</i> )
Mrežne (uslužne) performanse unaprijed su ugovorene	DTE može "ugovarati" vrijednosti mrežnih (uslužnih) performansi tijekom uspostave konekcije	Vrijednosti mrežnih (uslužnih) performansi ne mogu se jamčiti
Preuzimanje paketa i poruka ( <i>message</i> ) može biti potvrđeno od određiškog DTE	Preuzimanje paketa i poruka može biti potvrđeno od određiškog DTE	Preuzimanje poruka ostaje nepotvrđeno, moguće potvrđivanje pojedinih paketa

Izvor [1]

### 3. ANALIZA PARAMETARA KOJI UTJEČU NA ČEKANJE U ČVORU

#### PAKETNE MREŽE

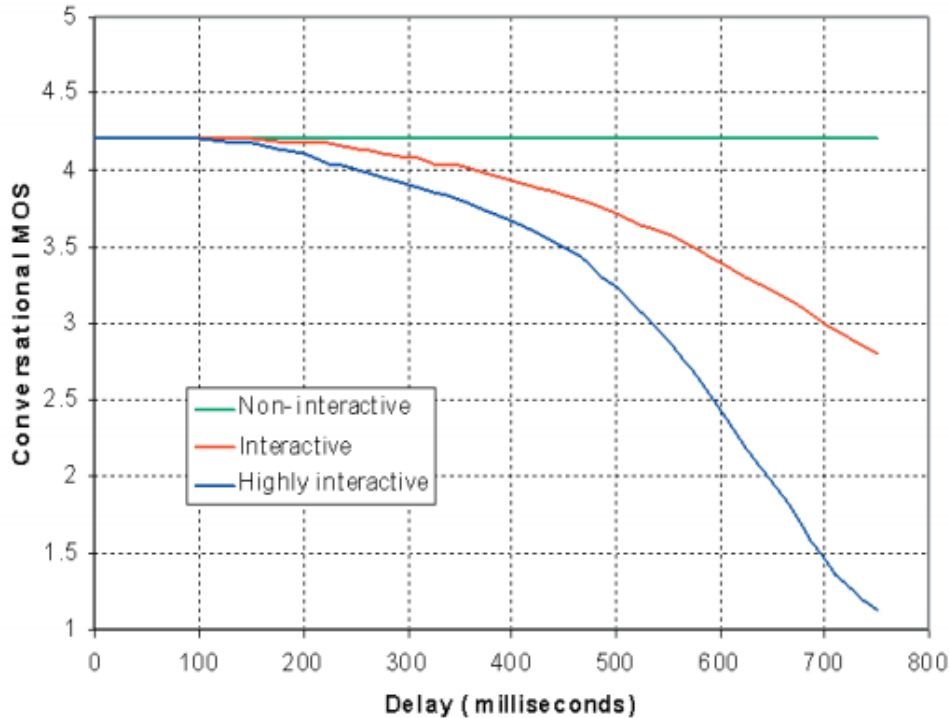
Različite vrste aplikacija zahtijevaju različite mrežne kapacitete i kvalitetu usluge. S obzirom na zahtjeve pojedinih vrsta aplikacija dijele se na: aplikacije za prijenos podataka, govorne aplikacije i video aplikacije.

U [6] definiran je normalni govor koji je interaktivni proces u kojemu kašnjenje može dovesti do upadanja glasovne poruke govornika drugome govorniku (*doubletalk*) ili su moguće pauze i šumovi u govoru zbog prevelikog kašnjenja. Ako dolazi do maloga kašnjenja događaju se samo ispuštanja malog dijela glasovne poruke. Što nije veliki problem jer se poanta glasovne poruke može shvatiti iz konteksta ostatka glasovne poruke. U takvim situacijama najčešće se ispušta samo poneki fonem odnosno slog neke riječi. Ukoliko dolazi do velikog kašnjenja, veliki dio glasovne poruke može se smatrati izgubljenim. Tada na mjesto izgubljenih glasovnih poruka dolazi šum ili se ništa ne čuje (dolazi do pauze u glasovnoj poruci). Rezultat tome je pogrešno tumačenje glasovne poruke što može dovesti do velikih problema.

Gubitak glasovne poruke najbolje je objasniti na primjeru. Kao primjer može se razmotriti glasovna poruka: „Kolega, položili ste ispit.“. Ukoliko govorni kanal ima minimalno kašnjenje, može se dogoditi da poruka glasi: „Kolega, položi ste ispit.“. U navedenoj poruci nedostaje zadnji slog „li“ u riječi „položili“. No, iz konteksta ljudski mozak može trenutno shvatiti pravo značenje poruke. Ukoliko govorni kanal ima veliko kašnjenje, može se dogoditi da poruka glasi: „Kolega, ste ispit.“. U navedenoj poruci nedostaje cijela riječ „položili“. Iz čega nije moguće razaznati značenje poruke.

Jednako kašnjenje ne mora nužno uvijek imati jednak učinak. Ako se razgovor odvija u jednom smjeru, kašnjenje ne mora imati veliki učinak na glasovnu poruku. Ukoliko se razgovor odvija u dva smjera, tada čak i mala kašnjenja mogu prouzrokovati probleme u komunikaciji.

U grafu 1. prikazana su rezultati kašnjenja u tri situacije. Ukoliko je razgovor *non-interactive*<sup>4</sup>, tada kašnjenje nema nikakav efekt. Za *interactive*<sup>5</sup> razgovor postoji mali efekt na 300 ms. Međutim, za *high-interactive* vidljiv je efekt već na 100 ms te se razgovor degradira sa sve većim kašnjenjem.

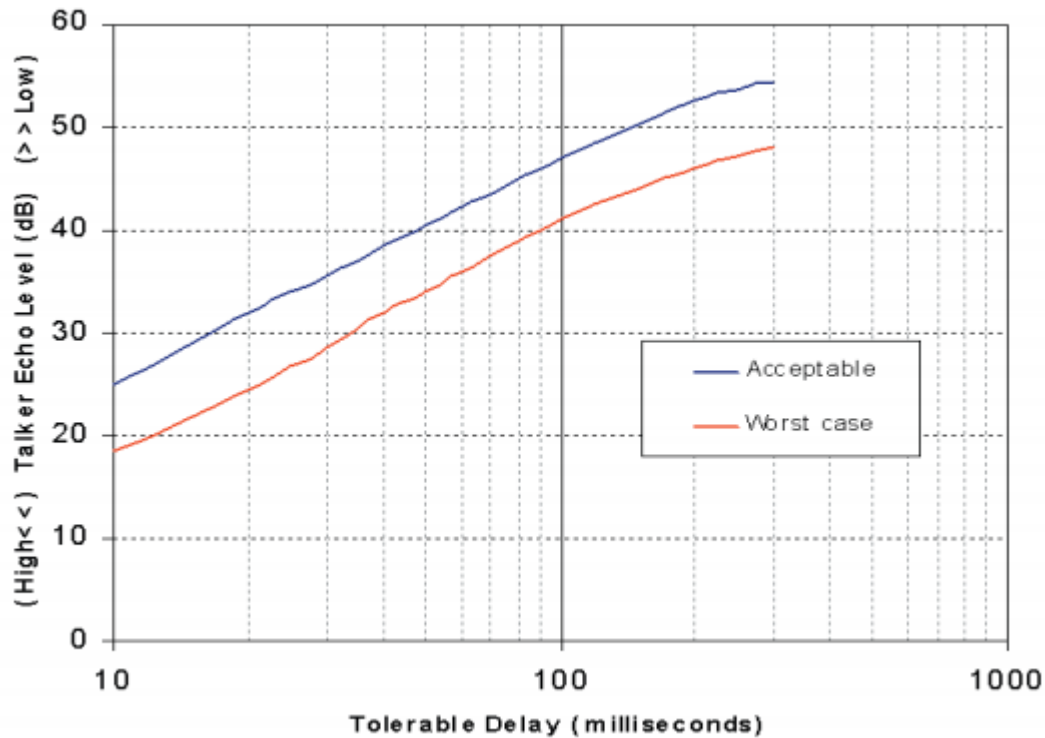


**Graf 1.** Ovisnost vrste razgovora i kašnjenja, [6]

Jeka je čest problem u prijenosu glasovnih paketa. Efekt jeka ovisi o kašnjenju. Ako je kašnjenje izrazito malo tada je razina jeka podnošljiva. U grafu 2. vidljivo je da u kašnjenju od 10 ms razina jeka od 25 dB je podnošljiva. Međutim, sa kašnjenjem od 100 ms tolerirana razina jeka je 46 dB, što je dosta nisko. Jeka može biti uzrokovana akustičnim „*feedbackom*“ od strane zvučnika prema mikrofону govornog uređaja ili zbog spajanja 4-žičanog u 2-žičani analognu konekcijsku točku. Za redukciju jeka koristi se „*echo cancellers*“, međutim rezultati nisu uvijek efektivni.

<sup>4</sup> Ne interaktivni razgovor je razgovor u kojemu se razgovor odvija isključivo u jednom smjeru

<sup>5</sup> Interaktivni razgovor je razgovor u kojemu se razgovor odvija u dva smjera



*Graf 2. Prikaz veze ovisnosti kašnjenja i razine jeke, [6]*

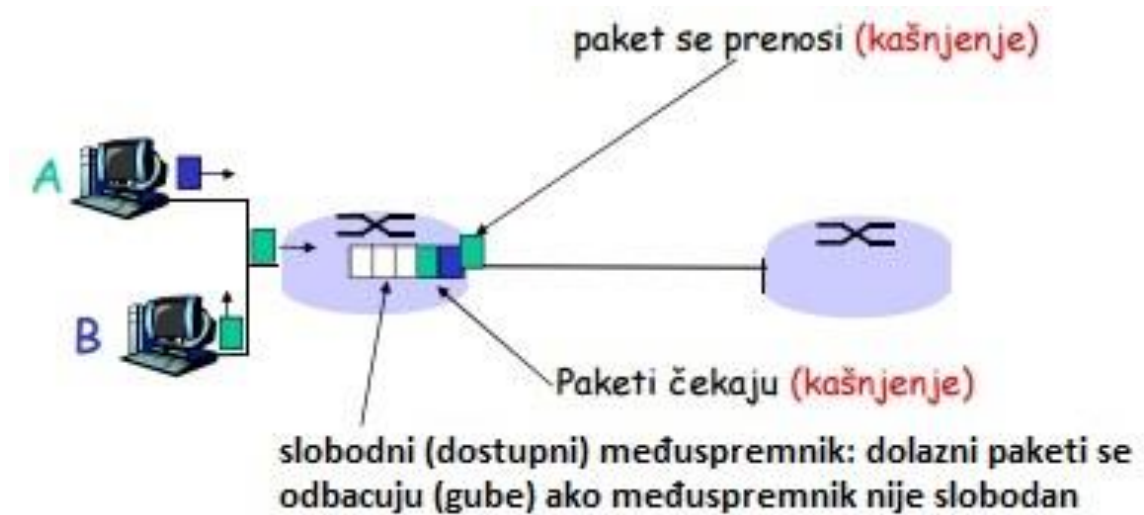
### 3.1. Kapacitet odlaznog linka

Prema [7] definirano je sljedeće: Internet se sastoji od skupa međusobno povezanih mreža koji se sastoje od elemenata za prospajanje i usmjeravanje prometnih tokova, koji su međusobno povezani fizičkim linkovima. Osim fizičke povezanosti, postoji logička i aplikacijska povezanost. Logička povezanost sastoji se od protokola kao skup pravila kojima se određuje kako komuniciraju uređaji na mreži. Međutim, aplikacijska povezanost odnosi se na same aplikacije i gotove programe koji služe za predstavljanje podataka korisniku u razumljivom obliku.

Zadatak fizičkih linkova je prijenos podataka između rutera. Podatci su većinom upakirani u pakete različitih veličina, te se kao takvi prenose linkovima fiksnom brzinom koja se naziva brzina linka ili kapacitet. Kada je odlazni link iz nekog čvora mreže u potpunosti iskorišten, on će prenositi pakete najbrže što može, odnosno ovisno o implementiranim mehanizmima raspoređivanja kapaciteta odlaznog linka. Kapacitet linka je fizičko ograničenje između dva rutera koja povezuje. Također, povezan je i sa kašnjenjem u prijenosu podataka i

vjerojatnosti izgubljenih paketa. Paketi ulaze u ruter u ulaznom portu, gdje se ispituje njegovo odredište. Na taj način se određuje koji je odgovarajući put kroz ruter za pojedini paket.

Paketi se spremaju u međuspremnicima rutera dok se ne donese odluka o tome gdje će se usmjeriti paket. U slučaju da je kapacitet međuspremnika u potpunosti iskorišten, dolazeći paketi ne mogu se smjestiti u međuspremnik, te se tada smatraju odbačenima. Brzina prosljeđivanja paketa prema odlaznom portu je ograničena. Također, ovisi o brzini kojom je moguće donositi odluke o usmjeravanju paketa, dok brzina kojom se prosljeđuju paketi prema sljedećem čvoru ovisi o kapacitetu odlaznog linka. Rezultat toga je dodatno zadržavanje paketa pri prolasku kroz ruter. Na slici 5. može se vidjeti jednostavan prikaz međuspremnika na odlaznom linku.



*Slika 5. Prikaz međuspremnika odlaznog linka*

Izvor: [2]

Paketi se usmjeravaju koristeći dvije metode: statičku i dinamičku. Administratori unose naredbe ruteru gdje će usmjeriti pakete, dok kod dinamičke metode ruter komunicira s ostalim ruterima u mreži kako bi saznao gdje se mogu pronaći različite adrese.

### **3.2. Duljina paketa**

Neke komponente kašnjenja su fiksne, dok su druge varijabilne. Komponente koje se odnose na kašnjenja u mreži teško se mogu predvidjeti jer ovise o trenutnom opterećenju čvorova kao i o performansama mrežnih elemenata. Na varijabilnost određenih



komponenta utječu različito vrijeme čekanja u čvorovima mreže i duljina paketa koja je različita za pojedine aplikacije, a i iste aplikacije mogu imati različite duljine paketa.

Premda je govor prva aplikacija koja zahtijeva QoS, pri prijenosu preko Interneta i ostale aplikacije koje uključuju više medija pojavljuju se na Internetu u sve većem broju uključujući distribuciju audia (net radio, MP3 glazba, itd.) i videa (*streaming* video, DVD, HDTV, itd.). Tablicom 4. prikazane su duljine paketa za različite videoaplikacije i različite kodeke govora [6].

**Tablica 4.** Veličina paketa za prijenos govora, videokonferencija i prijenosa videa strujanjem

APLIKACIJE	KORIŠTENI KODECI	DULJINE PAKETA
GOVOR	G.711 64k, 20 ms	160 Byte+40/60 Byte
	G.728, 16K LD-CELP, 20 ms	40 Byte+40/60 Byte
	G.729, 8K CS-ACELP, 20 ms	20 Byte+40/60 Byte
VIDEO	Business-Quality Conference	915 Byte
	NetMeeting Video LAN	779 Byte
	NetMeeting Video DSL	363 Byte
	NetMeeting Video 28K	288 Byte
	Media Player 80K Stream DSCP CS4	687 Byte
	Media Player 80K Stream DSCP CS4	476 Byte
	Media Player 80K Stream DSCP CS4	384 Byte

Izvor [6]

Prijenos govora, odnosno VoIP (*Voice over IP*)<sup>6</sup> omogućava korisnicima više mogućnosti i daje im više opcija [8]. Veliki broj korisnika već koristi sustave koji se baziraju na kombinaciji analogne i VoIP tehnologije. Najbolji primjeri su društvene mreže (Facebook, Twitter), aplikacije dostupne za mobilne uređaje i računala (Skype, Viber, WhatsApp).

Prema [6] VoIP tehnologija zahtijeva slijedeće:

- VoIP kodeci omogućuju prijenos govora na 8 Kb/s, a telefonska linija zahtijeva 64 Kb/s. Pretvaranje glasovnih i faks poziva iz analognog u digitalni oblik. To je učinjeno u PSTN za kancelarijski prijenos, ali na manje učinkovit način
- Paket se provodi preko IP mreže, što se idealno uklapa u QoS značajke, te daje veći prioritet osjetljivom prometu kao što je RSVP ili drugi mehanizmi
- VoIP sustav također mora uključivati postavljanje i upravljanje pozivima

<sup>6</sup> Unificirana komunikacija, odnosno prijenos govora putem Internet mreže

Na primjer kodek G.711 duljine paketa od 160 Byte, te se svaki VoIP paket generira svakih 20 ms, što znači da u jednom sekundi se generira 50 paketa. Ako se dodaju ostala zaglavlja veličine od 40 do 60 Byte, duljina paketa iznosi 200 Byte. Kada se Byte pretvori u bite, paket je veličine od 1600 bita. Kada se veličina paketa pomnoži sa brojem generiranih paketa u sekundi, dobiva se širina pojasa po razgovoru od 80 Kb/s. Ovaj primjer prikazan je u tablici ispod zajedno sa drugim kodecima koji su navedeni u tablici 5.

**Tablica 5.** Glasovna širina pojasa po kodecima

KODEK	INTERVAL	VELIČINA (B)	PAKETI U SEK.	ŠIRINA POJASA
G.711	20 ms	160	50	80 Kb/s
G.711	30 ms	240	33	74 Kb/s
G.729A	20 ms	20	50	24 Kb/s
G.729A	30 ms	30	33	19 Kb/s

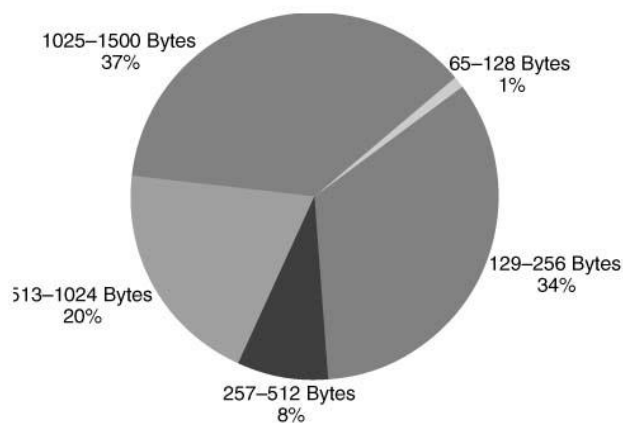
Izvor [6]

Postoje dva tipa videa koji se prenose: interaktivni video (videokonferencija) i streaming video.

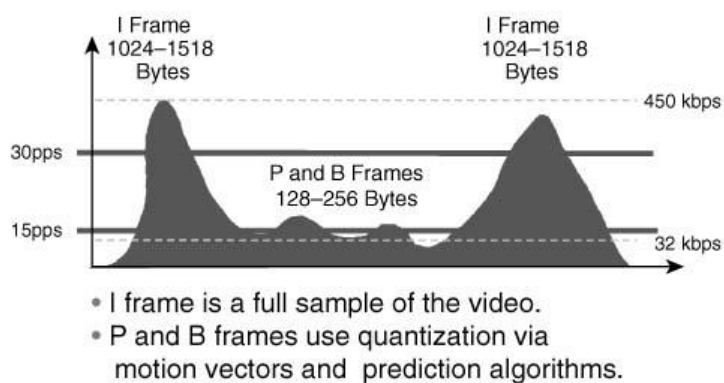
Kada se šalje interaktivni video, prema [8] trebaju se zadovoljiti određeni kriteriji:

- Interaktivni video promet treba bi biti označen oznakom DSCP AF41, iako je moguća oznaka AF42 i Af43.
- Gubitak paketa ne bi smio biti veći od 1.
- Kašnjenje u jednom smjeru ne smije biti veće od 150 ms.
- *Jitter* ne smije biti veći od 30 ms.
- Uvijek je potreba veća propusnost od samog interaktivnog videa (na primjer, 384 Kb/s videokonferencija zahtijeva 460 Kb/s propusnost).

Budući da interaktivni video uključuje G.711 glasovni kodek, što rezultira jednakom gubitku i kašnjenju kao za prijenos glasa. Međutim veličina paketa interaktivnog videa razlikuje se od glasovnog. Distribucija duljina paketa za interaktivni video promet prikazana je na slici 6. Na slici 7 prikazane su različite brzine interaktivnog video prometa.



**Slika 6.** Različite veličina paketa za interaktivni video promet, [8]



**Slika 7.** Različite brzine interaktivnog video prometa, [8]

Prema [8] kada se šalje *streaming* video, trebaju se zadovoljiti određeni kriteriji:

- *Streaming* video treba biti označen oznako DSCP CS4
- Gubitak ne smije biti veći od 5 %
- Kašnjenje ne smije biti veće od 4 do 5 sekundi
- Ne postoje značajni zahtjevi za *jitter*

*Streaming* video aplikacija ima blaže zahtjeve jer prienos paketa jednosmjernan i nije toliko osjetljiv. Međutim, *streaming* video može sadržavati vrijedan sadržaj, kao što su aplikacije za e-učenje ili sastanak neke tvrtke. U takvim slučajevima zahtijeva se usluga jamstva [6].

### 3.3. Intenziteti dolazaka paketa u čvor

Određeni tipovi prometa, posebno stvarno-vremenski promet kao što je govor, ne toleriraju velike varijacije u kašnjenju [9]. Razlike u vremenima dolazaka paketa na određite se manifestiraju kratkim prekidima u komunikaciji. Da bi se prikrile varijacije u kašnjenju paketa i spriječile neželjene pojave, poput kratkih prekida u govornom tijeku, dimenzioniraju se tzv. *dejitter* međuspremnicima odnosno međuspremnicima za uklanjanje kolebanja kašnjenja. Njegova je uloga izgladiti varijacije kašnjenja koje su prisutne u paketnoj mreži. To je posebno važno za prijenos govora jer govor mora biti isporučivan konstantnom brzinom. Za takve spremnike je također važno da se može izvršiti ponovni poredak paketa za one pakete koji su stigli van reda u pristupnik mreži.

Bez takvog spremnika paketa, svi paketi koji stignu na određeni paketni pristupnik u neko drugo vrijeme koje nije očekivano vrijeme dolaska paketa, morali bi biti odbačeni. Što može dovesti do potencijalno neprihvatljive stope gubitaka paketa. Tipični spremnik paketa zbog ublažavanja *jittera* zadržava dva do četiri paketa i stoga uvodi dodatno kašnjenje od 20 do 40 ms za pakete veličine 10 ms i 40 do 80 ms za pakete veličine 20 ms. *Jitter* ne bi smio biti veći od 60 ms (prosječna kvaliteta), dok se *jitter* manji od 20 ms označava komercijalnom kvalitetom.

Međutim, međuspremnicima unose dodatno kašnjenje u mrežu što može uzrokovati druge probleme. Bitno je razlikovati *jitter* od varijacije kašnjenja. Varijacija kašnjenja je mjera koja označava kolika je varijacija uočena u promatranom vremenskom periodu, dok *jitter* mjeri varijacije kašnjenja između uzastopnih paketa iste sesije.

Ponekad je mogući gubitak paketa zbog pune memorije međuspremnika. Nakon što paketi dolaze u čvor, prvo se smještaju u međuspremnik koji ih privremeno pohranjuje te paketi čekaju na daljnju obradu. Ukoliko je dolazak paketa veći od memorije međuspremnika, dolazi do gubitka paketa.

## 4. MODELI ZA ODREĐIVANJE ČEKANJA U ČVORU PAKETSKE MREŽE S DISCIPLINOM POSLUŽIVANJA FIFO

Postoje dvije vrste sustava ovisno o veličini paketa: eksponencijalni i deterministički. Eksponencijalni sustav sastoji se od paketa različitih veličina, dok se deterministički sastoji od paketa jednakih veličina. Također, postoji razlika u količini likova u modelu (jedan link ili više).

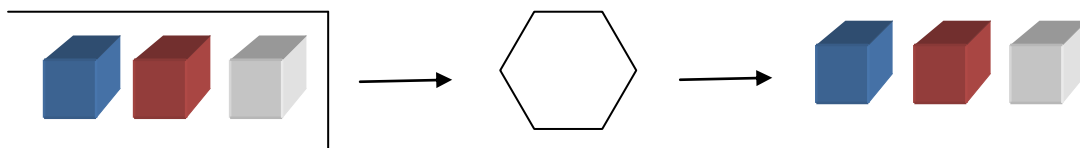
Kendall-ov model sastoji se od 5 oznaka koji su označeni abecednim slovima [10]:

**A/B/C/D/E**

Značenje oznaka je sljedeće:

- A - distribucija međudolaznih vremenskih intervala
- B - distribucije vremena posluživanja
  - M – eksponencijalna raspodjela
  - D – deterministička raspodjela
- C - broj kanala
- D - maksimalan broj poslova koji može biti u sustavu
- E - disciplina Posluživanja

FIFO je postupak gdje se svi paketi, koji dolaze, stavljaju u jedan red (slika 8.). Potom se paketi prenese odnosno propuštaju onom brzinom koju čvor posjeduje. Svi paketi se, neovisno iz kojih tokova dolaze, jednako tretiraju i smještaju u isti red. To znači da prvi paket koji je došao, biva prvi pušten dalje u sustav. Ako je red na ulazu pun, paket će svejedno pristići, međutim neće stati u red jer je međuspremnik rutera pun, te će se paket izgubiti.



*Slika 8. Sustav sa posluživanjem FIFO*

Izvor [4]

#### 4.1. M/M/1

Model M/M/1 sastoji se od tri Kendall-ove oznake. Prva oznaka je veliko slovo „M“, te se odnosi na *Poisson-ov* proces (N paketa dolazi u određenom vremenskom intervalu). *Poisson-ov* proces je jedan od najznačajnijih modela koji se koristi za čekanje paketa u redovima.

Drugi oznaka „M“ odnosi se na eksponencijalni model, što znači da paketi koji dolaze u sustav posluživanja su različite veličine i da se njihove duljine mogu opisati eksponencijalnom razdiobom.

Treća oznaka u obliku brojke „1“ znači da se u modelu nalazi samo jedan poslužitelj odnosno prijenosni kanal.

Svrha M/M/1 modela je izračunavanje prosječnog kašnjenja paketa ( $T_q$ ) za N pridošlih paketa koji prolaze kroz jedan kanal. Prosječno kašnjenje paketa sastoji se od prosječnog vremena obrade paketa ( $T_s$ ) i prosječnog čekanja paketa ( $T_w$ ).

$$T_q = T_s + T_w \quad (4)$$

Prosječno vrijeme obrade paketa ( $T_s$ ) prikazano je sljedećim izrazom:

$$T_s = \frac{p}{C} \quad (5)$$

gdje je  $p$  prosječna duljina paketa, a  $C$  brzina prijenosa.

Prosječno vrijeme čekanja paketa ( $T_w$ ) prikazano je sljedećim izrazom:

$$T_w = \frac{\rho p}{(1 - \rho)C} \quad (6)$$

gdje je  $\rho$  prometno opterećenje linka a ostale oznake u formuli imaju isto značenje kako je prethodno navedeno.

Kada se u izraz (4) uvedu izrazi proširi formulama (5) i (6), dobije se formula (7) pomoću koje se izračunava prosječno kašnjenje paket.

$$T_q = \frac{p}{C} + \frac{\rho p}{(1 - \rho)C} \quad (7)$$

U sustavu se nalazi samo jedan link, stoga su veličina prometa ( $A$ ) i prometno opterećenje linka ( $\rho$ ) jednaki:

$$A = \rho * m, A = \rho * 1, A = \rho \quad (8)$$

## 4.2. M/M/m

Također kao i za M/M/1 sustav, sustav M/M/m se ne razlikuje u prva dvije oznake. Razlika se nalazi samo u trećoj oznaci koji se odnosi na broj kanala koji se koristi u sustavu i označen je malim slovom „m“. On može biti u intervalu  $1 < m < \infty$  i u tome slučaju se razlikuje od M/M/1 sustava.

Svrha M/M/m modela također je izračunavanje prosječnog kašnjenja paketa ( $T_q$ ) za  $N$  pridošlih paketa koji prolaze kroz  $m$  kanala. Prosječno kašnjenje paketa sastoji se od prosječnog vremena obrade paketa ( $T_s$ ) i prosječno čekanje paketa ( $T_w$ ).

$$T_q = T_s + T_w \quad (9)$$

Prosječno vrijeme obrade paketa ( $T_s$ ) prikazano je sljedećim izrazom:

$$T_s = \frac{p}{C} \quad (10)$$

gdje je  $p$  prosječna duljina paketa, a  $C$  brzina prijenosa.

Prosječno vrijeme čekanja paketa ( $T_w$ ) prikazano je sljedećim izrazom:

:

$$T_w = \frac{\pi p}{(m - A)C} \quad (11)$$

,gdje je  $\pi$  vjerojatnost da će pristigli paket čekati na posluživanje a ostale oznake imaju isto značenje kako je prethodno navedeno.

Kada se u izraz (9) uvedu izrazi proširi formulama (10) i (11), dobije se formula (12) pomoću koje se izračunava prosječno kašnjenje paket.

$$T_q = \frac{p}{C} + \frac{\pi p}{(m - A)C} \quad (12)$$

U sustavu se nalazi  $m$  linkova, stoga se veličina prometa ( $A$ ) može izraziti na sljedeći način, korištenjem vrijednosti za prometno opterećenje linka ( $\rho$ ):

$$A = \rho * m \quad (13)$$

Iz čega se dobiva vjerojatnost čekanja na posluživanje ( $\pi$ ) određuje se prema erlangovoj C formuli:

$$E_c(m, A) = \frac{\frac{A^m}{m!}}{\frac{A^m}{m!} + (1 - \rho) \sum_{k=0}^{m-1} \frac{A^k}{k!}} \quad (14)$$

### 4.3.M/D/1

Sustav M/D/1 također ima istu prvu oznaku kao i prethodna dva sustava. Drugi čimbenik „D“ je različit, jer paketi koji dolaze na posluživanje u čvor više nisu različitih duljina već su svi jednake duljine. Treća oznaka je jedan što znači da je također riječ o sustavu sa jednim kanalom.

Svrha M/D/1 modela također je izračunavanje prosječnog kašnjenja paketa ( $T_q$ ) za  $N$  pristiglih čija međudolazna vremena su eksponencijalno distribuirana. Prosječno kašnjenje paketa kako je već navedeno kod prethodna dva modela sastoji se od prosječnog vremena obrade paketa ( $T_s$ ) i prosječnog čekanja paketa ( $T_w$ ).

$$T_q = T_s + T_w \quad (15)$$

Prosječno vrijeme obrade paketa ( $T_s$ ) prikazano je sljedećim izrazom:

$$T_s = \frac{p}{C} \quad (16)$$



Prosječno vrijeme čekanja paketa ( $T_w$ ) prikazano je sljedećim izrazom:

$$T_w = \frac{\rho p}{2(1 - \rho)c} \quad (17)$$

Kada se u izraz (15) uvedu izrazi proširi formulama (16) i (17), dobije se formula (18) pomoću koje se izračunava prosječno kašnjenje paket.

$$T_q = \frac{p}{c} + \frac{\rho p}{2(1 - \rho)c} \quad (18)$$

U sustavu se nalazi samo jedan link, stoga su veličina prometa ( $A$ ) i prometno opterećenje linka ( $\rho$ ) jednaki:

$$A = \rho * m, \quad A = \rho * 1, \quad A = \rho \quad (19)$$

## 5. ODREĐIVANJE PROSJEČNOG ČEKANJA PAKETA U ČVORU

### PAKETSKE MREŽE

U daljnjim poglavljima biti će prikazano određivanje parametara dobrote sustava prema modelima (opisanim u poglavlju 4 ovog rada): M/M/1, M/M/m i M/D/1. Određivanje parametara čekanje na prijenos i kašnjenje koje u ovom slučaju uključuje samo čekanje na prijenos i vrijeme prijenosa. Vrijeme propagacije i vrijeme potrebno za procesiranje u čvoru u ovoj analizi nisu uključeni.

Analiza čekanja na prijenos u čvoru i kašnjenje napravljena je u ovisnosti o prometnom opterećenju i duljini paketa. Kapacitet odlaznog linka iz čvora na koji se šalju paketi u ovoj analizi iznosi od 2 Mb/s. Prosječne duljine paketa definirane su u skladu s analizom duljina paketa provedenom u [11].

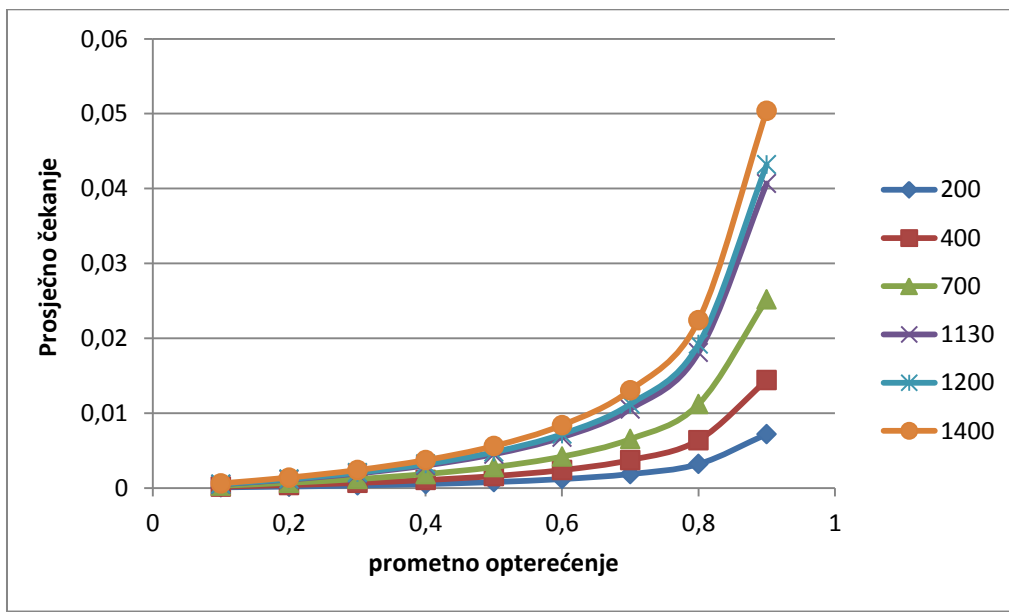
#### 5.1. Određivanje parametara dobrote sustava prema modelu M/M/1

Prema izrazima (6) i (7) za određivanje parametara dobrote sustava posluživanja navedenim u potpoglavlju 4.1. određene su vrijednosti čekanja na posluživanje i kašnjenje za prometna opterećenja čvora od 10 do 90 % te za prosječne duljine paketa 200, 400, 700, 1130, 1200 i 1400 Byte (tablice 6 i 7).

**Tablica 6.** Prosječno vrijeme čekanja na posluživanje prema modelu M/M/1

prometno opterećenje	prosječna duljina paketa [Byte]					
	200	400	700	1130	1200	1400
0,1	8,88889E-05	0,000178	0,000311	0,000502	0,000533	0,000622
0,2	0,0002	0,0004	0,0007	0,00113	0,0012	0,0014
0,3	0,000342857	0,000686	0,0012	0,001937	0,002057	0,0024
0,4	0,000533333	0,001067	0,001867	0,003013	0,0032	0,003733
0,5	0,0008	0,0016	0,0028	0,00452	0,0048	0,0056
0,6	0,0012	0,0024	0,0042	0,00678	0,0072	0,0084
0,7	0,001866667	0,003733	0,006533	0,010547	0,0112	0,013067
0,8	0,0032	0,0064	0,0112	0,01808	0,0192	0,0224
0,9	0,0072	0,0144	0,0252	0,04068	0,0432	0,0504

Iz rezultata prikazanih u tablici 6 i na grafikonu 1 može se zaključiti kako na čekanje na posluživanje utječe duljina paketa i kako utječe prometno opterećenje. Uz isto prometno opterećenje veće duljine paketa uzrokuju veća čekanja na posluživanje. Nadalje se može zaključiti da kod većih duljina paketa povećanje opterećenja znatno više utječe na porast čekanja nego kod manjih duljina paketa.

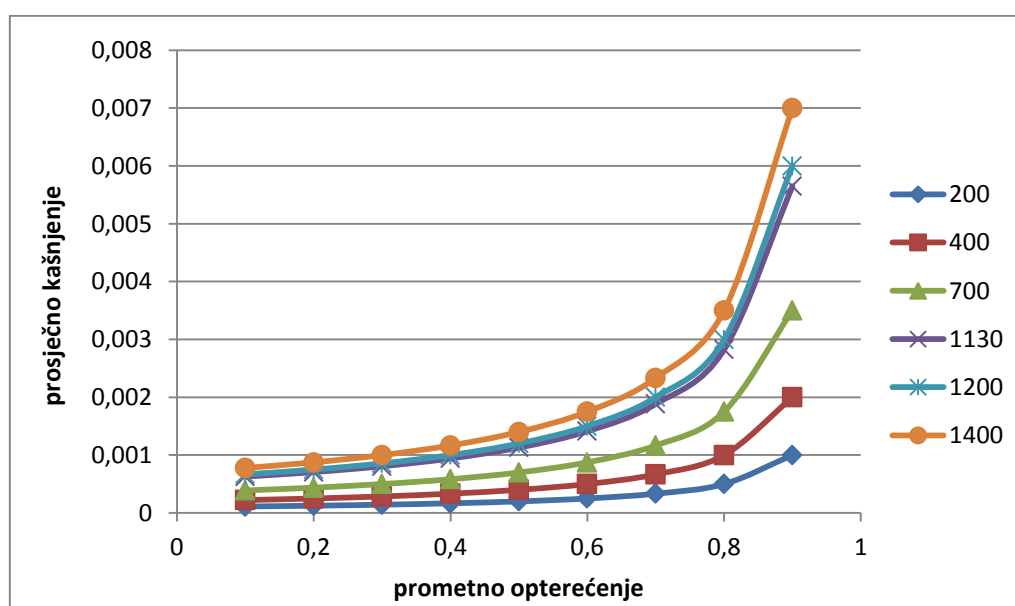


*Graf 1. Prosječno vrijeme čekanja na posluživanje prema modelu M/M/1*

U tablici 7 i na grafikonu 2 prikazane su vrijednosti kašnjenja (vrijeme prijenosa i vrijeme čekanja na prijenos) izračunate prema izrazu (7). Kao i prethodno može se zaključiti da su kašnjenja veća u slučaju većih duljina paketa uz isto prometno opterećenje i da je porast kašnjenja pri povećanju opterećenja veći kod većih duljina paketa. Nadalje se može zaključiti da kod većih opterećenja duljina paketa ima manji utjecaj na veličinu kašnjenja nego kod manjih opterećenja, gdje je čekanje zanemarivo maleno, a kašnjenje je približno jednako vremenu posluživanja (prijenosa na linku).

**Tablica 7.** Prosječno kašnjenje paketa prema modelu M/M/1

prometno opterećenje	prosječna duljina paketa					
	200	400	700	1130	1200	1400
0,1	0,0001111	0,000222	0,000389	0,000628	0,000667	0,000778
0,2	0,000125	0,00025	0,000438	0,000706	0,00075	0,000875
0,3	0,0001429	0,000286	0,0005	0,000807	0,000857	0,001
0,4	0,0001667	0,000333	0,000583	0,000942	0,001	0,001167
0,5	0,0002	0,0004	0,0007	0,00113	0,0012	0,0014
0,6	0,00025	0,0005	0,000875	0,001413	0,0015	0,00175
0,7	0,0003333	0,000667	0,001167	0,001883	0,002	0,002333
0,8	0,0005	0,001	0,00175	0,002825	0,003	0,0035
0,9	0,001	0,002	0,0035	0,00565	0,006	0,007



**Graf 2.** Prosječno kašnjenje paketa prema modelu M/M/1

## 5.2. Određivanje parametara sustava prema modelu M/M/m

Prema izrazima (11) i (12) za određivanje parametara dobrote sustava posluživanja navedenim u potpoglavlju 4.2. određene su vrijednosti čekanja na posluživanje i kašnjenje za prometna opterećenja čvora od 10 do 90 % te za prosječne duljine paketa 200, 400, 700, 1130, 1200 i 1400 Byte . Korištena su četiri sustava sa brojem kanala: 5, 10, 15 i 20 (tablice 8, 9, 10 i 11).

**Tablica 8.** Prosječno vrijeme čekanja na posluživanje prema modelu  $M/M/m=5$

prometno opterećenje	prosječna duljina paketa [Byte]						A	m	$\pi$
	200	400	700	1130	1200	1400			
0,1	0	0	0	0	0	0	0,5	5	0
0,2	0,000000075	1,5E-07	2,63E-07	4,24E-07	4,5E-07	5,25E-07	1		0,003
0,3	0,00000004	8E-07	1,4E-06	2,26E-06	2,4E-06	2,8E-06	1,5		0,014
0,4	1,233333E-06	2,47E-06	4,32E-06	6,97E-06	7,4E-06	8,63E-06	2		0,037
0,5	0,00000028	5,6E-06	9,8E-06	1,58E-05	1,68E-05	1,96E-05	2,5		0,07
0,6	0,00000055	0,000011	1,93E-05	3,11E-05	0,000033	3,85E-05	3		0,11
0,7	1,02667E-05	2,05E-05	3,59E-05	5,8E-05	6,16E-05	7,19E-05	3,5		0,154
0,8	0,0000199	3,98E-05	6,97E-05	0,000112	0,000119	0,000139	4		0,199
0,9	0,0000486	9,72E-05	0,00017	0,000275	0,000292	0,00034	4,5		0,243

**Tablica 9.** Prosječno vrijeme čekanja na posluživanje prema modelu  $M/M/m=10$

prometno opterećenje	prosječna duljina paketa [Byte]						A	m	$\pi$
	200	400	700	1130	1200	1400			
0,1	0	0	0	0	0	0	1	10	0
0,2	0	0	0	0	0	0	2		0
0,3	1,42857E-08	2,86E-08	5E-08	8,07E-08	8,57E-08	1E-07	3		0,001
0,4	8,333333E-08	1,67E-07	2,92E-07	4,71E-07	5E-07	5,83E-07	4		0,005
0,5	0,00000036	7,2E-07	1,26E-06	2,03E-06	2,16E-06	2,52E-06	5		0,018
0,6	0,000001075	2,15E-06	3,76E-06	6,07E-06	6,45E-06	7,53E-06	6		0,043
0,7	2,633333E-06	5,27E-06	9,22E-06	1,49E-05	1,58E-05	1,84E-05	7		0,079
0,8	0,0000061	1,22E-05	2,14E-05	3,45E-05	3,66E-05	4,27E-05	8		0,122
0,9	0,0000168	3,36E-05	5,88E-05	9,49E-05	0,000101	0,000118	9		0,168

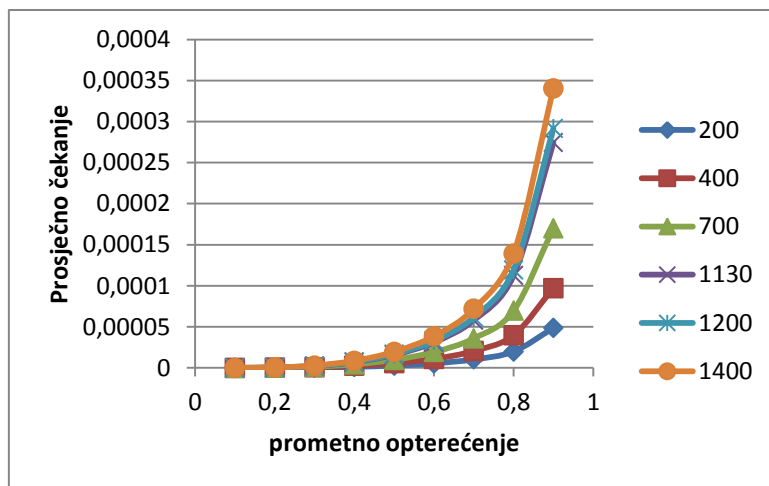
**Tablica 10.** Prosječno vrijeme čekanja na posluživanje prema modelu  $M/M/m=15$

prometno opterećenje	prosječna duljina paketa [Byte]						A	m	$\pi$
	200	400	700	1130	1200	1400			
0,1	0	0	0	0	0	0	1,5	15	0
0,2	0	0	0	0	0	0	3		0
0,3	0	0	0	0	0	0	4,5		0
0,4	1,111111E-08	2,22E-08	3,89E-08	6,28E-08	6,67E-08	7,78E-08	6		0,001
0,5	0,00000008	1,6E-07	2,8E-07	4,52E-07	4,8E-07	5,6E-07	7,5		0,006
0,6	3,333333E-07	6,67E-07	1,17E-06	1,88E-06	0,000002	2,33E-06	9		0,02
0,7	1,044444E-06	2,09E-06	3,66E-06	5,9E-06	6,27E-06	7,31E-06	10,5		0,047
0,8	2,86667E-06	5,73E-06	1E-05	1,62E-05	1,72E-05	2,01E-05	12		0,086
0,9	8,8E-06	1,76E-05	3,08E-05	4,97E-05	5,28E-05	6,16E-05	13,5		0,132

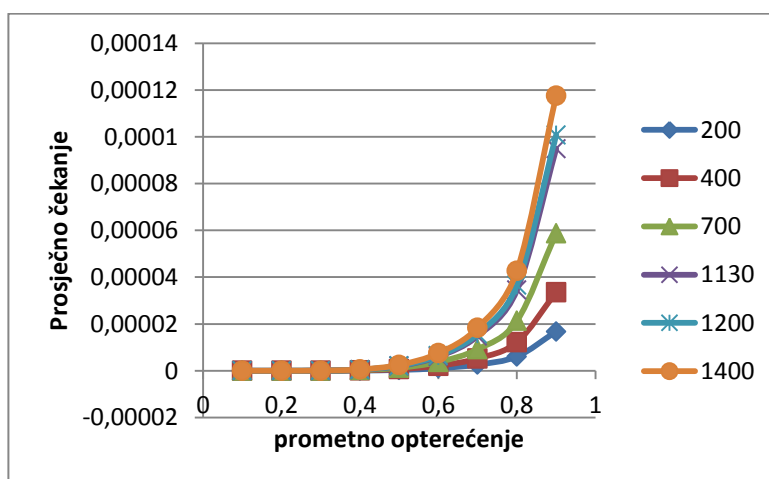
**Tablica 11.** Prosječno vrijeme čekanja na posluživanje prema modelu  $M/M/m=20$

prometno opterećenje	prosječna duljina paketa [Byte]						A	m	$\pi$
	200	400	700	1130	1200	1400			
0,1	0	0	0	0	0	0	2	20	0
0,2	0	0	0	0	0	0	4		0
0,3	0	0	0	0	0	0	6		0
0,4	0	0	0	0	0	0	8		0
0,5	0,00000002	4E-08	7E-08	1,13E-07	1,2E-07	1,4E-07	10		0,002
0,6	0,000000125	2,5E-07	4,38E-07	7,06E-07	7,5E-07	8,75E-07	12		0,01
0,7	0,0000005	0,000001	1,75E-06	2,83E-06	0,000003	3,5E-06	14		0,03
0,8	0,0000016	3,2E-06	5,6E-06	9,04E-06	9,6E-06	1,12E-05	16		0,064
0,9	0,00000545	1,09E-05	1,91E-05	3,08E-05	3,27E-05	3,82E-05	18		0,109

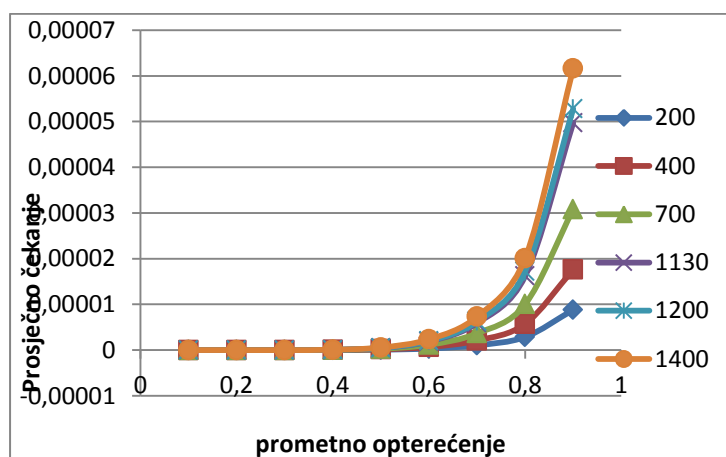
Iz rezultata prikazanih u tablicama 8, 9, 10 i 11 i na grafikonima 3, 4, 5 i 6 može se zaključiti kako na čekanje na posluživanje utječe duljina paketa i kako utječe prometno opterećenje. Uz isto prometno opterećenje veće duljine paketa uzrokuju veća čekanja na posluživanje. Nadalje se može zaključiti da kod većih duljina paketa povećanje opterećenja znatno više utječe na porast čekanja nego kod manjih duljina paketa. Međutim, povećanjem broja kanala, znatno se smanjuje čekanje paketa na posluživanje.



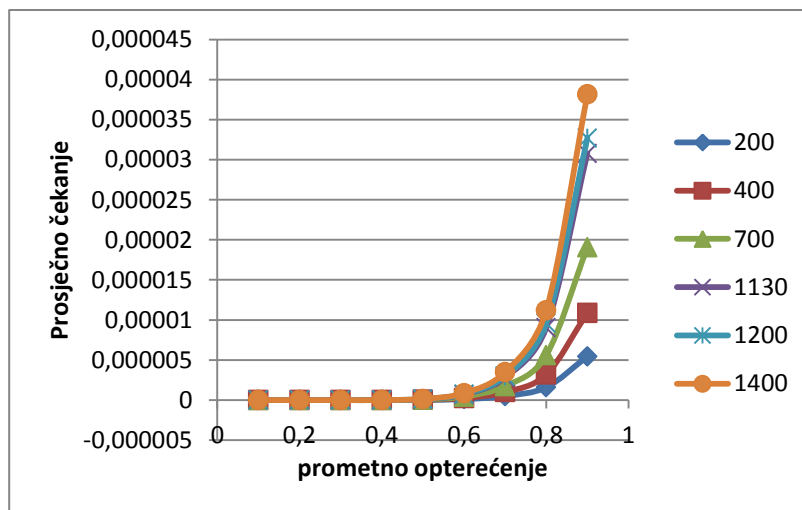
Graf 3. Prosječno vrijeme čekanja na posluživanje prema modelu  $M/M/m=5$



Graf 4. Prosječno vrijeme čekanja na posluživanje prema modelu  $M/M/m=10$



Graf 5. Prosječno vrijeme čekanja na posluživanje prema modelu  $M/M/m=15$



**Graf 6.** Prosječno vrijeme čekanja na posluživanje prema modelu  $M/M/m=20$

U tablicama 12, 13, 14 i 15 i na grafikonima 7, 8, 9 i 10 prikazane su vrijednosti kašnjenja (vrijeme prijenosa i vrijeme čekanja na prijenos) izračunate prema izrazu (12). Kao i prethodno može se zaključiti da su kašnjenja veća u slučaju većih duljina paketa uz isto prometno opterećenje i da je porast kašnjenja pri povećanju opterećenja veći kod većih duljina paketa. Nadalje vidi se da kod većih opterećenja duljina paketa ima manji utjecaj na veličinu kašnjenja nego kod manjih opterećenja, gdje je čekanje zanemarivo maleno, a kašnjenje je približno jednako vremenu posluživanja (prijenosa na linku). Također, povećanjem broja kanala, znatno se smanjuje kašnjenje paketa.

**Tablica 12.** Prosječno kašnjenje paketa prema modelu  $M/M/m=5$

prometno opterećenje	prosječna duljina paketa [Byte]						A	m	$\pi$
	200	400	700	1130	1200	1400			
0,1	0,0001	0,0002	0,00035	0,000565	0,0006	0,0007	0,5	5	0
0,2	0,0001	0,0002	0,00035	0,000565	0,0006	0,000701	1		0,003
0,3	0,0001	0,000201	0,000351	0,000567	0,000602	0,000703	1,5		0,014
0,4	0,000101	0,000202	0,000354	0,000572	0,000607	0,000709	2		0,037
0,5	0,000103	0,000206	0,00036	0,000581	0,000617	0,00072	2,5		0,07
0,6	0,000106	0,000211	0,000369	0,000596	0,000633	0,000739	3		0,11
0,7	0,00011	0,000221	0,000386	0,000623	0,000662	0,000772	3,5		0,154
0,8	0,00012	0,00024	0,00042	0,000677	0,000719	0,000839	4		0,199
0,9	0,000149	0,000297	0,00052	0,00084	0,000892	0,00104	4,5		0,243



**Tablica 13.** Prosječno kašnjenje paketa prema modelu  $M/M/m=10$

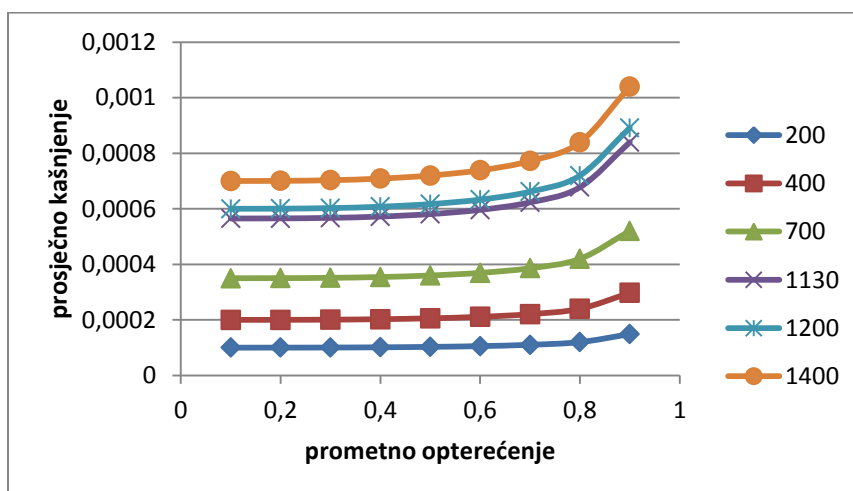
prometno opterećenje	prosječna duljina paketa [Byte]						A	m	$\pi$
	200	400	700	1130	1200	1400			
0,1	0,0001	0,0002	0,00035	0,000565	0,0006	0,0007	1	10	0
0,2	0,0001	0,0002	0,00035	0,000565	0,0006	0,0007	2		0
0,3	0,0001	0,0002	0,00035	0,000565	0,0006	0,0007	3		0,001
0,4	0,0001	0,0002	0,00035	0,000565	0,000601	0,000701	4		0,005
0,5	0,0001	0,000201	0,000351	0,000567	0,000602	0,000703	5		0,018
0,6	0,000101	0,000202	0,000354	0,000571	0,000606	0,000708	6		0,043
0,7	0,000103	0,000205	0,000359	0,00058	0,000616	0,000718	7		0,079
0,8	0,000106	0,000212	0,000371	0,000599	0,000637	0,000743	8		0,122
0,9	0,000117	0,000234	0,000409	0,00066	0,000701	0,000818	9		0,168

**Tablica 14.** Prosječno kašnjenje paketa prema modelu  $M/M/m=15$

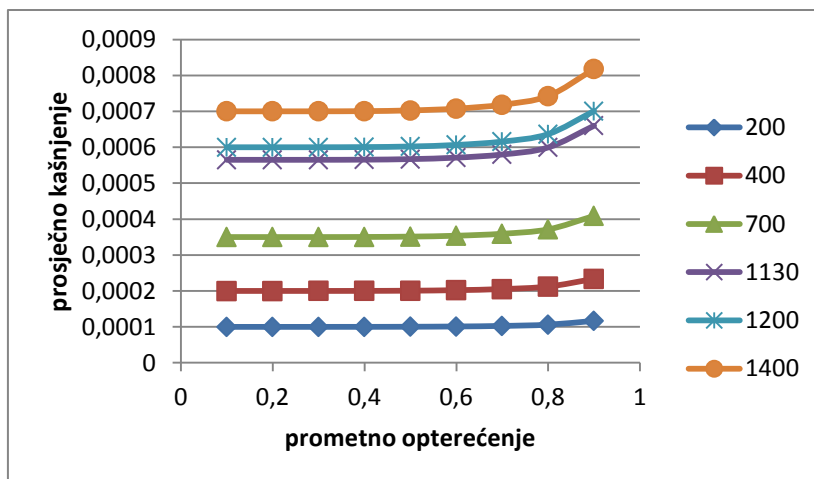
prometno opterećenje	prosječna duljina paketa [Byte]						A	m	$\pi$
	200	400	700	1130	1200	1400			
0,1	0,0001	0,0002	0,00035	0,000565	0,0006	0,0007	1,5	15	0
0,2	0,0001	0,0002	0,00035	0,000565	0,0006	0,0007	3		0
0,3	0,0001	0,0002	0,00035	0,000565	0,0006	0,0007	4,5		0
0,4	0,0001	0,0002	0,00035	0,000565	0,0006	0,0007	6		0,001
0,5	0,0001	0,0002	0,00035	0,000565	0,0006	0,000701	7,5		0,006
0,6	0,0001	0,000201	0,000351	0,000567	0,000602	0,000702	9		0,02
0,7	0,000101	0,000202	0,000354	0,000571	0,000606	0,000707	10,5		0,047
0,8	0,000103	0,000206	0,00036	0,000581	0,000617	0,00072	12		0,086
0,9	0,000109	0,000218	0,000381	0,000615	0,000653	0,000762	13,5		0,132

**Tablica 15.** Prosječno kašnjenje paketa prema modelu  $M/M/m=20$

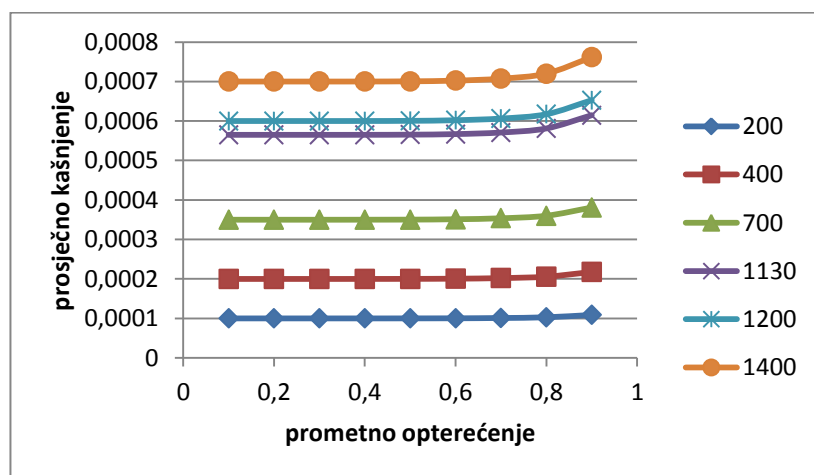
prometno opterećenje	prosječna duljina paketa [Byte]						A	m	$\pi$
	200	400	700	1130	1200	1400			
0,1	0,0001	0,0002	0,00035	0,000565	0,0006	0,0007	2	20	0
0,2	0,0001	0,0002	0,00035	0,000565	0,0006	0,0007	4		0
0,3	0,0001	0,0002	0,00035	0,000565	0,0006	0,0007	6		0
0,4	0,0001	0,0002	0,00035	0,000565	0,0006	0,0007	8		0
0,5	0,00010002	0,0002	0,00035	0,000565	0,0006	0,0007	10		0,002
0,6	0,000100125	0,0002	0,00035	0,000566	0,000601	0,000701	12		0,01
0,7	0,0001005	0,000201	0,000352	0,000568	0,000603	0,000704	14		0,03
0,8	0,0001016	0,000203	0,000356	0,000574	0,00061	0,000711	16		0,064
0,9	0,00010545	0,000211	0,000369	0,000596	0,000633	0,000738	18		0,109



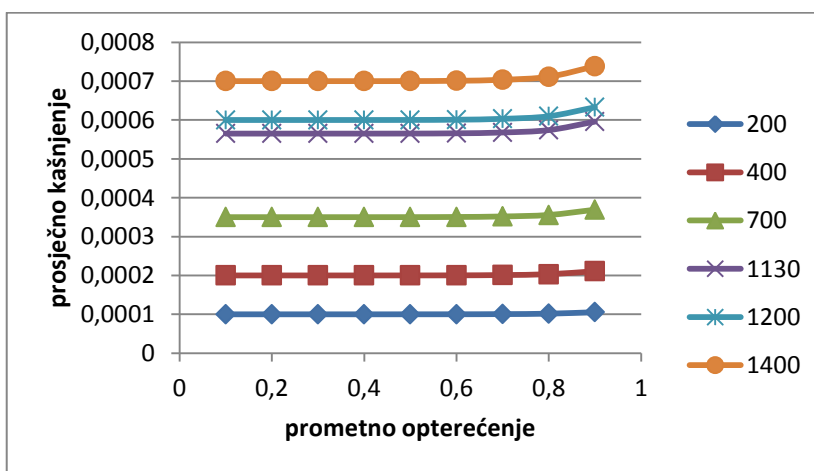
**Graf 7.** Prosječno kašnjenje paketa prema modelu  $M/M/m=5$



Graf 8. Prosječno kašnjenje paketa prema modelu M/M/m=10



Graf 9. Prosječno kašnjenje paketa prema modelu M/M/m=15



Graf 10. Prosječno kašnjenje paketa prema modelu M/M/m=20

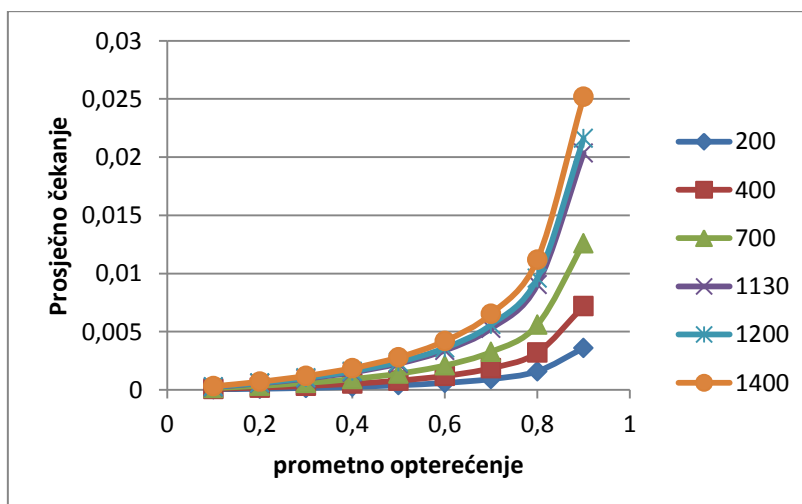
### 5.3. Određivanje parametara sustava prema modelu M/D/1

Prema izrazima (17) i (18) za određivanje parametara dobrote sustava posluživanja navedenim u potpoglavlju 4.3. određene su vrijednosti čekanja na posluživanje i kašnjenje za prometna opterećenja čvora od 10 do 90 % te za prosječne duljine paketa 200, 400, 700, 1130, 1200 i 1400 Byte (tablice 16 i 17).

**Tablica 16.** Prosječno vrijeme čekanja na posluživanje prema modelu M/D/1

prometno opterećenje	prosječna duljina paketa [Byte]					
	200	400	700	1130	1200	1400
0,1	4,44444E-05	8,89E-05	0,000156	0,000251	0,000267	0,000311
0,2	0,0001	0,0002	0,00035	0,000565	0,0006	0,0007
0,3	0,000171429	0,000343	0,0006	0,000969	0,001029	0,0012
0,4	0,000266667	0,000533	0,000933	0,001507	0,0016	0,001867
0,5	0,0004	0,0008	0,0014	0,00226	0,0024	0,0028
0,6	0,0006	0,0012	0,0021	0,00339	0,0036	0,0042
0,7	0,000933333	0,001867	0,003267	0,005273	0,0056	0,006533
0,8	0,0016	0,0032	0,0056	0,00904	0,0096	0,0112
0,9	0,0036	0,0072	0,0126	0,02034	0,0216	0,0252

Iz rezultata prikazanih u tablici 16 i na grafikonu 11 može se zaključiti kako na čekanje na posluživanje utječe duljina paketa i kako utječe prometno opterećenje. Uz isto prometno opterećenje veće duljine paketa uzrokuju veća čekanja na posluživanje. Nadalje se može zaključiti da kod većih duljina paketa povećanje opterećenja znatno više utječe na porast čekanja nego kod manjih duljina paketa.

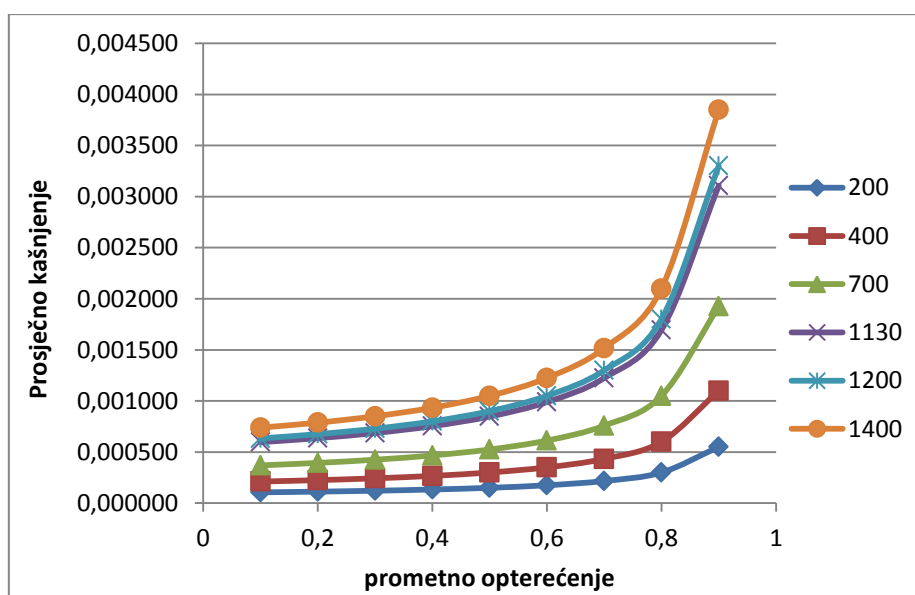


**Graf 11.** Prosječno vrijeme čekanja na posluživanje prema modelu M/D/1

U tablici 17 i na grafikonu 12 prikazane su vrijednosti kašnjenja (vrijeme prijenosa i vrijeme čekanja na prijenos) izračunate prema izrazu (18). Kao i prethodno može se zaključiti da su kašnjenja veća u slučaju većih duljina paketa uz isto prometno opterećenje i da je porast kašnjenja pri povećanju opterećenja veći kod većih duljina paketa. Nadalje se može zaključiti da kod većih opterećenja duljina paketa ima manji utjecaj na veličinu kašnjenja nego kod manjih opterećenja, gdje je čekanje zanemarivo maleno, a kašnjenje je približno jednako vremenu posluživanja (prijenosa na linku).

**Tablica 17.** Prosječno kašnjenje paketa prema modelu M/D/1

prometno opterećenje	prosječna duljina paketa [Byte]					
	200	400	700	1130	1200	1400
0,1	0,000106	0,000211	0,000369	0,000596	0,000633	0,000739
0,2	0,000113	0,000225	0,000394	0,000636	0,000675	0,000788
0,3	0,000121	0,000243	0,000425	0,000686	0,000729	0,000850
0,4	0,000133	0,000267	0,000467	0,000753	0,000800	0,000933
0,5	0,000150	0,000300	0,000525	0,000848	0,000900	0,001050
0,6	0,000175	0,000350	0,000613	0,000989	0,001050	0,001225
0,7	0,000217	0,000433	0,000758	0,001224	0,001300	0,001517
0,8	0,000300	0,000600	0,001050	0,001695	0,001800	0,002100
0,9	0,000550	0,001100	0,001925	0,003108	0,003300	0,003850



**Graf 12.** Prosječno kašnjenje paketa prema modelu M/D/1

Bitno je napomenuti razliku između M/M/1 i M/D/1 modela. Osim što se razlikuju u eksponencijalnoj i determinističkoj razdiobi međudolaznog vremena, prosječno kašnjenje i čekanje na posluživanje se znatno razlikuje. M/M/1 model uvijek će imati veće kašnjenje od M/D/1 modela za iste ulazne parametre (prometno opterećenje i duljinu paketa). Kod malih prometnih opterećenja razlike u kašnjenju su minimalne, dok je kod većih prometnih opterećenja razlika u kašnjenju znatno veća (gotovo je duplo veća kašnjenje kod M/M/1 sustava).

## 6. ZAKLJUČAK

Ovim završnim radom obrađeno je područje analize čekanja u čvoru paketne mreže sa disciplinom posluživanja FIFO. Način posluživanja koji omogućuje paketima koji dolaze iz različitih tokova i putova u jedan čvor, privremeno pohranjivanje paketa u međuspremniku onim redoslijedom kojim su paketi stigli u čvor. Nakon što su paketi poredani izvršava se njihova obrada te daljnje puštanje paketa prema drugome čvoru.

Postoje četiri izvora kašnjenja u čvoru, a to su: procesiranje u čvoru, čekanje na prijenos (odlani link), propagacija i prijenos. Procesiranje se ubraja pod fiksno kašnjenje a pod njega spada: kodiranje, dekodiranje, *jitter* i paketizacija. Čekanje na prijenos započinje kada paketi koji trebaju biti obrađeni i poslani dolaze brže nego je to moguće obraditi. Propagacijsko je vrijeme potrebno električnom (ili fotonskom) signalu da savlada duljinu vodiča od točke A do točke B.

Postoje tri čimbenika koji utječu na kašnjenje u čvoru. Jedan od njih je kapacitet odlaznog linka jer on određuje protok paketa u čvoru. Što je kapacitet linka veći to je manja vjerojatnost za prepunjivanja međuspremnika odnosno gubitka paketa. Duljina paketa također utječe na popunjavanje međuspremnika, odnosno veličina paketa. Neovisno o veličini paketa na kašnjenje utječe intenzitet dolazaka paketa. Većim intenzitetom dolazaka stvaraju se veće „gužve“ ispred čvorova. U radu su analizirana tri sustava posluživanja s disciplinom posluživanja FIFO, koji se mogu opisati modelima M/M/1, M/D/1 i M/M/m. Model M/M/1 pretpostavlja eksponencijalnu razdiobu međudolaznog vremena i vremena posluživanja te jedan poslužitelj (odlazni link), dok model M/M/m pretpostavlja iste razdiobe i više poslužitelja. Model M/D/1 pretpostavlja determinističku razdiobu međudolaznog vremena i determinističku razdiobu vremena posluživanja i jedan poslužitelj (odlazni link).

Prema tablicama i grafovima koji su prikazani u poglavlju 5, zaključuje se da prometno opterećenje zajedno sa veličinom paketa znatno utječu na vrijednosti kašnjenja paketa. Pored navedenih veličina na kašnjenje utječe i broj poslužitelja koji utječe na vrijeme čekanja na posluživanje. Pored prosječne duljine paketa na čekanje na posluživanje utječe i razdioba duljine paketa. U slučaju determinističke razdiobe vremena posluživanja prosječno vrijeme čekanja je duplo kraće nego u slučaju eksponencijalne razdiobe. Promjena čekanja na

posluživanje i kašnjenje ovisno o promjeni prometnog opterećenja za sve duljine paketa ravnaju se po eksponencijalnom zakonu.



## POPIS LITERATURE

1. Bošnjak I.: Tehnologija telekomunikacijskog prometa II, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2000
2. [http://www.eecs.yorku.ca/course\\_archive/2014-15/W/3214/LEC/queue.pdf](http://www.eecs.yorku.ca/course_archive/2014-15/W/3214/LEC/queue.pdf), 08.09.2016
3. [http://www.hill2dot0.com/wiki/index.php?title=Queuing\\_delay&\\_sm\\_au\\_=iVV0Z1ZtZ7PgJTvr](http://www.hill2dot0.com/wiki/index.php?title=Queuing_delay&_sm_au_=iVV0Z1ZtZ7PgJTvr), 08.09.2016
4. [http://mediaplayer.pearsoncmg.com/\\_ph\\_cc\\_ecs\\_set.title.Propagation\\_Delay\\_and\\_Transmission\\_Delay\\_\(Chapter\\_01\)\\_\\_\\_/aw/streaming/ecs\\_kurose\\_compnetw\\_6/PropAndTransmit.m4v](http://mediaplayer.pearsoncmg.com/_ph_cc_ecs_set.title.Propagation_Delay_and_Transmission_Delay_(Chapter_01)___/aw/streaming/ecs_kurose_compnetw_6/PropAndTransmit.m4v) 08.09.2016
5. [http://www.ccs-labs.org/teaching/rn/animations/propagation/?\\_sm\\_au\\_=iVV0Z1ZtZ7PgJTvr](http://www.ccs-labs.org/teaching/rn/animations/propagation/?_sm_au_=iVV0Z1ZtZ7PgJTvr), 08.09.2016
6. [http://www.telchemy.com/appnotes/Telchemy\\_Impact\\_of\\_Delay.pdf?\\_sm\\_au\\_=iVV0Z1ZtZ7PgJTvr](http://www.telchemy.com/appnotes/Telchemy_Impact_of_Delay.pdf?_sm_au_=iVV0Z1ZtZ7PgJTvr), 08.09.2016
7. Bošnjak I.: Tehnologija telekomunikacijskog prometa II, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2001
8. <http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=357102&seqNum=2>, 08.09.2016
9. Stiliadis D.: Traffic Scheduling in Packet-Switched Networks: Analysis, Design and Implementation, Santa Cruz 1996
10. [http://home.iitk.ac.in/~skb/qbook/Slide\\_Set\\_3.PDF?\\_sm\\_au\\_=iVV0Z1ZtZ7PgJTvr](http://home.iitk.ac.in/~skb/qbook/Slide_Set_3.PDF?_sm_au_=iVV0Z1ZtZ7PgJTvr), 08.09. 2016
11. Xiao-Long Wu, Wei-Min Li, Fang Liu , Hua Yu: Packet size distribution of typical Internet applications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing, China

## POPIS SLIKA

<b>Slika 1.</b> Četiri izvora kašnjenja na svakome čvoru .....	- 5 -
<b>Slika 2.</b> Prikaz kašnjenja na prijenos .....	- 8 -
<b>Slika 3.</b> Konekcijski orijentirana mreža usluga (CONS).....	- 12 -
<b>Slika 4.</b> Bezkonekcijski način prijenosa paketa (datagram mrežna usluga) .....	- 12 -
<b>Slika 5.</b> Prikaz međuspremnik odlaznog linka.....	- 17 -
<b>Slika 6.</b> Različite veličina paketa za interaktivni video promet.....	- 20 -
<b>Slika 7.</b> Različite brzine interaktivnog video prometa.....	- 20 -
<b>Slika 8.</b> Sustav sa posluživanjem FIFO .....	- 22 -

## POPIS TABLICA

<b>Tablica 1.</b> Prikaz prosječnog kašnjenja ovisno o brzini usluge i brzini dolaska paketa.....	- 7 -
<b>Tablica 2.</b> Rezultati propagacijsko kašnjenja .....	- 9 -
<b>Tablica 3.</b> Komparacija SVC, PVC i DG .....	- 13 -
<b>Tablica 4.</b> Veličina paketa za prijenos govora, videokonferencija i prijenosa videa strujanjem .....	- 18 -
<b>Tablica 5.</b> Glasovna širina pojasa po kodecima .....	- 19 -
<b>Tablica 6.</b> Prosječno vrijeme čekanja na posluživanje prema modelu M/M/1 .....	- 27 -
<b>Tablica 7.</b> Prosječno kašnjenje paketa prema modelu M/M/1 .....	- 29 -
<b>Tablica 8.</b> Prosječno vrijeme čekanja na posluživanje prema modelu M/M/m=5 .....	- 30 -
<b>Tablica 9.</b> Prosječno vrijeme čekanja na posluživanje prema modelu M/M/m=10 .....	- 30 -
<b>Tablica 10.</b> Prosječno vrijeme čekanja na posluživanje prema modelu M/M/m=15 .....	- 31 -
<b>Tablica 11.</b> Prosječno vrijeme čekanja na posluživanje prema modelu M/M/m=20 .....	- 31 -
<b>Tablica 12.</b> Prosječno kašnjenje paketa prema modelu M/M/m=5 .....	- 33 -
<b>Tablica 13.</b> Prosječno kašnjenje paketa prema modelu M/M/m=10 .....	- 34 -
<b>Tablica 14.</b> Prosječno kašnjenje paketa prema modelu M/M/m=15 .....	- 34 -
<b>Tablica 15.</b> Prosječno kašnjenje paketa prema modelu M/M/m=20 .....	- 35 -
<b>Tablica 16.</b> Prosječno vrijeme čekanja na posluživanje prema modelu M/D/1 .....	- 37 -
<b>Tablica 17.</b> Prosječno kašnjenje paketa prema modelu M/D/1 .....	- 38 -

## METAPODACI

**Naslov rada:** ANALIZA ČEKANJA U ČVORU PAKETNE MREŽE S DISCIPLINOM POSLUŽIVANJA FIFO

**Student:** Filip Strikinac

**Mentor:** Izv. prof. dr. sc. Štefica Mrvelj

**Naslov na drugom jeziku (engleski):** QUEUING DELAY ANALYSES FOR PACKET-SWITCHED NETWORKS WITH FIFO SERVICE DISCIPLINE

### Povjerenstvo za obranu:

- doc. dr. sc. Niko Jelušić predsjednik
- izv. prof. dr. sc. Štefica Mrvelj mentor
- dr. sc. Marko Matulin član
- prof. dr. sc. Zvonko Kavran zamjena

**Ustanova koja je dodijelila akademski stupanj:** Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu

**Zavod:** Informacijsko Komunikacijski promet

**Vrsta studija:** Preddiplomski

**Studij:** Promet

**Datum obrane završnog rada:** 13.09.2016



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih  
znanosti  
10000 Zagreb  
Vukelićeva 4

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj \_\_\_\_\_ završni rad

isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu \_\_\_\_\_ završnog rada

pod naslovom ANALIZA ČEKANJA U ČVORU PAKETNE MREŽE S DISCIPLINOM  
POSLUŽIVANJA FIFO

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

Student/ica:

U Zagrebu, \_\_\_\_\_ 12.9.2016 \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(potpis)