Opis funkcionalnosti metoda za dodjelu kapaciteta u višeuslužnim mrežama primjenom UML-a

Šinko, Rebeka

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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:119:246837

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Rebeka Šinko

OPIS FUNKCIONALNOSTI METODA ZA DODJELU KAPACITETA U VIŠEUSLUŽNIM MREŽAMA PRIMJENOM UML-A

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2018.

Sveučilište u Zagreb
Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

OPIS FUNKCIONALNOSTI METODA ZA DODJELU KAPACITETA U VIŠEUSLUŽNIM MREŽAMA PRIMJENOM UML-A

FUNCTIONALITY DESCRIPTION OF THE CAPACITY ALLOCATION METHODS IN MULTISERVICE NETWORKS USING UML

Mentor: doc. dr. sc. Marko Matulin

Student: Rebeka Šinko

JMBAG: 0135234123

Zagreb, rujan 2018.

SAŽETAK

Podvorbeni sustav ili sustav posluživanja opisuje svaku vrstu sustava u koji pristižu određeni entiteti i traže uslugu, a sastoji se od spremnika i poslužiteljskog dijela. Ovakav oblik sustava se koristi u svakodnevnici u različitim granama poslovanja. Podvorbeni sustavi se ponekad nazivaju i modeli zato što između ostalog služe za opis stvarnih situacija. U ovom radu su prikazane različite metode za dodjelu kapaciteta korištenjem UML (*Unified Modeling Language*) dijagrama aktivnosti i međudjelovanja. Dijagrami predstavljaju tijek događaja iz kojih je dobivena analiza prosječnog vremena čekanja pojedinih paketa. Analiza pojedinih metoda za dodjelu kapaciteta rezultirala je različitim vremenima čekanja čime se omogućuje jednostavniji odabir prikladne metode za određeni podvorbeni sustav.

KLJUČNE RIJEČI: višeuslužna mreža; podvorbeni sustav; metoda za dodjelu kapaciteta; podvorbena stega; UML

SUMMARY

Queuing systems or serving systems describe each type of system in which certain entities arrive and require a service, and it consists a container and serving part. This type of system is used daily in various branches of business. Queuing systems are sometimes referred to as models because they serve, among other things, to describe the actual situation. This paper presents different methods for allocation of capacity using the UML (Unified Modeling Language) activity diagram and interaction diagram. Diagrams represent the course of events from which an analysis of the average waiting time of individual packets is obtained. The analysis of individual capacity allocation methods has resulted in different waiting times, enabling simple selection of appropriate method for a queuing system.

KEYWORDS: multiservice network; queuing system; capacity allocation method; serving rule; UML

SADRŽAJ

1. Uvod 1
2. Značajke višeuslužnih mreža 3
   2.1. Razvoj i arhitektura 3
   2.2. OSI referentni model 5
   2.3. TCP/IP složaj 8
   2.4. Tehnologije i protokoli u pojedinim slojevima 10
      2.4.1. Protokoli aplikacijskog sloja 11
      2.4.2. Protokoli prezentacijskog sloja 14
      2.4.3. Protokoli sesijskog sloja 16
      2.4.4. Protokoli transportnog sloja 16
      2.4.5. Protokoli mrežnog sloja 18
      2.4.6. Protokoli sloja podatkovne veze 20
      2.4.7. Tehnologije fizičkog sloja 21
3. Opis usluga i njihovih karakteristika 23
   3.1. Podatkovne usluge 25
   3.2. Govorne usluge 25
   3.3. Video usluge 27
4. Kvaliteta usluga 29
   4.1. Parametri QoS-a 29
   4.2. Modeli pružanja QoS usluga u mreži 32
5. Primjena podvorbenih modela u analizi performansi 34
   5.1. Opis pojedinih elemenata podvorbenih sustava 34
   5.2. Kendall-ova oznaka 36
   5.3. Mjerenje telekomunikacijskog prometa 38
6. Značajke različitih metoda dodjele kapaciteta 41
7. Modeliranje metoda za dodjelu kapaciteta 46
   7.1. Opći dijagrami sustava s određenom metodom za dodjelu kapaciteta 46
   7.2. Dijagrami međudjelovanja metoda za dodjelu kapaciteta kroz primjer 48
8. Zaključak 58

Literatura 59

Popis slika 62

Popis tablica 64

1. Uvod

Kontinuirani razvoj mrežnih tehnologija i neprestano uvođenje inovacija i poboljšanja, dovelo je do pojave raznovrsnih terminalnih uređaja putem kojih je korisnicima omogućeno korištenje različitih vrsta usluga. Kako se razvijala tehnologija, tako su se povećavali zahtjevi i očekivanja korisnika. Zbog tih i mnogo drugih razloga, s vremenom je omogućen i pristup višeuslužnim mrežama koja omogućuje korisnicima povezivanje na jedinstvenu širokopojasnu mrežu koja podržava sve vrste usluga.

Kako bi se ciljane performanse pojedine usluge postignule nužno je efikasno upravljati dostupnim kapacitetom koji je ograničen. Pravilna raspodjela kapaciteta uvelike utječe na performanse mreže, a samim time i na kvalitetu usluge koja se koristi, budući da dodjela nedovoljnog kapaciteta pojedinim korisnicima može uzrokovati prekide u isporuci usluge, a samim time i povećanim nezadovoljstvom korisnika.

To je glavni razlog pojave različitih metoda dodjele kapaciteta koji upravljaju redovima čekanja. Na taj način se nastoji ublažiti zagušenje mreže bez obzira dođe li ponekad do odbacivanja paketa. Algoritam raspoređivanja ili planiranja (*scheduling algorithms*) se koristi kako bi održavalo i poštivalo raspoređivanje raspoloživih kapaciteta. Postoji mnogo različitih metoda posluživanja od kojih će njih nekoliko biti objašnjeno u šestom poglavlju i prikazano skicama za jednostavnije razumijevanje. Rad je podijeljen u 8 cjelina:

1. Uvod
2. Značajke višeuslužnih mreža
3. Opis usluga i njihovih karakteristika
4. Kvaliteta usluga
5. Primjena podvorbenih modela u analizi performansi
6. Značajke različitih metoda dodjele kapaciteta
7. Modeliranje metoda za dodjelu kapaciteta
8. Zaključak.

Detaljnije objašnjenje višeuslužnih mreža se nalazi u drugom poglavlju u radu nakon uvoda. Isto tako su prikazani i pojašnjeni modeli i protokoli koji se primjenjuju za opis arhitekture mreže i razumijevanje međusobnih odnosa.

Kao što je spomenuto, razvojem tehnologija došlo je i do porasta zahtjeva korisnika za novim ili unapređenjem postojećih usluga. O kojim se točno uslugama radi koje se u današnjici većinom koriste pojašnjeno je u trećem poglavlju ovog diplomskog rada.

Višeuslužne mreže ne podrazumijevaju samo postojanje višestrukih vrsta prometa unutar mreže, već i sposobnost jedne mreže da podrži sve aplikacije bez ugrožavanja kvalitete usluge za bilo koju od njih. Kvaliteta usluge opisuje cjelokupnu izvedbu mreže te obuhvaća razne parametra poput propusnosti, pojasne širine, kašnjenje itd. što je definirano u četvrtom poglavlju ovog rada.

Telekomunikacijske mreže s komutacijom kanala rukovale su u početku isključivo govornim prometom. Ključna karakteristika je bila da se resurs dodjeljuje pojedinom pozivu. Kao što se može pretpostaviti, mreže s komutacijom kanala su imale mnogo nedostataka s obzirom na brzi razvoj tehnologija što se riješilo novom tehnikom komutacije pod nazivom komutacija paketa.

Ukratko, podaci se prenose u manjim paketima kroz mrežu. Kada nastupi zagušenje, paketi budu prihvaćeni, ali zbog čekanja u čvorovima za prijenos povećava se ukupno vrijeme potrebno za isporuku paketa. Kako bi se spriječila zagušenja i smanjenje kvalitete usluge, koriste se podvorbeni sustavi. To je sustav koji se sastoji od korisnika, repa, poslužitelja i zbirke pravila prema kojima se obavlja posluživanje dolazećih korisnika. Detaljniji opisi pojedinih elemenata podvorbenog sustava nalaze se u petom poglavlju.

Cilj ovog diplomskog rada jest UML (*Unified Modeling Language*) dijagramima međudjelovanja i aktivnosti prikazati funkcionalnosti različitih metoda za dodjelu kapaciteta u višeuslužnim mrežama, koristeći ujedno i stečeno znanje iz područja podvorbenih sustava što je vidljivo u sedmom poglavlju.

Na samom kraju rada je provedena analiza pojedinih metoda za dodjelu kapaciteta kako bi se odabrala odgovarajuća metoda koja je u skladu sa zahtjevima i potrebama korisnika te podvorbenog sustava. Svrha analize jest održavanje pozitivnog korisničkog iskustva kao i osiguravanje poštenog posluživanja korisnika.

2. Značajke višeuslužnih mreža

Tradicionalno su se razne usluge odvijale preko zasebnih mreža kao što je primjerice telefonska mreža koja je građena na način da prenosi samo glasovni promet ili računalna mreža koja je prvobitno bila osmišljena za prijenos podataka. Te su mreže bile uglavnom projektirane za određenu primjenu i nisu bile prikladne za druge vrstu usluge.

Bilo je poželjno imati jedinstvenu mrežu za pružanje svih oblika telekomunikacijskih usluga. Osobno računalstvo olakšalo je jednostavan pristup, manipulaciju, pohranu i razmjenu informacija zbog čega se zahtijeva pouzdan prijenos podataka. Komunikacija korištenjem dokumenata i slika visoke razlučivosti omogućila je prirodniji način ljudske interakcije u odnosu na glas i podatke. Videokonferencija i videozapisi visoke razlučivosti poboljšale su grupnu interakciju na daljinu i kvalitetu slike, ali te usluge ujedno zahtijevaju i velike brzine prijenosa.

Razni novi zahtjevi za prijenos podataka povećale su potrebu za novim prijenosnim sredstvima. Suvremena telekomunikacijska mreža mora pružiti navedene različite usluge visoke kvalitete kako bi se održalo zadovoljstvo krajnjih korisnika.

Višeuslužna mreža (*Multi Service Network* – MSN) može se definirati kao mreža dizajnirana tako da prenosi promet više od jedne vrste usluge. Prema [1], razvoj nove generacije širokopojasnih telekomunikacijskih mreža odvija se u pravcu višeuslužnih mreža u kojima su integrirane raznovrsne usluge kao što su:

- prijenos govora,
- prijenos podatkovnih aplikacija,
- prijenos pokretne slike,
- prijenos nepokretne slike,
- multimedijske usluge.

2.1. Razvoj i arhitektura

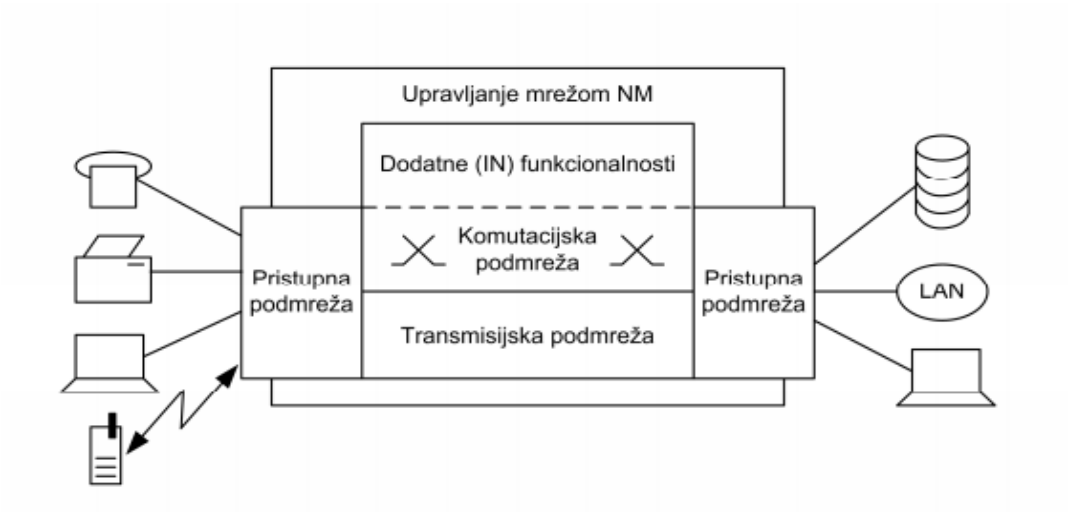
Početkom osamdesetih godina, sektor telekomunikacijske standardizacije međunarodne telekomunikacijske unije (*International Telecommunication Union Telecommunication Standardization sector* – ITU-T) i ostale standardizacijske organizacije, uspostavile su niz preporuka za tehnike umrežavanja. Opisivale su potrebe za implementacijom inteligentne mreže temeljene na optičkim vlaknima za rješavanje granica interoperabilnosti i dodavanja novih usluga poput digitalnog glasa i podataka javne telefonske mreže (*Public Switched Telephone Network* – PSTN). Mreža je nazvana digitalna mreža širokopojasne integrirane usluge (*Broadband Integrated Services Digital Network* – B-ISDN), [2].

Zbog novog načina rada mreže bilo je potrebno donijeti i nove standarde asinkronog načina prijenosa (*Asynchronous Transfer Mode* – ATM) za komutaciju, standarde za transmisiju (*Synchronous Optical Network* – SONET) i multipleksiranje (*Synchronous Digital Hierarchy* – SDH) što je postalo dostupno proizvođačima od sredine 1990-ih. ATM mreže su dizajnirane kako bi istodobno pružale više klasa usluga poput prijenosa glasovnog, video i podatkovnog prometa. Mnogi pružatelji usluga koji su imali potrebu za nadogradnjom tijekom 90-ih godina, odlučili su koristiti ATM kao platformu s ciljem pružanja novih usluga, [2].

S vremenom se u ATM mrežu uspješno implementirao i prijenos prometa baziran na internetskom protokolu (*Internet Protocol* – IP) što je omogućilo razvoj lokalnih mreža (*Local Area Network* – LAN). Zbog cijene i održavanja se ATM komutacija sve više zamjenjivala Ethernet[1]-om i proizvodima koji su se temeljili na IP-u, [2].

Mnogo pružatelja usluga je konvergiralo svoje ATM mreže na jezgru višeprotokolnog komutiranju *labela* (*Multiprotocol Label Switching* – MPLS) kako bi smanjili operativne rashode i strateški postavili kapitalne izdatke za veće marže zbog boljeg podržavanja prijenosa usluga temeljene na IP-u. MPLS je mehanizam za prijenos i usmjeravanje podatkovnog prometa. U referentnom modelu za otvoreno povezivanje sustava (*Open Systems Interconnection model* – OSI) se MPLS nalazi između podatkovnog i mrežnog sloja s obzirom na funkcionalnosti, a pored IP paketa može prenositi i druge vrste prometa kao što su primjerice Ethernet i ATM, što će biti detaljnije pojašnjeno u nadolazećim poglavljima.

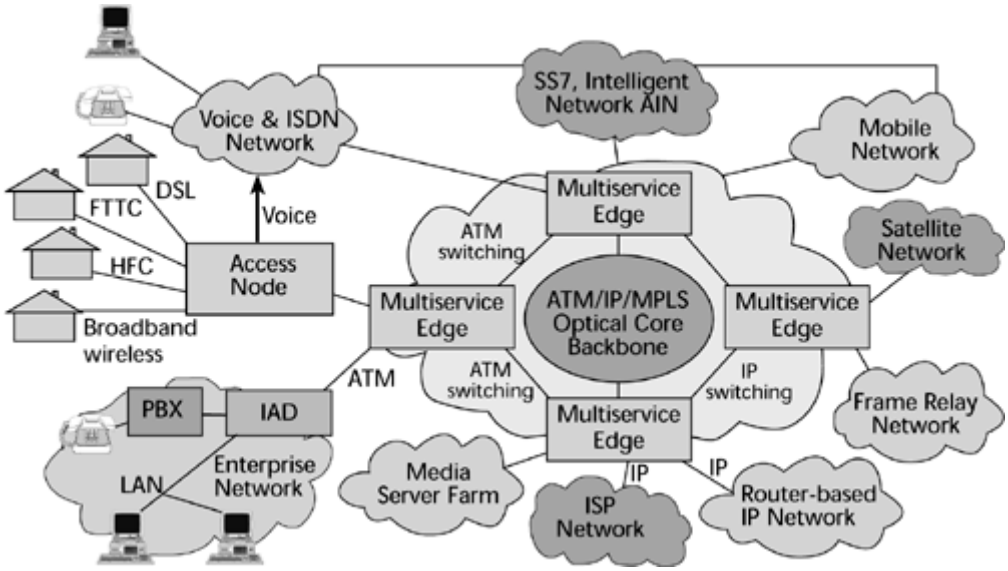
Višeuslužna mreža se najjednostavnije može prikazati kao telekomunikacijska mreža prema poopćenom modelu na slici 1. Ono predstavlja uređen skup prostorno distribuiranih tehničkih sustava odnosno kapaciteta ili resursa dizajniranih i izgrađenih prema temeljnom zahtjevu da uspješno poslužuju promet na određenom području, [1].



Slika 1. Prikaz telekomunikacijske mreže/sustava prema poopćenom modelu, [1]

[1] Ethernet ili IEEE standard 802.3 je danas najčešće korištena tehnologija za lokalne mreže.

Komutacijska podmreža se sastoji od komutacijskih sustava, tj. čvorišta koja su potrebna radi uspostavljanja veze između krajnjih korisnika mreže tako da mogu međusobno komunicirati. Transmisijska podmreža se sastoji od spojnih vodova koji povezuju čvorišta pri čemu se koriste različiti mediji (bakreni, svjetlovodni, radio) i odgovarajuća elektronička oprema. Pristupnu podmrežu predstavljaju korisnički terminalni uređaji koji su spojeni na lokalnu pristupnu centralu.



Slika 2. Primjer višeuslužne mreže, [3]

Primjer jedne višeuslužne mreže je prikazan arhitekturom na slici 2. Višeuslužne mreže su dosta kompleksne s obzirom na veliki broj usluga koje se nude od strane operatora i velikog broja korisnika koji ih koriste te visoke razine kvalitete koja je nužna kako bi se zadovoljile potrebe i zahtjevi korisnika.

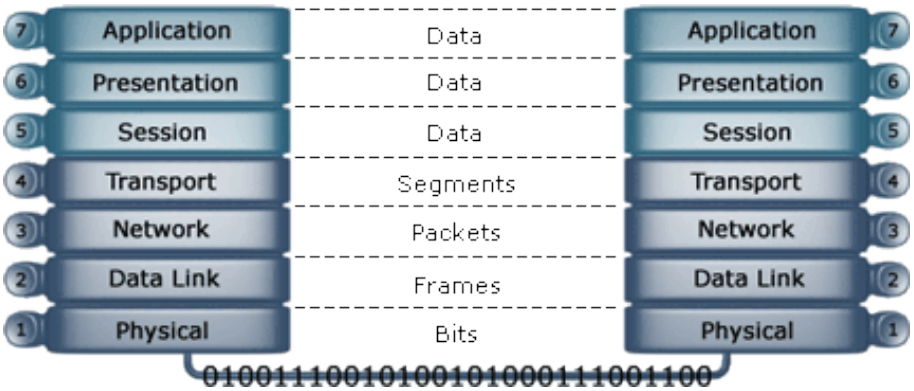
Arhitektura se sastoji od tri razine. Prva razina uključuje pristup koji predstavlja vanjsku razinu za pružanje usluge krajnjem korisniku. Druga razina uključuje tzv. rubnu sklopku koja je povezana s integracijom protokola i podatkovnih usluga. Treća razina uključuje jezgru koja predstavlja unutarnju razinu za upravljanje prijenosom podataka velike brzine. U nastavku će biti opisani modeli koji detaljnije opisuju komponente pojedinih mreža zbog čega su u današnjici najkorišteniji.

2.2. OSI referentni model

OSI referentni model je najkorišteniji konceptualni model koji se primjenjuje za opis arhitekture mreže i razumijevanje odnosa. Koristi se od strane proizvođača pri projektiranju mreža i od strane stručnjaka pri proučavanju mreža. Osnovni koncept OSI modela je podjela procesa komunikacije između dvije krajnje točke u telekomunikacijskoj mreži na sedam različitih skupina funkcija ili slojeva:

- Aplikacijski sloj,
- Prezentacijski sloj,
- Sesijski sloj,
- Transportni sloj,
- Mrežni sloj,
- Sloj podatkovne veze,
- Fizički sloj.

Razlikuju se niži slojevi (tri donja sloja) koji su orijentirani na mrežne funkcije i na protokole asocirane s telekomunikacijskom mrežom koja se koristi za povezivanje dvaju sustava. Nasuprot tome viši slojevi (tri gornje razine) s aplikacijski-orijentiranim funkcijama opisuju funkcionalnosti slojeva koji omogućuju interakciju aplikacijskih procesa krajnjih korisnika, [4].



Slika 3. Enkapsulacija podatka u OSI referentnom modela, [5]

OSI model opisuje način na koji informacija putuje od aplikacije na jednom računalu do aplikacije koja se izvršava na drugom umreženom računalu. Taj proces se naziva enkapsulacija podatka u OSI modelu što je prikazano na slici 3. Podaci višeg sloja se enkapsuliraju, odnosno podacima višeg sloja se dodaje zaglavlje sloja kroz koji podaci prolaze što znači da svakim prijelazom u niži sloj, informacija mijenja format, [4].

Podaci se prvo enkapsuliraju u transportnom sloju i kao takvi nose naziv segment. Segment se tada prebacuje do mrežnog sloja gdje također zaprima zaglavlje mrežnog sloja. Segment i zaglavlje mrežnog sloja na kraju čine paket. Nakon toga paket putuje do sloja veze podataka gdje dobiva novo zaglavlje što zajedno čini tzv. okvir. Ovo zaglavlje definira način transporta informacije kroz mrežno sučelje do fizičkog sloja mreže. U fizičkom sloju mreže podaci se konvertiraju u oblik podoban za prijenos podataka ovisno o tipu prijenosnog medija. Kada podaci stignu na odredište, postupak je obrnut što znači da se svakim prijelazom u novi sloj, podatku uklanja zaglavlje tog sloja kako bi se vratio u oblik u kojem je podatak bio poslan.

Tablica 1. Opis funkcija pojedinih slojeva OSI modela, [4]

Naziv	Funkcije
Fizički sloj	- Definiran fizičkim medijem koji prenosi električne, svjetlosne ili radio signale kroz mrežu - Podaci se prenose s mrežne kartice (*Network Interface Crad* – NIC) na prijenosni medij - Nema sloja kojem daje uslugu
Sloj podatkovne veze	- Podatke šalje do fizičkog sloja - Kontrola greške (detekcija i korekcija greške, provjera integriteta) - Podaci sadrže: • oznaku odredišta koja je najčešća izvedena kao fizička adresa mrežne kartice (*Media Access Control* – MAC) • oznaku pošiljatelja (MAC adresa odredišnog računala) • upravljačke informacije (tip okvira, usmjeravanje te informacije vezane za segmentaciju) - Podijeljen na dva sloja: • kontrola logičke veze (*Logical Link Control* – LLC) koji osigurava kontrolu greške i primarno komunicira s mrežnim slojem radi osiguranja konekcijske ili bezkonekcijske veze • kontrola pristupa mediju (MAC) koji pruža pristup LAN mediju i primarno komunicira s fizičkim slojem
Mrežni sloj	- Određuje najbolji put za prijenos podataka između dva računala - Upravlja s adresiranjem poruke i prevođenjem logičkih adresa (IP) u fizičke (MAC) - Osigurava putanju paketa u mreži prilikom prijenosa podataka - Može dodatno segmentirati IP pakete u manje segmente ako je potrebno
Transportni sloj	- Segmentira i spaja podatke u jednu cjelinu - Omogućava krajnju komunikaciju između dva računala prilikom razmjene podataka: • svaki paket se numerira i tada šalje na odredište • primatelj nakon zaprimanja šalje ACK signal pošiljatelju • ako nije primio paket tada se ponovno šalje nedostajući paket (uz primjenu odgovarajućeg protokola) - Služi kao rezervna provjera kako bi se osiguralo da svi podaci budu primljeni - Osigurava najpovoljnije korištenje mrežnih resursa i usluga ovisno o vrsti i zahtjevima koji se definiraju na sloju sesije - Transportne podatkovne jedinice se nazivaju blokovi - Pruža različite klase usluga što odgovara različitoj kvaliteti usluga
Sloj sesije	- Osigurava komunikaciju između aplikacija - Izvršava sigurnosne funkcije kako bi se utvrdila dozvola za uspostavu mrežne komunikacije - Koordinira zahtjevima usluga i događaja koji se događaju prilikom komunikacije - Brine da sve komunikacije funkcioniraju u slučaju više mrežnih aplikacija i usmjerava dolazeće podatke pravoj aplikaciji

Prezentacijski sloj	- Definira način formatiranja podataka - Odgovoran za sve konverzije[2] podataka, kriptografsku zaštitu, konverzije skupa znakova ili konverzije protokola
Sloj aplikacije	- Omogućuje aplikacijama pristup mrežnim uslugama - Programi moraju biti pisani tako da posjeduju komunikacijske komponente koje mogu komunicirati s aplikacijskim slojem

U tablici 1 su detaljno pojašnjene funkcionalnosti svakog sloja OSI referentnog modela. Što se tiče formata s kojima prezentacijski sloj radi su:

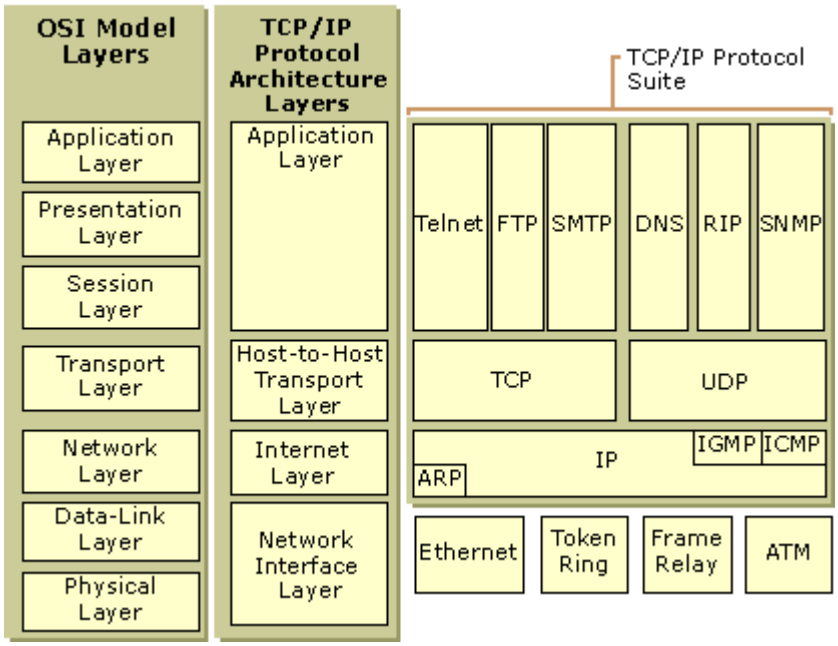
- ASCII (*American Standard Code for Information Interchange)* – 8-bitni skup znakova koji se koristi za predstavljanje svih alfanumeričkih znakova.
- EBCDIC (*Extended Binary Coded Decimal Interchange Code)* – format koji se najčešće koristio na IBM *mainframe* i mini računalima.
- Eksterna prezentacija podataka (*External Data Representation* – XDR) – koristi se kod komunikacije između računala s različitim skupom znakova i koristi se kao univerzalni format za prijenos tekstualnih podataka.
- Binarni format (*Binary files*) – većina izvršnih, muzičkih i grafičkih datoteka konvertiraju se u binarni formatu u sloju prezentacije.

2.3. TCP/IP složaj

Pored OSI modela se koristi i TCP/IP složaj koji sadrži skup komunikacijskih protokola koji se koriste u različitim računalnim mrežama. Nazvan je po protokolima koji se koriste unutar složaja, odnosno po protokolu kontrole prijenosa (*Transmission Control Protocol* – TCP) i IP protokolu. Poznat je i pod nazivom model ministarstva obrane (*Department of Defense* – DoD) zato što je razvoj umrežavanja financirala agencija Ministarstva obrane SAD-a (*Defense Advanced Research Projects Agency* – DARPA).

TCP/IP protokolarni složaj se, za razliku od OSI modela, sastoji od četiri sloja, odnosno od aplikacijskog, transportnog, Internet i mrežnog sloja. Svaki sloj odgovara jednom ili više slojeva od sedam razina OSI modela kao što je vidljivo na slici 4.

[2] Konverzija – proces pretvaranja u slučaju da računala imaju dva različita skupa znakova



Slika 4. Usporedba arhitekture OSI i TCP/IP konceptualnih modela, [6]

Slojevi mrežnog sučelja (koji se naziva i sloj mrežnog pristupa) odgovorni su za postavljanje TCP/IP paketa na mrežni medij i za primanje TCP/IP paketa s mrežnog medija. Sloj mrežnog sučelja obuhvaća sloj podatkovne veze i fizički sloj OSI modela. Model je dizajniran na način da bude neovisan o načinu pristupa mreži, okvirnom formatu i mediju. Na taj se način model može koristiti za povezivanje različitih vrsta mreža. To uključuje LAN tehnologiju kao što su *Ethernet* i *Token Ring*[3] te tehnologiju širokopojasne mreže (*Wide Area Network* – WAN) kao što su *X.25*[4] i *Frame Relay*[5]. Neovisnost od bilo koje specifične mrežne tehnologije daje TCP/IP mogućnost prilagodbe novim tehnologijama kao što je ATM, [6].

Internetski sloj je odgovoran za funkcije adresiranja, pakiranja i usmjeravanja te je analogan mrežnom sloju OSI modela. Sastoji se od četiri protokola, [6]:

- IP – protokol koji je odgovoran za IP adresiranje, usmjeravanje i fragmentaciju te ponovno sastavljanje paketa.
- *Adress Resolution Protocol* (ARP) – komunikacijski protokol kojim se dobiva fizička adresa na lokalnoj mreži iz poznate mrežne adrese.
- *Internet Control Message Protocol* (ICMP) – odgovoran za pružanje dijagnostičkih funkcija i izvještavanje o pogreškama zbog neuspješne dostave IP paketa.

[3] Token Ring – komunikacijski protokol za lokalne mreže.
[4] X.25 – komunikacijski protokol za prijenos paketa u WAN mreži.
[5] Frame Relay – standardizirana tehnologija WAN mreže koja opisuje fizički sloj i sloj podatkovne veze digitalnih telekomunikacijskih kanala pomoću metodologije zamjene paketa.

- *Internet Group Management Protocol* (IGMP) – komunikacijski protokol odgovoran za upravljanje IP *multicast*[6] grupama.

Transportni sloj je odgovoran za pružanje komunikacijskih usluga aplikacijskom sloju. Protokoli na ovom sloju su TCP i protokol kratkih poruka (*User Datagram Protocol* – UDP). TCP je protokol koji kreira virtualnu konekciju između uređaja umreženih u računalnu mrežu te putem te ostvarene konekcije prenosi podatke. UDP je protokol koji omogućuje slanje kratkih poruka (*datagram*) između aplikacija na umreženim računalima. Transportni sloj obuhvaća odgovornosti transportnog sloja u OSI modelu i nekoliko odgovornosti sloja sesije, [6].

Aplikacijski sloj omogućuje aplikacijama pristup uslugama drugih slojeva i definira protokole koje aplikacije koriste za razmjenu podataka. Najpoznatiji protokoli aplikacijskog sloja su oni koji se koriste za razmjenu korisničkih podataka:

- *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP) – koristi se za prijenos datoteka koje čine *web* stranice.
- *File Transfer Protocol* (FTP) – koriste se za interaktivni prijenos datoteka.
- *Simple Mail Transfer Protocol* (SMTP) – koristi se za prijenos poruka u obliku elektroničke pošte i privitaka.
- *Telnet* – protokol koji se koristi za daljinsko prijavljivanje na mrežne uređaje.

Sljedeći protokoli aplikacijskog sloja olakšavaju upotrebu i upravljanje TCP/IP mrežama, [6]:

- *Domain Name System* (DNS) – koristi se za rješavanje naziva glavnog računala na IP adresu.
- *Routing Information Protocol* (RIP) – protokol za usmjeravanje koji usmjerivači koriste za razmjenu informacija.
- *Simple Network Management Protocol* (SNMP) – koristi se između konzole za upravljanje mrežom i mrežnih uređaja za prikupljanje i razmjenu informacija o mrežnom upravljanju

2.4. Tehnologije i protokoli u pojedinim slojevima

Na svakom sloju TCP/IP složaja se primjenjuju protokoli kako bi prijenos podataka bio moguć što je vidljivo u tablici 2. Nekoliko protokola je spomenuto u prethodnom poglavlju, ali će u ovome biti detaljnije pojašnjeni.

[6] Multicast – grupna komunikacija gdje je prijenos podataka adresiran na skupinu odredišnih računala istovremeno.

Tablica 2. Prikaz protokola koji se opisuju funkcionalnosti pojedinih slojeva TCP/IP složaja, [7] [8]

<table>
<tr><th>Sloj</th><th>OSI model</th><th>TCP/IP složaj</th><th colspan="8">Protokoli</th></tr>
<tr><td>7</td><td>Aplikacijski sloj</td><td rowspan="3">Aplikacijski sloj</td><td>HTTP</td><td>FTP</td><td>DNS</td><td>SNMP</td><td>SIP</td><td colspan="2">Telnet</td></tr>
<tr><td>6</td><td>Prezentacijski sloj</td><td colspan="3">SSL</td><td colspan="4">TLS</td></tr>
<tr><td>5</td><td>Sesijski sloj</td><td colspan="3">NetBIOS</td><td colspan="4">PPTP</td></tr>
<tr><td>4</td><td>Transportni sloj</td><td>Transportni sloj</td><td colspan="3">TCP</td><td colspan="4">UDP</td></tr>
<tr><td>3</td><td>Mrežni sloj</td><td>Internetski sloj</td><td colspan="2">IP</td><td colspan="2">ARP</td><td colspan="2">ICMP</td><td>IGMP</td></tr>
<tr><td>2</td><td>Sloj podatkovne veze</td><td rowspan="2">Mrežni sloj</td><td colspan="3">PPP</td><td colspan="3">HDLC</td><td colspan="2">Frame Relay</td></tr>
<tr><td>1</td><td>Fizički sloj</td><td>Ethernet</td><td colspan="2">USB</td><td colspan="2">Bluetooth</td><td colspan="2">Token Ring</td></tr>
</table>

U nastavku su detaljnije opisane funkcije pojedinih protokola s obzirom na razinu sloja TCP/IP složaja.

2.4.1. Protokoli aplikacijskog sloja

U aplikacijskom sloju se primjenjuje najviše protokola, ali će samo najvažniji biti pojašnjeni. HTTP je protokol aplikacijskoj sloja koji omogućuje prijenos hipermedijskih dokumenata, kao što je HTML[7]. Osmišljen je za komunikaciju između *web* preglednika i *web* poslužitelja, ali se također može koristiti i za druge svrhe. HTTP slijedi klasični model *klijent-poslužitelj*, pri čemu klijent otvara vezu za postavljanje zahtjeva, a zatim čeka dok ne dobije odgovor, [9].

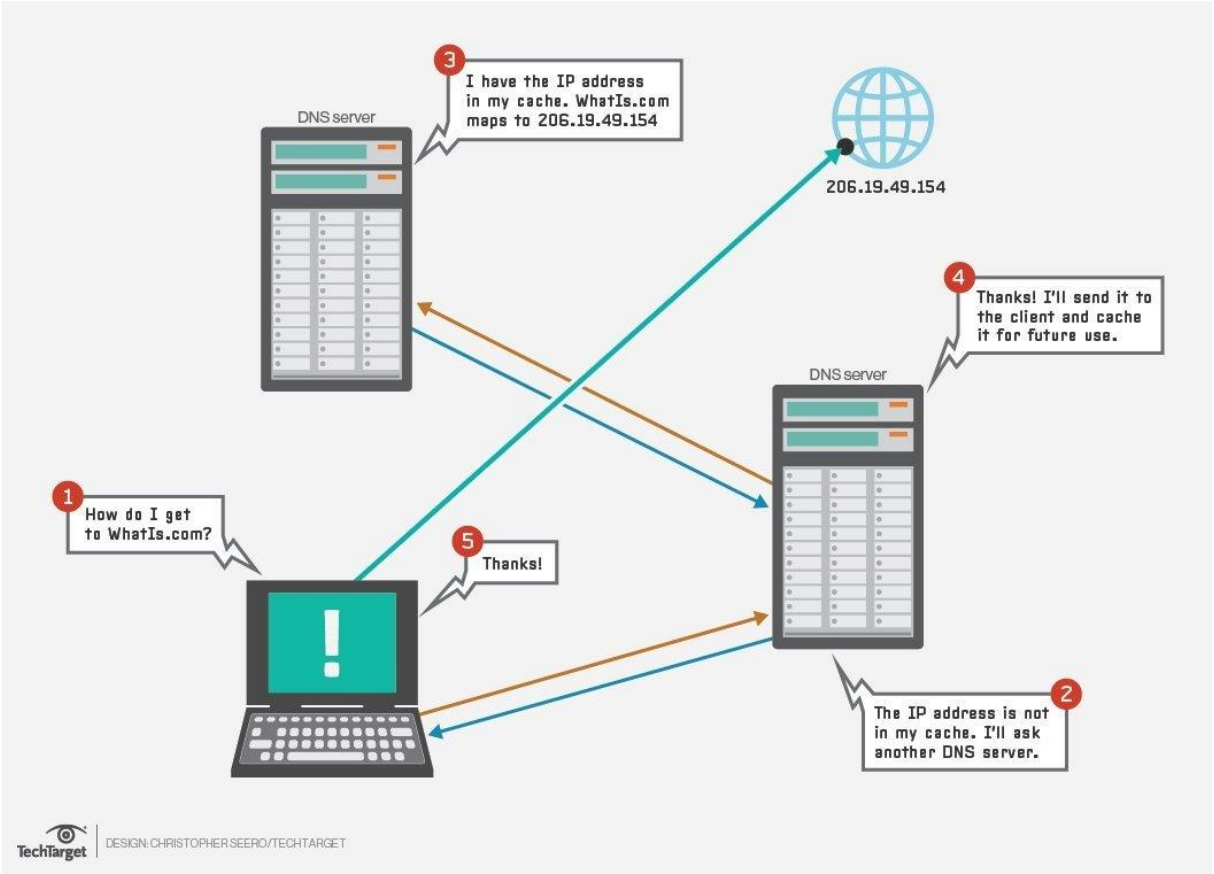
FTP je protokol koji se koristi za razmjenu datoteka između klijenta i poslužitelja na računalnoj mreži. Baziran je na arhitekturi modela *klijent-poslužitelj* te koristi zasebne konekcije za kontrolu između klijenta i poslužitelja. Korisnici se mogu autentificirati pomoću jasnog teksta za prijavu, obično u obliku korisničkog imena i lozinke, ali se mogu povezati i anonimno ako poslužitelj to dopusti. Poslužitelji bazirani na FTP-u omogućuju klijentima preuzimanje raznih datoteka i kasnije njihovo brisanje, preimenovanje, premještanje, kopiranje i sl. koje se nalaze na arhivi kojom poslužitelj raspolaže, [10].

DNS je hijerarhijski decentralizirani sustav imenovanja računala, usluga ili drugih resursa povezanih s Internetom ili privatnom mrežom. On povezuje različite informacije s nazivima domena koji su dodijeljeni svakom od sudionika. U svakom

[7] HTML – *HyperText Markup Language,* prezentacijski jezik za izradu web stranica.

slučaju, ona predstavlja bitnu komponentu funkcionalnosti Internet mreže koja je u upotrebi od 1985. godine. Isto tako prevodi domenska imena u numeričke IP adrese koje su potrebne za lociranje i identifikaciju računalnih usluga i uređaja, [11].

DNS poslužitelji odgovaraju na pitanja unutar i izvan vlastitih domena. Kada poslužitelj primi zahtjev izvan domene, informacije o nazivu ili adresi unutar domene pružaju autoritativni odgovor. Kada poslužitelj primi zahtjev unutar vlastite domene za informacije o imenu ili adresi izvan te domene, on prosljeđuje zahtjev drugom poslužitelju kojim obično upravlja njegov davatelj internetskih usluga (*Internet Service Provider* – ISP). Ako taj poslužitelj ne zna odgovor ili autoritativni izvor odgovora, on će doprijeti do DNS poslužitelja za najvišu domenu. Zatim će zahtjev proslijediti autoritativnom poslužitelju za određenu domenu te se odgovor vraća istim putem. Primjer slanja zahtjeva za pristup na određenu *web* stranicu i proces traženja odgovora od poslužitelja prikazano je na slici 5.



Slika 5. Prikaz komunikacije između klijenta i poslužitelja za ostvarivanje pristupa na određenu web stranicu, [12]

Za promicanje učinkovitosti, poslužitelji mogu spremiti odgovore što im omogućuje bržu reakciju kada sljedeći put dođe zahtjev za istu pretragu. Taj mehanizam pruža distribuciju usluga koja podnosi pogreške i dizajnirana je kako bi se izbjegla jedna velika središnja baza podataka.

SNMP je protokol za upravljanje mrežom koji prikuplja i organizira informacije o upravljanim uređajima na IP mrežama. Jedan od najčešće korištenih protokola, SNMP je podržan na širokom rasponu hardvera, od mrežne opreme kao što su usmjerivači, preklopnici i bežične pristupne točke do krajnjih točaka poput pisača, skenera i internet uređaja (*Internet of Things* – IoT). Ukratko, SNMP je protokol koji se koristi za upravljanje i praćenje mrežnih uređaja i njihovih funkcija te osigurava zajednički jezik za mrežne uređaje za prijenos podataka, [12].

Telnet je protokol koji se koristi na Internetu ili lokalnim mrežama kako bi osigurao dvosmjerni interaktivni komunikacijski sustav. Odnosno, omogućuje korisniku na jednom mjestu putem nekog terminalnog uređaja uspostavljanje veze s poslužiteljem ili nekim drugim terminalnim uređajem na drugom mjestu, [13].

Osim navedenih protokola, postoji još mnogo drugih vrsta protokola koji se u koriste za opis funkcionalnosti aplikacijskog sloja. Jedan od njih je *Dynamic Host Configuration Protocol* (DHCP) koji se koristi od strane mrežnih računala za dodjeljivanje IP adresa i ostalih mrežnih postavki ili protokoli za preuzimanje elektroničke pošte preko Interneta kao što su:

- *Internet Message Access Protocol* (IMAP),
- *Post Office Protocol* (POP),
- *Post Office Protocol version 3* (POP3).

Posljednji važniji protokol koji se koristi naziva se protokol za pokretanje sesije (*Session Initation Protocol* – SIP). Predstavlja signalizacijski protokol za pokretanje, održavanje, izmjenu i ukidanje sesije u realnom vremenu što uključuje video, glas, poruke i ostale komunikacijske aplikacije i usluge između dvije ili više krajnjih točaka na IP mrežama. Razvila ga je radna skupina Internet inženjerstva (*Internet Engineering Task Force* – IETF) kako bi se odgovorilo na razvojne potrebe IP komunikacija. SIP nadopunjuje druge komunikacijske protokole kao što su RTP (*Real-Time Transport Protocol*) i RTSP (*Real-Time Streaming Protocol*) koji se koriste u IP sesijama, [18].

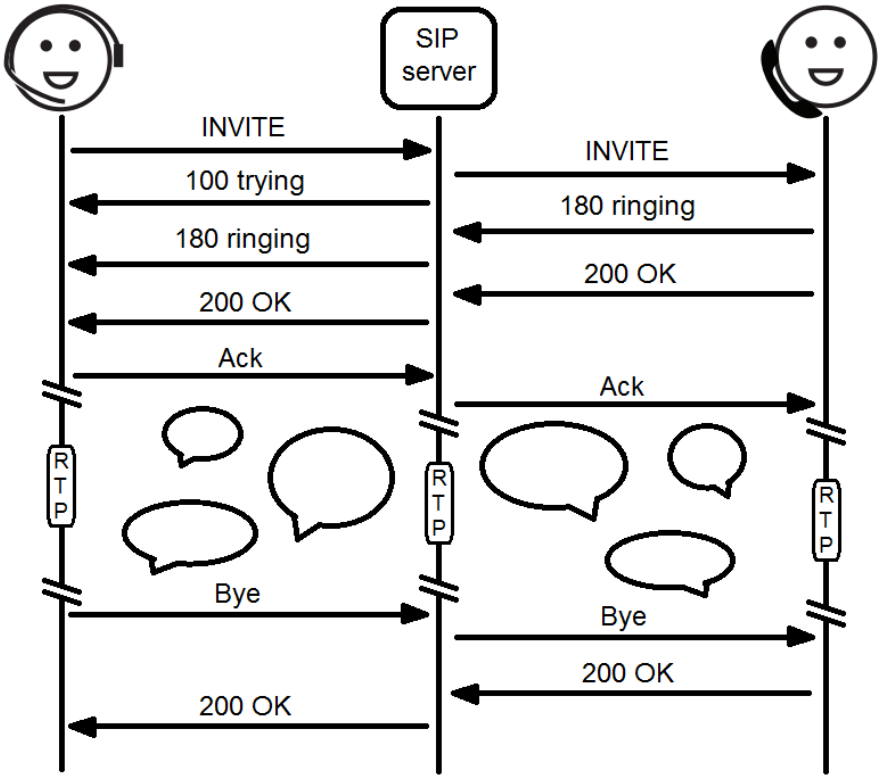
Protokol je koncipiran neovisno o transportnom mediju tako da se može implementirati na bilo koju vrstu mreže. Pomoću posrednih (*proxy*) poslužitelja SIP isto tako omogućuje lociranje i preusmjeravanje poziva te podržava mobilnost korisnika. Svaka registracija na novu lokaciju se bilježi na SIP poslužitelje, [19].

Multimedijske SIP sesije uključuju različite vrste usluga poput poziva putem internetske telefonije, videokonferencije i druge oblike komunikacije. Definira specifičan oblik razmjene poruka i slijed komunikacije, a poruke se dijele na zahtjeve i odgovore. Primjeri nekih poruka, [20]:

- *INVITE* – poziv za sudjelovanje u sesiji,
- *ACK* – potvrda na zahtjev *REQUEST,*
- *BYE* – završavanje poziva,
- *CANCEL* – otkazivanje svih akcija koje su u tijeku, ali ne završava poziv koji je već prihvaćen,

- *OPTIONS* – svojstva poslužitelja itd.

Uspostava SIP sesije se provodi kroz dvosmjernu razmjenu opisa sesije čiji se model naziva *offer/answer*. Korisnički agent generira opis sesije (*offer*) koja sadrži informacije neophodne za uspostavu sesije i šalje ga drugom korisničkom agentu. Taj drugi korisnički agent generira vlastiti opis sesije, tj. *answer* nakon prijema *offer*-a. Nakon završetka *offer/answer* razmjene započinje razmjena tokova medija između korisničkih agenata što znači da je sesija uspostavljena. Primjer uspostave sesije pomoću poruka i *offer/answer* modela prikazano je na slici 6.

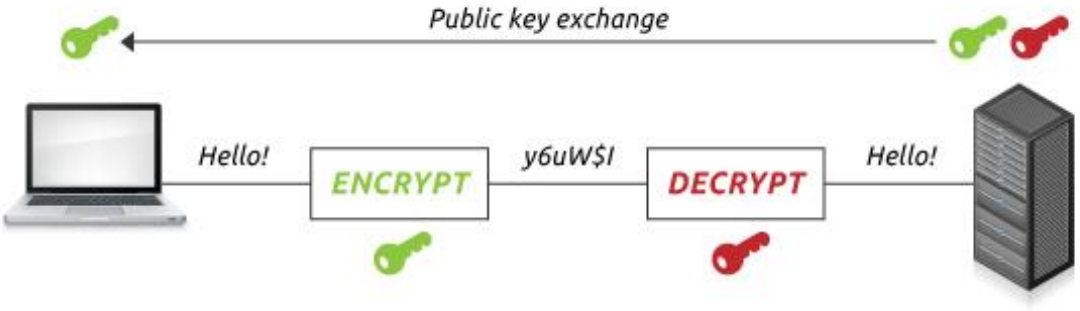


Slika 6. Prikaz zahtjeva i odgovora za pozivom, [21]

2.4.2. Protokoli prezentacijskog sloja

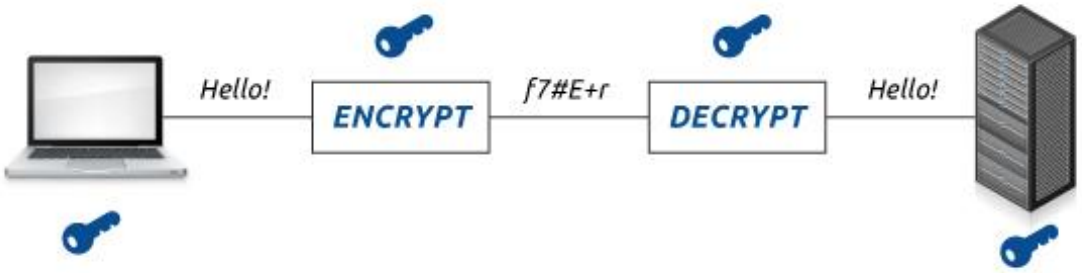
U prezentacijskom sloju se primjenjuju dva protokola. *Secure Sockets Layer* (SSL) označava standardnu tehnologiju za održavanje sigurne internetske veze i zaštitu svih osjetljivih podataka koji se šalju između dva sustava. Dva sustava mogu biti poslužitelj i klijent ili poslužitelj i poslužitelj. Ovaj protokol koristi algoritme za enkripciju kako bi se spriječilo neautorizirano pristupanje i korištenje podataka koji se šalju putem mreže, a dijeli se na asimetrično i simetrično šifriranje. Informacije mogu biti osjetljive i osobne te mogu uključivati brojeve kreditnih kartica ili druge financijske informacije te imena i adrese, [14].

Asimetrično šifriranje ili kriptografija s javnim ključem koristi zasebni ključ za šifriranje i dešifriranje. Svatko može koristiti ključ za šifriranje (javni ključ) za šifriranje poruke, ali ključ za dešifriranje (privatni ključ) je privatan. Na taj način samo primatelj kojem je namijenjena poruka može dešifrirati poruku što se može prikazati slikom 7. Asimetrični ključevi su obično 1024 ili 2048 bita. Međutim, ključevi manji od 2048 bita se više ne smatraju sigurnim za upotrebu.



Slika 7. Prikaz asimetričnog šifriranja ili kriptografije, [15]

Simetrično šifriranje upotrebljava jedan ključ za šifriranje i dešifriranje podataka, odnosno pošiljatelj i primatelj trebaju isti ključ za komunikaciju, slika 8. Simetrične veličine ključa su obično 128 ili 256 bita i što je veća veličina ključa, to je i veća sigurnost. Budući da su asimetrični ključevi veći od simetričnih, podaci koji se asimetrično šifriraju su sigurniji od neautoriziranog korištenja, ali to ne znači da su i bolji. Simetrični ključevi su manji pa zahtijevaju i manje računalnog opterećenja.



Slika 8. Prikaz simetričnog šifriranja ili kriptografije, [15]

Transport Layer Security (TLS) je protokol koji osigurava integritet i privatnost podataka između dvije komunikacijske aplikacije te predstavlja ažuriranu i sigurniju verziju SSL-a. To je najčešće korišteni sigurnosni protokol koji se danas upotrebljava za *web* preglednike i druge aplikacije koje zahtijevaju sigurnosno razmjenjivanje podataka putem mreže (npr. prijenos datoteka, komunikacija u realnom vremenu, virtualna privatna mreža itd.), [14].

2.4.3. Protokoli sesijskog sloja

Jedan od protokola koji se koristi na ovom sloju naziva se NetBIOS (*Network Basic Input/Output System*). To je program koji omogućuje aplikacijama na različitim računalima komunikaciju unutar lokalne mreže. Koristi se u mrežama *Ethernet* i *Token Ring* te *Microsoft Windows.* Ne podržava mehanizam usmjeravanja zbog čega aplikacije koje komuniciraju na WAN mreži moraju koristiti pomoćni transportni mehanizam poput TCP protokola, [16].

NetBIOS pruža komunikacijske usluge na lokalnim mrežama koji pritom koristi protokol pod nazivom NetBIOS okvir (*NetBIOS Frame* – NBF). NetBIOS i NetBEUI (*NetBIOS Extended User Interface*) su zasebne, ali povezane tehnologije. NetBEUI je proširio prve implementacije NetBIOS-a dodatnim mogućnostima umrežavanja. Softverske aplikacije se na mreži lociraju i prepoznaju međusobno preko svojih NetBIOS imena. U operativnom sustavu *Windows* se NetBIOS ime odvaja od naziva računala i može sadržavati do 16 znakova, [16].

Drugi protokol sesijskog sloja naziva se protokol za tuneliranje od točke do točke (*Point-to-Point Tunneling Protocol* – PPTP). To je protokol koji se sastoji od skupa komunikacijskih pravila i omogućuje korporacijama proširenje vlastite korporacijske mreže putem privatnih tunela preko javnog interneta. Korporacija koristi širokopojasnu mrežu kao jednu veliku lokalnu mrežu te na taj način ne treba iznajmiti vlastite linije za širokopojasnu komunikaciju i pritom može sigurno koristiti javnu mrežu. Ova vrsta međusobnog povezivanja poznata je kao virtualna privatna mreža (*Virtual Private Network* – VPN), [17].

PPTP je jedan od najstarijih VPN protokola koji se koristi još od *Windows 95* i od tada je standardni protokol na svim verzijama *Windows*-a. Razvijen je *Microsoft*-ovom inicijativom kako bi razvio drugi protokol pod nazivom PPP (*Point-to-Point Protocol*). Od svih VPN protokola, PPTP je jedan od najčešće korištenih, najlakši za postavljanje i najbrži za računala. Iz tog razloga, koristan je za aplikacije u kojima se zahtijevaju velike brzine prijenosa poput audio ili video strujanje (*streaming*) i uređajima s manje ograničenim procesorima, [17].

Međutim, PPTP je podložan ozbiljnim sigurnosnim ranjivostima zato što su temeljni protokoli za provjeru autentičnosti dosta nesigurni pa se iz tog razloga često ne preporučuje za uporabu.

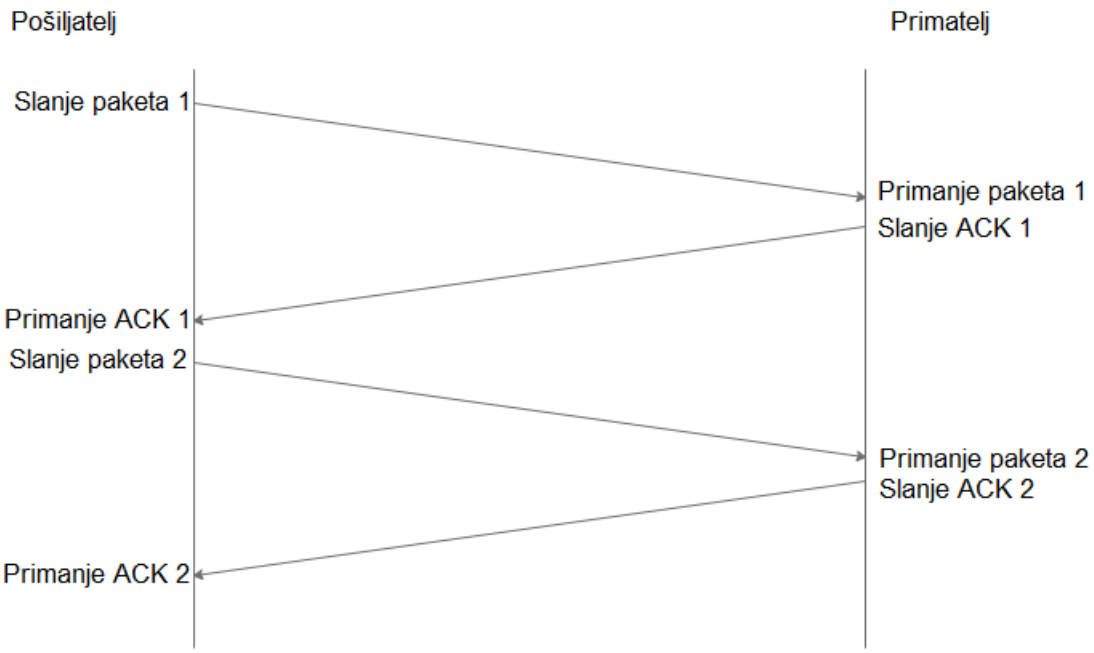
2.4.4. Protokoli transportnog sloja

Na transportnom sloju se nalaze dva najbitnija protokola koja su se već spominjala kroz rad, a u pitanju su TCP i UDP. TCP je protokol koji definira kako uspostaviti i održavati komunikaciju putem mreže gdje aplikacije razmjenjuju podatke.

Radi s IP protokolom koji definira kako računala šalju pakete podataka jedni drugima. TCP i IP zajedno tvore osnovna pravila koja definiraju Internet.

TCP je konekcijski orijentirani protokol što znači da se konekcija ostvaruje i održava dok aplikacije na svakom kraju ne završe razmjenu poruka. Određuje kako podijeliti aplikacijske podatke u segmente koje mreža može isporučiti te kako slati i primati pakete iz mrežnog sloja. Isto tako upravlja nadzorom protoka i s obzirom da je namijenjen za pružanje prijenosnih podataka bez pogrešaka, upravlja retransmisijom u slučaju izgubljenih ili oštećenih paketa i potvrđivanjem paketa koji su stigli na odredište, [23].

Primjerice, kada *web* poslužitelj šalje HTML datoteku klijentu, koristi HTTP protokol kako bi to ostvario. HTTP programski sloj šalje zahtjev TCP sloju da uspostavi konekciju i pošalje datoteku. Nakon toga TCP dijeli datoteku na segmente, numerira ih i šalje individualno do IP sloja za dostavu. Iako svaki IP paket ima naznačenu istu izvornu i odredišnu adresa, ne znači da će putovati istom rutom. TCP programski sloj u odredišnom računalu čeka dok svi paketi ne stignu, nakon čega šalje potvrdu za pakete koji su pristigli. U slučaju nedostataka, zatražuje retransmisiju što se može vidjeti iz nedostajućih brojeva paketa. Proces slanja paketa se može prikazati dijagramom na slici 9.



Slika 9. Razmjena paketa između izvora i odredišta korištenjem TCP protokola

Izvor: [22]

Retransmisija ili ponovno slanje izaziva kašnjenje. Aplikacije koje su vremenske osjetljive kao što su VoIP (*Voice over IP*) i *video streaming* uglavnom se oslanjaju na transport korištenjem UDP protokola.

UDP je alternativni komunikacijski protokol TCP-a koji se prvenstveno koristi za osiguravanje niske razine kašnjenja i toleranciju gubitaka koje se događaju prilikom slanja podataka između aplikacija na mreži. Oba protokola šalju kratke pakete podataka koji se nazivaju datagram, [24].

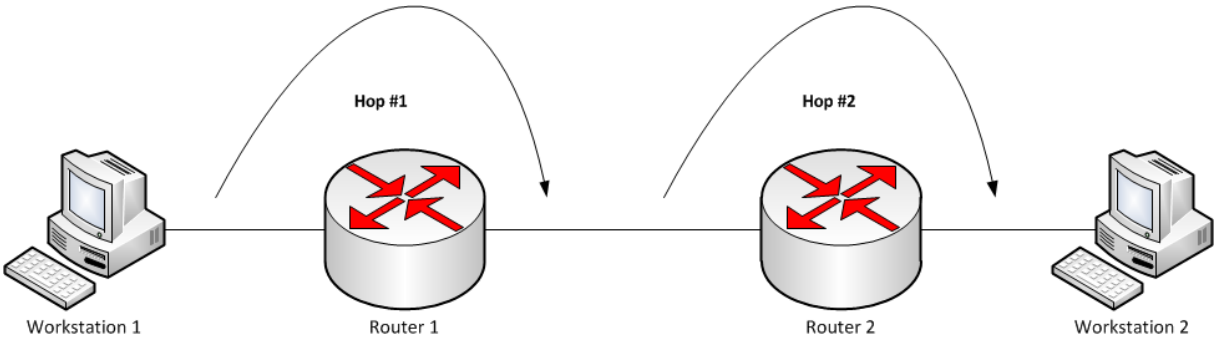
TCP je nastao kao dominantan protokol koji se koristi za veći dio internetske veze zahvaljujući uslugama za podjelu velikih skupova podataka na pojedinačne pakete, provjeravanjem i ponovnim slanjem paketa kao i ponovno sastavljanje paketa u ispravnu sekvencu. Nasuprot tome, UDP šalje samo pakete što znači da ima puno manju propusnost i kašnjenje. S obzirom na to, UDP predstavlja idealan protokol za mrežne aplikacije kojima je percipirano kašnjenje kritično kao što su umreženo igranje igara, glasovne i video komunikacije. Gubitak podataka je prihvatljivo, ali i dalje može utjecati na kvalitetu sadržaja, [24].

2.4.5. Protokoli mrežnog sloja

Internet protokol označava skup pravila koja reguliraju kako se paketi prenose putem mreže tako da postoji jedna vrsta standardizacije. IP protokol opisuje način na koji uređaji preko Interneta ili bilo koje IP mreže usmjeravaju svoje pakete na temelju njihovih IP adresa, [25].

Uz adresiranje, usmjeravanje (*routing*) je jedna od temeljnih funkcija IP protokola. Usmjeravanje je prosljeđivanje IP paketa od izvora do odredišta putem mreže na temelju njihovih IP adresa. IP adresa je jedinstvena adresa koja identificira uređaj (računalo, prijenosno računalo, poslužitelj, usmjerivač, mobilni uređaj i sl.) na mreži što služi za usmjeravanje i prosljeđivanje paketa, [25].

Kada se šalju ili primaju podaci, poruka se dijeli na manje dijelove zvane pakete. Svaki od tih paketa sadrži internetsku adresu pošiljatelja i adresu primatelja. Bilo koji paket se prvo šalje do usmjerivača (*router*) koji je povezan s nekoliko drugih usmjerivača. Nakon toga, usmjerivač učitava odredišnu adresu i koristi svoju tablicu za prosljeđivanje kako bi utvrdio sljedeći skok za odredište paketa te šalje do susjednog usmjerivača. Taj usmjerivač također ponavlja postupak i šalje paket dalje sve dok paket ne stigne do usmjerivača u čijem se susjednom čvoru nalazi odredište paketa, slika 10.



Slika 10. Usmjeravanje paketa od izvora do odredišta putem mreže na temelju IP adrese, [26]

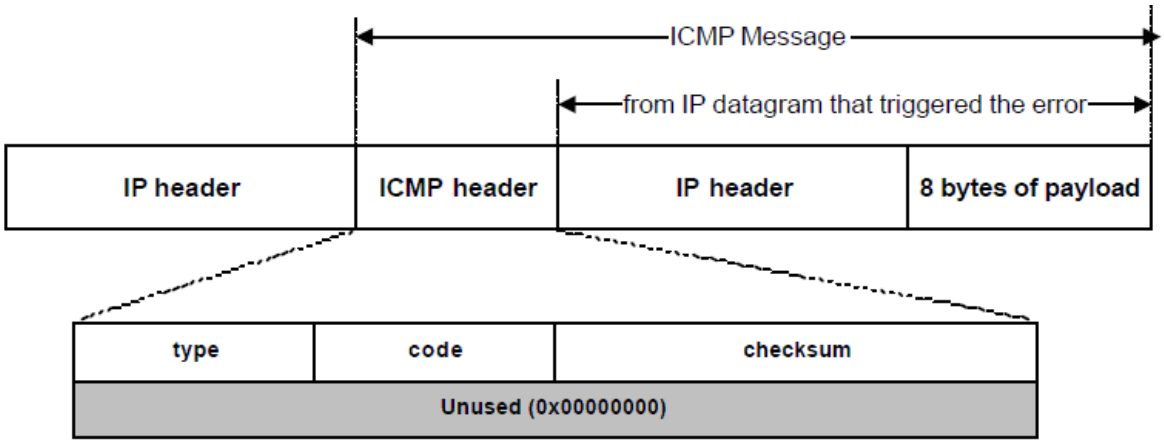
Budući da je poruka podijeljena na više paketa, svaki paket može biti poslan drugom rutom putem mreže. Isto tako paketi mogu stići na odredište drugim redoslijedom od slijeda slanja. Stizanje paketa u pravilnom redoslijedu je odgovornost TCP protokola.

Sljedeći protokol se naziva ARP koji služi za mapiranje IP adrese na fizičku adresu uređaja koji se prepoznaje u lokalnoj mreži. Adresa fizičkog uređaja je poznata kao MAC adresa. Tablica, koja se naziva *ARP cache*, koristi se za održavanje korelacije između svake MAC adrese i odgovarajuće IP adrese, [27].

Kada nadolazeći paket, namijenjen računalu unutar određene lokalne mreže, stigne na pristupnik (*gateway*), pristupnik traži od ARP programa da pronađe MAC adresu koja odgovara IP adresi. ARP program traži u tablici odgovarajuću adresu i osigurava ju tako da paket može biti konvertiran u odgovarajuću duljinu i format te paket šalje na računalo, [27].

ICMP je protokol koji je zadužen za izvještavanje o pogreškama. Stvara i šalje poruke izvornoj IP adresi, što ukazuje na to da pristupnik za Internet ne može postići isporuku paketa. Svaki uređaj IP mreže ima sposobnost slanja, primanja ili obrade ICMP poruka. Iako se ICMP ne upotrebljava redovito u aplikacijama krajnjih korisnika, koriste ga administratori mreža za rješavanje internetskih veza u dijagnostičkim programima, [28].

Jedan od glavnih protokola, ICMP koriste usmjerivači, posredni uređaji i drugi uređaji za razmjenu informacija o pogreškama ili ažuriranju. ICMP poruke se prenose kao datagrami i sastoje se od IP zaglavlja koja obuhvaća ICMP podatke. Također sadrže cijelo IP zaglavlje iz izvorne poruke tako da krajnji sustav zna koji paket nedostaje, [28].



Slika 11. ICMP zaglavlje, [29]

Svrha ICMP zaglavlja je povratna informacija o problemima koji su nastupili za vrijeme komunikacije. Slika 11 prikazuje ICMP zaglavlje koji se pojavljuje nakon zaglavlja IP paketa, a sastoji se od:

- polje vrsta (*type*) – ICMP vrsta poruke, 8 bita,
- polje kod (*code*)– ICMP podvrsta poruke, 8 bita,
- kontrolni broj (*checksum*) – pomaže u detekciji pogrešaka uvedenih tijekom transmisije, 16 bita.

Kontrolne poruke prepoznate su po vrijednosti u polju vrste ICMP poruke i polju koda koji daje dodatne informacije o vrsti poruke. Sljedeća tri polja su ICMP podaci i izvorno IP zaglavlje kako bi se utvrdilo koji paketi nedostaju.

Posljednji protokol koji je spomenut je komunikacijski protokol IGMP, a koriste ga usmjerivači na IP mreži pri prijavljivanju članstva u *multicast* grupu, [29].

2.4.6. Protokoli sloja podatkovne veze

Ranije spomenuti protokol PPP se nalazi na sloju podatkovne veze. To je protokol za prijenos IP prometa preko mreže između dvije točke po čemu je i dobio naziv *Point-to-Point*. Sastoji se od tri osnovne komponente, [31]:

- *Link Control Protocol* (LCP) – uspostavlja radne veze između dvije točke.
- *Authentication protocol* – omogućuje sigurne veze između dvije točke.
- *Network Control Protocol* (NCP) – inicijalizira PPP protokol za obradu više protokola mrežnog sloja kao što su *Internet Protocol version 4* (IPv4), *Internet Protocol version 6* (IPv6) i *Connectionless Network Protocol* (CLNP).

Frame Relay je dizajniran za povezivanje lokalnih mreža i prijenosa podataka preko širokopojasne mreže. Dijeli istu temeljnu tehnologiju kao *X.25* i postigla je neke popularnosti u SAD-u kao temeljna infrastruktura za usluge integrirane digitalne mreže

(*Integrated Services Digital Network* – ISDN) koje se prodaju poslovnim korisnicima, [32].

Podržava multipleksiranje prometa s više veza preko zajedničke fizičke veze pomoću posebnih hardverskih komponenti uključujući usmjerivače, mostove i sklopke koji pakiraju podatke u pojedine *Frame Relay* poruke. Postoje dvije vrste veza, [32]:

- *Permanent Virtual Circuits* (PVC) – za trajne veze koje se namjeravaju održavati dulje vrijeme čak i ako se aktivno ne prenose podaci.
- *Switched Virtual Circuits* (SVC) – za privremene veze koje traju samo tijekom trajanja jedne sesije.

High-level Data Link Control (HDLC) je skup protokola ili pravila za prijenos podataka između mrežnih točaka (čvorova). U HDLC-u se podaci organiziraju u jedinicu koja se naziva okvir (*frame*) i šalju se preko mreže na odredište koje potvrđuje uspješan dolazak. HDLC također upravlja protokom gdje se šalju podaci. Jedan je od najčešće korištenih protokola u sloju podatkovne veze, [33].

2.4.7. Tehnologije fizičkog sloja

Ethernet je danas najčešće korištena lokalna mreža odnosno mreža računala koja pokriva mali prostor poput prostorije, ureda, zgrade ili kampusa. To je mrežni protokol koji kontrolira prijenos podataka preko lokalne mreže i tehnički se naziva IEEE 802.3 protokol. Protokol je evoluirao i poboljšavao se tijekom vremena te omogućuje prijenos podataka velikim brzinama. Većina stolnih i prijenosnih računala dolaze s integriranom *Ethernet* karticom tako da je spremna za spajanje u lokalnu mrežu.

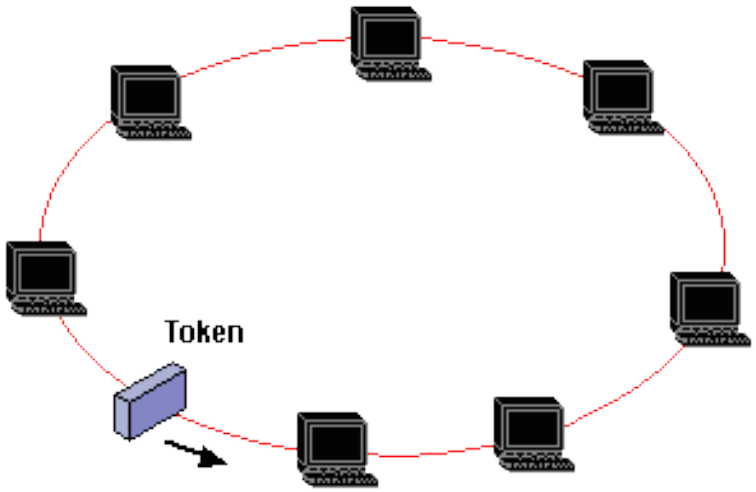
Universal Serial Bus (USB) je hardverski uređaj koji se koristi za komunikaciju računala s vanjskim uređajima. Ciljevi ove tehnologije su rasterećivanje glavne sabirnice računala, olakšavanje umetanja i odvajanja vanjskog uređaja bez potrebe za ponovnim pokretanjem računala.

Bluetooth je bežična tehnologija kratkog dometa koja omogućuje bežičnu podatkovnu komunikaciju između digitalnih uređaja kao što su računalo i digitalni fotoaparat. Radi na udaljenosti od otprilike 10 metara. Najčešće se spajaju dva uređaja, ali se neki uređaji mogu istodobno povezati s više uređaja.

Budući da *Bluetooth* upotrebljava frekvenciju od 2,4 GHz, jednako kao i neki Wi-Fi uređaji, Wi-Fi uređaji koji se upotrebljavaju u blizini jedinice mogu izazvati smetnje kao što su šum, nevaljala veza ili pogoršanje komunikacijske brzine. Mikrovalovi koje emitira *Bluetooth* uređaj mogu ometati rad elektroničkih medicinskih uređaja zbog čega ih je potrebno isključiti na takvim mjestima, [34].

Token Ring je lokalna mreža u kojoj su sva računala povezana u topologiju prstena ili zvijezde i prolaze jedan ili više *token*-a od uređaja do uređaja, slika 12. Samo

uređaj koji ima *token* može slati podatke, a *tokeni* se oslobađaju kada se potvrdi primitak podataka. Na ovaj način se sprječava gubitak podatkovnih paketa.



Slika 12. Token Ring tehnologija u obliku prstenaste topologije, [60]

Nekada je ova vrsta tehnologije bila široko korištena, ali ju je *Ethernet* gotovo u potpunosti zamijenio zahvaljujući nižim cijenama.

3. Opis usluga i njihovih karakteristika

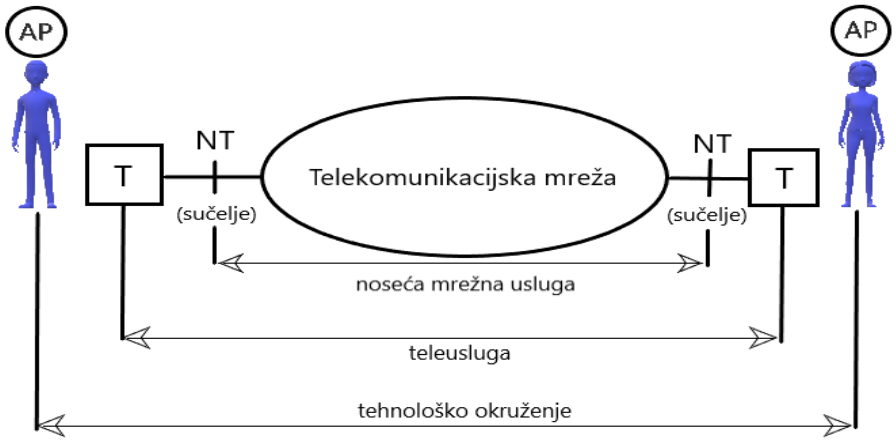
U današnjici postoji veliki broj usluga koji se nude korisnicima. Kako bi se olakšala njihova podjela uvodi se noviji pristup klasifikaciji telekomunikacijskih usluga u višeuslužnim mrežama sa stajališta telekom operatora i to na, [36]:

- noseće ili nosive mrežne usluge (*bearer service*),
- teleusluge,
- razne dodatne usluge.

Telekomunikacijska usluga je specificirani skup funkcionalnosti ili mogućnosti prijenosa i procesiranja informacija koje su dostupne korisnicima na mrežnim završecima. Nosive mrežne usluge su telekomunikacijske usluge koje se koriste za prijenos podataka i kontrolnih informacija između dva uređaja u mreži. Mogu varirati od prijenosa poruka malim brzinama do prijenosa podataka velikim brzinama. Klasifikacija nosivih mrežnih usluga se izvodi prema, [36]:

- Značajkama prijenosa informacija – uključuje brzinu prijenosa, smjer prijenosa, način (mod) prijenosa podataka i druge fizičke karakteristike.
- Metodama pristupa usluzi – određuje dijelove upravljačkog ili kontrolnog sustava koji bi mogli biti obuhvaćeni nosivom uslugom.
- Zahtjevima za međusobni rad s drugim mrežama – neke usluge moraju proći kroz različite tipove mreža tako da podaci i kontrolne informacije moraju biti usklađeni ovisno o tipu mreže.
- Ostali opći atributi – primjerice minimalna razina kvalitete za uslugu.

Teleusluga je kompletna usluga od kraja do kraja i uključuje funkcionalnosti krajnjih terminalnih uređaja te se temelji na uslugama noseće mreže. Na slici 13 je vidljiv prikaz takve vrste usluge u kojoj AP (*Access Point*) označava pristupnu točku, a T (*terminal*) označava terminalni uređaj.



Slika 13. Usporedba noseće mrežne usluge i teleusluge

Izvor: [36]

Teleusluge se uglavnom dijele na osnovne usluge, dodatne usluge i usluge dodatne vrijednosti (*Value Added Service* – VAS). Dodatne usluge moraju biti realizirane distribuirano (u pristupnoj centrali) i centralizirano u određenim čvorištima za čitavu mrežu. Primjeri dodatnih usluga su govorna pošta, poziv na čekanje, zabrana svih dolaznih/odlaznih poziva, preusmjeravanje poziva, zabrana prikaza broja itd., [36].

Usluge dodatne vrijednosti su usko vezane uz osnovne teleusluge i predstavljaju njihovo proširenje te se naplaćuju po posebnoj tarifi. Za razliku od dodatnih usluga, VAS usluge su više vezane uz sadržaj korisničke informacije i primjenjuju se u raznim djelatnostima, [36]:

- TV kuće – glasovanja, nagradne igre,
- banke – informacije o stanju računa,
- kladionice – informacije o rezultatima,
- trgovački lanci – obavijesti o akcijama, promocija usluga, ankete,
- uslužne djelatnosti i sl.

Teleusluge se dodatno dijele prema vrsti sadržaja koji se prenosi, a to su podaci, slike, tekst, govor, zvuk, video i multimedija. Prema načinu postupka s informacijama se dijeli na interaktivne, prijenos poruka, pretraživanje i distribuciju.

Interaktivne usluge omogućuju dvosmjernu komunikaciju pri čemu jedan ili drugi sudionik sam odlučuje kad će uspostaviti ili prekinuti poziv. Tipični primjeri su klasična telefonija, računalna komunikacija i videokonferencija. Usluge prijenosa poruka predstavljaju odgovarajuće oblike informacija koji se pohranjuju u odgovarajuće memorijske kapacitete kako bi se poslije mogli očitati, preslušati ili pogledati. Primjeri usluga prijenosa poruka su SMS (*Short Message Service*), MMS (*Multimedia Messaging Service*), e-mail itd.

Usluge pretraživanja pohranjenih informacija opisuju različite oblike informacija koji mogu biti pohranjeni u odgovarajućim datotekama, bazama podataka, na *web* stranicama i sl. Distributivne usluge predstavljaju jednosmjernu komunikaciju koja se ostvaruje prema većem broju primatelja (distribucija radio i TV programa) ili prema pojedinačnom korisniku (distribucija telefaks poruka). Kod usluga klasične distribucije radio i TV programa primatelj ne može birati vrijeme i sadržaj informacije. Novije usluge koje to omogućuju imaju obilježja interaktivne usluge, [37].

Internet je javno dostupna globalna mreža koja povezuje računala i računalne mreže korištenjem internetskog protokola. Sastoji se od kućnih, akademskih, poslovnih i vladinih mreža koje međusobno razmjenjuju informacije i usluge. U početku se Internet smatrao podatkovnom mrežom zato što je bio osmišljen kao mreža za prijenos podatkovnog prometa. Usluge nisu bile osjetljive na kašnjenja i varijacije kašnjenja prilikom prijenosa te potrebna propusnost nije toliko ovisila o količini podataka koju je generirao izvor.

U današnjici su usluge prilagođene korisniku i stalno raste ponuda tih usluga ili aplikacija. Najčešće se koriste podatkovne, govorne i video usluge zbog čega se promet koji se odvija u mrežama i dijeli na te tri vrste usluga unutar višeuslužnih mreža.

3.1. Podatkovne usluge

Internetske usluge predstavljaju podatkovne usluge kao što su elektronička pošta, glasovna komunikacija, prijenos podataka, pretraživanje informacija (*World Wide Web* – WWW), internetsko bankarstvo itd.

Razumijevanje ponašanja prometa u višeuslužnoj mreži je kompleksan zadatak zbog čega je neophodno uključiti ponašanje aplikacija. Postoji nekoliko mjera koje obuhvaćaju ponašanje aplikacija, a kao najvažnije i najčešće se koriste, [36]:

- vrijeme između konekcija,
- trajanje konekcije i
- međudolazno vrijeme između paketa.

Što se tiče podatkovnih usluga, one imaju visoki stupanj tolerancije na kašnjenje i varijacije kašnjenja te kolebanje kašnjenja. Podaci mogu dolaziti u mrežu generirani od korisnika koji imaju različite pristupne brzine, što utječe na mjere trajanja konekcije i međudolazna vremena između paketa, [36].

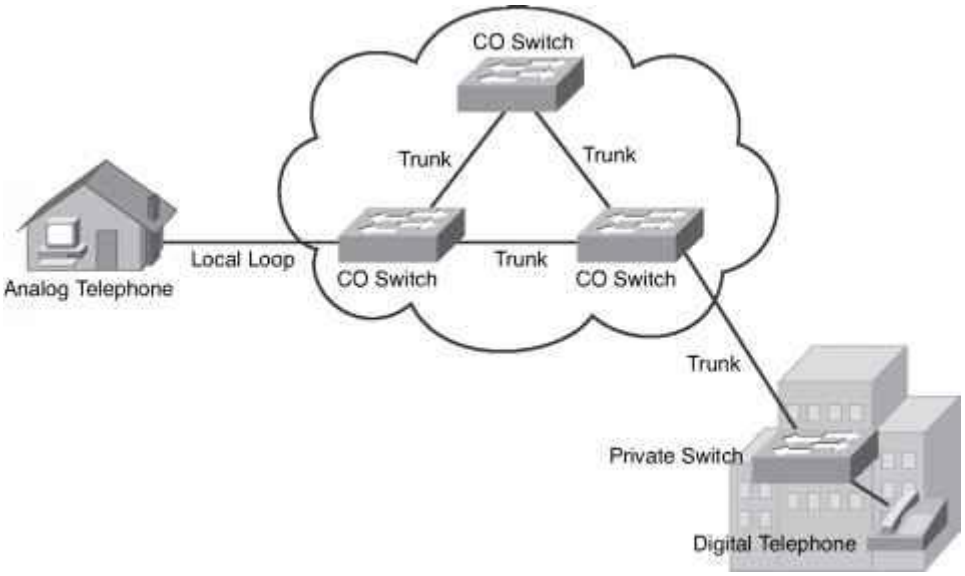
3.2. Govorne usluge

Javna telefonska mreža je svjetska zbirka međusobno povezanih govornih telefonskih mreža (komercijalnih i državnih). Naziva se još i Stara telefonska služba (*Plain Old Telephone Service* – POTS) koja se razvija još od 1876. godine zbog čega predstavlja prvu govornu uslugu i generalno prvu komunikacijsku uslugu. PSTN je gotovo u potpunosti digitalan i uključuje mobilne i druge mreže kao i fiksne telefone, [38].

Kada je telefonski sustav izvorno stvoren, pojedini su telefoni bili spojeni zajedno kako bi se omogućila komunikacija između dvije točke. Tada je bilo potrebno više telefonskih uređaja kako bi se povezali s više drugih telefona. Današnji PSTN izgrađen je od nekoliko elemenata, kao što je prikazano na slici 14:

- Analogni telefon (engl. *Analog Telephone*) – može se izravno povezati s PSTN-om (najčešći uređaj u mreži) i pretvara zvuk u električne signale.
- Lokalna petlja (engl. *Local Loop*) – veza između prostora kupca i davatelja telekomunikacijskih usluga.

- Prekidač središnjeg ureda (*Central Office Switch – CO*) – pruža usluge uređajima na lokalnoj petlji (uključuje signalizaciju, usmjeravanje poziva, postavke i uklanjanje pogrešaka).
- *Trunk* – pruža vezu između prekidača.
- Privatni prekidač (*Private Switch*) – omogućuje tvrtki da posluje unutar svoje tvrtke. To osigurava uštedu zato što svaki telefon u tvrtki ne zahtijeva izravnu vezu s prekidačem središnjeg ureda.
- Digitalni telefon (*Digital Telephone*) – obično se poveže s PBX[8] (*Private Branch Exchange*) sustavom. Pretvara zvuk u binarni oblik što omogućuje učinkovitiju komunikaciju od analognog prijenosa.



Slika 14. Komponente PSTN-a, [38]

Zbog razvoja PSTN-a i rasta potrebne kvalitete, u današnjici govorne usluge zahtijevaju konstantnu količinu kapaciteta linka te imaju malu toleranciju na kašnjenje i varijacije kašnjenja.

Razvijeniji način govorne usluge koji se koristi se naziva VoIP. Ova tehnologija ima puno prednosti u odnosu na tradicionalni telefonski sustav. To je alternativni način ostvarivanja telefonskih poziva koji mogu biti financijski povoljniji što je jedan od glavnih razloga njegovog masovnog korištenja. Jedna od usluga što je učinilo VoIP tehnologiju tako popularnom je *Skype* koji omogućuje korisnicima dijeljenje trenutačnih i glasovnih poruka te videopozive u cijelom svijetu. Time se prelazi na posljednje usluge koje se u današnjici masovno koriste, a to su video usluge.

[8] PBX – privatna telefonska mreža koja se koristi unutar tvrtke ili organizacije.

3.3. Video usluge

Sadašnji i nadolazeći videoizvori bitno utječu na dizajniranje i planiranje mreže koja nije originalno razvijena za podržavanje videoaplikacija. S točke gledišta teleprometnog inženjerstva nužno je razlikovati nekoliko vrsta video usluga, [36]:

- video na zahtjev (*Video on Demant* – VoD),
- videotelefonija i videokonferencija,
- prijenos videa strujanjem.

Video na zahtjev je sustav isporuke informacija od točke do točke ili od jedne točke prema više točaka. Zahtijeva kapacitet za dvosmjerni prijenos s obzirom na to da korisnicima mora biti omogućen odabir željenog sadržaja, [36]. Danas se VoD nudi brojnim pružateljima usluga i koristi u obrazovnim ustanovama što može poboljšati prezentacije u videokonferencijskim okruženjima.

Videotelefonija omogućuje dvosmjernu komunikaciju koja se danas vrlo često koristi. Istraživanja pokazuju kako trajanje sesije jednog videopoziva traje dulje od običnog telefonskog razgovora. Trajanje videokonferencije je uobičajeno dulje nego standardnog videopoziva jer je videokonferencija najčešće povezana sa sastancima koji obično traju sat vremena ili duže, [36].

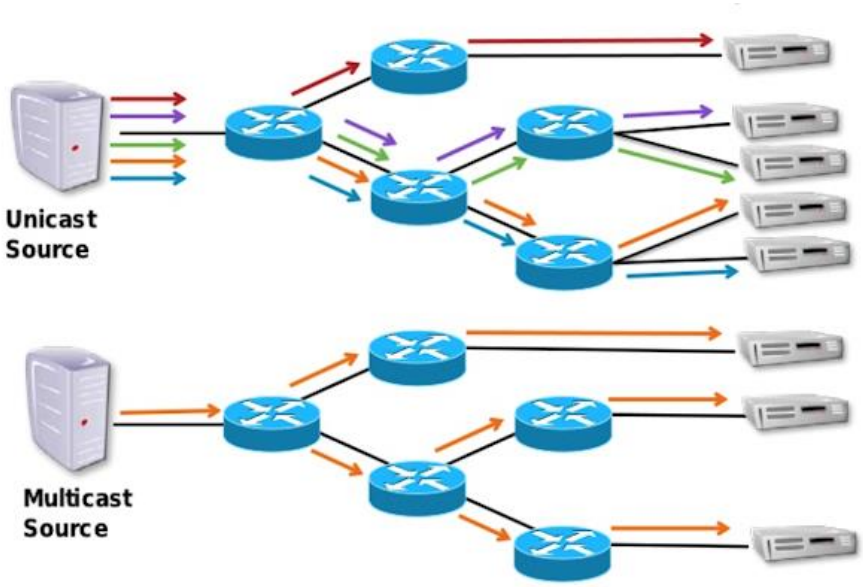
Prijenos videa strujanjem obuhvaća različite značajke, a to su vrsta i brzina prijenosa te broj točaka koje zahtijevaju prijenos. Što se tiče vrste prijenosa, razlikuje se video strujanje u stvarnom vremenu i one koje to nisu (*real time* i *non-real time*). U slučaju da se radi o stvarnovremenskom prijenosu, video se snima, a zatim komprimira i odmah šalje na prijenos. Za razliku od toga video strujanje koje ne zahtijeva prijenos u stvarnom vremenu, snimljeni sadržaj se komprimira i sprema na poslužitelja videa. Kada korisnik zahtijeva takav sadržaj, on se prije slanja konvertira u IP pakete, [36].

Brzina prijenosa se dijeli na konstantnu brzinu prijenosa (*Constant Bit Rate* – CBR) i varijabilnu brzinu prijenosa (*Variabile Bit Rate* – VBR). Jednostavni prijenos videa i nekomprimirani video mogu biti konstantne brzine prijenosa. Budući da se komprimiranjem postiže prenošenje samo onih uzoraka slike koji se mijenjaju, većina videokomprimiranja proizvode promet koji zahtijeva varijabilnu brzinu prijenosa. Veličina zahtijevanog kapaciteta u pojedinom trenutku će ovisiti o sadržaju koji korisnici gledaju, što predstavlja izazov u dizajniranju zahtijevanog kapaciteta kada više korisnika istovremeno gleda isti sadržaj, [36].

S obzirom na prijenos videa strujanjem prema određenom broju točaka, razlikuje se prijenos prema jednoj točki (*unicast*) i prijenos prema više točaka (*multicast*). Primjeri usluga su emitiranje vijesti, događaja, financijskih informacija i podataka u stvarnom vremenu. Ove multimedijske aplikacije su bazirane na stvarnom vremenu zbog čega su zahtjevne i zbog čega dolazi do eskalacije u podatkovnom prometu. Jedno moguće rješenje ovog problema je višesmjerni prijenos podataka, tj. *multicast*, [40].

Multicast smanjuje eskalaciju podatkovnog prometa jer zahtijeva prijenos jedinstvenog paketa od strane izvora i replicira ga samo ako je to potrebno. Za razliku od toga, jednosmjerni prijenos podataka, tj. *unicast* predstavlja metodu prijenosa podataka od jednog izvora do samo jednog odredišta što se može vidjeti na slici 15. Idealna je za aplikacije na zahtjev (*on-demand application*), ali je neučinkovita kada je informacije potrebno dostaviti na veći broj odredišnih računala. Prema [40], tri glavne prednosti *multicast* modela su:

- poboljšana učinkovitost putem kontrole mrežnog prometa i smanjenja opterećenja poslužitelja,
- optimizirana izvedba uklanjanjem prometne redudancije i
- mogućnost distribuiranja aplikacije prema više točaka.



Slika 15. Usporedba prijenosa videa strujanjem prema jednoj ili više točaka, [39]

Vezano uz prijenos videa strujanjem prema više točaka, potrebno je napomenuti važnu značajku da se paketi dupliciraju u mreži samo onda kada se moraju prenositi odvojenim putovima. Isto tako pridruživanje i napuštanje korisnika jednoj *multicast* sesiji ne uzrokuje promjenu u veličini prometnog toka koji generira jedan poslužitelj prijenosa videa strujanjem, [36].

4. Kvaliteta usluga

Međunarodna telekomunikacijska unija (*International Telecommunication Union* – ITU) je 1994. godine u području telefonije definirala kvalitetu usluge (*Quality of Service* – QoS). U današnjici se definira kao sposobnost pružanja usluga različite razine raznim Internet aplikacijama u skladu sa njihovim zahtjevima, [19].

Kvaliteta usluge predstavlja opis ili mjerenje cjelokupne izvedbe usluge poput telefonske ili računalne mreže, a osobito performanse koju vide korisnici mreže. Za kvantitativno mjerenje kvalitete usluge često se razmatraju nekoliko povezanih aspekata mrežne usluge kao što su, [19]:

- raspoloživost usluge,
- vjerojatnost greške,
- propusnost,
- kašnjenje,
- vjerojatnost gubitka paketa,
- vrijeme uspostave veze,
- vrijeme detekcije i korekcije greške itd.

U području računalnog umrežavanja i ostalih telekomunikacijskih mreža, kvaliteta usluge ima mogućnost pružanja različitih prioriteta različitim aplikacijama, korisnicima ili podatkovnim tokovima te osigurava određenu razinu izvedbe za tok podataka. Kvaliteta usluge je važna za multimedijske aplikacije *streaming*-a u stvarnom vremenu kao što su primjerice glasovni IP, *online* igre i IPTV zato što često zahtijevaju fiksnu brzinu prijenosa i osjetljive su na prekide. S obzirom na raznovrsnost telekomunikacijskih usluga i aplikacija koje ih koriste, podrška različitih razina QoS-a je preduvjet za primjenu IP tehnologije u višeuslužnim telekomunikacijskim mrežama, [19].

Kako bi se korisnicima osigurala određena razina kvalitete usluge, potpisuje se ugovor o razini usluge (*Service Level Agreement* – SLA). Ugovor o razini usluge je ugovor između pružatelja usluga i krajnjeg korisnika koji definira očekivanu razinu usluge od davatelja usluga, [41]. Njihova svrha je konkretno definirati što će klijent primiti, a ne kako se usluga pruža ili isporučuje.

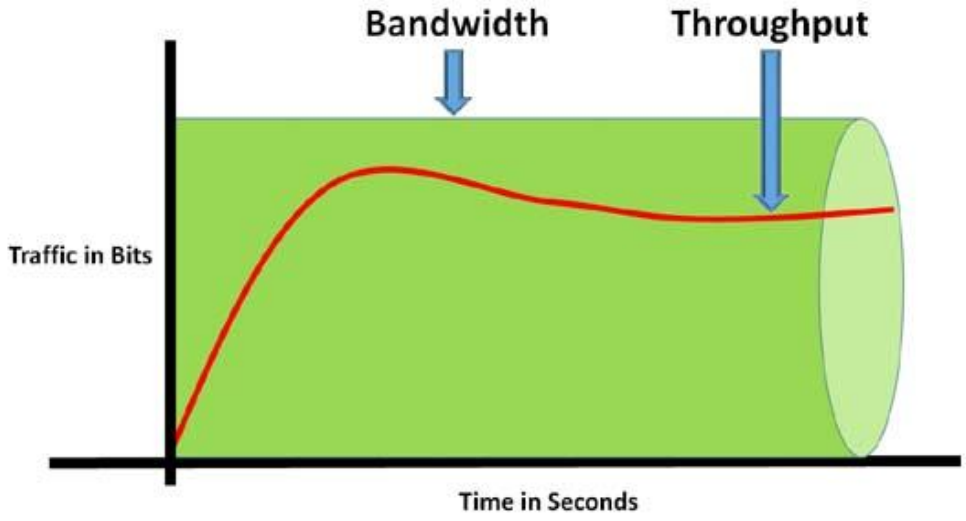
4.1. Parametri QoS-a

U telekomunikacijskim mrežama na kvalitetu usluge utječu razni čimbenici. Mnogo se stvari može dogoditi podacima dok putuju od izvora do odredišta, što može rezultirati problemima koji će u ovom poglavlju biti opisani. S obzirom na veliki broj parametara kvalitete usluga, bit će opisani QoS parametri koji se najčešće koriste.

Pojasna širina (*Bandwidth*) i propusnost (*Throughput*) su dva osnovna pojma umrežavanja u računalnoj mreži. Pojasna širina se definira kao maksimalan broj bita koji mogu protjecati kroz mrežu u određenom vremenskom razdoblju. Temeljna jedinica propusnosti mreže je bit u sekundi (b/s), [44].

Primjerice, ako je pojasna širina 1 Mb/s, to znači da se u toj sekundi može prenijeti najviše 10^6 bita preko veze. Pojam pojasne širine se obično koristi u planu pretplate na širokopojasni Internet. Uobičajeno su viši troškovi ako se radi o većem planu pretplate na propusnost. Potrebno je razmotriti kako je 1 Mb/s zapravo širina pojasa od osobnog računala do davatelja internetskih usluga. S obzirom da prijenos podataka prolazi kroz veći broj mrežnih uređaja od izvora do odredišta, može doći do sporijeg preuzimanja datoteka.

U računalnoj mreži se propusnost može definirati kao stvarni broj bita koji protječe kroz mrežnu vezu u određenom vremenskom razdoblju. Odnos propusnosti i pojasne širine je prikazano slikom 16.



Slika 16. Odnos pojasne širine i propusnosti za određeni broj bita u određenom vremenu, [44]

Propusnost je uvijek manja ili jednaka pojasnoj širini, ali je nikada ne može nadmašiti. Na propusnost mogu utjecati razni čimbenici kao što je primjerice veliki broj korisnika koji istovremeno pristupaju istom poslužitelju.

Gubitak paketa je parametar koji opisuje neuspjeh prijenosa paketa do određenog odredišta. U slučaju gubitka paketa kod TCP/IP protokola, odredište će zatražiti od izvora da ponovno pošalje izgubljeni paket, što uzrokuje dodatno kašnjenje, jer će isti paket biti poslan dva ili više puta.



Slika 17. Primjer slike u slučaju gubitka paketa kod UDP protokola, [45]

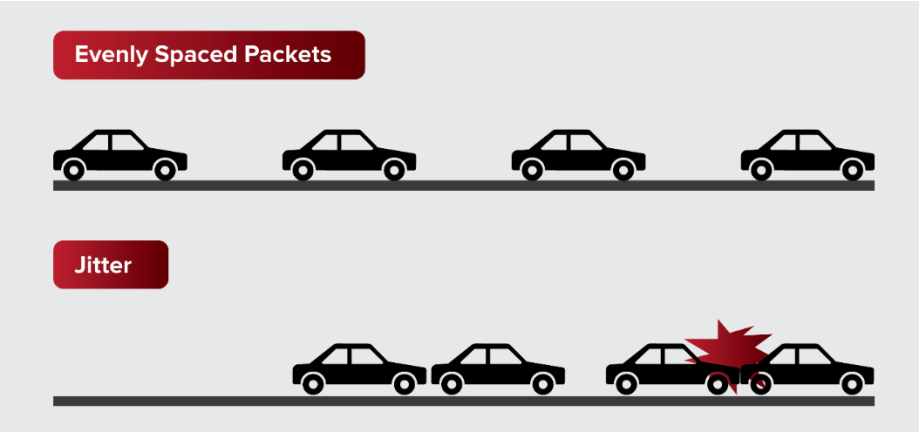
No, kod UDP protokola će se gubitak paketa zanemariti i uzrokovati nepravilan prikaz na odredištu kao što se može vidjeti na slici 17. Uzroci gubitka paketa uključuju neodgovarajuću jačinu signala na odredištu, prirodne ili ljudske smetnje, hardverske pogreške, preopterećeni mrežni čvorovi itd. Često se radi o više od jednog od takvih čimbenika, [45].

Što se tiče kašnjenja u mreži kao parametar QoS-a, to se može definirati kao vrijeme potrebno da zahtjev dođe od pošiljatelja do primatelja i vrijeme da primatelj obradi taj zahtjev. Očigledno je da željeno kašnjenja ostane što je moguće niže, ali može biti nekoliko stvari u pitanju čime se sprječava niska razina kašnjenja. Postoji nekoliko uzroka koji mogu utjecati na vrijeme kašnjenja, a uključuje sljedeće, [47]:

- kašnjenje zbog kodiranja i dekodiranja,
- kašnjenje zbog komprimiranja i dekomprimiranja,
- kašnjenje zbog paketizacije i depaketizacije,
- kašnjenje zbog prijenosa na linku,
- kašnjenje zbog propagacije[9] itd.

Jitter se može definirati kao varijacija u kašnjenju primljenih paketa koji se šalju u kontinuirano i ravnomjerno raspoređenom toku što se može prikazati slikom 18. To je uzrokovano mnogim čimbenicima kao što je, primjerice, promet koji je na izvoru manji nego na odredištu. Zagušenja mreže, konfiguracijske pogreške ili drugi problemi sa sustavom poput neprikladnog čekanja mogu uzrokovati *jitter*.

[9] Propagacija – širenje signala s jednog mjesta na drugo



Slika 18. Prikaz *jittera*, [46]

Paketi znači mogu doći na svoje odredište u različito vrijeme ili čak u različitom redoslijedu od namjeravanog. Neki paketi dolaze brže, a ostali paketi podataka stižu sporije. *Jitter* također može uzrokovati gubitak paketa.

4.2. Modeli pružanja QoS usluga u mreži

Postoje tri glavna modela za pružanje QoS usluga u mreži, a diferencirana su prema tome kako svaki od njih omogućuje aplikacijama slanje podataka i način na koji mreža upravlja isporukom podataka unutar određene razine usluge.

Model usluge najbolje namjere (*Best Effort*) je najjednostavniji model koji je originalno dizajniran za Internet i ne provodi niti jedan QoS mehanizam. Ovaj model ne dopušta rezervaciju resursa ili bilo koji drugi mehanizam povezan s traženjem nekog posebnog "tretmana" u mreži zbog čega ne pruža potpunu pouzdanost. Dovoljno je dobar za promet kao što je *e-mail*, prijenos datoteka i *web* promet s obzirom na vremenske zahtjeve.

S vremenom su se pojavile naprednije aplikacije koje su osjetljive na performanse mreže zbog čega u osnovi postoje dva mehanizma koji mogu biti upotrijebljena za osiguravanje dopuštenih ili ugovorenih vrijednosti parametara kvalitete usluge. Jedan se temelji na modelu integriranih usluga (*Integrated Services* – IntServ), a drugi na diferencirane usluge (*Differentiated Services* – DiffServ) modelu, [19].

Integrirane usluge predstavljaju proširenje Internet arhitekture i protokola kao odgovor na nedostatke usluge najbolje namjere. U *IntServ* arhitekturi moguće je osigurati tri vrste ili klase usluga s obzirom na razinu traženog QoS-a, [42]:

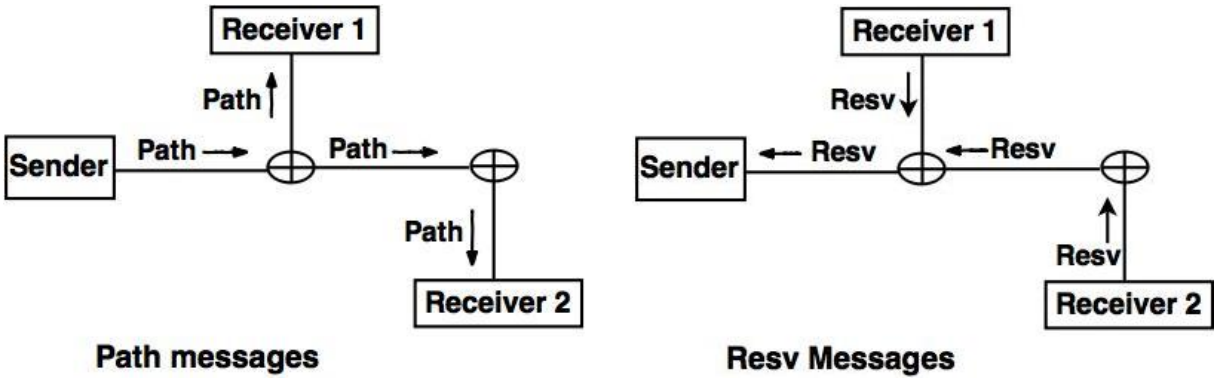
- *best effort* usluga,
- usluga kontroliranog opterećenja,
- garantirana usluga.

Kod usluga kontroliranog opterećenja tok podataka ima kvalitetu usluge kakvu bi imao pri neopterećenoj mreži ili pri malom opterećenju mrežnog elementa u *best effort* modelu. Pri tome se koristi kontrola prihvata i rezervacija kako bi se osigurala kvaliteta usluge čak i kada je mrežni element preopterećen, [42].

Kod garantirane usluge postoji određena granica kašnjenja pri čemu se uzima u obzir kašnjenje svih mrežnih elemenata na putu te propusnost u skladu sa zahtjevima. Kako bi se mogla pružiti tražena usluga, za rezerviranje kapaciteta se koristi protokol za rezervaciju resursa (*Resource Reservation Protocol* – RSVP), [42].

Dio koji upravlja rezervacijom resursa primjenom RSVP protokola upravlja usmjeravanjem, a koristi kontrolu politike i kontrolu prihvata. Kontrolu pristupa provode algoritmi odluke koje koriste usmjernici da bi odredili mogu li se za novi tok podataka pružiti određeni zahtjevi kvalitete usluge. Ulazna kontrola se radi na svakom čvoru te se radi lokalna odluka prihvaćanja ili odbijanja novog toka. Kontrola politike je provjera administrativnih ograničenja za korisničku aplikaciju kao npr. zabrana korištenja.

Ako bilo koja kontrola ne prođe, pošiljatelju se vraća poruka o grešci. U suprotnom se obavlja rezervacija resursa potrebnih za pružanje tražene kvalitete usluge, te se tokovima dodjeljuju rezervirani resursi.



Slika 19. Vrste poruka između pošiljatelja i primatelja u svrhu rezerviranja resursa za tok podataka, [43]

Na slici 19 su prikazane poruke koje se koriste u svrhu rezerviranja resursa. Pošiljatelj šalje RSVP *path* poruku na odredišnu adresu koja može biti pojedinačna ili višeodredišna. Svaki usmjeritelj koji podržava RSVP na putu od izvora do odredišta pamti da se nalazi na stazi i koji mu je prvi skok u smjeru pošiljatelja. Kako bi izvršio rezervaciju, svaki primatelj šalje zahtjev za rezervaciju *resv* porukom natrag prema pošiljatelju. Staza kojom putuje *resv* poruka je ona prethodna uspostavljena *path* porukama. Nakon uspješne rezervacije duž cijele staze s kraja na kraj, pošiljatelj može početi slati tok podataka, kojem je na temelju prethodne rezervacije osigurana tražena kvaliteta usluge.

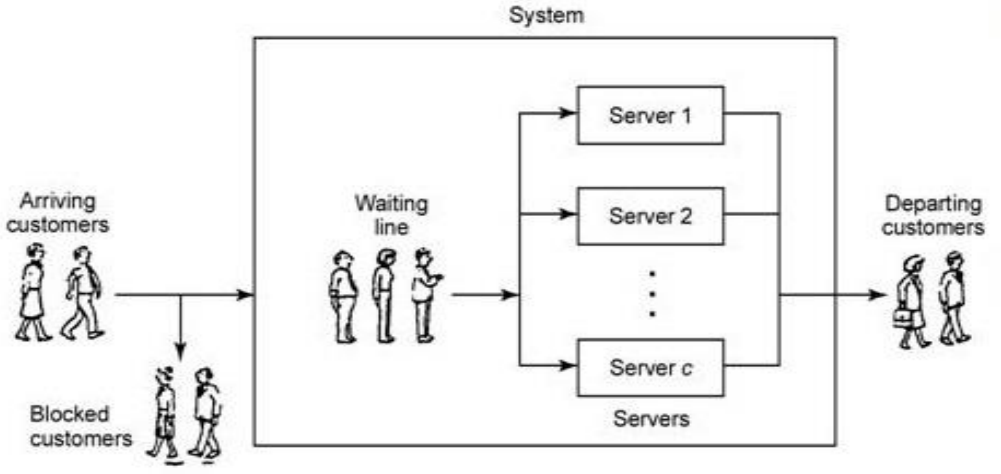
5. Primjena podvorbenih modela u analizi performansi

Teorija podvorbenih sustava je razvijena kako bi se dobili modeli za predviđanje ponašanja sustava podloženih slučajnoj potražnji. Podvorbeni sustav ili sustav posluživanje je sustav u koji pristižu određeni entiteti i traže uslugu. Može se opisati i kao sustav koji se sastoji od korisnika, repa, poslužitelja i skupa pravila prema kojima se obavlja posluživanje dolazećega korisnika, [49].

5.1. Opis pojedinih elemenata podvorbenih sustava

Svaki podvorbeni sustav čine korisnici, poslužitelj, rep, poslužiteljsko mjesto i pravila odvijanja procesa posluživanja, slika 20. U današnjici se gotovo u svakom području primjenjuje jedna vrsta podvorbenog sustava, a neka od tih područja su:

- telekomunikacijski sustavi,
- računalni sustavi,
- transport fizičkih dobara,
- industrijska proizvodnja,
- biološke znanosti.



Slika 20. Vizualni prikaz funkcija podvorbenog sustava, [51]

Korisnik je osoba ili stvar koja zahtijeva podvorbu i dolazi iz izvorišta. Izvorište može biti konačno ili beskonačno. Ako je broj korisnika u izvorištu toliki da na vjerojatnost dolaska na posluživanje ne utječe broj korisnika koji su došli prije u podvorbeni sustav i nalaze se u repu ili kod poslužitelja, izvorište se može smatrati beskonačno velikim. Inače se izvorište smatra konačno velikim kao npr. broj korisnika

na području jedne bazne stanice. Korisnici se razlikuju po tome kako dolaze pred podvorbeni sustav, kako se poslužuju i kakva su međudolazna vremena[10], [50].

Poslužiteljsko mjesto je dio podvorbenog sustava gdje se nalaze poslužitelji koji obavljaju podvorbu. Važno je utvrditi broj poslužitelja i način rada ili organizacju posluživanja. Prema [50], organizacija posluživanja može biti:

- jedan ili više poslužitelja,
- promjenjiv ili nepromjenjiv broj poslužitelja,
- paralelno ili serijski poredani poslužitelji,
- svi korisnici ne moraju imati istu razdiobu posluživanja,
- posluživanje korisnika pojedinačno ili u skupinama.

Proces posluživanja je vjerojatnosni zakon vremenskog redoslijeda posluživanja korisnika, a može imati razne oblike. Trajanje posluživanja definira se kao vremenski odsječak tijekom kojega korisnik boravi kod poslužitelja, [50].

Rep je skup korisnika koji čekaju na posluživanje tj. skup korisnika koji predstavljaju podvorbene zahtjeve, ali još nisu obavili posluživanje. Najvažnija značajka repa je podvorbena stega tj. način na koji korisnici ulaze u rep, kako se ponašaju u repu i kako izlaze iz njega, [50].

Postoji više vrsta sustava koji utječu na pravila ulaska u rep. Sustav s gubicima se dijeli na TSG (temeljni sustav s gubicima) u kojem ne postoji mogućnost čekanja u repu i OSG (opći sustav s gubicima) u kojem postoji mogućnost čekanja u repu, ali je rep ograničen. Zatim postoji sustav s čekanjem gdje je čekanje i veličina repa bez ograničenja što je uobičajeno za informacijski komunikacijski promet. Na kraju može doći i do blokiranja ili gubitka te odustajanja od ulaska u rep, [50].

Varijante pravila boravka u repu su odustajanje i čekanje. Korisnici mogu formirati jedan ili više repova ovisno o pravilu. Isto tako rep može biti ograničen s obzirom na broj korisnika (konačna čekaonica) ili ograničen s obzirom na trajanje čekanja.

Pravilo izlaska iz repa je pravilo koje govori na koji način korisnici izlaze iz repa i započinju posluživanje kod poslužitelja. Poredak izlaženja iz repa može biti, [50]:

- FCFS (*First Come First Served*),
- LCFS (*Last Come First Served*),
- SIRO (*Service in Random Order*),
- RR (*Round Robin*),
- SPT (*Shortest Processing Time*),
- PQ (*Priority Queuing*).

[10] Međudolazno vrijeme – vrijeme između dolazaka korisnika

5.2. Kendall-ova oznaka

Kendallova oznaka je skraćeni način opisivanja glavnih obilježja podvorbenog sustava, a predložio ga je David George Kendall 1953. godine. Bio je engleski statističar i matematičar poznat po svome radu o vjerojatnosti, analizi statističkih oblika i teoriji čekanja. Kendallova oznaka se sastoji od šest simbola, [50]:

$$A|B|C\left|K_q\right|K_i|P.S.$$

gdje pojedina slova označavaju:

A – razdioba međudolaznih vremena,

B – razdioba trajanja posluživanja,

C – broj poslužitelja,

K_q – kapacitet sustava (najveći dopušteni broj korisnika u sustavu),

K_i – kapacitet izvora,

P.S. – podvorbena stega.

Podvorbeni sustav je potrebno matematički opisati pomoću matematički prikazanih ulaznih veličina odnosno definirati matematički model sustava. Definiranjem ulaznog proces i procesa posluživanja uz definiranu podvorbenu stegu, matematički model podvorbenog sustava je posve definiran, [50].

Promet se definira kao količina podataka ili broj poruka koji se prenese kanalom tijekom određenog vremenskog intervala. Promet također uključuje povezanost između uspostave poziva i brzine kojom oni završavaju. Najvažnija mjerila izvedbe u podvorbenom sustavu su prometne veličine, slika 21, koje povezuju ulazne i izlazne veličine, a to su, [50]:

- Ponuđeni promet – jednak prosječnom broju korisnika ponuđenih podvorbenom sustavu tijekom razdoblja koje je jednako prosječnoj vrijednosti trajanja posluživanja jednog korisnika. Ponuđeni korisnici su oni koji dolaze pred podvorbeni sustav, a jedinica za mjerenje ponuđenog prometa u telekomunikacijskim sustavima je Erlang. Formula za izračunavanje ponuđenog prometa je, [50]:

$$a = \frac{\lambda}{\mu} = \lambda \cdot T_S = \frac{T_S}{T_a}\ [Erl] \qquad (1)$$

gdje je:

a – ponuđeni promet,

λ – intenzitet nailazaka paketa,

μ – intenzitet posluživanja,

T_s – prosječno trajanje posluživanja,

T_a – prosječno međudolazno vrijeme.

- Jakost prometa – ponuđeni promet po jednom poslužitelju. Formula za izračunavanje jakosti prometa je, [50]:

$$\rho = \frac{a}{c} = \frac{\lambda}{\mu \cdot c}\ [Erl] \tag{2}$$

gdje je:

ρ – jakost prometa

c – broj poslužitelja

Za jednoposlužiteljski sustav bez gubitaka vrijedi $\rho = a$.

- Obavljeni/ostvareni promet – dio ponuđenog koji se ne gubi na ulazu podvorbenog sustava, nego prolazi kroz njega. Ako sustav omogućuje stvaranje neograničenog repa, obavljeni promet jednak je ponuđenom. Formula za izračunavanje obavljenog prometa je, [50]:

$$a' = a[1 - B(a)][Erl] \tag{3}$$

gdje je:

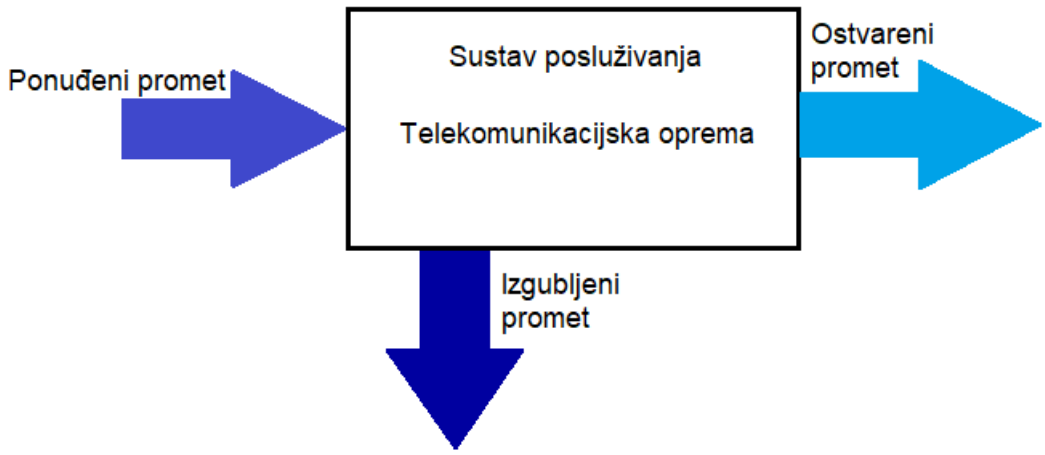
a' – obavljeni promet

$B(a)$ – vjerojatnost gubitka, tj. vjerojatnost da korisnik koji dolazi u sustav neće moći biti poslužen odmah. Ako sustav omogućuje stvaranje neograničenog repa, tj. ako korisnici ne napuštaju sustav prije nego što budu posluženi, obavljeni promet je jednak ponuđenom.

- Iskoristivost poslužitelja ρ' – obavljeni promet na jednoga poslužitelja u stacioniranom stanju sustava ili dio ukupnog vremena promatranja unutar kojega je poslužitelj zaposlen. Ako je riječ o sustavu kod kojega niti jedan korisnik ne može biti odbijen i ako svi poslužitelji imaju jednaku brzinu

posluživanja, iskoristivost poslužitelja i jakost prometa su jednake veličine. Za c paralelnih poslužitelja, iskoristivost poslužitelja se računa po formuli, [50]:

$$\rho' = \frac{a'}{c} \tag{4}$$



Slika 21. Vizualni prikaz ponuđenog, ostvarenog i izgubljenog prometa

Izvor: [61]

5.3. Mjerenje telekomunikacijskog prometa

Telekomunikacijski promet se definira kao količina podataka ili broj poruka koji se prenese kanalom tijekom određenog vremenskog intervala. Uključuje povezanost između upostave poziva i brzine kojom se oni izvršavaju. Danas postoje dvije osnovne mjerne jedinice za mjerenje prometa odnosno prometnog opterećenja:

- Erlang,
- 100 poziva u sekundi (*centum call seconds* – CCS).

Kao što je već spomenuto, *erlang* je jedinica za mjerenje telekomunikacijskog prometa čiji naziv dolazi od danskog znanstvenika A.K.Erlang. Jedan *erlang* odgovara prometu od 3600 sekundi nastalih poziva na istom poslužitelju ili kanalu, tj. jedan *erlang* je prometno opterećenje koje je dovoljno da bi držalo zauzetim jedan sat jedan kanal. Jedinica za promet koja se koristi u sjevernoj Americi za kvantifikaciju ukupnog prometa u mreži 1 CCS odgovara prometu od 100 (poziv) sekundi.

Mrežni dizajneri koriste mjernu jedinicu *erlang* kako bi lakše razumjeli obrasce prometa i provode prometnu analizu koja im omogućava da se odredi veličina pojasne

širine, odnosno brzina prijenosa koja je potrebna na linkovima za podatkovni, govorni i multimedijalni promet. Upotreba *erlang*-a i osnovnih koncepata oko njegove uporabe, omogućile su telekomunikacijskim inženjerima vrijedan alat. Osobito se koristi u područjima kao što su pozivni centri, telefonske centrale i linije koje povezuju različita područja.

Postoji mnogo različitih prometnih modela, ali je cilj naći onaj model koji najbolje odgovara stvarnom okruženju. Modeli koji se najčešće koriste su Erlangov B model, prošireni Erlangov B model i Erlangov C model.

Erlangov B model je najčešći model za opis prometnih karakteristika koji se koristi za utvrđivanje koliki je potreban kapacitet poslužitelja ako su poznate neke od ranije opisanih prometnih veličina. Ovaj model se temelji na raznim pretpostavkama, [53]:

- neograničen izvor prometa,
- uzorak sa slučajnim dolascima poziva,
- blokirani pozivi se odbijaju,
- vrijeme zadržavanja resursa eksponencijalno je distribuirano,
- disciplina posluživanja je prvi došao prvi poslužen (*First In First Out* – FIFO),
- potpuna dostupnost.

Telekomunikacijski promet varira tijekom dana i tjedna zbog čega je neophodno razumjeti telekomunikacijski promet u vršnim vremenima dana i biti u stanju odrediti prihvatljivu razinu potrebne usluge. U osnovi, prometni model Erlang B se koristi kada su blokirani pozivi ponovno rutirani i nikada se ne vraćaju na originalni link. Zatim se koristi kada pozivatelj radi samo jedan pokušaj ako je poziv blokiran, tada se poziv ponovno rutira. Koristi se za skupinu kanala gdje je prisutan prvi pokušaj uspostave poziva, gdje se ne mora uzimati u razmatranje intenzitet ponovnih pokušaja, jer su pozivi ponovno rutirani ili kada se očekuje vrlo malo blokiranje, [52].

Prošireni Erlangov B model je sličan osnovnom Erlangovom B modelu, ali se može koristiti za blokirane pozive koji su se ponovno pokušali povezati. Formula za Erlangov B model se može vidjeti u nastavku, [53]:

$$B(a,c) = \frac{\frac{a^c}{c!}}{\sum_{i=0}^{c} \frac{a^i}{i!}} \tag{5}$$

Erlangov C model pretpostavlja da su svi blokirani zahtjevi u redu čekanja u sustavu dok se ne mogu obraditi. Najčešće telefonski centri koriste ovaj model kako bi odredili koliko je potrebno osoblja ili pozivnih stanica, ovisno o broju zahtjeva po satu, prosječnom trajanju posluživanja zahtjeva i duljini vremena odnosno vjerojatnosti da

će prispjeli zahtjev čekati na posluživanje (π_m). Formula za Erlangov C model glasi, [54]:

$$\pi_m(a,c) = \frac{B(a,c)}{1 - \frac{a}{c}(1 - B(a,c))} \tag{6}$$

6. Značajke različitih metoda dodjele kapaciteta

Kod paketnog načina prijenosa podataka, u redu čekanja se nalaze paketi u memoriji usmjernika koji čekaju na posluživanje, odnosno usmjeravanje kako bi mogli nastaviti svoj put od izvora do odredišta. Kojim redom će paketi biti posluženi ovisi o disciplini posluživanja, tj. pravilu prema kojem se odabiru i poslužuju paketi.

U paketno komutiranoj mreži kao što je Internet je gotovo nemoguće predvidjeti koliko će korisnika, kada i u kojoj količini početi slati podatke pa su neki dijelovi mreže zagušeni. Postavljanjem memorije za prihvat paketa je moguće kompenzirati naglo povećanje mrežnog prometa i gomilanje paketa na vezama.

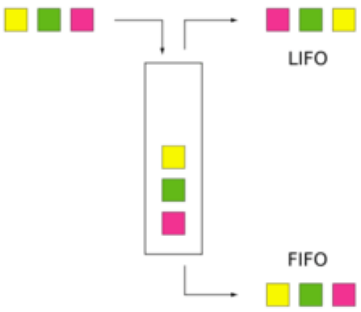
U telekomunikacijskoj mreži treba razlikovati tri vrste korisnika, [50]:

1. primarni korisnici – izvor prometa (sve vrste terminala),
2. sekundarni korisnici – količina posluživanja (poruke, paketi, riječi),
3. tercijarni korisnici – jedinice posluživanja (bit).

Kapacitet poslužitelja je brzina kojom poslužitelj obrađuje jedinice posluživanja (tercijarne korisnike), a naziva se još i kapacitet linka, [50]:

$$Kapacitet\ poslužitelja\ (K) = \frac{broj\ jedinica\ posluživanja}{jedinica\ vremena}\ [\frac{bit}{s}] \qquad (7)$$

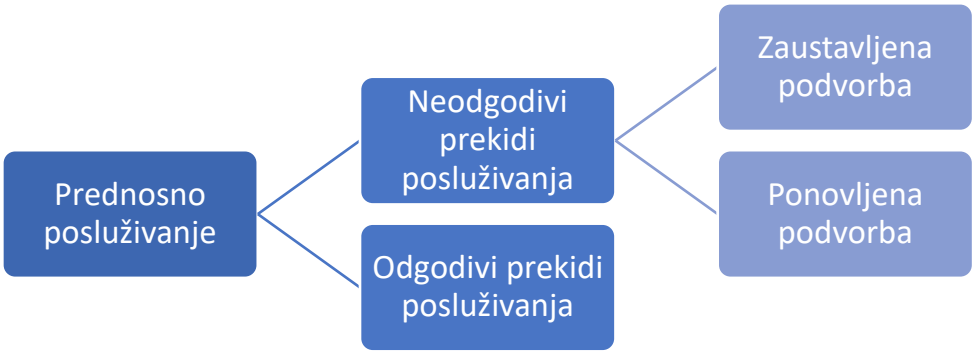
Najjednostavnija i najčešće korištena disciplina posluživanja je „prvi došao, prvi poslužen“ (*First Come First Served*, FCFS ili *First In First Out*, FIFO). Kao što naziv sustava posluživanja govori, radi na način da se paketi poslužuju onim redoslijedom kojim su pristigli. Vizualni prikaz FCFS načina posluživanja je moguće vidjeti na slici 21. U slučaju zagušenja, paketi se spremaju u međuspremnik kako ne bi došlo do odbacivanja, [55]. Postoji još mnogo sustava posluživanja koji su slični FCFS-u poput „zadnji došao, prvi poslužen“ (*Last Come First Served*, LCFS ili *Last In First Out*, LIFO) što je također vidljivo na slici 22.



Slika 22. Vizualni prikaz funkcioniranja FIFO i LIFO disciplina posluživanja, [56]

Sljedeća disciplina posluživanja se naziva „posluživanje nasumičnim odabirom“ (*Service In Random Order*, SIRO) gdje se paketi odabiru nasumično pa će tako svi paketi jednako vjerojatno biti odabrani. Stoga, vrijeme dolaska paketa nema nikakvog utjecaja na izbor.

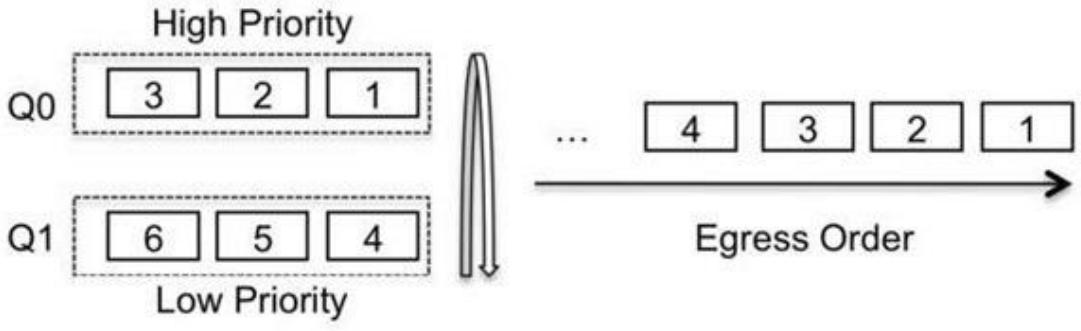
Prednosno posluživanje (*Priority Queuing*, PQ) je sustav posluživanja gdje se korisnici poslužuju na osnovi prioriteta, a vrste prednosnog posluživanja su prikazane na slici 23.



Slika 23. Vrste prednosnog posluživanja

Izvor: [49]

Kod prednosnog posluživanja svaki je korisnik označen različitim stupnjem prioriteta. U slučaju istovremenog dolaska korisnika različitih prioriteta, odabire se onaj s višim prioritetom, slika 24. Za vrijeme posluživanja određenog korisnika se u međuvremenu može pojaviti korisnik s višim prioritetom. Zbog toga dolazi do podjele prednosnog posluživanja i to na neodgodive i odgodive prekide posluživanja.



Slika 24. Jednostavan prikaz primjera prednosnog posluživanja, [58]

Kod prednosnog posluživanja s odgodivim prekidom se u slučaju pojave korisnika iz više prednosne razine ne prekida posluživanje korisnika iz niže prednosne razine. Kod posluživanja s neodgodivog prekidom se u slučaju pojave korisnika iz više

prednosne razine dopušta trenutni prekid posluživanja korisnika iz niže prednosne razine. Nastavak posluživanja se može odvijat na razne načine, [57]:

- Nastavljanjem od točke prekida – jedinica čije je posluživanje prekinuto zbog dolaska jedinice višeg prioriteta nastavlja se posluživati od točke prekida (*preemptive resume*).
- Posluživanje ispočetka s istom razdiobom posluživanja – jedinica kojoj je posluživanje prekinuto sa svojim ponovnim ulaskom u sustav zahtijeva istu količinu usluge koju je zahtijevala i na svom ranijem ulasku (*preemptive repeat-identical*).
- Nastavak posluživanja ili posluživanje s drugom razdiobom posluživanja – prekinuta jedinica na svom ponovnom ulasku u sustav zahtijeva slučajno vrijeme posluživanja neovisno o prošlim prekidima i potrošenom vremenu na posluživanje.

S obzirom na utjecaj prednosnog posluživanja na proces čekanja sva pravila izlaska iz repa mogu se podijeliti u dvije grupe, [57]:

- pravila koja ne utječu na posao (pravila s očuvanjem posla),
- pravila koja utječu na posao (pravila bez očuvanja posla).

„Pravila s očuvanjem posla“ zadovoljavaju tri zahtjeva:

- ako se u repu nalaze korisnici, u poslužiteljskom mjestu ne može biti slobodnih poslužitelja,
- pravilo ne utječe na trajanje posluživanja,
- pravilo ne utječe na trenutke ulaska korisnika kod poslužitelja.

Kada nastupi zagušenje u redu čekanja, odbacuju se paketi s manjim stupnjem prioriteta. Problem se pojavljuje ako je previše paketa s višim stupnjem prioriteta jer u tom slučaju paketi s manjim prioritetom uopće ne bivaju posluženi.

Round Robin (RR) je jedan od najstarijih, najjednostavnijih i najčešće korištenih algoritama raspoređivanja, tj. metode posluživanja. U osnovi je zasnovan na algoritmu FCFS, ali je RR-u dodano vremensko ograničenje u korištenju procesorskog vremena. Radi na način da svakom procesu dodjeljuje vremenski interval koji u telekomunikacijskim sustavima obično iznosi od 10 do 100 ms. Taj vremenski interval se naziva kvant (*quantum*). Ako se posluživanje ne izvrši u tom intervalu ili ako se blokira, prekida se, a procesor se dodjeljuje nekom drugom procesu. Za lakše razumijevanje ovog algoritma, u nastavku se nalazi jedan primjer gdje kvantum iznosi 3 ms.

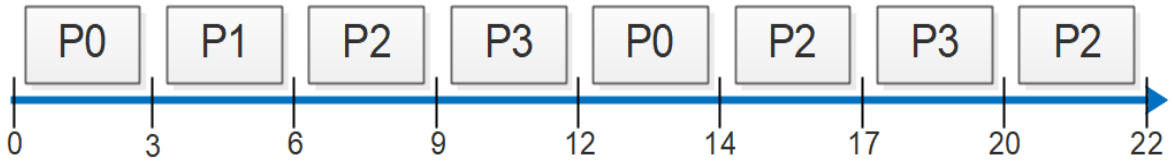
Tablica 3. Podaci o procesima koji su u redu čekanja na posluživanje *Round Robin* metodom

Proces	Vrijeme dolaska	Vrijeme izvršavanja
P0	0	5
P1	1	3
P2	2	8
P3	3	6

Tablica 4. Izračun redoslijeda posluživanja različitih procesa

Proces	Korak 1	Korak 2	Korak 3
P0	5 – 3 = 2	2 – 2 = 0	-
P1	3 – 3 = 0	-	-
P2	8 – 3 = 5	5 – 3 = 2	2 – 2 = 0
P3	6 – 3 = 3	3 – 3 = 0	-

U tablici 3 je prikazan primjer različitih procesa s različitim vremenom dolaska i različitim vremenom izvršavanja. S obzirom da kvantum, odnosno vrijeme posluživanja pojedinog paketa, iznosi 3 ms, u tablici 4 je prikazan izračun trajanja posluživanja pojedinih procesa. Svaki paket se naizmjenično poslužuje po 3 ms sve dok ne završi cjelokupan proces posluživanja. Nakon izračuna je moguće prikazati redoslijed posluživanja procesa što je vidljivo na slici 25.

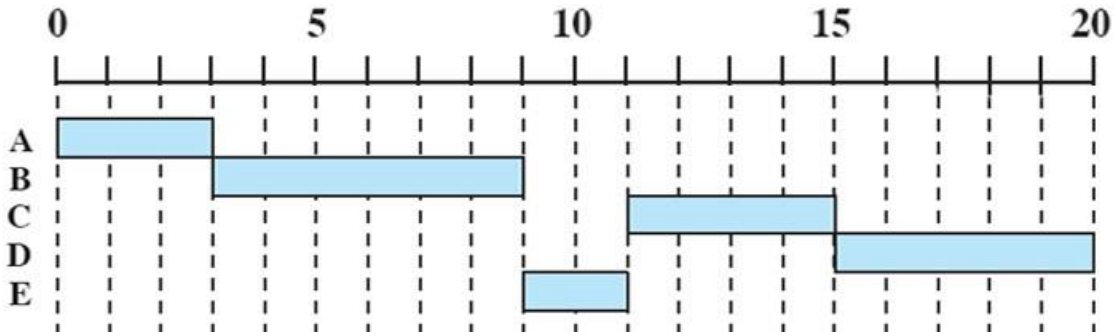


Slika 25. Prikaz vremenskog redoslijeda posluživanja pojedinih procesa pomoću *Round Robin* algoritma

Posljednja važna metoda posluživanja se naziva metoda najkraćeg vremena procesiranja (*Shortest Processing Time*, SPT) gdje su procesi poredani prema vremenu obrade i gdje se najprije obrađuju procesi s najkraćim vremenom obrade. SPT je optimalan za smanjenje prosječnog vremena posluživanja, prosječnog vremena čekanja te prosječnog i ukupnog kašnjenja. U nastavku je prikazan primjer SPT algoritma kroz podatke u tablici 5 i u konačnici slikom 26.

Tablica 5. Podaci o procesima koji su u redu čekanja na posluživanje SPT metodom

Proces	Vrijeme dolaska	Vrijeme izvršavanja
A	0	3
B	2	6
C	4	4
D	6	5
E	8	2



Slika 26. Prikaz vremenskog redoslijeda posluživanja pojedinih procesa pomoću SPT algoritma, [59]

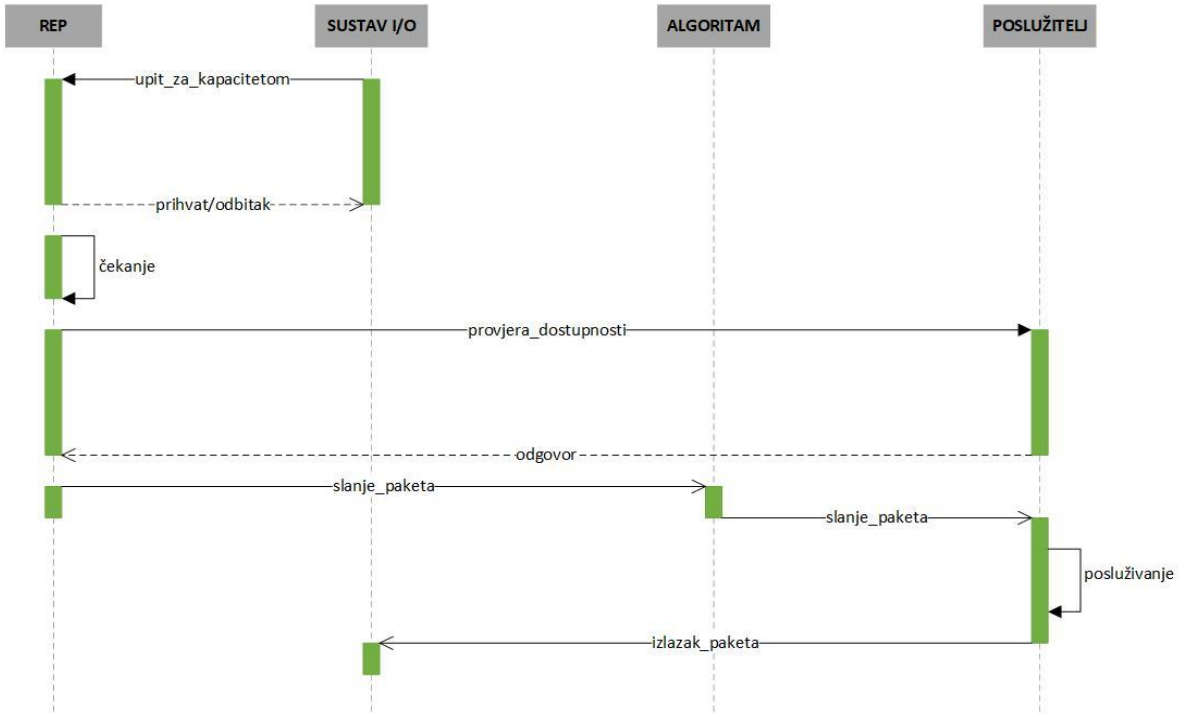
7. Modeliranje metoda za dodjelu kapaciteta

U ovom poglavlju će prethodno navedene metode posluživanja biti prikazane korištenjem UML (*Unified Modeling Language* – UML) alata za modeliranje procesa, odnosno pomoću UML dijagrama. Modeli omogućuju bolje razumijevanje sustava, odnosno pomažu kod vizualizacije stvarnog ili zamišljenog sustava, opisuju strukturu i ponašanje sustava, predstavljaju plan za izgradnju sustava te omogućuju dokumentiranje postupaka izgradnje sustava.

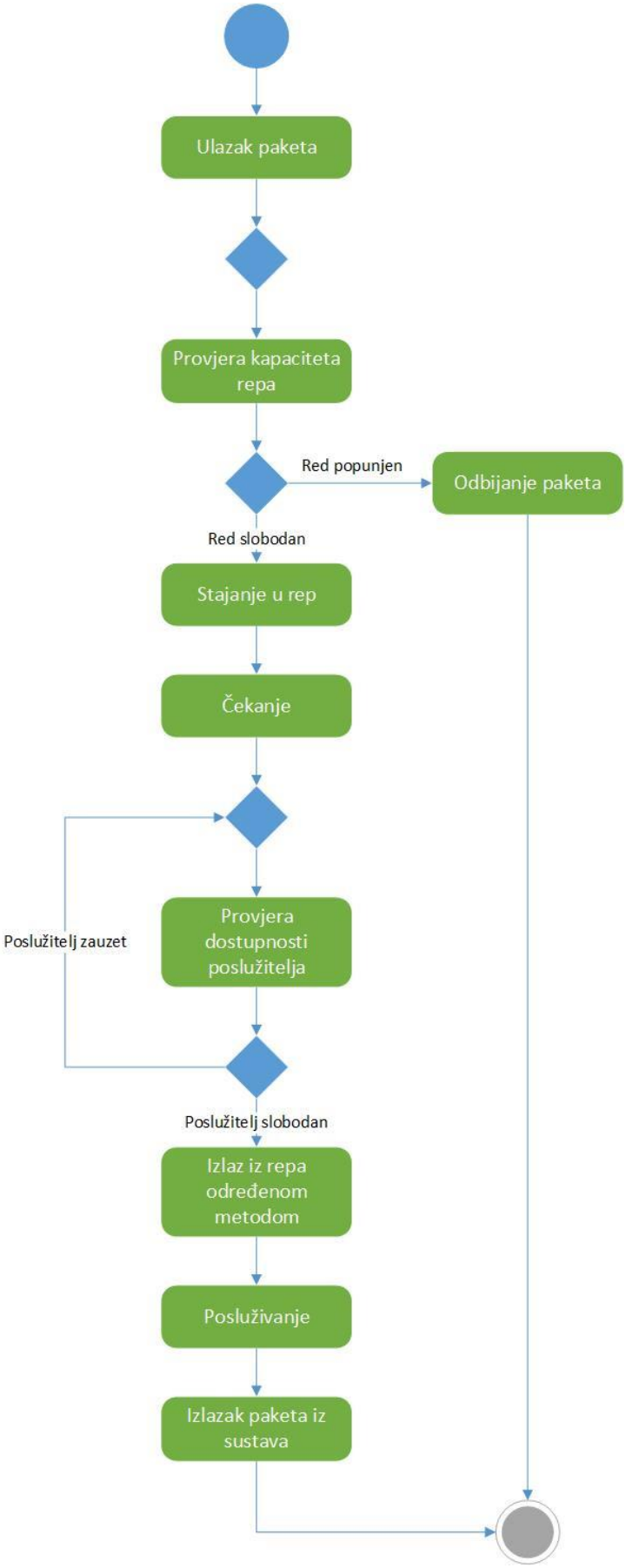
UML je jezik opće namjene koji se primjenjuje za razvoj i modeliranje u području softverskog inženjerstva te je namijenjen za pružanje standardnog načina vizualizacije dizajna sustava.

7.1. Opći dijagrami sustava s određenom metodom za dodjelu kapaciteta

U ovom poglavlju su prikazani dijagram međudjelovanja i dijagram aktivnosti koji opširnije opisuju funkcioniranje današnjih sustava, odnosno način posluživanja dolazećih paketa. Na slici 27 je prikazan dijagram međudjelovanja koji opisuje tijek događaja od trenutka ulaska paketa u sustav i njegovog posluživanja do izlaska iz sustava.



Slika 27. Dijagram međudjelovanja sustava s određenom metodom za dodjelu kapaciteta u slučaju prihvata zahtjeva



Slika 28. Dijagram aktivnosti sustava s određenom metodom za dodjelu kapaciteta

Na slici 28 je prikazan dijagram aktivnosti koji također opisuje sustav s određenom metodom posluživanja paketa. Može se vidjeti tijek aktivnosti kroz koje paketi prolaze prilikom slanja zahtjeva za posluživanjem unutar nekog sustava.

Paketi najprije ulaze u podvorbeni sustav i redaju se u rep ukoliko je kapacitet repa čekanja slobodan. Kapacitet repa ovisi o svakom sustavu, a može biti ograničen ili neograničen. U slučaju da je kapacitet repa ograničen i da je popunjen, dolazi do odbijanja paketa. Nakon toga, paket automatski izlazi iz sustava bez da je poslužen. U slučaju da je rep neograničen, paketi se redaju u rep i čekaju na posluživanje.

Nadalje se provjerava dostupnost poslužitelja. Kao i kod kapaciteta repa, tako i broj poslužitelja ovisi o svakom sustavu, a može ih biti jedan ili više. Na koji način paketi izlaze iz repa čekanja, definirano je određenom metodom za dodjelu kapaciteta.

Metode su odgovorne za slanje paketa do poslužitelja određenim redoslijedom, a nakon samog posluživanja, paketi se šalju na izlaz. Radi lakšeg i bržeg opisa i razumijevanja funkcioniranja pojedinih sustava koriste se *Kendall*-ove oznake koje su ranije spomenute u ovom radu.

7.2. Dijagrami međudjelovanja metoda za dodjelu kapaciteta kroz primjer

Za primjer je odabran sustav M/M/1/∞/∞/PS, a u tablici 6 su prikazani paketi sa dolaznim vremenima i trajanjem posluživanja:

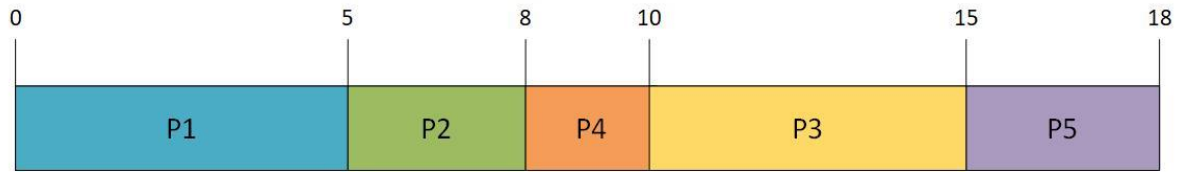
- funkcija razdiobe međudolaznih vremena je eksponencijalna,
- funkcija razdiobe trajanja posluživanja je eksponencijalna,
- poslužiteljsko mjesto ima jednog poslužitelja,
- kapacitet repa je beskonačan,
- izvorište nema ograničenja,
- podvorbena stega.

Prikazani paketi su uzeti kao primjer i predstavljaju dio većeg prometnog toka u kojemu su međudolazna vremena i vremena posluživanja eksponencijalno distribuirana, a omogućuju jednostavniji pregled dijagrama i rezultata analize.

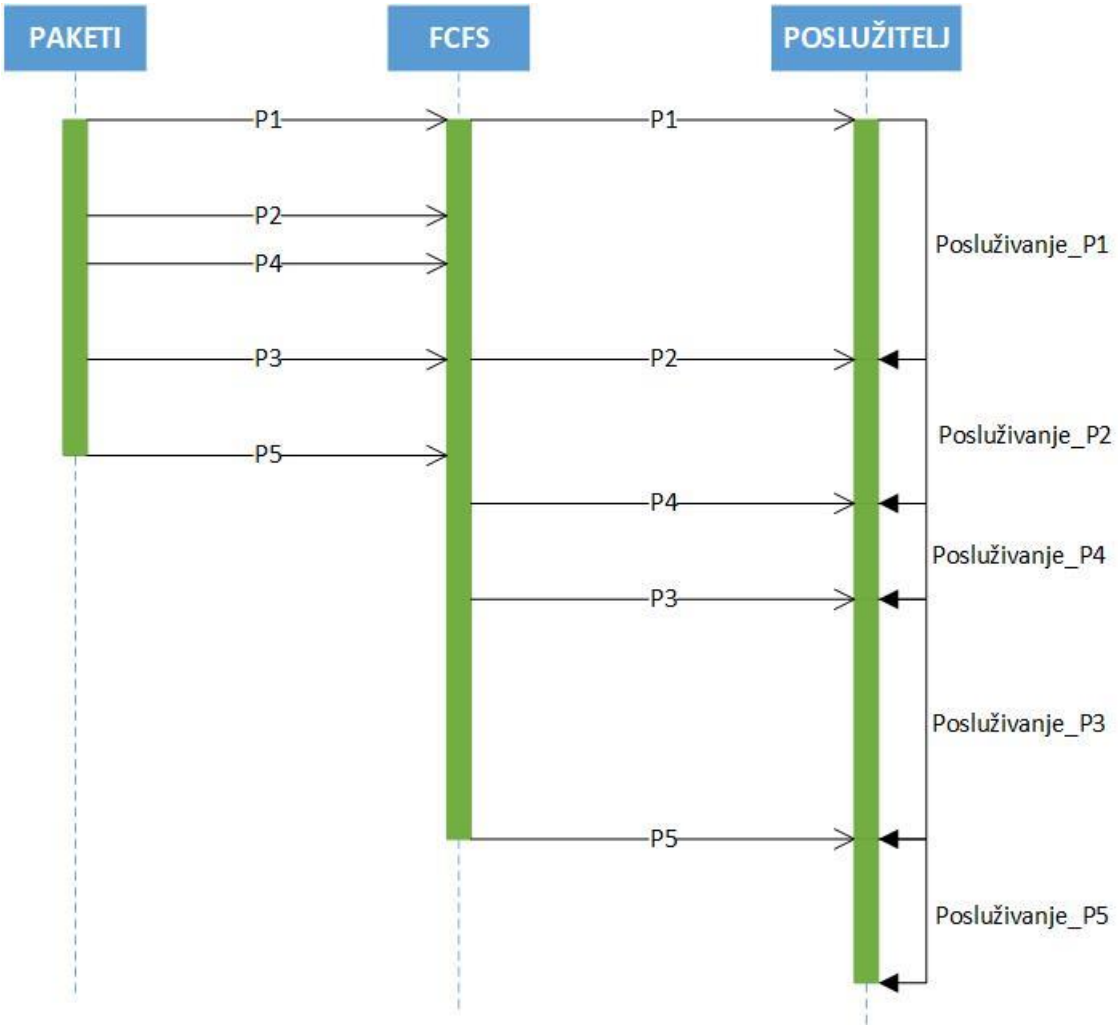
Tablica 6. Primjer paketa s različitim vremenom dolaska i vremenom izvršavanja

Paket	Vrijeme dolaska (ms)	Vrijeme izvršavanja (ms)
P1	0	5
P2	2	3
P3	5	5
P4	3	2
P5	7	3

U prvom dijagramu međudjelovanja, slika 30, je opisan sustav gdje je podvorbena stega takva da je pravilo izlaska iz repa poslužitelju FCFS. A pojednostavljeni prikaz redoslijeda posluživanja pojedinih paketa prikazano je na slici 29 s obzirom na FCFS metodu za dodjelu kapaciteta.



Slika 29. Prikaz redoslijeda posluživanja paketa metodom FCFS

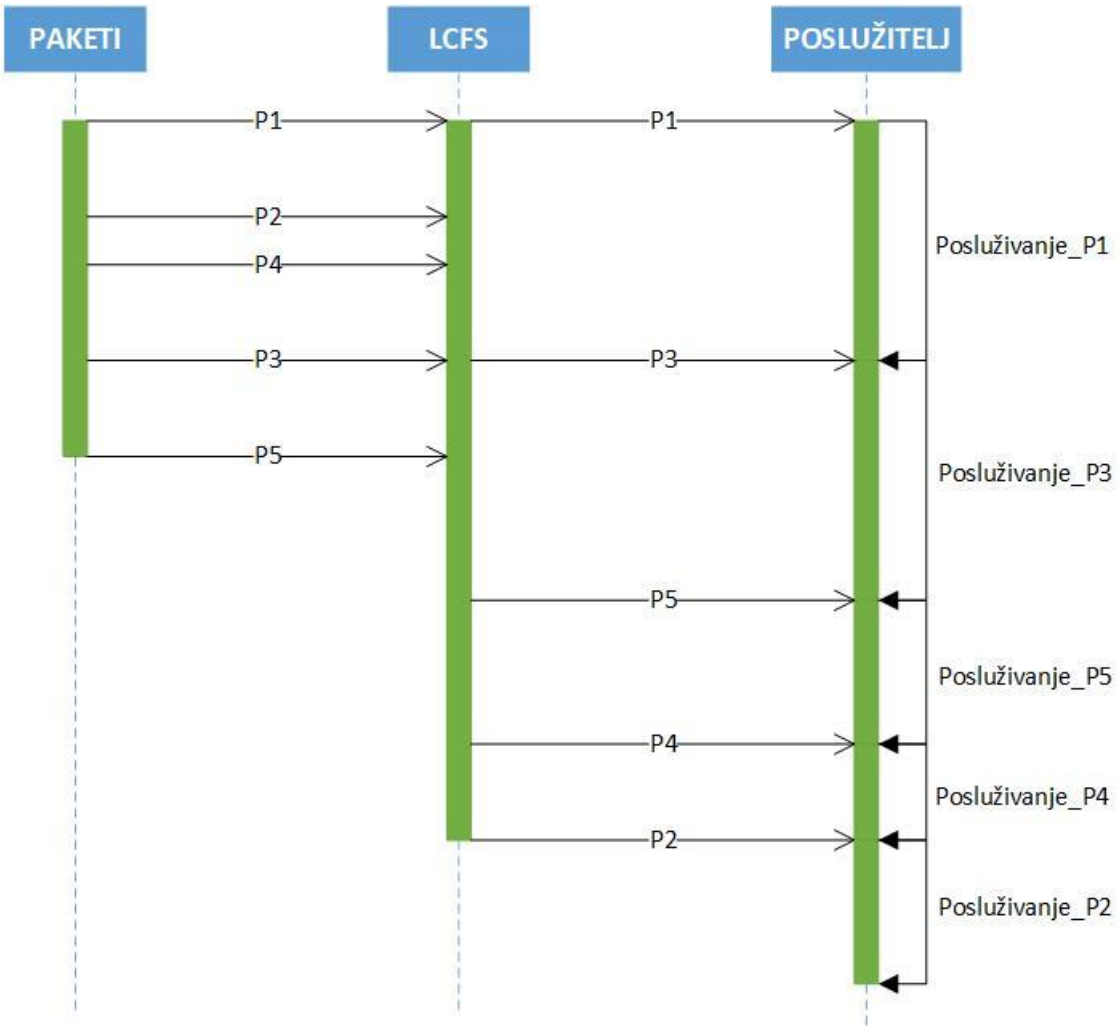


Slika 30. Dijagram međudjelovanja za opis FCFS metode posluživanja u danom primjeru

U drugom dijagramu međudjelovanja, slika 32, je opisan sustav gdje je podvorbena stega takva da je pravilo izlaska iz repa poslužitelju LCFS. A pojednostavljeni prikaz redoslijeda posluživanja pojedinih paketa prikazano je na slici 31 s obzirom na LCFS metodu za dodjelu kapaciteta.



Slika 31. Prikaz redoslijeda posluživanja paketa metodom LCFS

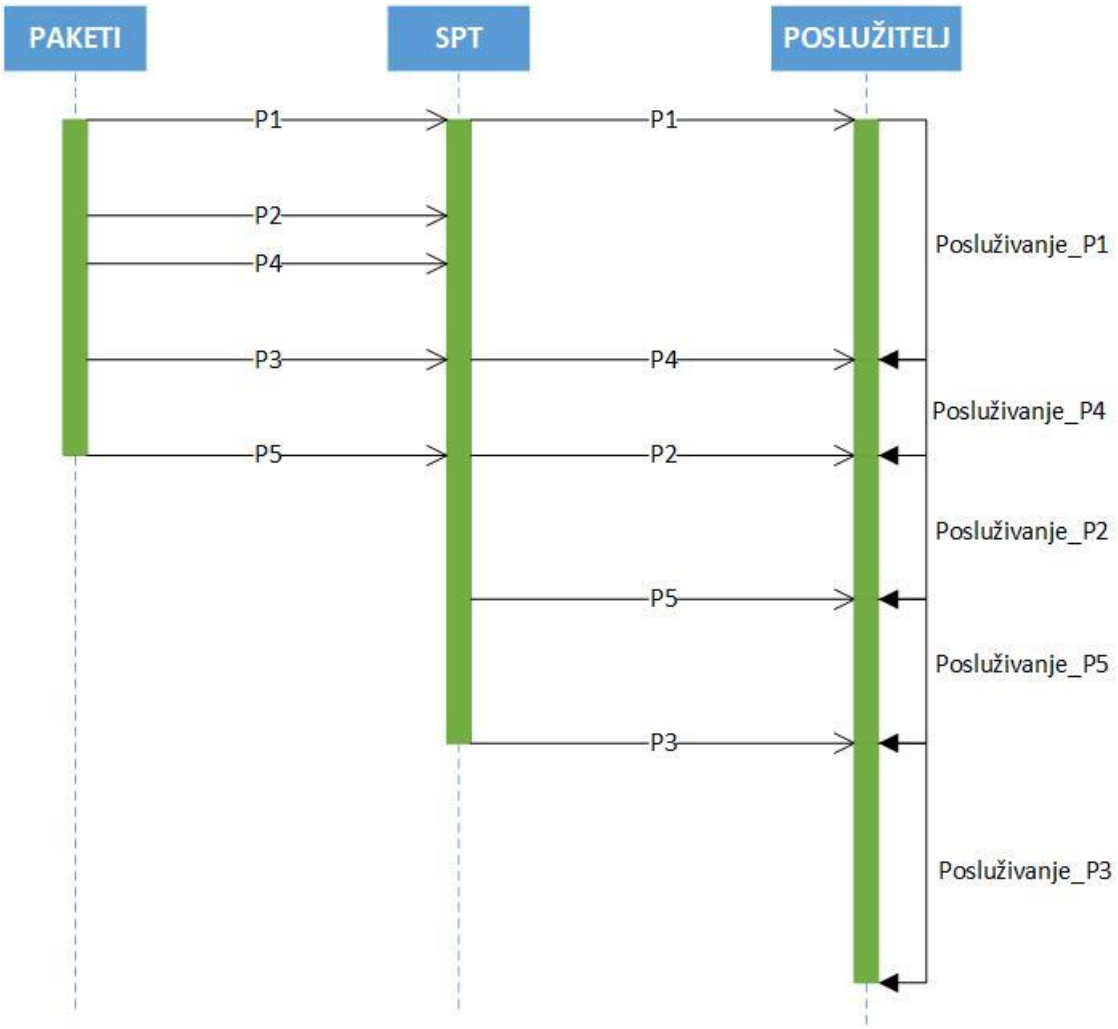


Slika 32. Dijagram međudjelovanja za opis LCFS metode posluživanja u danom primjeru

U trećem dijagramu međudjelovanja, slika 34, je opisan sustav gdje je podvorbena stega takva da je pravilo izlaska iz repa poslužitelju SPT. A pojednostavljeni prikaz redoslijeda posluživanja pojedinih paketa prikazano je na slici 33 s obzirom na SPT metodu za dodjelu kapaciteta.



Slika 33. Prikaz redoslijeda posluživanja paketa metodom SPT

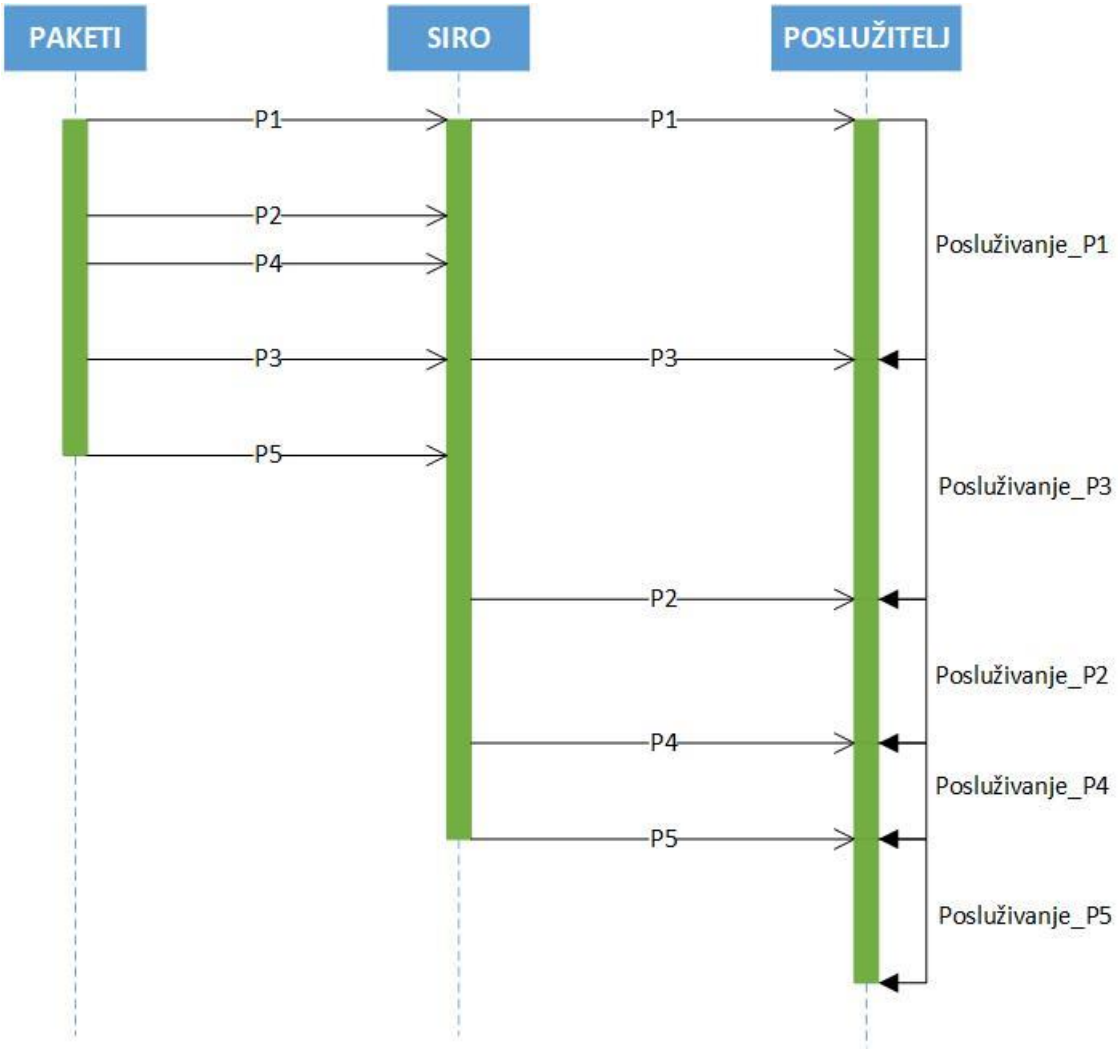


Slika 34. Dijagram međudjelovanja za opis SPT metode posluživanja u danom primjeru

U četvrtom dijagramu međudjelovanja, slika 36, je opisan sustav gdje je podvorbena stega takva da je pravilo izlaska iz repa poslužitelju SIRO. A pojednostavljeni prikaz redoslijeda posluživanja pojedinih paketa prikazano je na slici 35 s obzirom na SIRO metodu za dodjelu kapaciteta.



Slika 35. Prikaz redoslijeda posluživanja paketa metodom SIRO



Slika 36. Dijagram međudjelovanja za opis SIRO metode posluživanja u danom primjeru

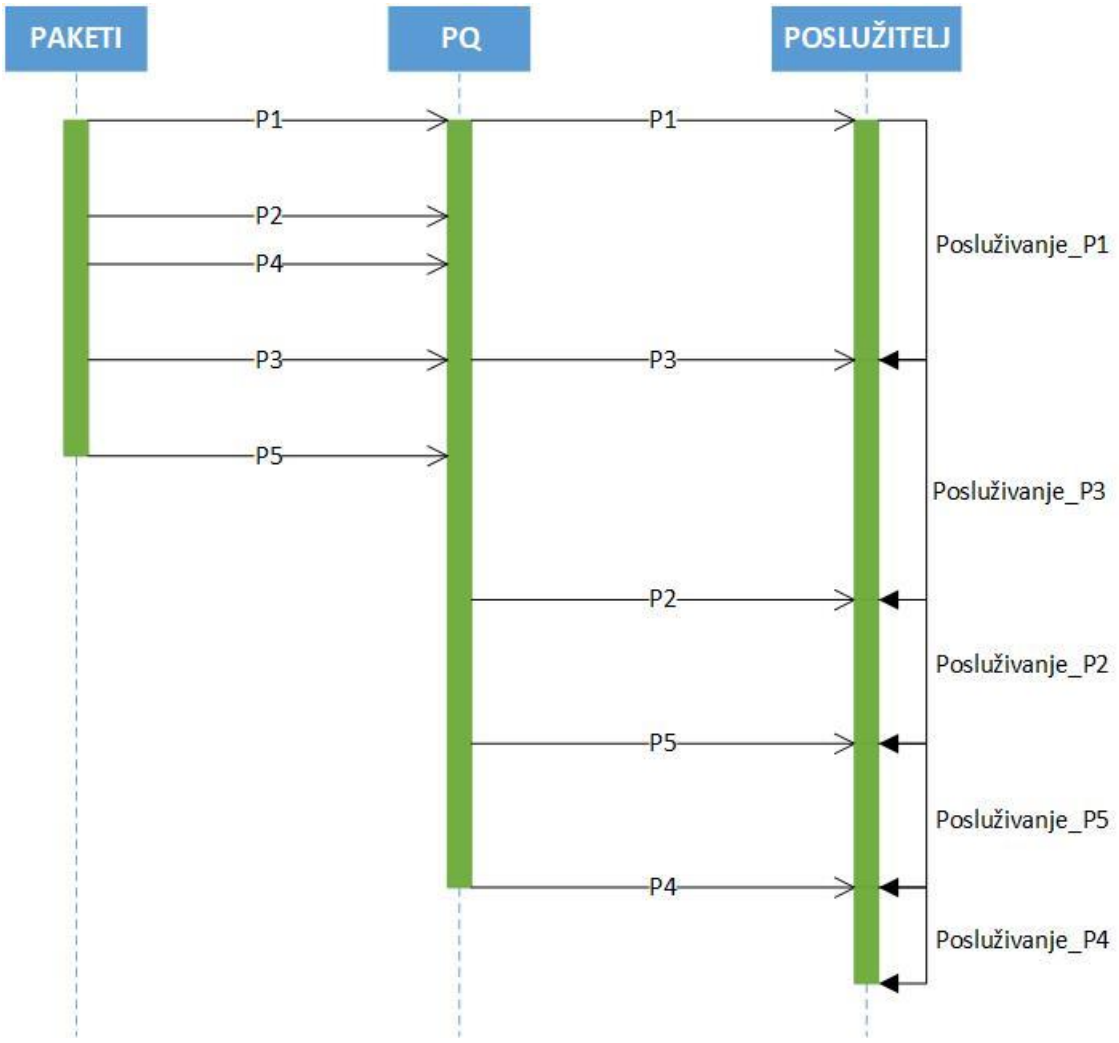
Na petom dijagramu međudjelovanja, slika 38, je opisan sustav gdje je podvorbena stega takva da je pravilo izlaska iz repa poslužitelju PQ. A pojednostavljeni prikaz redoslijeda posluživanja pojedinih paketa prikazano je na slici 37 s obzirom na PQ metodu za dodjelu kapaciteta. Razlika između ove i ostalih metoda je u tome što se paketi poslužuju s obzirom na razinu prioriteta koja im je proizvoljno dodijeljena za potrebe ovog rada, a razina prioriteta se može vidjeti u tablici 7.

Tablica 7. Prikaz prioriteta pojedinih paketa

Paket	Prioritet	Vrijeme dolaska (ms)	Vrijeme izvršavanja (ms)
P1	1	0	5
P2	2	2	3
P3	1	5	5
P4	3	2	2
P5	2	3	3

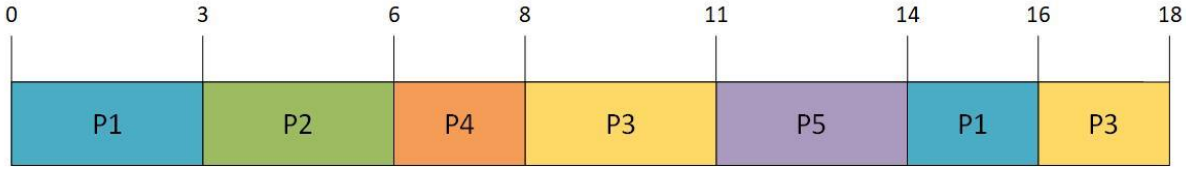


Slika 37. Prikaz redoslijeda posluživanja paketa metodom PQ

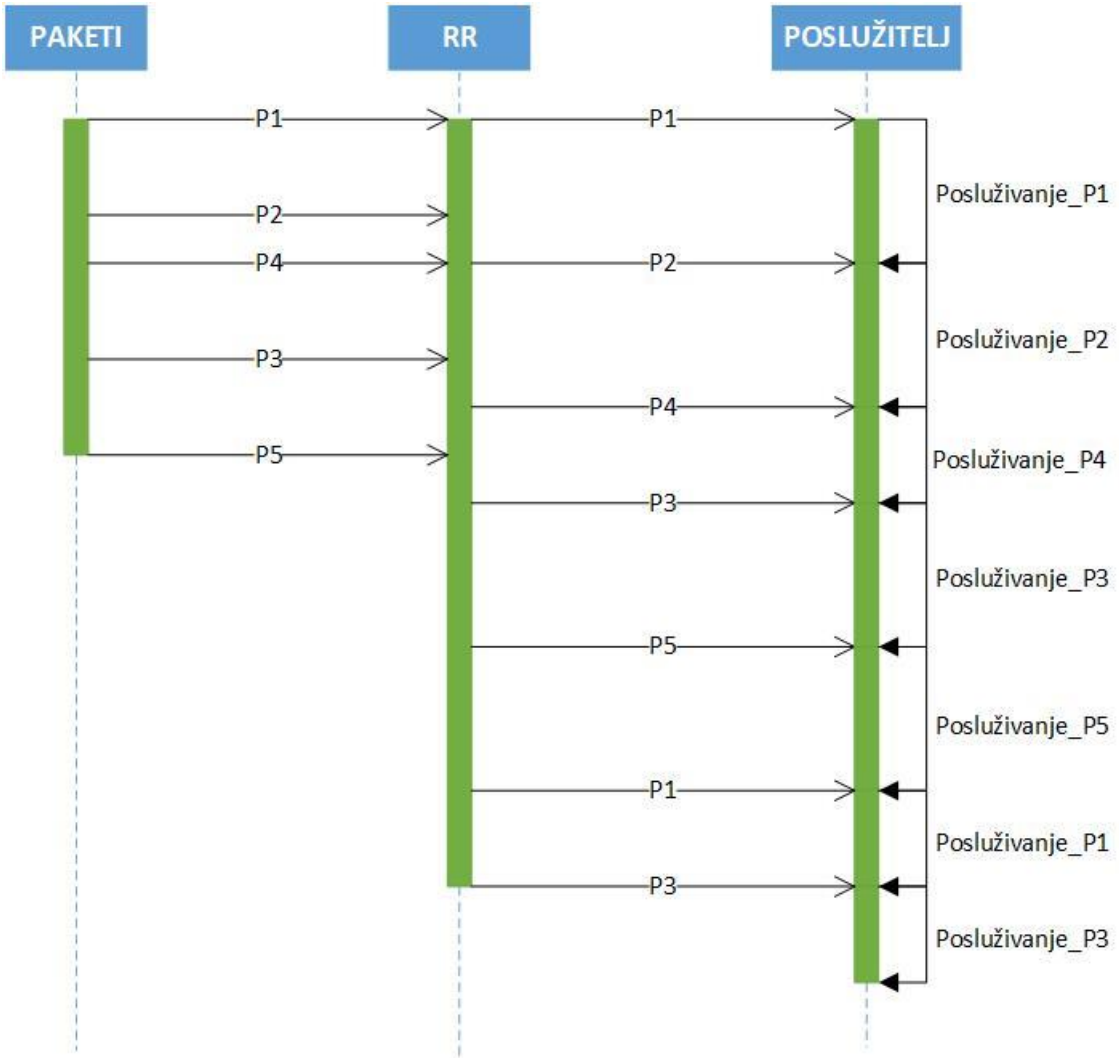


Slika 38. Dijagram međudjelovanja za opis PQ metode posluživanja u danom primjeru

U šestom i posljednjem dijagramu međudjelovanja, slika 40, je opisan sustav gdje je podvorbena stega takva da je pravilo izlaska iz repa poslužitelju RR. A pojednostavljeni prikaz redoslijeda posluživanja pojedinih paketa prikazano je na slici 39 s obzirom na RR metodu za dodjelu kapaciteta. Razlika ove metode posluživanja je u tome što ima definirano vrijeme posluživanja pojedinih paketa (kvantum). Na taj način se paketi poslužuju kružno određeno vrijeme sve dok ne bivaju posluženi, a za primjer će kvantum iznositi 3 ms.



Slika 39. Prikaz redoslijeda posluživanja paketa metodom RR



Slika 40. Dijagram međudjelovanja za opis RR metode posluživanja u danom primjeru

U nastavku su prikazane razlike između pojedinih metoda kroz izračun prosječnog vremena čekanja paketa (T_w) u repu čekanja i prosječnog vremena boravka u sustavu (T_q). Prosječno trajanje posluživanja paketa je za svaku metodu isto, a formula glasi:

$$T_s = \frac{\sum t}{\lambda}[ms] \tag{8}$$

gdje je:

t – vrijeme posluživanja pojedinih paketa

λ – broj paketa

U tablici 8 je prikazano prosječno vrijeme posluživanja i prosječno vrijeme boravka paketa u sustavu korištenjem metode FCFS.

Tablica 8. Prikaz izračuna korištenjem metode FCFS

FCFS	
Paket	Vrijeme čekanja = vrijeme početka izvršavanja - vrijeme dolaska
P1	0 – 0 = 0
P2	5 – 2 = 3
P3	10 – 5 = 5
P4	8 – 3 = 5
P5	15 – 7 = 8
$T_w = (0 + 3 + 5 + 5 + 8)/5 = 21/5 = 4{,}2\,ms$	
$T_s = (5 + 3 + 5 + 2 + 3)/5 = 18/5 = 3{,}6\,ms$	
$T_q = T_s + T_w = 3{,}6 + 4{,}2 = 7{,}8\,ms$	

U tablici 9 je prikazano prosječno vrijeme posluživanja i prosječno vrijeme boravka paketa u sustava korištenjem metode LCFS.

Tablica 9. Prikaz izračuna korištenjem metode LCFS

LCFS	
Paket	Vrijeme čekanja = vrijeme početka izvršavanja - vrijeme dolaska
P1	0 – 0 = 0
P2	15 – 2 = 13
P3	5 – 5 = 0
P4	13 – 3 = 10
P5	10 – 7 = 3
$T_w = (0 + 13 + 0 + 10 + 3)/5 = 26/5 = 5{,}2\,ms$	
$T_s = (5 + 3 + 5 + 2 + 3)/5 = 18/5 = 3{,}6\,ms$	
$T_q = T_s + T_w = 3{,}6 + 5{,}2 = 8{,}8\,ms$	

U tablici 10 je prikazano prosječno vrijeme posluživanja i prosječno vrijeme boravka paketa u sustava korištenjem metode SPT.

Tablica 10. Prikaz izračuna korištenjem metode SPT

SPT	
Paket	Vrijeme čekanja = vrijeme početka izvršavanja - vrijeme dolaska
P1	0 – 0 = 0
P2	7 – 2 = 5
P3	13 – 5 = 8
P4	5 – 3 = 2
P5	10 – 7 = 3
$T_w = (0 + 5 + 8 + 2 + 3)/5 = 18/5 = 3{,}6\,ms$	
$T_s = (5 + 3 + 5 + 2 + 3)/5 = 18/5 = 3{,}6\,ms$	
$T_q = T_s + T_w = 3{,}6 + 3{,}6 = 7{,}2\,ms$	

U tablici 11 je prikazano prosječno vrijeme posluživanja i prosječno vrijeme boravka paketa u sustava korištenjem metode PQ.

Tablica 11. Prikaz izračuna korištenjem metode PQ

PQ	
Paket	Vrijeme čekanja = vrijeme početka izvršavanja - vrijeme dolaska
P1	0 – 0 = 0
P2	10 – 2 = 8
P3	5 – 5 = 0
P4	16 – 3 = 13
P5	13 – 7 = 6
$T_w = (0 + 8 + 0 + 13 + 6)/5 = 27/5 = 5{,}4\,ms$	
$T_s = (5 + 3 + 5 + 2 + 3)/5 = 18/5 = 3{,}6\,ms$	
$T_q = T_s + T_w = 3{,}6 + 5{,}4 = 9\,ms$	

U tablici 12 je prikazano prosječno vrijeme posluživanja i prosječno vrijeme boravka paketa u sustava korištenjem metode RR.

Tablica 12. Prikaz izračuna korištenjem metode RR

RR		
Paket	Vrijeme čekanja = vrijeme početka izvršavanja - vrijeme dolaska	
P1	0 – 0 = 0	14 – 3 = 11
P2	3 – 2 = 1	-
P3	8 – 5 = 3	16 – 11 = 5
P4	6 – 3 = 3	-
P5	11 – 7 = 4	-

$T_w = (0 + 1 + 3 + 3 + 4 + 11 + 5)/5 = 27/5 = 5{,}4\, ms$
$T_s = (5 + 3 + 5 + 2 + 3)/5 = 18/5 = 3{,}6\, ms$
$T_q = T_s + T_w = 3{,}6 + 5{,}4 = 9\, ms$

Kao što se može i pretpostaviti, prosječna vremena se razlikuju s obzirom na metodu tj. način posluživanja. Iz dobivenih rezultata odnosno izračuna prosječnog vremena čekanja, može se zaključiti kako najbolje performanse pruža metoda najkraćeg vremena procesiranja. Bez obzira na dobivene rezultate, koju metodu za dodjelu kapaciteta izabrati ovisi o svakom sustavu i njegovim zahtjevima i potrebama.

8. Zaključak

Sve veći broj korisnika terminalnih uređaja dovelo je do porasta podatkovnog prometa. Isto tako, današnja su poslovanja nezamisliva bez uporabe informacijsko komunikacijskih sustava što je dovelo i do porasta te razvoja suvremenih modernih tehnologija.

Povećanje mogućnosti korištenja raznih usluga od strane korisnika dovelo je do povećanja njihovih zahtjeva i potreba. To je rezultiralo porastom opterećenja na mrežu zbog čega je došlo do razvoja višeuslužnih mreža.

Kako bi se izbjegla moguća zagušenja unutar mreže i gubitak paketa podatkovnog prometa, koriste se podvorbeni sustavi. Procjena performansi sustava preuzela je sve veću važnost jer se nastoje dizajnirati sve sofisticiraniji informacijsko komunikacijski sustavi. Proučavanje sustava posluživanja je važno jer pruža teorijsku podlogu za vrstu usluge koja se može očekivati od određenog sustava i način na koji se sustav može oblikovati kako bi svojim klijentima pružio određenu razinu usluge.

S ciljem uspješnog održavanja zadovoljstva korisnika, potrebno je zadržati određenu razinu kvalitete tih usluga. Kvaliteta usluge se najviše odnosi na dostupnost odnosno raspodjelu kapaciteta što utječe na performanse mreže. Iz tog razloga su se pojavile različite metode za dodjelu kapaciteta koje upravljaju redovima čekanja.

Sustavi se najčešće prikazuju pomoću dijagrama koji opisuju tijek događaja korištenjem UML alata i na taj način je moguće usporediti funkcionalnosti različitih metoda za dodjelu kapaciteta. Usporedba se obavlja analizom dobivenih rezultata iz izračuna prosječnog vremena čekanja zahtjeva u sustavu.

Kako bi rezultati bili pouzdani, potrebno je uzeti veliku količinu prometa u obzir. U suprotnom su razlike između pojedinih metoda za dodjelu kapaciteta izrazito male. Unatoč prednostima određenih metoda, odabir najprikladnije ovisi o razini potreba i zahtjeva informacijsko komunikacijskih sustava.

Literatura

1. Mrvelj, Š.: *Višeuslužne telekomunikacijske mreže i usluge u tehnološkom okruženju,* Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2014.
2. http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=426645 (pristupljeno: 04. travanj 2018.)
3. https://flylib.com/books/en/2.567.1.57/1/ (pristupljeno: 04. travanj 2018.)
4. Mrvelj, Š.: *Slojevite arhitekture i norme umrežavanja otvorenih sustava*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2014.
5. https://netomad.wordpress.com/about/osi-model-2-0/ (pristupljeno: 04. travanj 2018.)
6. https://technet.microsoft.com/en-us/library/cc958821.aspx (pristupljeno: 05. travanj 2018.)
7. https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tf6310_tc3_tcpip/84246923.html&id (pristupljeno: 07. travanj 2018.)
8. http://sourcedaddy.com/windows-xp/the-tcp-ip-protocol-framework.html (pristupljeno: 07. travanj 2018.)
9. https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTTP (pristupljeno: 07. travanj 2018.)
10. https://searchenterprisewan.techtarget.com/definition/File-Transfer-Protocol (pristupljeno: 07. travanj 2018.)
11. https://searchnetworking.techtarget.com/definition/domain-name-system (pristupljeno: 07. travanj 2018.)
12. https://searchnetworking.techtarget.com/definition/SNMP (pristupljeno: 07. travanj 2018.)
13. http://mars.netanya.ac.il/~unesco/cdrom/booklet/HTML/NETWORKING/node300.html (pristupljeno: 07. travanj 2018.)
14. https://www.websecurity.symantec.com/security-topics/what-is-ssl-tls-https (pristupljeno: 07. travanj 2018.)
15. https://www.digicert.com/ssl-cryptography.htm (pristupljeno: 07. travanj 2018.)
16. https://searchnetworking.techtarget.com/definition/NetBIOS (pristupljeno: 08. travanj 2018.)
17. https://searchnetworking.techtarget.com/definition/Point-to-Point-Tunneling-Protocol (pristupljeno: 08. travanj 2018.)
18. https://searchunifiedcommunications.techtarget.com/definition/Session-Initiation-Protocol (pristupljeno: 08. travanj 2018.)
19. Mrvelj, Š.: *Promet u Internet mreži*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2009.
20. Mrvelj, Š.: *Tehnologija telekomunikacijskog prometa 2, 5. predavanje*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb
21. https://askozia.com/voip/what-is-sip/ (pristupljeno: 08. travanj 2018.)
22. https://www.tutorialsweb.com/networking/tcp-ip/udp-tcp.htm (pristupljeno: 08. travanj 2018.)
23. https://searchnetworking.techtarget.com/definition/TCP (pristupljeno: 08. travanj 2018.)

24. https://searchnetworking.techtarget.com/definition/UDP-User-Datagram-Protocol (pristupljeno: 08. travanj 2018.)
25. https://www.lifewire.com/internet-protocol-explained-3426713 (pristupljeno: 08. travanj 2018.)
26. http://www.networxsecurity.org/members-area/glossary/h/hop.html (pristupljeno: 08. travanj 2018.)
27. https://searchnetworking.techtarget.com/definition/Address-Resolution-Protocol-ARP (pristupljeno: 08. travanj 2018.)
28. https://searchnetworking.techtarget.com/definition/ICMP (pristupljeno: 08. travanj 2018.)
29. https://www.globalknowledge.com/blog/2011/11/21/icmp-error-inspection-on-the-asa/ (pristupljeno: 08. travanj 2018.)
30. https://searchnetworking.techtarget.com/definition/Internet-Group-Management-Protocol (pristupljeno: 08. travanj 2018.)
31. https://www.juniper.net/documentation/en_US/junos/topics/concept/interface-security-encapsulation-point-to-point-protocol-understanding.html (pristupljeno: 08. travanj 2018.)
32. https://www.lifewire.com/definition-of-frame-relay-817947 (pristupljeno: 08. travanj 2018.)
33. https://searchnetworking.techtarget.com/definition/HDLC (pristupljeno: 08. travanj 2018.)
34. http://helpguide.sony.net/mig/Z003888B11/HR/contents/TP0001034966.html (pristupljeno: 08. travanj 2018.)
35. https://www.pctechguide.com/networking/token-ring-networks (pristupljeno: 08. travanj 2018.)
36. Mrvelj, Š.: *Tehnologija telekomunikacijskog prometa 2, 2.predavanje*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb
37. Mrvelj, Š.: *Tehnologija TK prometa, 1.predavanje*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb
38. https://searchnetworking.techtarget.com/definition/PSTN (pristupljeno: 13. travanj 2018.)
39. http://www.routexp.com/2017/10/basics-of-multicast-addresses-224000-to.html (pristupljeno: 13. travanj 2018.)
40. http://courses.ischool.berkeley.edu/i224/s99/GroupA/intro.htm (pristupljeno: 13. travanj 2018.)
41. https://searchitchannel.techtarget.com/definition/service-level-agreement (pristupljeno: 09. lipanj 2018.)
42. Mrvelj, Š.: *Tehnologija telekomunikacijskog prometa 2, 4. predavanje*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb
43. https://www.tutorialride.com/computer-network/resource-reservation-protocol-rsvp.htm (pristupljeno: 09. lipanj 2018.)
44. http://systemzone.net/network-bandwidth-and-throughput/ (pristupljeno: 10. lipanj 2018.)
45. http://revo-brain.blogspot.com/2015/08/jitter-delay-throughput-packet-loss-in-qos.html (pristupljeno: 10. lipanj 2018.)
46. http://www.innovasic.com/news/industrial-ethernet/what-is-jitter-and-how-it-affects-your-operation/ (pristupljeno: 10. lipanj 2018.)

47. Mrvelj, Š.: *Ciljevi razine usluge QoS/GoS/NP, 5. predavanje*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb
48. https://plus.maths.org/content/agner-krarup-erlang-1878-1929 (pristupljeno: 16. lipanj 2018.)
49. Mrvelj, Š.: *Podvorbeni sustavi, Uvodno predavanje*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2015.
50. Mrvelj, Š.: *Podvorbeni sustavi, Matematički opis podvorbenog sustava*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2015.
51. http://slideplayer.com/slide/2541399/ (pristupljeno: 17. lipanj 2018.)
52. https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/erlang/erlang-c.php (pristupljeno: 17. lipanj 2018.)
53. Mrvelj, Š.: *Odabir prometnog modela*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb
54. Mrvelj, Š.: *Modeli sustava posluživanja sa čekanjem*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb
55. https://www.techopedia.com/definition/23455/first-come-first-served-fcfs (pristupljeno: 19. srpanj 2018.)
56. URL:https://2minutetech.wordpress.com/2015/11/13/what-is-fifo-and-lifo/ (pristupljeno: 19. srpanj 2018.)
57. Mrvelj, Š.: *Grupni podvorbeni sustavi*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2015./2016.
58. http://what-when-how.com/qos-enabled-networks/queuing-and-scheduling-qos-enabled-networks-part-2/ (pristupljeno: 21. srpanj 2018.)
59. https://spin.atomicobject.com/2015/02/26/uniprocessor-scheduling-policies/ (pristupljeno: 21. srpanj 2018.)
60. https://www.pctechguide.com/networking/token-ring-networks (pristupljeno: 21. srpanj 2018.)
61. Mrvelj, Š.: *Tehnologija telekomunikacijskog prometa, Osnove teorije prometa*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb

Popis slika

Slika 1. Prikaz telekomunikacijske mreže/sustava prema poopćenom modelu 4
Slika 2. Primjer višeuslužne mreže 5
Slika 3. Enkapsulacija podatka u OSI referentnom modela 6
Slika 4. Usporedba arhitekture OSI i TCP/IP konceptualnih modela 9
Slika 5. Prikaz komunikacije između klijenta i poslužitelja za ostvarivanje pristupa na određenu web stranicu 12
Slika 6. Prikaz zahtjeva i odgovora za pozivom 14
Slika 7. Prikaz asimetričnog šifriranja ili kriptografije 15
Slika 8. Prikaz simetričnog šifriranja ili kriptografije 15
Slika 9. Razmjena paketa između izvora i odredišta korištenjem TCP protokola 17
Slika 10. Usmjeravanje paketa od izvora do odredišta putem mreže na temelju IP adrese 19
Slika 11. ICMP zaglavlje 20
Slika 12. Token Ring tehnologija u obliku prstenaste topologije 22
Slika 13. Usporedba noseće mrežne usluge i teleusluge 23
Slika 14. Komponente PSTN-a 26
Slika 15. Usporedba prijenosa videa strujanjem prema jednoj ili više točaka 28
Slika 16. Odnos pojasne širine i propusnosti za određeni broj bita u određenom vremenu 30
Slika 17. Primjer slike u slučaju gubitka paketa kod UDP protokola 31
Slika 18. Prikaz jittera 32
Slika 19. Vrste poruka između pošiljatelja i primatelja u svrhu rezerviranja resursa za tok podataka 33
Slika 20. Vizualni prikaz funkcija podvorbenog sustava 34
Slika 21. Vizualni prikaz ponuđenog, ostvarenog i izgubljenog prometa 38
Slika 22. Vizualni prikaz funkcioniranja FIFO i LIFO disciplina posluživanja 41
Slika 23. Vrste prednosnog posluživanja 42
Slika 24. Jednostavan prikaz primjera prednosnog posluživanja 42
Slika 25. Prikaz vremenskog redoslijeda posluživanja pojedinih procesa pomoću Round Robin algoritma 44
Slika 26. Prikaz vremenskog redoslijeda posluživanja pojedinih procesa pomoću SPT algoritma 45
Slika 27. Dijagram međudjelovanja sustava s određenom metodom za dodjelu kapaciteta u slučaju prihvata zahtjeva 46
Slika 28. Dijagram aktivnosti sustava s određenom metodom za dodjelu kapaciteta 47
Slika 29. Prikaz redoslijeda posluživanja paketa metodom FCFS 49
Slika 30. Dijagram međudjelovanja za opis FCFS metode posluživanja u danom primjeru 49
Slika 31. Prikaz redoslijeda posluživanja paketa metodom LCFS 50
Slika 32. Dijagram međudjelovanja za opis LCFS metode posluživanja u danom primjeru 50
Slika 33. Prikaz redoslijeda posluživanja paketa metodom SPT 51
Slika 34. Dijagram međudjelovanja za opis SPT metode posluživanja u danom primjeru 51

Slika 35. Prikaz redoslijeda posluživanja paketa metodom SIRO..... 52
Slika 36. Dijagram međudjelovanja za opis SIRO metode posluživanja u danom primjeru..... 52
Slika 37. Prikaz redoslijeda posluživanja paketa metodom PQ 53
Slika 38. Dijagram međudjelovanja za opis PQ metode posluživanja u danom primjeru 53
Slika 39. Prikaz redoslijeda posluživanja paketa metodom RR 54
Slika 40. Dijagram međudjelovanja za opis RR metode posluživanja u danom primjeru 54

Popis tablica

Tablica 1. Opis funkcija pojedinih slojeva OSI modela 7
Tablica 2. Prikaz protokola koji se opisuju funkcionalnosti pojedinih slojeva TCP/IP složaja 11
Tablica 3. Podaci o procesima koji su u redu čekanja na posluživanje Round Robin metodom..... 44
Tablica 4. Izračun redoslijeda posluživanja različitih procesa..... 44
Tablica 5. Podaci o procesima koji su u redu čekanja na posluživanje SPT metodom 45
Tablica 6. Primjer paketa s različitim vremenom dolaska i vremenom izvršavanja... 48
Tablica 7. Prikaz prioriteta pojedinih paketa 53
Tablica 8. Prikaz izračuna korištenjem metode FCFS 55
Tablica 9. Prikaz izračuna korištenjem metode LCFS 55
Tablica 10. Prikaz izračuna korištenjem metode SPT 56
Tablica 11. Prikaz izračuna korištenjem metode PQ 56
Tablica 12. Prikaz izračuna korištenjem metode RR 56