

Komunikacijski sustavi i mreže

7. Komutacijski sustav

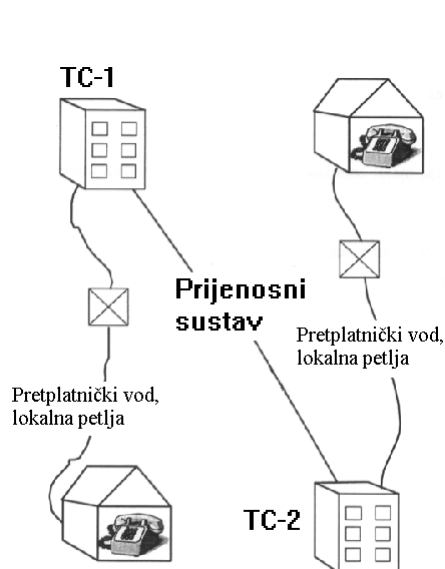
7.	Komutacijski sustav	7-296
7.1	Povijesni razvoj i principi rada komutacijskih sustava.....	7-296
7.2	Blokade u komutacijskom sustavu.....	7-301
7.3	Automatska komutacija	7-306
7.3.1	Zajedničko upravljanje.....	7-309
7.3.2	Prevođenje.....	7-311
7.4	Elektroničko upravljanje u komutacijskim sustavima	7-312
7.5	Vremenska komutacija - TDS.....	7-314
7.5.1	Razmjena vremenskih odsječaka	7-315
7.5.2	Primjeri vremenskih PCM komutacijskih sustava.....	7-318
7.5.3	Komutacija (switching) i usmjeravanje (routing) u mreži	7-320
7.6	Komutacijski sustavi.....	7-321
7.7	Struktura mreže komutacijskih sustava	7-323
7.8	Sastav komutacijskog centra.....	7-324
7.9	Razvitak komutacijskih sustava.....	7-325
7.10	Promet telekomunikacijskim sustavom	7-326
7.10.1	Model prometa klasičnim telefonskim sustavom	7-329
7.10.2	Analiza prometa telefonskim komunikacijskim sustavom	7-332
7.11	Promet podatkovnim komunikacijskim sustavom.....	7-334
7.11.1	Littleova formula (teorem).....	7-335
7.11.2	Analiza prometa podatkovnim sustavom.....	7-336

Zagreb i Osijek, rujan 2005.

Dr. sc. Predrag Valožić

7. Komutacijski sustav

Telefonski komunikacijski sustav bitno se razlikuje od radija ili televizije. Radio i televizija, difuzni su sustavi masovnih, jednosmjernih telekomunikacija relativno malog broja izvora poruka s nepoznatim mnoštvom primatelja poruka. Telefonija pak, poput pošte omogućava individualnu komunikaciju jedne osobe s drugom, određenom osobom (*person-to-person*). Da bi se omogućilo komuniciranje “svakoga sa svakim”, prijenosni podsustav znatno je kompliciranije funkcije, pa i organizacije, u usporedbi s difuznim komunikacijskim sustavima. Neophodno je uvesti **komutacijski** (*switching*) podsustav (Osnove telkomunikacija, opći model telekomunikacijskog sustava). Svaki pojedinačni **pretplatnik** ("broj", *subscriber*) može inicirati komunikaciju s drugim pretplatnikom, te je povezan s **komutacijskim središtem** ("centrala" *switching office*) posredstvom **lokalne petlje** (*local loop*) koju tvore:



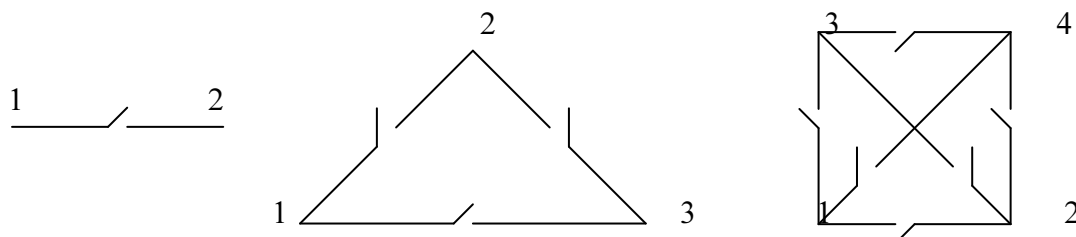
- Telefonski aparat (terminal)
- Par vodiča - telefonska parica (prijenosni podsustav)
- Sklopovi centrale (komutacijskog podsustava) pridijeljeni svakom pojedinačnom pretplatniku, koji u slučaju telefonskog komunikacijskog sustava ujedno i opskrbljuju napajanjem pretplatničke terminale (zajedničko napajanje – CB, jedan je izvor napajanja: 24, 48 ili 60V).

Slika 7.1. Sastavnice telefonskog komunikacijskog sustava

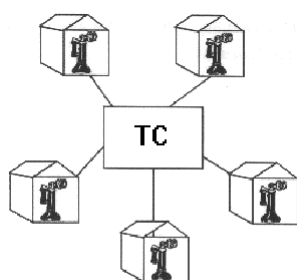
7.1 Povijesni razvoj i principi rada komutacijskih sustava

Kako omogućiti razgovor svakom pretplatniku priključenom na telefonsku mrežu s bilo kojim drugim pretplatnikom, bilo je, a i ostalo je, temeljna je zadaća koju obavlja komutacijski podsustav. Trivijalno je rješenje povezivanje “svakoga-sa-svakim” posebnom sklopkom (Slika 7.2). U tom slučaju, za dva pretplatnika trebamo jednu sklopku, za tri pretplatnika tri sklopke, za 4 pretplatnika 6 sklopki, itd..., za s pretplatnika trebali bi $\frac{1}{2} \cdot s \cdot (s-1)$

sklopki. Za 100 pretplatnika imali bi 4950, a za 1000 pretplatnika 499.500 sklopki. Očito je da broj sklopki u **komutacijskom polju** vrlo brzo postaje nepraktično velik.



Slika 7.2. Komutacijsko polje s posebnim sklopkama za svako moguće povezivanje, za 2, 3 i 4 pretplatnika



Centralizirana mreža

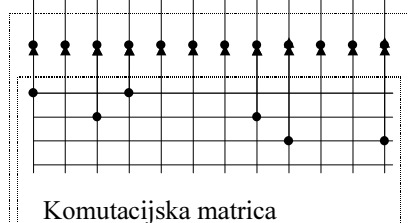
Slika 7.3. Telefonska mreža s komutacijskim središtem



Slika 7.4. Radno mjesto manualne telefonske centrale

Pretplatnički vodovi

1 2 3 4 5 6 7 8 9 . . n



Komutacijsko polje

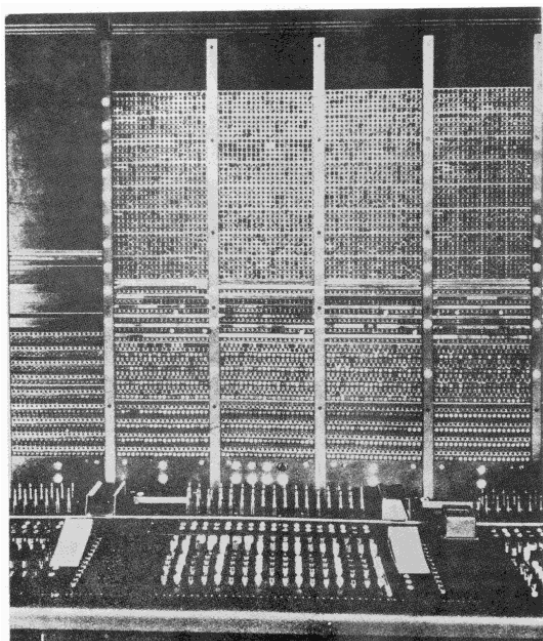
“Prva naprava za posredovanje veza montirana je 1878.g. u New Havenu (Connecticat, USA), a imala je 21 priključak. Izgledala je kao rešetka od mjedenih šipki (međusobno izoliranih) s rupama. Telefonist je vezu uspostavljao provlačenjem mjedenog čepa kroz rupe na sjecištu šipki...”

Miroslav Mikula, Razvoj telekomunikacija, Školska knjiga, Zagreb, 1994.

Razumniju konstrukciju komutacijskog središta (Slika 7.3) moguće je prikazati na primjeru manualne telefonske centrale **MTC** (Slika 7.4 i Slika 7.5).

Svaki **poslužitelj** (redovito su to bile žene - telefonistice) sjedi ispred pulta s 20-tak pari spojnih kabela s utikačima kojima može povezati lokalne petlje dvaju pretplatnika. Svaki se par kabela sastoji od **prednjeg** i **zadnjeg** utikača ("čepa"), kabela koji ih povezuju, te **odzivne** i **pozivne** tipke. Na okomitoj ploči nalazi se stotinjak **odzivnih utičnica** (čepišta) sa signalnim žaruljicama, te čak do nekoliko tisuća **multipliciranih** utikača (čepišta) ostalih pretplatnika.

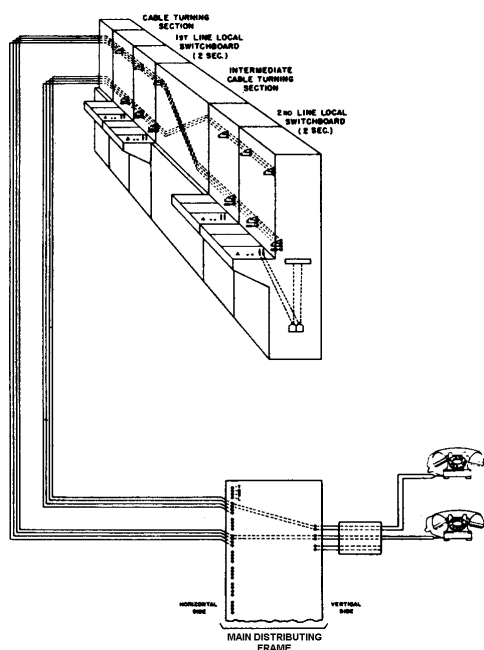
Kada jedan pretplatnik poželi razgovarati s nekim drugim pretplatnikom, on "pozove centralu" dizanjem MTK svog telefonskog aparata. Tada se zatvara strujni krug lokalne petlje, upali se žaruljica kraj "njegove" odzivne utičnice, što obavještava poslužitelja da pretplatnik npr. **broj 325** želi s nekim razgovarati. Poslužitelj utakne zadnji utikač u utičnicu kraj upaljene žaruljice, stisne odzivnu tipku čime se uključi u strujni krug lokalne petlje **pozivajućeg** pretplatnika i javi mu se: "Broj molim". Nakon što sazna broj željenog sugovornika, poslužitelj vrhom prednjeg utikača dotakne utičnicu **pozvanog** broja. Ako je taj pretplatnik već u nekoj drugoj vezi, njegov je strujni krug zatvoren, te će poslužitelj centrale u svojoj slušalici čuti "**klik**". U tom će slučaju obavijestiti pozivajućeg pretplatnika da je pozvani broj "**zauzet**", te raskinuti vezu s pozivajućim pretplatnikom. Ako nema "klika", poslužitelj utakne prednji utikač u utičnicu pozvanog broja i stisne pozivnu tipku. Pozvanom



pretplatniku zazvoni telefon, on se odazove dizanjem MTK, što poslužitelju signalizira žaruljica uz prednji utikač, te je razgovor s pozivajućim pretplatnikom moguć. Poslužitelj se isključuje iz uspostavljene veze vraćanjem odzivne tipke u neutralni položaj. Kada bilo koji od dva pretplatnika u vezi odloži MTK, upali se žaruljica uz par kabela koji ih povezuje, što je znak poslužitelju da je razgovor završen, te može raskinuti tu vezu dvaju lokalnih petlji.

Slika 7.5. Komutacijsko polje MTC

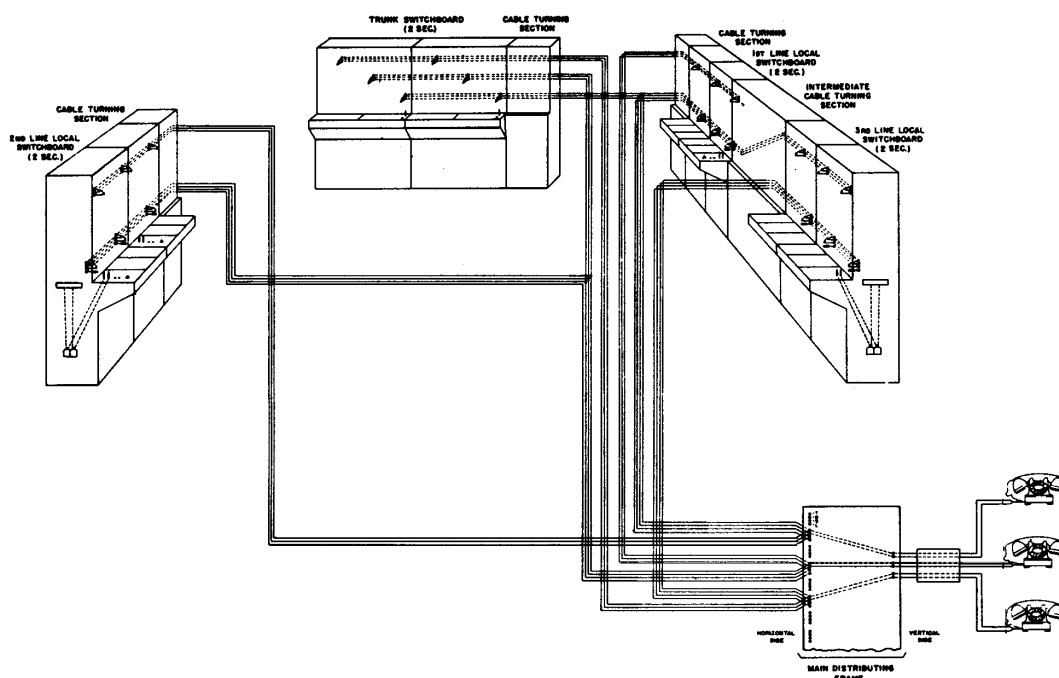
Dakle, ako raspolaže s npr. 18 pari spojnih kabela poslužitelj može odgovoriti na pozive npr. 120 “svojih” pretplatnika i uspostaviti vezu s bilo kojim od pretpostavimo, 10.000 pretplatnika u polju pozivnih utičnica. Očito je, da je kapacitet centrale 10.000 brojeva. Jedan poslužitelj može obslužiti 120 pretplatnika i uspostaviti samo 18 istovremenih veza. Za ukupno 10.000 pretplatnika na centrali trebati će $10.000/120=83.3$, znači 84 radna mjesta, na kojima će se ponavljati matrica s 10.000 pozivnih utičnica, znači ukupno 850.000 pozivnih i odzivnih utičnica. Zaista veliki brojevi, ali ipak manji od matrice sklopki sustava “svatko-sa-svakim”!



Međutim, kako uspostaviti vezu u slučaju da ima više od 10.000 pretplatnika na toj centrali, ili da je traženi pretplatnik na nekoj drugoj centrali u istom gradu ili negdje u svijetu?

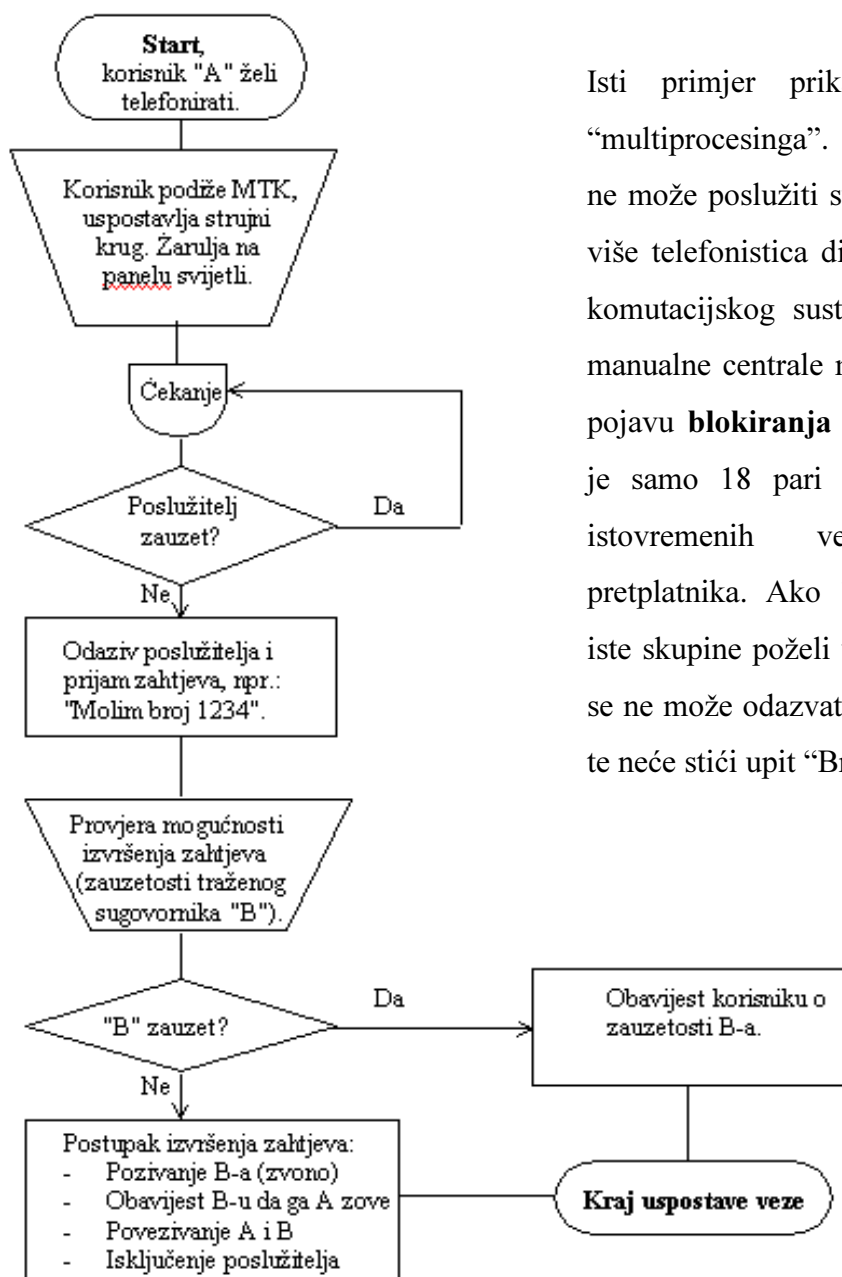
U tu svrhu služe **spojne** utičnice postavljene između skupina odzivnih i višestrukih utičnica. Posredstvom spojnih utičnica poslužitelj jednog panela može uspostaviti vezu s poslužiteljem drugog panela iste (**tandem**) ili druge telefonske centrale i dostaviti mu podatak o traženom broju, te se pozive proslijeđuje tim putem.

Slika 7.6. Križanje linija na MTC



Opisani primjer manualne komutacije ilustrira temeljne funkcije komutacijskog sustava i slijed događaja u uspostavi telefonske veze (Slika 7.7):

- Odgovor poslužitelja na zahtjev pretplatnika A da uspostavi komunikaciju s pretplatnikom B.
- Prijam telefonskog broja traženog sugovornika B.
- Provjera zauzeća B i obavještenje A-u o eventualnom zauzeću B-a.
- Povezivanje lokalnih krugova A i B (spoj - connection).
- “Zvonjenje” B-u i uspostave veze.
- Povrat u mirno stanje nakon završetka razgovora, raskid spoja A i B.



Isti primjer prikazuje i princip “multiprocesinga”. Jedan poslužitelj ne može poslužiti sve pretplatnike, te više telefonistica dijeli ukupni posao komutacijskog sustava. Na primjeru manualne centrale možemo zapaziti i pojavu **blokiranja** sustava. Na pultu je samo 18 pari kabela, znači 18 istovremenih veza za 120 pretplatnika. Ako 19. pretplatnik iz iste skupine poželi vezu, telefonistica se ne može odazvati na njegov poziv, te neće stići upit “Broj molim!”.

Slika 7.7. Slijed događaja u uspostavi telefonske komunikacije

Nema druge, nego strpljivo sačekati ili lupkati po kontaktu MTK u nadi da će se telefonisticu animirati žmiganjem “svoje” lampice. Blokiranje može nastati i zbog konačnog broja spojeva između panela radnih mjesta. Ako su svi spojevi već angažirani, pozivajući pretplatnik neće dobiti vezu, unatoč tome što mu se telefonistica javila i što joj je dao podatke o traženom broju. U suvremenim uvjetima, to znači da signal o zauzeću ne mora značiti samo to da je pozvani broj zauzet stoga što taj pretplatnik već razgovara, već i da su spojni organi centrale zauzeti te ne mogu prospojiti vezu od jednog polja do drugog.

Naglasili smo, da je jedan poslužitelj bio u mogućnosti izravno doseći samo 10.000 pretplatnika. Povezivanje većeg broja pretplatnika bilo je moguće prosljeđivanjem poziva preko spojnih linija do drugog poslužitelja u drugoj centrali, te je poziv tako išao preko dva komutacijska stupnja. Kako je u velikim gradovima broj pretplatnika rastao, centrale za samo 10.000 pretplatnika postale su premale. Preveliki broj zgrada s malim centralama u kojima se opslužuje samo po 10.000 pretplatnika bio bi razasut po gradu. Umjesto toga, dva su komutacijska stupnja objedinjena u jednu **tandem** centralu s kapacitetom većim od 10.000 linija. Poslužitelj stupnja A odazvao bi se pretplatniku, preuzeo traženi broj, uključio se na spojni vod do poslužitelja stupnja B koji je mogao dosegnuti traženi broj, proslijedio mu podatak o traženom broju, te je konačno poslužitelj stupnja B mogao uspostaviti traženu vezu.

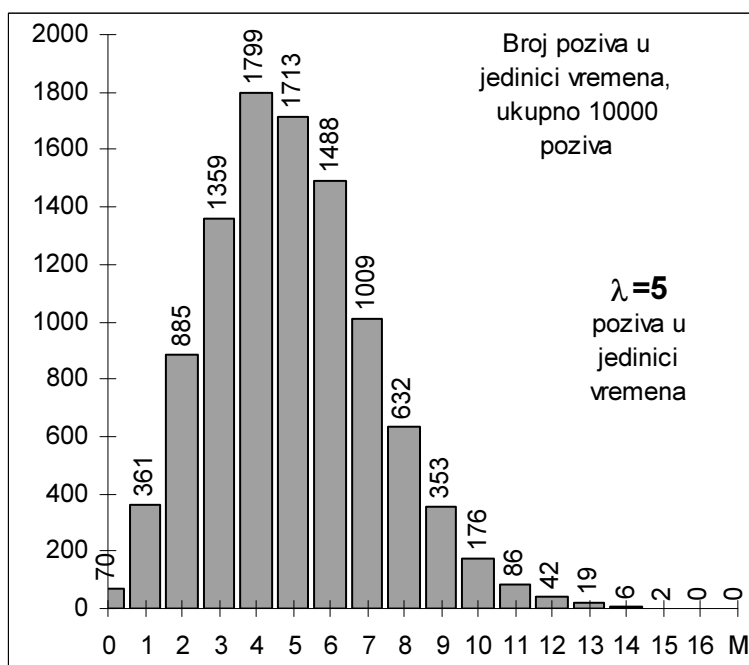
7.2 Blokade u komutacijskom sustavu

Višestupanjska komutacija u tandem centralama ili među njima povezivala je sve više pretplatnika, te su se inženjeri pozabavili problemom blokiranja i djelotvornijeg projektiranja komutacijskog sustava uopće. Pretpostavimo, da uz zadani broj pretplatnika i zadani intenzitet prometa (broj poziva određenog trajanja na sat) mijenjamo broj komutacijskih stupnjeva. Koliko opreme i koliko poslužitelja je neophodno na svakom komutacijskom stupnju? Ili, kako određenu količinu opreme i zadani broj poslužitelja iskoristiti za posluživanje što većeg broja pretplatnika?

U analizi problema blokiranja, najjednostavnije je slijedeće pitanje: Ako imamo M mogućih pozivatelja (pretplatnika) a samo N spojnih linija (npr. N pari kabela, $N < M$), koja je vjerojatnost blokade? Kada bi precizno znali kada će tko pozivati i koliko će razgovor trajati (determinirani sustav), tada bi mogli i precizno odrediti postotak blokiranih poziva. Umjesto toga, moramo razmotriti statističke pretpostavke ili podatke o broju poziva jednog

pretplatnika tijekom sata ili dana, kao i statističke podatke o trajanju razgovora, te će odgovor biti u obliku vjerojatnosti blokade određenog broja poziva.

Time su se pozabavili M. C. Rorty 1903. i E. C. Molina 1908. godine, obojica iz AT&T kompanije. Molina je bio prvi koji je pretpostavio da je nastanak određenog broja poziva u zadanom vremenskom intervalu po **Poissonovoj** radiobi. Bilježenjem prometa, bio je poznat srednji (prosječni) broj poziva tijekom određenog vremenskog intervala. Međutim, stvarni se broj poziva u tom vremenskom intervalu razlikuje od srednje vrijednosti. Poissonova razdioba daje nam vjerojatnost da upravo **n** poziva nastupi u tom vremenskom intervalu, za različite brojeve **n** (slika 4.3.), te tako dođemo do vjerojatnosti da se **x** poziva natječe za opsluživanje.



Slika 7.8. Histogram telefonskih poziva koji ilustrira Poissonovu razdiobu

Prema Poissonovoj razdiobi, ako je srednji broj poziva tijekom jedne minute λ , vjerojatnost da u jednoj minuti bude **n** poziva $P(n)$, jednaka je:

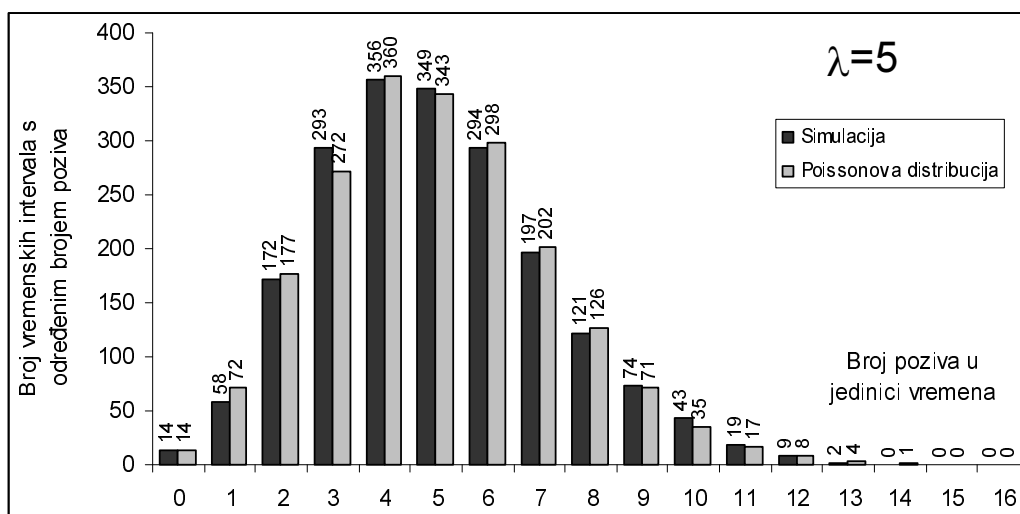
$$P(n) = \lambda^n \frac{e^{-\lambda}}{n!} \quad (7.1.)$$

Poissonova razdioba posljedica je jednostavne pretpostavke - podjednakih vjerojatnosti da netko od brojnih pozivatelja uputi poziv u bilo kojem trenutku. Rečeno matematičkim jezikom, vjerojatnost upućivanja poziva u neizmjereno kratkom vremenskom intervalu, jednaka je umnošku konstante i trajanje tog kratkog vremenskog intervala. Ako je trajanje intervala jednako nuli, neće biti upućen niti jedan poziv. Nula je granična vrijednost. Za bilo koji konačni vremenski interval, postoji mogućnost upućivanja jednog ili nekoliko poziva tijekom tog intervala.

Primjer 7.1. : U telefonskom sustavu tijekom 2000 minuta, registrirani su trenutci u kojima su pretplatnici dizanjem MTK inicirali proces uspostave veze (tablica). Zabilježeno je ukupno 10000 poziva. Odrediti intenzitet poziva λ , te grafički prikazati statistiku pozivanja i provjeriti statističku hipotezu kako se radi o Poissonovoj razdiobi.

$$\lambda = 10000 / 2000 = 5 \text{ poziva u minuti}$$

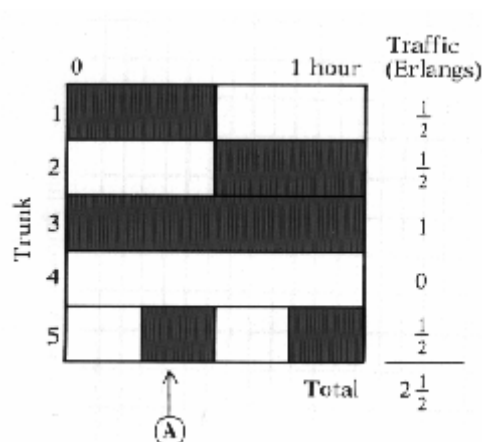
Minuta u kojoj je iniciran poziv	n - broj poziva u minuti	Broj minuta s n poziva	Poissonova razdioba, $\lambda=5$
0	0	14	14
1	1	58	72
1	2	172	177
1	3	293	272
1	4	356	360
1	5	349	343
2	6	294	298
2	7	197	202
2	8	121	126
2	9	74	71
3	10	43	35
3	11	19	17
3	12	9	8
3	13	2	4
3	14	0	1
3	15	0	0
4	16	0	0
4			
4			
4			
4			
4			
4			
4			
5			



Sličnost grafova ukazuje na utemeljenost pretpostavke o Poissonovoj razdiobi poziva.

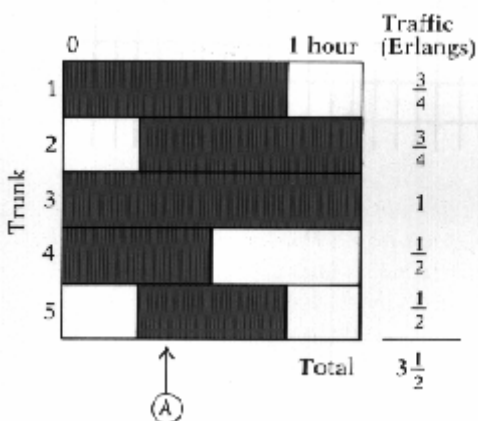
Godine 1918, danski inženjer telefonije **A. K. Erlang** objavio je rad o blokiranju u *The Post Office Electrical Engineers' Journal*. Poput Molina, i Erlang je pretpostavio da se radi o Poissonovoj razdiobi poziva. Molina je kao drugu, usvojio pretpostavku o jednakom trajanju svih razgovora, dok je Erlangova pretpostavka bila trajanje razgovora (zauzeće) s eksponencijalnom razdiobom, što znači da su kraći razgovori vjerojatniji od dugotrajnijih. Erlangova pretpostavka ne samo da je bliža stvarnoj situaciji, ona je i jednostavnija za analizu, jer je u tom slučaju broj razgovora koji se okončaju u nekom vremenskom intervalu srazmjernan trajanju tog intervala i aktualnom broju razgovora, te ne ovisi o trenutku kada su ti razgovori započeli. Drugim riječima, kod Erlangova modela s “eksponencijalnim padom” vjerojatnost da je razgovor (zauzeće) dulji od određenog vremenskog intervala, ne ovisi o trenutku kada je razgovor započet.

Nadalje, dok je Molina pretpostavio da je blokirani poziv zadržan jednako dugo kao i realizirani poziv i da je tek nakon toga “otpušten” zbog zauzeća opslužnih resursa, Erlang je pretpostavio da se blokirani pozivi odmah prekidaju, te da se ne ponavljaju. Izraz koji je razvio Erlang temeljem prethodnih pretpostavki (Erlang B) još je uvijek u primjeni u projektiranju telefonskih sustava.



Slika 7.9. Ilustracija prometa u Erlanzima

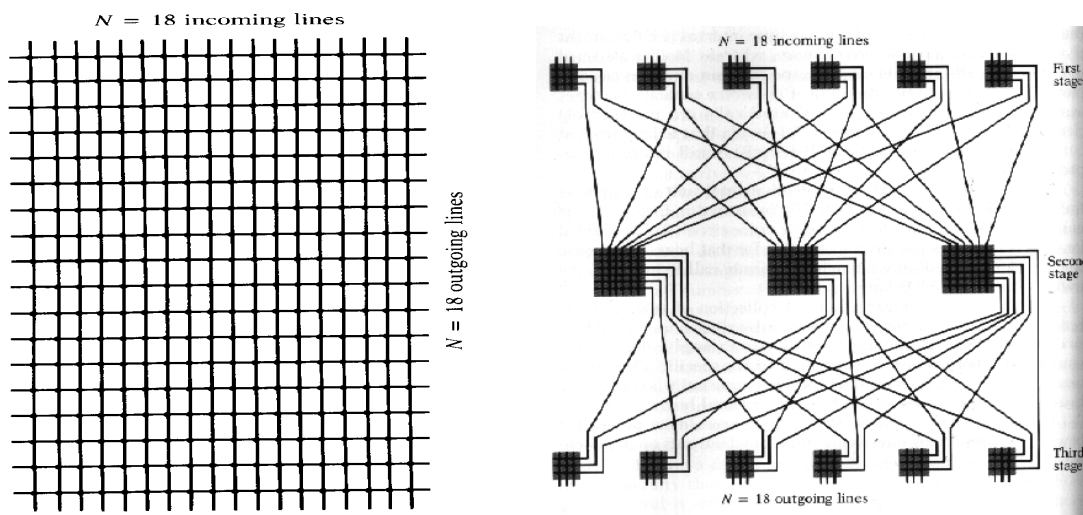
U čast A. K. Erlanga, temeljna jedinica telefonskog prometa nazvana je **Erl** (Erlang). Promet mjerjen Erlanzima je broj prometnih sati tijekom jednog sata. Jedan telefonski krug potpuno zauzet tijekom jednog sata daje promet od 1Erl tijekom tog sata. Ako je taj isti krug prenosio jedan 15-minutni razgovor tijekom tog sata, tada je ostvaren promet od 0,25 Erl.



Promet se mjeri za skupinu spojnih linija koje povezuju komutacijska središta (centrale) ili određeni broj pretplatničkih linija koji opslužuje ta centrala. Promet u Erlanzima jest prosječni broj istovremenih poziva posluženih komutacijskim središtem tijekom jednog sata. Odabrani sat obično je najprometniji sat u danu, **glavni prometni sat (GPS)**.

U projektiranju telefonskog sustava, cilj je odrediti broj sklopova ili broj ulaza i izlaza komutacijskog sustava (tzv. portovi), neophodnih za opsluživanje poznate količine prometa uz održavanje željene vjerojatnosti blokiranja. Vjerojatnostni model kojega su razvili Molina i Erlang daje rješenje pod određenim pretpostavkama. Taj model obično predviđa podržani promet u Erlanzima za različite vjerojatnosti blokiranja i različite brojeve spojnih linija ili portova u grupama priključaka.

Usporedimo li dvije komutacijske mreže (Slika 7.10) možemo vidjeti, kako djelotvorno projektiranje može umanjiti troškove. Najjednostavnija komutacijska mreža (Slika 7.10.a.) povezuje N dolaznih i N odlaznih linija posredstvom $N \times N$ matrice, u kojoj se svaka od ulazna linija sječe sa svakom izlaznom, a sklopke su smještene u točkama-sjecištima. Broj sklopki u takvoj mreži je N^2 , ako je $N=18$, sklopki će biti $N^2=324$. Komutacijska mreža s više stupnjeva traži manji broj sklopki. Na Slika 7.10.b. prikazana je mreža s jednakom brojem ulaza i izlaza, ali s tri stupnja i sa samo 216 sklopki. Prvi stupanj povezuje 18 ulaznih linija sa 6 matrica 3×3 . Svaka od tih matrica ima 3 ulaza i 3 izlaza. Slična je i na izlazu, gdje je 6 matrica 3×3 koje su spojene na 18 izlaza komutacijske mreže. Drugi stupanj tvore 3 matrice 6×6 . Broj sklopki po stupnjevima $6 \times 3 \times 3 = 54$, $3 \times 6 \times 6 = 108$, $6 \times 3 \times 3 = 54$, ukupno 216, što je znatno manje od 324 u 18×18 matrici.



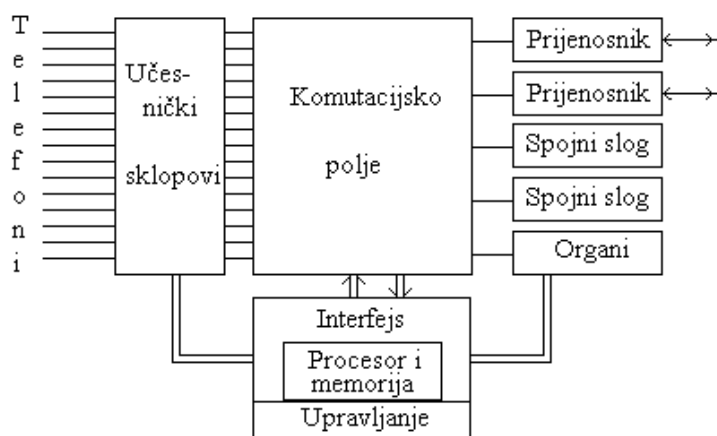
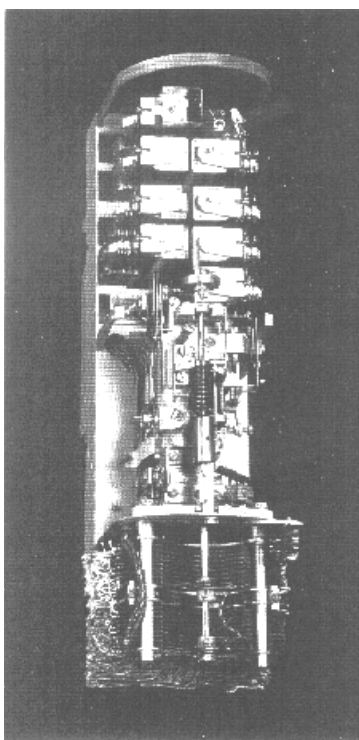
Slika 7.10. Komutacijske mreže bez blokiranja (a) s jednim stupnjem i (b) s tri stupnja

Moguće je konstruirati i drugačiju tro-stupanjsku mrežu čak i s manje sklopki. Npr.: tri matrice tipa 6×2 u prvom stupnju, jedne 6×6 matrice u drugom stupnju, te sa tri 2×6 matrice u trećem stupnju, ukupno 108 sklopki.

Sve opisane mreže povezuju 18 dolaznih sa 18 odlaznih linija. Prva, jednostupanjska mreža je **neblokirajuća** jer može povezati bilo koji ulaz s bilo kojim slobodnim izlazom neovisno o unutarnjem stanju mreže. Prva trostupanjska mreža također je neblokirajuća, ali staze povezivanja određenog ulaza i izlaza različite su i ovise o prethodno uspostavljenim vezama. **Druga mreža s tri stupnja je blokirajuća.** Ako, npr. po tri ulaza prve 6x2 matrice dolaze zahtjevi za uspostavu veze, samo će prva dva biti opslužena jer matrica ima samo dva izlaza. Određeni postotak blokiranja prihvatljiv je u situacijama kada se ne mora sve pozive istovremeno zadovoljiti, te su praktična rješenja kompromis vjerojatnosti blokiranja i broja komutacijskih sklopki.

7.3 Automatska komutacija

Manualna komutacija bila je spora i zahtijevala je veliki broj poslužitelja. Suvremeni komutacijski sustavi su automatski, ali su temeljne ideje i neki od problema ostali isti. Komutacijski sustav i dalje obavlja dvije skupine funkcija. Upravljački dio (Slika 7.11) zamjenjuje poslužitelja, a komutacijska mreža obavlja funkciju uspostave fizičkog komunikacijskog strujnog kruga, koju su u manualnim sustavima imali utikači, kabeli i utičnice komutacijskog polja. Skoro sve komutacijske mreže su višestupanjske, pažljivo projektirane kako bi primjenom što manjeg broja komutacijskih preklopki dale prihvatljivu razinu blokiranja.

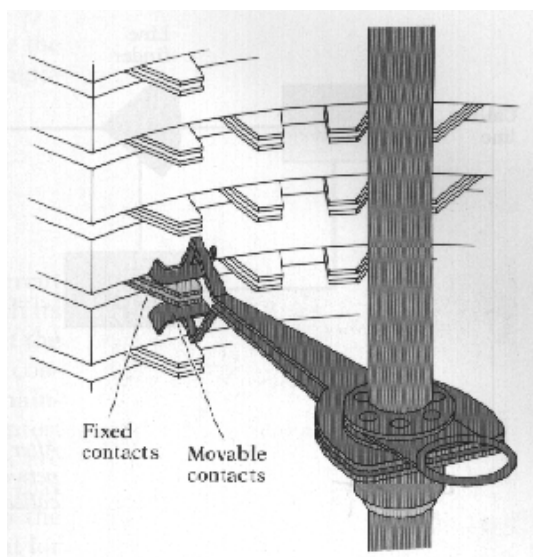
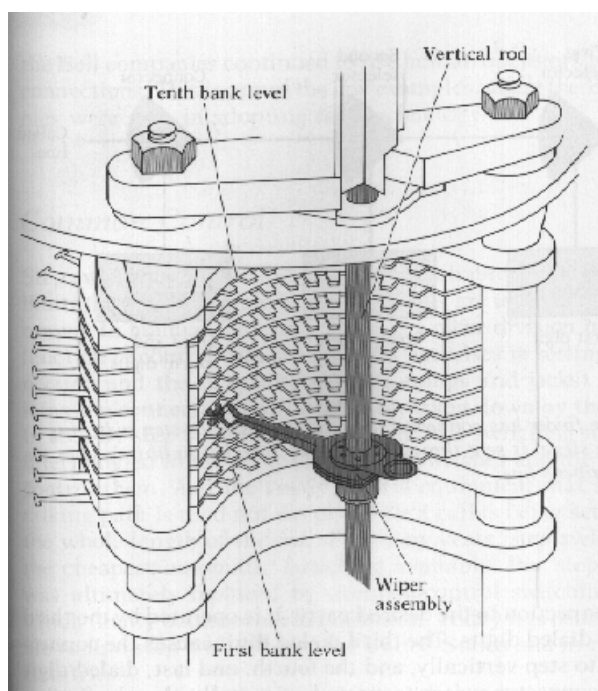


Slika 7.11. Blok-shema automatskog komutacijskog sustava

Slika 7.12. Strowgerov koračni birač

Suvremeni automatski komutacijski sustavi imaju visoki stupanj fleksibilnosti i preglednosti organizacije koji su bili svojstveni manualnim sustavima sa čepovima i čepištima. Današnji su sustavi međutim, rezultat dugotrajnog razvoja, te su u odnosu na prvotne, izvedbom veoma različiti. Ostala su dva bitna dijela: Upravljačka funkcija povezana matricama sklopki koje povezuju govorne kanale.

Nitko nije očekivao da će automatska komutacija riješiti sve probleme. Na početku razvoja, cilj je bio pronaći zadovoljavajuća sredstva za ubrzanje komutacijskih procesa uz smanjenje troškova za radnu snagu. Godine 1891, Almon B. Strowger, poduzetnik iz Kansas Citya, Missouri, patentirao je automatski komutacijski sustav koji je zaista i izrađen 1892. godine, te funkcionirao slijedeće četiri godine. Prva praktična telefonska centrala, nazvana “korak po korak” ili kraće “koračna” nastala je na Strawgerovim idejama. Godine 1896. suradnici Strawgera izumili su sličan rotirajući birač, koji je omogućavao pozivatelju da izravno komutacijskom sustavu daje upute, bez posredovanja ljudskog poslužitelja.

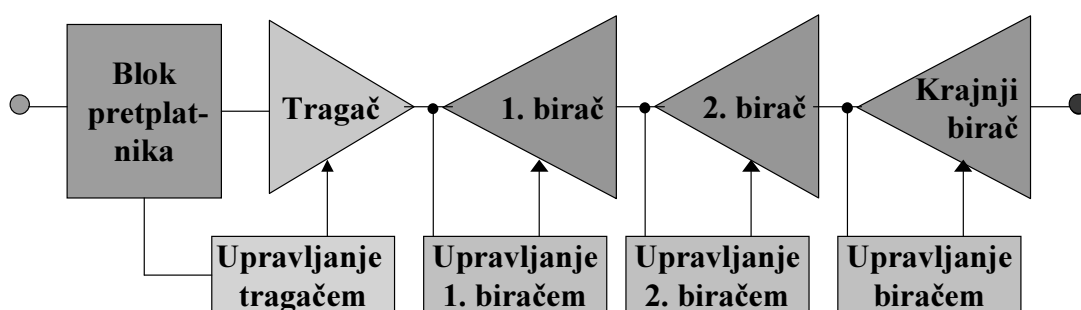


Slika 7.13. Komutacijsko polje koračnog birača

Koračni birač (Slika 7.12 i Slika 7.13) imao je pokretni par metalnih kontakata, tzv. “ruka” pričvršćen za vertikalnu polugu i 10 polukružnih “katova” nepomičnih metalnih kontakata sa po 10 pari kontakata na svakom katu (ukupno 100 pari kontakata na jednom biraču). Biračkim impulsima određuje se pomicanje birača. Slijed od 1 do 10 biračkih impulsa pomiče polugu do željenog kata, a drugi slijed od 1 do 10 impulsa zakreće polugu tako da se pomični kontakti ruke spoje sa željenim parom nepomičnih kontakata. Tako, nakon nekoliko

koraka podizanja i zakretanja ručice birača, moguće je spojiti se na bilo koji od 100 pari nepomičnih kontakata. U centrali sa 100 pretplatnika (brojeva) koračni birač pridjeljen svakom pretplatniku i upravljan s dva slijeda električnih impulsa, može povezati pretplatnika sa bilo kojom od 100 izlaznih linija birača. Nezgodna je, što koračni birač djeluje s puno mehaničkog gibanja, a klizanje pomičnih kontakata preko nepomičnih izaziva njihovo trošenje i generira impulsne smetnje.

U centralama većeg kapaciteta, prvi koračni birač povezuje pretplatnika s drugim biračem i tako dalje dok pretplatnik konačno ne dosegne željenu izlaznu liniju. Kao primjer (Slika 7.14), za povezivanje pretplatnika s jednim od 10.000 ostalih pretplatnika (numeriranih sa 0 do 9999) posredstvom komutacijskog sustava korak-po-korak, potrebno je biranje sa četiri znamenke koje upravljaju pomicanje četiriju stupnjeva koračnih birača. Kada pozivatelj digne MTK svojeg telefonskog aparata, centrala “osjeća” zatvaranje strujnog kruga, reagira na protjecanje struje tako što se pokreće tzv. “tragač”. To je također koračni birač, koji u dva slijeda koraka: vertikalno pa zatim horizontalno, pronade liniju s koje dolazi zahtjev za uspostavom veze. Nakon što je ustanovljeno tko je pozivatelj, tom se linijom upućuje “znak slobodnog biranja” (eng. *dial tone*). Tragač je povezan s prvim biračem. Pretplatnik – pozivatelj bira prvu znamenku traženog broja, brojčanik njegovog telefonskog aparata odašilje toliko impulsa, te se za isti broj vertikalnih koraka pomiče prvi birač, a nakon toga samostalno se pomiče u horizontalnom smjeru dok ne pronade svoj prvi slobodni izlaz do drugog biračkog stupnja. Druga odabrana znamenka na sličan način pomiče drugi birački stupanj, a tek treći stupanj konačno dolazi do traženog broja pomicanjem vertikalno i horizontalno upravljani biračkim impulsima predzadnje i zadnje znamenke broja pozivanog pretplatnika. Ako je linija traženog pretplatnika zauzeta, pozivatelju se upućuje signal zauzeća, a ako je slobodna, pozvanom se upućuje signal za zvono.

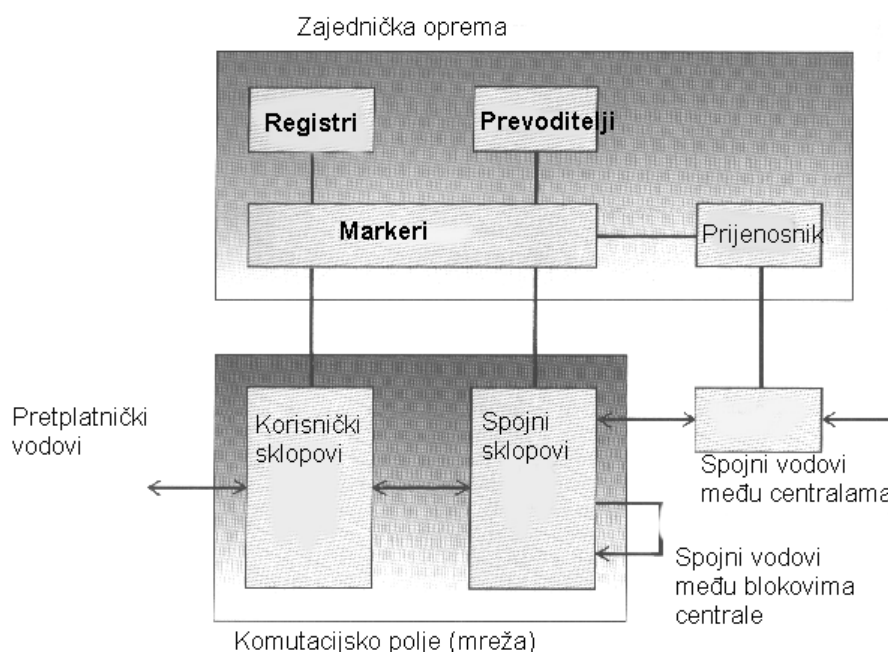


Slika 7.14. Uspostava veze u koračnom sustavu s 10.000 pretplatnika

Koračni birači upravljani su releima koji su sastavni dio birača. Upravljanje je samo u cilju uspostave tražene veze i ne može biti iskorišteno za bilo koji drugi poziv. Koračni komutacijski sustavi nisu osobito djelotvorni jer su sjedinjene upravljačka funkcija (kojom se uspostavlja veza) i komutacijska mreža (koja uspostavi spoj dvaju pretplatnika).

7.3.1 Zajedničko upravljanje

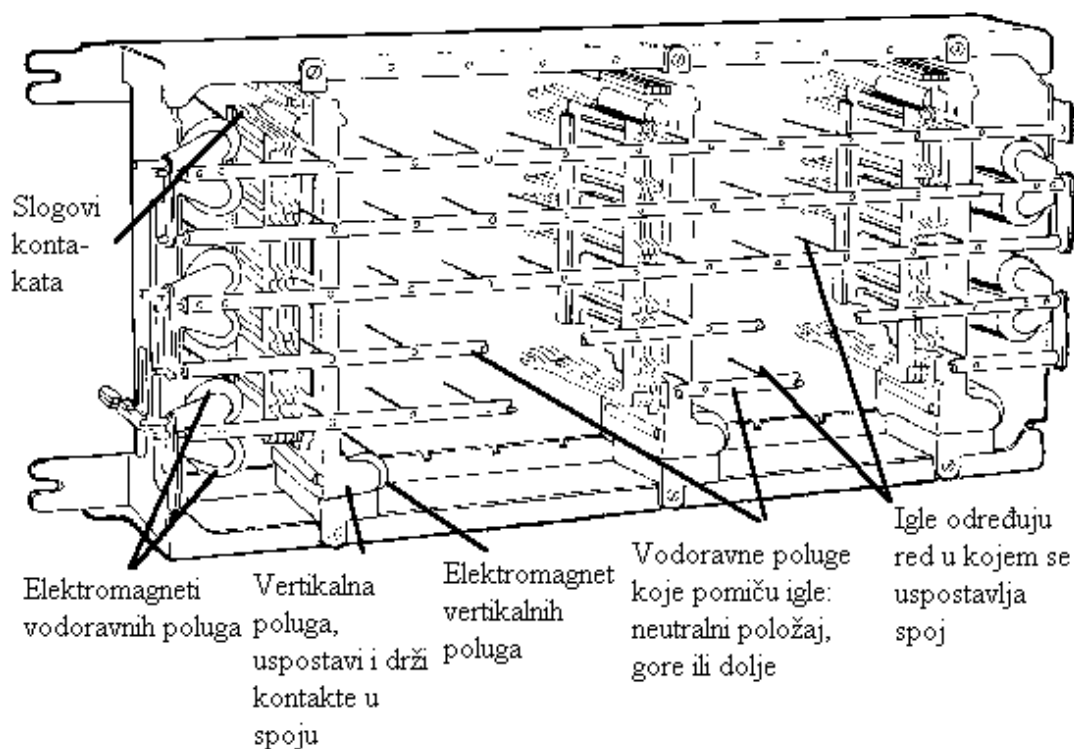
Koračna komutacija potvrdila je svoju nisku cijenu i pouzdanost, ali je imala i skrivenih (inherentnih) ograničenja. Jedna je poteškoća dolazila iz međusobno izmiješanih “mišića” (komutacijskog polja) i “mozga” (upravljanja). U manualnim komutacijskim sustavima bila je jasna podjela funkcije upravljanja koju je obavljao poslužitelj tijekom uspostave veze i komutacijske mreže u obliku polja utikača i utičnica (čepova i čepišta) kojima se održavao spoj dok ga poslužitelj nije raskinuo. U koračnim sustavima upravljanje i komutacijska mreža isprepleteni su u složenim koračnim biračima i relejima koji njima upravljaju. Skupi upravljački sklopovi koji služe tijekom uspostave veze, zauzeti su i kasnije tijekom razgovora, kada su praktično neiskorišteni i stoje u miru. Više desetljeća koračna je komutacija bio najjeftiniji raspoloživi sustav. Relativno nedavno, koračni su sustavi zamijenjeni komutacijskim sustavima sa zajedničkim upravljanjem, čim su ti, razvojem tehnologije, postali ekonomičniji. Danas je skoro nemoguće pronaći aktivne koračne sustave.



Slika 7.15. Blok-shema sustava sa zajedničkim upravljanjem

U sustavima sa zajedničkim upravljanjem, ponovo imamo jasno odvojene funkcije upravljanja komutacijom i samo komutacijsko polje. Složeni upravljački sklopovi koji zamjenjuju poslužitelja u manualnim sustavima, koriste se samo u fazi uspostave i raskidanja veze, a preostalo vrijeme na raspolaganju su ostalim pretplatnicima. Budući se upravljački sklopovi koriste kratkotrajno u odnosu na trajanje jedna veze, može ih biti relativno mali broj u jednom komutacijskom sustavu, te mogu biti složenije građe i fleksibilnije funkcionalnosti.

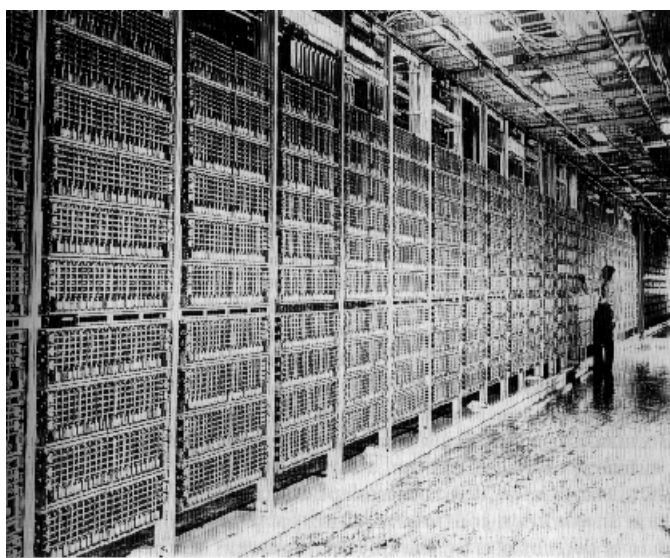
Prvi su sustavi zajedničkog upravljanja bili elektromehanički, sastavljeni od relea i drugih prekidača pogonjenih elektromagnetima i elektromotorima. Opći principi zajedničkog upravljanja preživjeli su i u elektroničkim komutacijskim sustavima (Slika 7.17). Kada pretplatnik podigne MTK (*off hook*) pretplatnička linija povezuje se na polazni **registar**, koji “sluša” i “pamti” birani broj pohranjivanjem svih znamenaka biranog broja. Za povezivanje s željenim brojem, mora se zatvoriti određena skupina sklopki. Uređaj nazvan **marker** određuje koje su to sklopke koje treba zatvoriti. Nakon provjere zauzetosti pohranjenog broja, marker pronalazi slobodnu stazu kroz komutacijsku mrežu, od pozivatelja ka pozvanom, te nakon toga generira signale koji zatvaraju odgovarajuće sklopke. Ako marker ustanovi da je birani broj izvan te centrale, zaposjeda se slobodni izlazni kanal, te uređaj nazvan **prijenosnik** odašilje birani broj preko tog kanala.



Slika 7.16. Krossbar sklopka

Umjesto koračnih birača, sustavi sa zajedničkim upravljanjem koriste međusobno povezane prekidačke matrice. Matrični prekidač sastavljen je od križišta (eng. *crosspoints*) ulaznih i izlaznih linija. Jednostavni kontakti na križištima tvore spojeve. Istom matricom moguće je istovremeno ostvariti više staza.

Elektromehanički sustavi obično koriste krossbar prekidače sa po 20 ulaza i 10 izlaza. Prvi krossbar sustav Bell N°.1 proradio je 1938. godine. Slični su sustavi dalje razvijani, te 1974. imamo AT&T krossbar sustav N°.3 namijenjen ruralnim područjima. Tih godina, samo su trećinu linija Bell-ovog sustava opsluživali koračni sustavi. Ostatak su pokrivali krossbar sustavi i novi, elektronički komutacijski sustavi.



Slika 7.17. Komutacijski sustav N°.5

U cilju korištenja fleksibilnosti automatskih komutacijskih sustava sa zajedničkim upravljanjem, provedena su temeljite matematičke studije višestupanjskih komutacijskih mreža. U tim su istraživanjima povezivani različiti komutacijski stupnjevi s konačnim brojem prijenosnih linija. U kompliciranijim je arhitekturama problem blokiranja znatno složeniji od onih na koje se primjenjuje Erlangova B- formula.

7.3.2 Prevođenje

Mogućnost pohranjivanja cijelog biranog broja u sustavima sa zajedničkim biranjem, neka vrst prevođenja može biti od velike praktične koristi, kako korisnicima sustava, tako i telefonskim kompanijama. Pretplatnicima je moguće pridijeliti brojeve neovisno o fizičkoj lokaciji posljednjeg komutacijskog stupnja na kojega su povezani. Dio komutacijskog sustava zadužen je za **prevođenje** biranog broja iz telefonskog imenika u broj prema kojemu se pronalazi staza do željenog pretplatnika. Tako je moguće, da se pretplatnik preseli, a da zadrži stari pozivni broj.

Takav je sustav povoljniji i za telefonske kompanije jer omogućava miješanje pretplatnika s velikim prometnim zahtjevima (poduzeća i slično) i pretplatnika s malim prometom (privatne osobe). U tom slučaju blokiranje je manje vjerojatno.

7.4 Elektroničko upravljanje u komutacijskim sustavima

U prvim komutacijskim sustavima sa zajedničkim upravljanjem, suvremenim rječnikom, upravljački podsustav mogli bi nazvati: ožičeno (*hard-wired*), višeprosorsko (*multiprocessor*), namjensko (*special-purpose*), relejsko računalo. **Ožičeno**, označava da je računalo “programirano” lotanim vodičima koji su povezivali odgovarajuće priključke različitih sklopova. Elektromehanički procesor nije mogao raditi dovoljno brzo da bi mogao opslužiti sve zahtjeve za uspostavom veze, za obavljanje iste funkcije u sustavu je bilo nekoliko procesora, te otuda i naziv **multiprosorski**. Uređaji su tragači linija koji traže pretplatnika koji je zahtijeva uslugu centrale, registri koji prihvataju znamenke biranog broja i prosljeđuju ga markeru u izravnom obliku ili prevedenog iz pretplatničkog u komutacijski broj, markera koji primaju takav broj, odabiru slobodnu stazu kroz komutacijsko polje i dostavljaju povratnu informaciju o uspostavljenoj stazi. Računalo je nazvano **namjensko** jer je projektirano za zatvaranje odgovarajućih sklopki, a ne za zbrajanje, množenje, pretraživanje podataka i slično, čime se bave računala opće namjene. Konačno, **relejski** znači da je taj računalo sličan upravljački uređaj sačinjen uglavnom od elektromagnetskih releja.

Kada su tranzistori i memorije s magnetskim jezgicama učinile računala opće namjene pouzdanim i razumno jeftinim, prevladala su nastojanja koja nisu bila ostvariva u vrijeme vakuumske elektronike – **elektronička komutacija**. Početna je ideja bio komutacijski sustav bez metalnih kontakata, ili sa malo njih. U prvom, većem elektroničkom komutacijskom sustavu ESS N°.1, govorne kanale uspostavljali su metalni prekidači posebne izvedbe, koji su se otvarali ili zatvarali strujnim impulsima. Prekidačima je upravljao uređaj

kojega bi mogli označiti kao elektroničko digitalno računalo opće namjene.



Slika 7.18. Upravljačka konzola AT&T ESS N°.1

Govorne staze temeljene na metalnim vodičima u sustavu ESS N°.1 odabrane su prvenstveno zbog aktualne tehnologije telefonskih sustava uključujući i same pretplatničke aparate. Telefonsko zvono zveni kada po pretplatničkoj liniji stigne signal frekvencije oko 20 Hz i amplitude reda 90V. Takav

bi napon uništio većinu tranzistorskih krugova toga vremena, ali ne i metalne kontakte komutacijske matrice. Ugljenom mikrofonom telefonskog aparata neophodno je napajanje strujom 40 do 50 mA, što je velika struja kada su tranzistori u pitanju. Napon napajanja CB aparata iz centrale je 48V do 60V, što je također previše za germanijeve tranzistore.

Osim toga, u lokalnom telefonskom prometu uobičajeno je dvožično povezivanje, što znači da se prijenos govora mora odvijati u oba smjera, bez znatnijeg slabljenja signala. To je moguće s metalnim kontaktima. Ako bi i sama komutacijska mreža bila elektroničke izvedbe, temeljne komponente bili bi dvosmjerni, simetrični elektronički prekidači s malim gubicima u prijenosu signala. Druga je mogućnost, da u komutacijskom dijelu imamo prijelaz dvo/četvero žični i pojačala kojima bi nadoknadili slabljenje signala. U ESS N^o.1 sustavu ova je dilema riješena u korist metalnih kontakata upravljanih elektroničkim računalom. Upravljačke su funkcije **programirane (SPC)** umjesto ožičenih, što je značilo da se mnogobrojne funkcije moglo dodati ili mijenjati brže i jednostavnije, izmjenom programa a ne sječenjem i lotanjem vodiča. Ujedno, to je postavilo i potpuno nove zahtjeve u pisanju i izmjenama velikih računalnih programa.

Kada je ESS N^o.1 izrađen, multiprocesiranje više nije bilo bitno. Računalo je radilo dovoljno brzo te je moglo odgovoriti na zahtjeve svih pozivatelja. Kako bi osigurali pouzdanost sustava, ugrađena su dva posve jednaka računala. Oba su stalno bila u pogonu i međusobno provjeravala ispravnost rada. Postavljanje svih funkcija za sve pretplatnike u program jednog računala opće namjene, tražilo je sekvencijalni program bez paralelnih procesa, kako u smislu složenosti, tako i pouzdanosti. Logički i memorijski sklopovi računala postajali su sve jeftiniji, te se u slijedećim generacijama ESS jednostavnije, često ponavljane funkcije moglo povjeriti posebnim sklopovima sa svojim procesorima. Središnje računalo upravljačkog podsustava zadržalo je složene funkcije, provjeru i samo-provjeru, kako bi se imao stalni uvid u ispravnost sustava.

Nakon rješavanja početnih problema, ESS N^o.1 se pokazao kao veliki uspjeh. Zauzimao je manje prostora, trošio manje energije za napajanje i tražio manje održavanja. Izmjene programa omogućile su uvođenje novih, složenijih komutacijskih funkcija. Iza ESS N^o.1 slijedili su i drugi modeli temeljeni na računalnom upravljanju komutacijskom matricom metalnih kontakata.

7.5 Vremenska komutacija - TDS

Problemi s kombiniranjem elektroničkog upravljanja i elektromehaničkih prekidača poticali su dalji razvoj tehnologije. Pojavom LSI krugova i novih, CMOS memorijskih čipova, cijene računala znatno su se smanjile, dok se cijene elektromehaničkog dijela komutacije nisu mijenjale. Jasno je, da je za znatno smanjenje cijene komutacijskih sustava bilo neophodno oba dijela centrale: upravljački i komutacijski, realizirati istom, elektroničkom, LSI tehnologijom. LSI krugovi pogodniji su za binarne digitalne signale negoli za analogne signale, što je bio poticaj zbližavanju PCM tehnologije digitalnih prijenosnih sustava i komutacije.

PCM (8.000 uzoraka u sekundi, 8 bitna kvantizacija i kodiranje = 64 kb/s digitalni informacijski protok) i vremenski multipleks (TDM) omogućavaju prijenos velikog broja istovremenih telefonskih razgovora po istom kanalu u ciklički ponovljivim vremenskim intervalima. Za korištenje pogodnosti PCM-a moralo se je razviti novu vrstu komutacije, nazvanu **vremenska komutacija** (*time-division switching-TDS*) kao razliku spram prostorne komutacije (*space-division switching-SDS*) prethodnih sustava.

Prostorna komutacija uspostavlja različite i električno razdvojene govorne staze tijekom cijelog trajanja razgovora. Tako u osam-stupanjskoj mreži, svaki poziv zauzima po osam prekidača. U slučaju vremenske komutacije, po istoj stazi imamo više govornih kanala, ali u različito vrijeme. Staza se tada naziva **sabirnica** (*bus*) i dostupna je većem broju korisnika. Sklopke povezuju sugovornike na sabirnicu. Prekidači su zatvoreni kratkotrajno, tek toliko da pošalju osam impulsa jednog PCM okteta, a zatim se zatvaraju redom prekidači drugih pretplatnika spojenih na istu sabirnicu itd. Svakom pretplatniku sabirnica je na raspolaganju 8.000 puta u jednoj sekundi.

Usporedimo sada ekstremne primjere dvaju sustava: prostornog i vremenskog. U jednostupanjskom prostornom sustavu, za komutaciju 10.000 pretplatnika potrebno je skoro 50 milijuna prekidača. U jednostavnom sustavu s vremenskom komutacijom trebali bi samo 10.000 prekidača, za svakog pretplatnika po jednog, te zajedničku sabirnicu za sve. Prekidače bi trebalo uključivati u parovima, tako da bi pozivatelj i pozvani bili spojeni na sabirnicu u istom vremenskom intervalu.

Ekonomске prednosti TDS sustava bile su očite i ranije, samo je bilo neizvjesno pitanje praktične izvedbe. Pokusni TDS PCM sustav načinjen je u Bellovim laboratorijima 1958. godine. Značajan je doprinos jednog od autora tog sustava, Johna Piercea, koji je

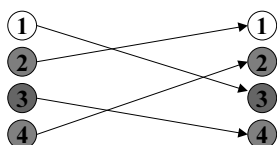
nagovorio kolege iz njegovog odjela, da zapostave rad na razvoju elektroničkih sustava prostorne komutacije kako bi se usredotočili na TDS. Skoro istovremeno, ranih 1960-tih elektronički digitalni komutacijski sustav na sveučilištu u Tokiu razvijen je pod vodstvom Hiroshi Inosea.

7.5.1 Razmjena vremenskih odsječaka

Vremenska komutacija koristi govorni signal u digitalnom, PCM obliku. U prijenosu, pa i u komutaciji, najmanja je cjelina jedan **oktet** (jedan uzorak kvantiziran i kodiran sa 8 bita). Na istu sabirnicu upućuje se više PCM govornih kanala. Ako je u pitanju 128-kanalni sustav, 128 okteta odašilje se sabirnicom tijekom 1/8000 s. Skupina od 128 okteta naziva se okvir (*frame*). Na strani prijamnika, svaki se vremenski interval koji sadrži jedan oktet, upućuje na odgovarajući izlazni kanal.

PRVI . 1
DRUGI 2
TREĆI 3
ČETVR 4

...PDTČRRREUVETIGČV.IIR...



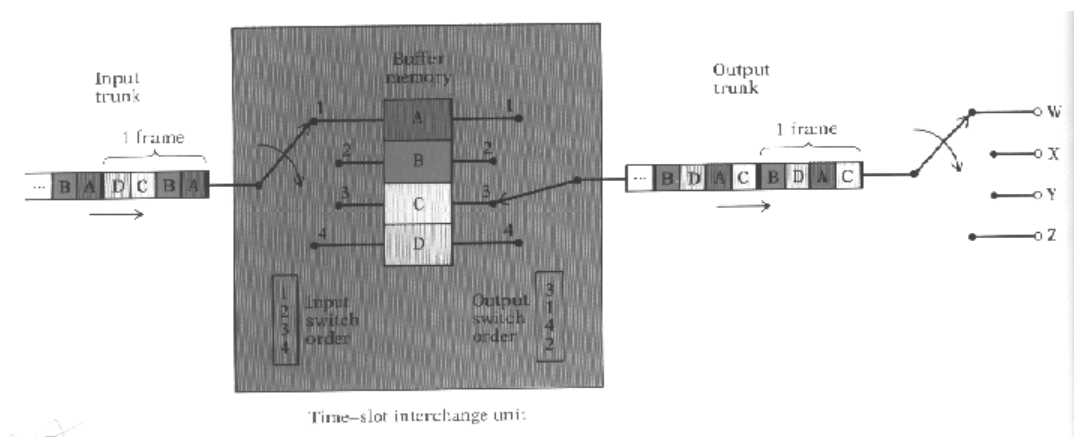
2 DRUGI
4 ČETVR
1 PRVI .
3 TREĆI

Slika 7.19. Princip

vremenske komutacije

U sustavima vremenske komutacije, blokiranje ima nešto drugačiji smisao negoli u prostornim sustavima. Da

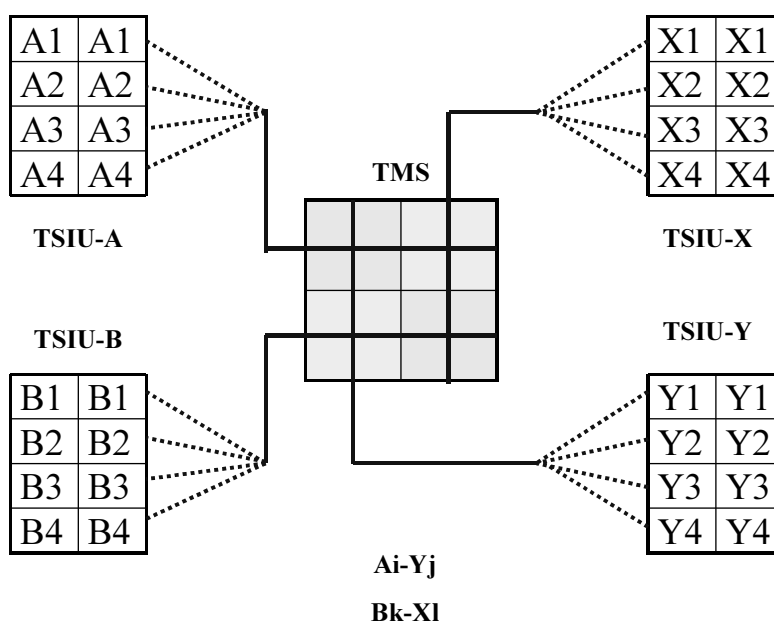
bi razgovor prošao sabirnicom, moraju biti na raspolaganju slobodni vremenski odsječci na svim komutacijskim stupnjevima i to u isto vrijeme. Inoseovo otkriće razmjene vremenskih odsječaka značajan je napredak u smanjenju blokiranja u TDS sustavima.



Slika 7.20. Blok za razmjenu vremenskih odsječaka TSIU

Ako se na prijenosnom kanalu razmjenjuju vremenski odsječci, to znači da će ulazni krug biti povezan s nekim drugim izlaznim krugom. Razmjena vremenskih odsječaka vrsta je TDS-a i odvija se u uređaju (slika 4.18.) za razmjenu vremenskih odsječaka TSIU (*time-slot interchange unit*), koji je u biti privremena memorija (*buffer*). Okteti ulaze u bafer u normalnom redoslijedu, ali odmah zatim, izlaze u izmijenjenom redoslijedu. Okteti su preraspoređeni, te na izlazu okteti odlaze na kanale različite od polaznih. Privremena memorija je poluvodička, a tranzistorske sklopke upisuju i čitaju oktete upravljane procesorom.

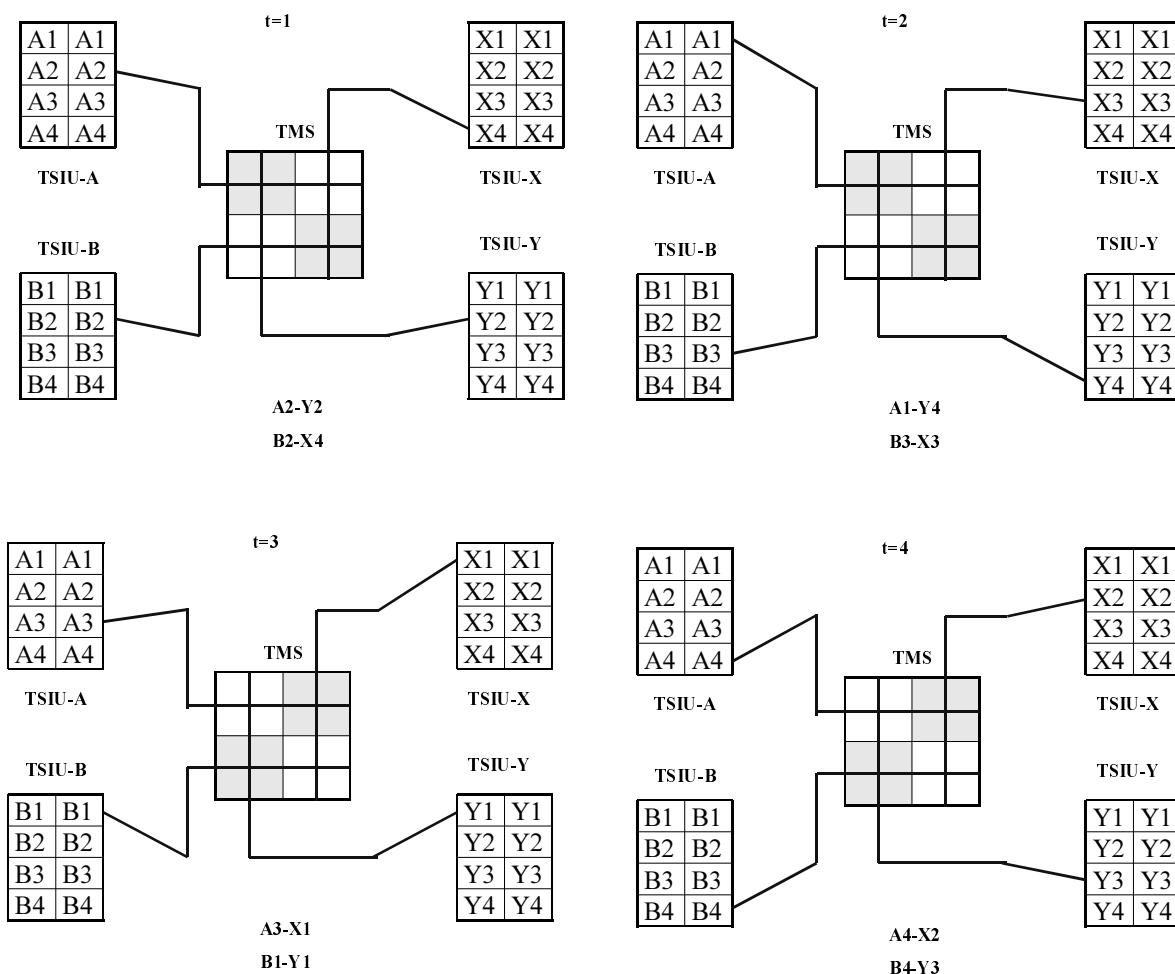
Nepraktično bi bilo graditi TDS sustav samo s jednim TSIU. U praksi, sustavi imaju više stupnjeva, sa TDS i SDS blokovima. Za TDS koriste se TSIU blokovi. Za prostornu komutaciju (SDS *Space Division Switch*) koriste se matrice brzih elektroničkih prekidača koje se brzo rekonfiguriraju, kako bi usmjerile oktete jedne TSIU u neku drugu TSIU. Tako primijenjena prostorna komutacija naziva se vremensko-prostorna komutacija (*time-multiplexed, space-division switch* - TMS).



Slika 7.21. Digitalna komutacija sastavljena iz blokova vremenske i prostorne komutacije

Shema na Slika 7.21 prikazuje jednostavni TDS sustav. Digitalni TDM ulazni trunk A prenosi 4 kanala: A1, A2, A3 i A4. Ulaz B ima također 4 kanala: B1, B2, B3 i B4. Dva su izlaza iz komutacije: X i Y, svaki sa po 4 kanala. Četiri okteta ulaza A dolaze u TSIU-A u normalnom redoslijedu i pohranjuju se u privremenu memoriju. Slično je i sa oktetima ulaza B. Okteti pohranjeni u baferima A i B čitaju se u drukčijem redoslijedu od onoga pri upisivanju. Izlazi TSIU-A i TSIU-B vezani su na ulaze TMS matrice 2x2, čiji su izlazi

povezani na TSIO-X i TSIU-Y, u koje okteti dolaze u redoslijedu koji odgovara željenom komutiranju kanala.



Slika 7.22. Rekonfiguracija komutacijskog sustava tijekom jednog TDM ciklusa

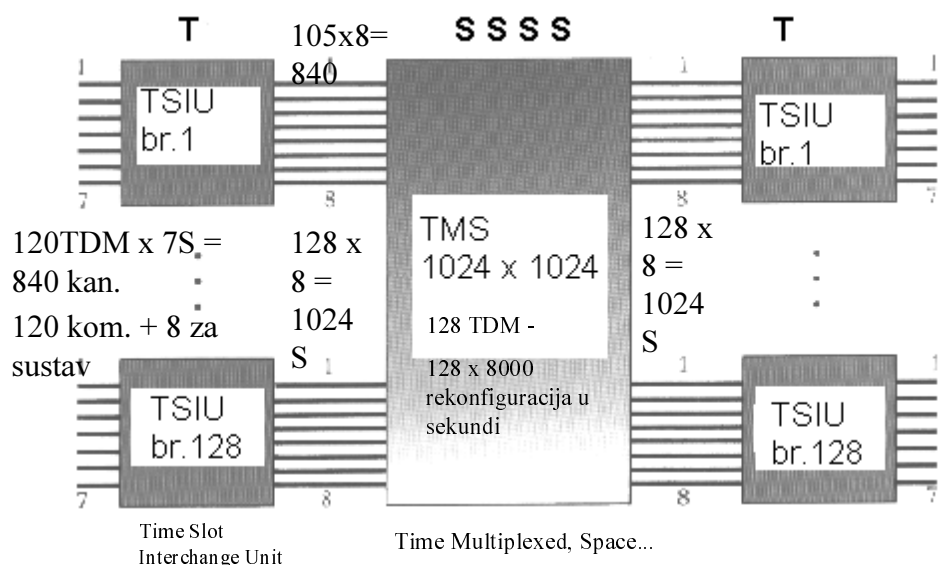
TMS se rekonfigurira četiri puta u svakih 1/8000 s. Pogledajmo prvi vremenski interval. Oktet A2 iz TSIU-A i oktet B2 iz TSIU-B komutiraju se u TMS tako da A2 ide u drugu lokaciju bafera TSIU-Y, a B2 ide u četvrtu lokaciju bafera TSIU-X. Okteti izlaznih TSIU čitaju se u normalnom redoslijedu, te je A3 povezan sa X1, B1 sa Y1 i tako dalje. Ostvarenu komutaciju možemo prikazati na slijedeći način:

A2	→	Y2		B2	→	X4
A1	→	Y4		B3	→	X3
A3	→	X1		B1	→	Y1
A4	→	X2		B4	→	Y3

Opisani komutacijski sustav ostvaruje komutaciju tipa vrijeme-prostor-vrijeme, te ih se može označiti kao TST komutacija.

7.5.2 Primjeri vremenskih PCM komutacijskih sustava

Prvi, komercijalno uspješni TDS PCM komutacijski sustav, AT&T-ov ESS N^o.4, aktiviran je 1976. godine. Koristi se prvenstveno za komutacije međumjesnih kanala, te za velike tandem-centrale. ESS N^o.4 može opslužiti više od 500.000 telefonskih poziva tijekom glavnog prometnog sata.



Slika 7.23. Komutacijski sustav ESS N^o.4

ESS N^o.4 sadrži 128 ulaznih TSIU sa po 7 digitalnih TDM ulaza, svaki sa po 128 vremenskih odsječaka (120 okteta digitalnih govornih kanala i 8 odsječaka za potrebe održavanja sustava), ukupno 107.520 ulaznih kanala. Izlazi svakog ulaznog TSIU (po 8 digitalnih TDM linija, spojeni su na vremensko-prostornu matricu (TMS), sa ukupno $128 \times 8 = 1024$ TDM ulaza. Jednak je i broj izlaza TMS-a, 1024 TDM izlaza. Svaki ulazni TDM ima 128 vremenskih odsječaka od kojih je 105 govornih ($105 \times 8 = 120 \times 7 = 840$), te se TMS rekonfigurira 128 puta svakih $1/8000$ s, ili 1.024.000 puta u sekundi. TDM izlazi TMS-a povezani su na 128 izlaznih TSIU-a. Svaki TSIU opslužuje 840 digitalnih govornih kanala, kako je 128 TSIU-a, ukupni je kapacitet 107.520 jednosmjernih ili 53.760 dvosmjernih govornih kanala.

Više je razloga zbog kojih je ESS N^o.4 namijenjen prvenstveno međumjesnom prometu. U prvom redu, to je 4-žično povezivanje koje je redovito u multipleksnim i prijenosnim sustavima. Čest je slučaj da je međumjesni prijenos digitaliziran (PCM) te je povezivanje sa komutacijom jednostavnije. Kapacitet od 107.520 kanala četiri puta je veći od kapaciteta prethodnih elektromehaničkih međumjesnih centrala.

AT&T-ov sustav N°.5 (slika 4.22. i 4.23.) prvi puta instaliran je 1982. godine. To je komutacijski sustav opće namjene, podjednako dobar za lokalne i međumjesne komutacijske centre. Opslužuje do 110.000 pretplatničkih linija i može obraditi do 300.000 poziva na sat. Sustav N°.5 ima 190 TSIU-a. Svaki od njih povezan je preko dva para optičkih niti sa TMS

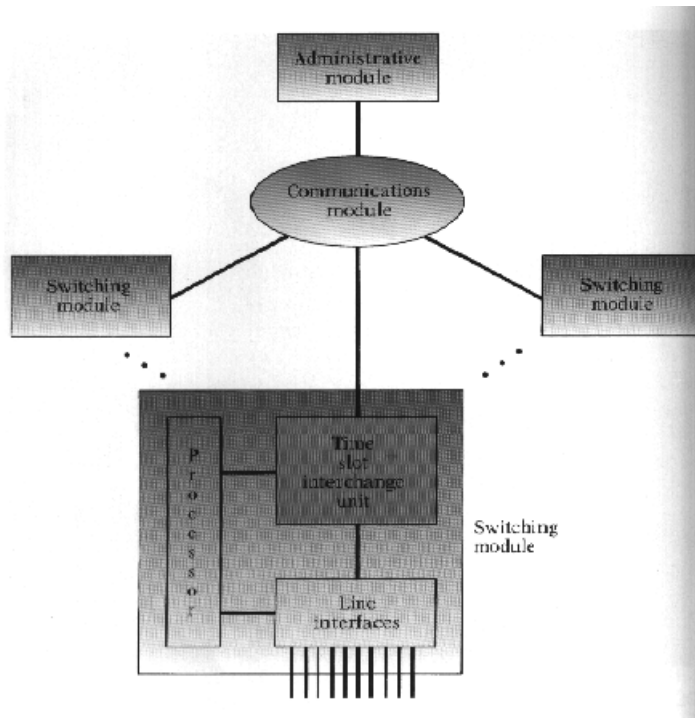


komutacijom nazvanom komunikacijski modul. Jedan optički kabel (4 niti) prenosi 32.768.000 b/s (4x128x64 kb/s).

Slika 7.24. AT&T-ov sustav ESS N°5

Svaki komutacijski modul ima vlastiti procesor i memoriju. Jedinstveni administrativni modul obavlja zajedničke funkcije poput tarifiranja, proslijeđivanja poziva i prevođenja. ESS

N°.5 pravi je PCM komutacijski sustav sa raspodijeljenim upravljanjem, po nečemu nalik



koračnim sustavima, osim što je fleksibilnost i inteligencija programskog upravljanja (SPC) primjenjena u svakom komutacijskom modulu.

Slika 7.25. Blok shema sustava N°.5

I drugi proizvođači imaju slične sustave, poput Northern Telecoma, Ericssona, Alcatela, Siemens, Fujitsua i NEC-a.

7.5.3 Komutacija (switching) i usmjeravanje (routing) u mreži

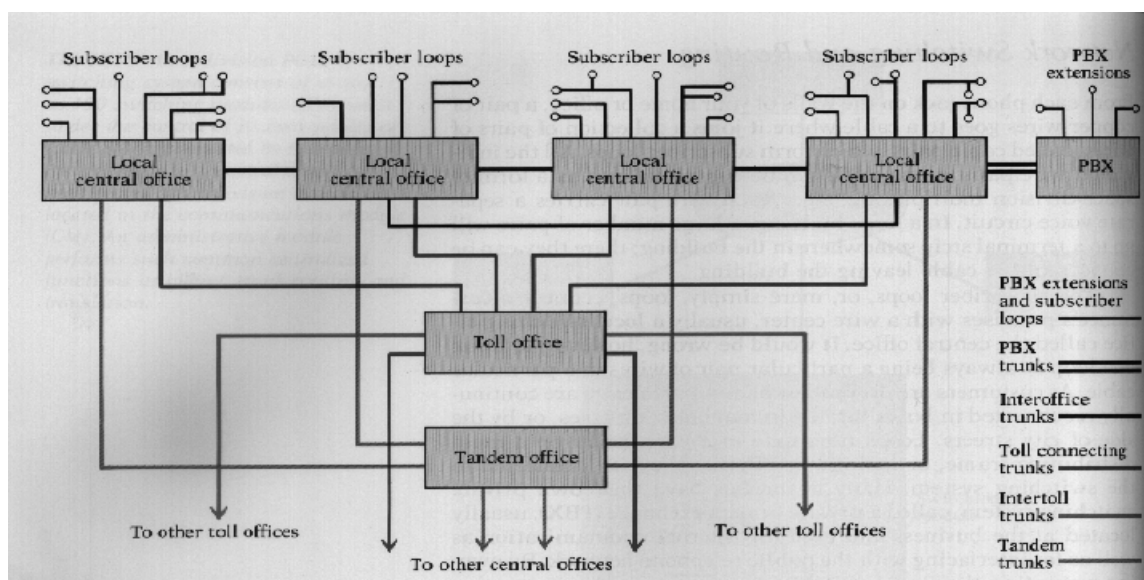
Telefonska mreža započinje telefonskom priključnicom na zidu sobe ili ureda. Od utičnice telefonska parica ide do ormarića negdje na ulici ili, u slučaju većih objekata, do ormarića u prizemlju zgrade. U ormariću, svaka telefonska parica povezana je s paricom višeparičnog telefonskog kabela, koji ide do razdjelnika telefonske centrale. Taj dio mreže možemo promatrati kao prostorni multipleks.

Pretplatničke petlje, ili kraće rečeno, samo **petlje**, povezuju pretplatnički terminalni uređaj sa centralom. Petlja se završava na glavnom razdjelniku (*mainframe*). Tako su pretplatnici povezani sa centralom. Mnogi poslovni sustavi imaju svoje, privatne komutacijske sustave (PBX), obično smješteni u poslovnim prostorima, korištenim za interne komunikacije i za povezivanje s javnom telefonskom mrežom. Kupovinom ili zakupom posebnog komutacijskog sustava, poslovni sustavi su najčešće uvjereni da ostvaruju uštedu i bolji nadzor nad telefonskim prometom. Umjesto posjedovanja vlastitog sustava, moguće je zakupiti odgovarajuće usluge od lokalne telefonske kompanije, pružatelja usluga.

Kakav god da je komutacijski sustav, manualni ili automatski, prostorni ili vremenski, mnogi pozivi moraju proći kroz više komutacijskih čvorišta dok se ne dovrše. U tuzemnim ili međunarodnim sustavima, poziv ide prvo do lokalne centrale. Ako je traženi pretplatnik na istoj lokalnoj centrali, ona će ga i dovršiti. Ako ne, poziv će biti proslijeđen drugoj lokalnoj centrali ili tandem centrali kako bi se pozivi okončali. Ako ste uputili međumjesni poziv, lokalna centrala prosljeđuje poziv međumjesnoj centrali, a ona ga preko međumjesnog prijenosnog sustava do druge međumjesne centrale koja ga prosljeđuje do lokalne centrale koja okonča poziv.

Blokiranje nastaje u slučaju kada je broj međumjesnih kanala nedovoljan za uspostavu traženih veza. Ako je poziv blokiran duž jedne staze, komutacijski sustavi nastoje pronaći slobodni, alternativni ili obilazni put, često i preko nekoliko drugih komutacijskih središta.

Što ako broj pokušaja za uspostavom veze iznenada naraste? To se često događa tijekom godine kada su neki praznici ili telefonske kompanije daju povremene popuste. Tada, alternativne staze mogu, u stvari, umanjiti mogućnosti uspostave veze, jer generiraju veliki broj dugih, indirektnih veza koje cik-cak stazama povezuju gradove. Radi toga, alternativno usmjeravanje se ograničava ili isključuje kada je promet izuzetno velik. To se često događa u slučaju prirodnih nepogoda ili drugih nesreća, kada iz obiteljskih razloga promet naglo naraste. Tada se odbijaju pozivi, kako bi se obnovile usluge.



Slika 7.26. Hijerarhija komutacijskih sustava u mreži

7.6 Komutacijski sustavi

Prve automatske telefonske centrale bile su sa **direktnim upravljanjem**. Sudionik prometa (korisnik sustava) impulsima brojčanika na telefonskom aparatu (terminalu) izravno je pomicao komutacijske elemente-birače s kružnim gibanjem sustava korak po korak. Vremenski razmak serije impulsa pojedinih znamenki omogućavao je biračima da uoče kraj jedne i početak slijedeće znamenke.

Razvoj koordinatnih birača (krosbar, *crossbar*) omogućio je i uvođenje **indirektnog** (posrednog) upravljanja. Sudionik kao i ranije odašilje impulse u skladu s željenim brojem, ali biranje se odmah ne realizira. Informaciju o biranom broju prihvaćaju upravljački organi centrale (registar), provjeravaju dali je traženi broj slobodan i sl. (marker), te tek nakon toga generiraju upravljačke signale za koordinatne birače (marker). Uvođenjem reed-releja, kontakti komutacijskih elemenata izolirani su od atmosfere, spriječena je korozija i povećana trajnost. Osim toga smanjene su dimenzije komutacijskih polja, te povećana brzina rada. Sve je to bila isključivo elektromehanička tehnologija. Telefonska centrala bila je skup releja, kontakata i snopova vodova, razmještenih u limenim ormarima.

Komutacija je postala veliki izazov za razvijenu poluvodičku tehnologiju. Prvi prodor elektroničkih sklopova bio je u generatore tonskih signala ("slobodno biranje", "zauzeto" i sl.). Revolucionarne promjene unosi tek zamjena elektromehaničkih zajedničkih logičkih sklopova centrale, istima po funkciji, ali elektroničke izvedbe. Odatle, pa do uvođenja "pravih" računala kao procesora informacija upravljanja u centrali bio je samo korak.

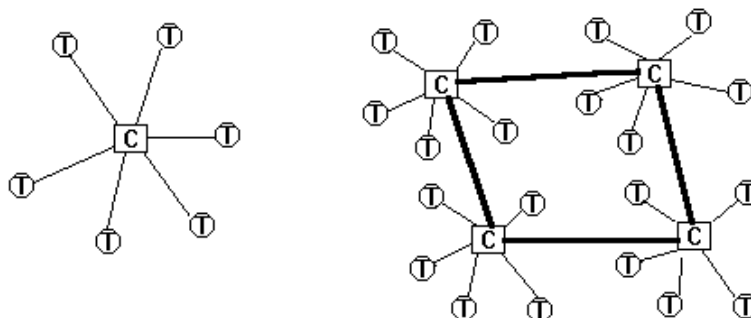
Oduvijek je bio problem u komutacijskim sustavima promjena načina rada. To je moglo biti priključenje ili isključenje nekog korisnika, uvođenje neke nove usluge (npr. telefonski govorni automati) i sl. Logika rada najstarijih sustava bila je definirana konstrukcijom elemenata i njihovim međusobnim električnim povezivanjem žičanim vodovima. To je bio period tzv. ožičene logike. Jasno je, da je promjena bila naporna, neugodna i spora, a tražila je i veliku pažnju i poznavanje komutacijskog sustava do u detalje. Mali je napredak bio u jednostavnijoj izmjeni vodiča, konektorima umjesto lotanja. Tek je primjena osnovnog principa elektroničkih računala: programa spremljenog u programskoj memoriji, omogućila kvalitativni napredak u izmjeni programa djelovanja centrale. Ne odstupajući od tradicije naziva, takav je sustav nazvan: komutacija sa memoriranim programom upravljanja, **SPC** (engl. *Stored Program Control*). Promjena programa može biti znatno brža, potrebno je "učitati" drugu kasetu ili disketu i centrala djeluje drugačije. Centralni upravljački organ postaje računalo, kao sredstvo obrade informacija o pozivima učesnika, zauzetosti spojnih vodova itd. Specifičnost primjene, tražena sigurnost djelovanja, te velika količina informacija koje treba obraditi u procesu upravljanja velikom centralom, dovela je do konstrukcije namjenskih procesora, računala i sustava računala.

Programi za rad postali su veoma opširni i složeni, te čine značajni dio ukupne cijene centrale. Da bi se troškovi snizili, te radi kompatibilnosti rada novijih generacija sa prethodnima, softver se radi po modulima i piše se u jezicima posebno razvijenim za komutacijske SPC sustave.

Sadašnje stanje u komutacijskim sustavima obilježeno je velikom raznovrsnošću elemenata sustava, te u tehnologijama i konstrukcijama. Telefonski komunikacijski sustavi razvijali su se neovisno od telegrafskih, a jedni i drugih od sustava prijenosa podataka. Prvi je izgrađen sustav komutacije u telefonskom prometu. Paralelno je razvijen sustav telegrafskog prometa, sa telefonskim se preklapao samo u podsustavu prijenosa. Prijenos podataka u komutacijskom dijelu nastavlja tradicije telegrafskoga, ako je u pitanju posebni sustav prijenosa podataka. Modemski način prijenosa podataka koristi u potpunosti telefonski komunikacijski sustav, te se mora povinovati standardima koji su u njemu važeći. Razvitak komutacijskih sustava ide u pravcu integracije: komutacije informacija različitoga porijekla u istom komutacijskom sustavu. To je jedno od ključnih pitanja ISDN, što će se razmotriti u posebnom poglavlju.

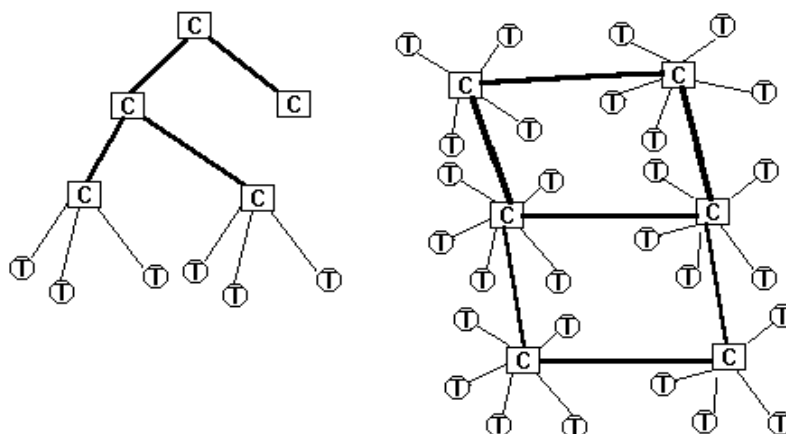
7.7 Struktura mreže komutacijskih sustava

Komutacijski centri smanjuju broj i dužinu vodova što povezuju međusobno udaljene terminale. Sustav bez komutacijskoga centra, značio bi da su terminali fiksno povezani. Za uspostavu komunikacijske veze s više subjekata, trebao bi i odgovarajući broj terminala i spojnih vodova, što je u praksi neodrživo. Problem je u praksi, dali u nekom gradu postaviti jednu centralu većega kapaciteta ili nekoliko manjih? U prvom slučaju, imali bi monocentričnu mrežu, a u drugom policentričnu telekomunikacijsku mrežu (Slika 7.27). Najčešće, presudni su ekonomski kriteriji.



Slika 7.27. Monocentrična (a) i policentrična (b) mreža

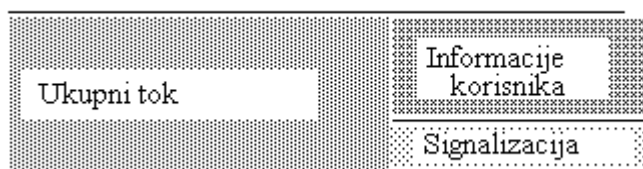
Policentrična mreža može biti hijerarhijska, rešetkasta ili kombinirana (Slika 7.28). U hijerarhijskim i kombiniranim mrežama, postoje komutacijski centri (centrale) različitih razina: najbliže učesniku su krajnje centrale, "iznad" njih su čvorne, glavne i tranzitne. Najveći dio prometa u krajnjim centralama je među njima pripadnim učesnicima. Kod ostalih, višoj razini pripada i veći dio prometa između pojedinih centrala, tako da se tranzitne isključivo bave povezivanjem komutacijskih centara (nacionalnih i internacionalnih).



Slika 7.28. Hijerarhijska mreža (a), rešetkasta (b) i kombinirana mreža (c)

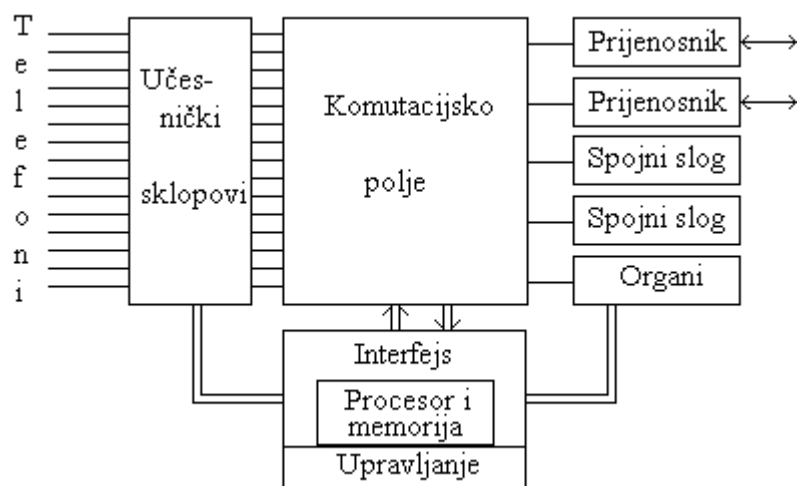
Telefonski aparati učesnika prometa, povezani su na krajnje centrale učesničkim vodovima. Centrale istih ili različitih razina povezuju spojni vodovi. Na spojnim i učesničkim vodovima prisutna su dva informacijska toka. Osnovni je informacijski tok terminala i on čini veći dio ukupnoga toka. Ostatak je signalizacija, informacije učesnika komutacijskim centrima, komutacijskih centara učesnicima, te između komutacijskih centara (Slika 7.29). Informacije terminala učesnika centrala samo proslijeđuje, izravno drugom učesniku ili drugoj centrali.

Signalizacijske informacije, centrala obrađuje, dio koristi za svoje potrebe, dio upućuje drugim komutacijskim centrima, dodajući nešto vlastitih itd. Osnovne su informacije učesnika. Vodovi se projektiraju za signale koji nose te informacije, a signalizacijski se signali tome prilagođavaju.



Slika 7.29. Raspodjela ukupnog informacijskog toka na vodovima

7.8 Sastav komutacijskog centra



Slika 7.30. Blok-shema komutacijskog centra

Osnovni su funkcionalni blokovi komutacijskoga centra: komutacijsko polje i blok upravljanja (Slika 7.30). Učesnički terminali (telefoni) vezuju se na komutacijsko polje

preko učesničkog sklopa, što je ujedno i sučelje prema bloku upravljanja. U komutacijskom polju prospajaju se kanali, lokalno preko spojnih slogova ili u odlaznom smjeru preko prijenosnika, PR-međusklopa prema drugim komutacijskim centrima. Spojni slogovi učesnicima daju napajanje telefona i signalizacijske signale. Blok upravljanja prati i analizira promet, te upravlja njime. Preko sučelja (interfejsa) procesor predaje i prima informacije. Procesor djeluje prema pristiglim informacijama, te na osnovi spremljenog programa i stalnih informacija.

Pojedine funkcije komutacijskog centra obavljaju se u hardverski i softverski izdvojenim blokovima. Broj je blokova za određenu funkciju određen prometnim zahtjevima, tj. učestalošću primjene pojedinih blokova, te brzinom rada pojedinog bloka. Manji broj blokova znači, da će se ponekad čekati na njegove usluge, što je nepovoljno za korisnike sustava, ali je povoljnije za investitora. Takvi kompromisi zahtjeva velikog broja nezavisnih korisnika jednoga sustava i mogućnosti sustava, čini teoriju masovnog opsluživanja osnovnom za pristup problemu projektiranja komutacijskih sustava i mreža.

Poput prijenosa, modulacije i multipleksa, komutacija se može razmatrati kao adresiranje informacijskog volumena jednoga učesnika, upućivanje na adresu drugoga učesnika, te obratno, kada je dvosmjerno komuniciranje u pitanju. Klasična je komutacija po prostornoj koordinati informacijskoga volumena komutacijskoga sustava. Suvremeni, digitalizirani komutacijski centri koriste vrijeme kao koordinatu za preusmjeravanje informacijskih volumena.

7.9 Razvitak komutacijskih sustava

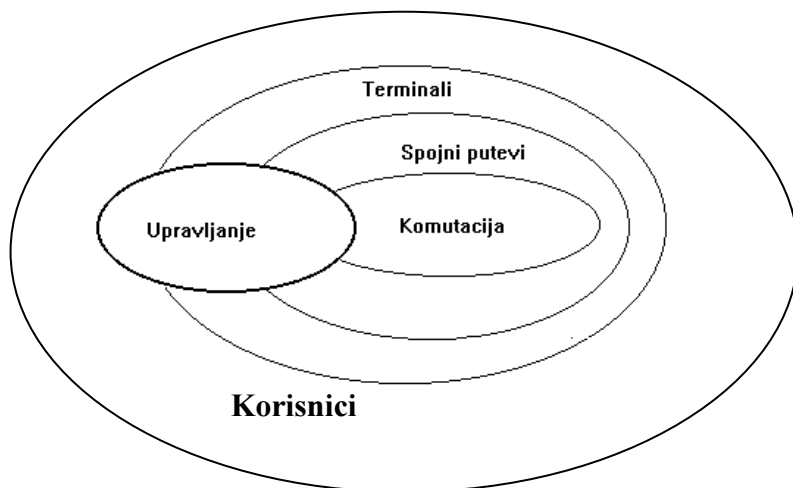
Komutacijski sustav, promatrano s aspekta korisnika, razvija se u pravcu pružanja novih usluga. Osim klasične, osnovne funkcije povezivanja s drugim, željenim pretplatnikom, suvremeni sustavi omogućavaju skraćeno biranje brojeva koje najčešće biramo, blokiranje međumjesnih poziva, praćenje učesnika kada se premjesti s jedne lokacije na drugu, buđenje, itd. Osim toga, može se ograničiti skup brojeva koji mogu međusobno uspostavljati vezu, a ulaze i izlaze iz te skupine ograničiti ili spriječiti. Tako nestaju neki od razloga za formiranjem posebnih mreža npr. većih poduzeća.

Domaća zadaća:

Analizirati usluge fiksnih i mobilnih telekomunikacijskih operatora u Hrvatskoj.

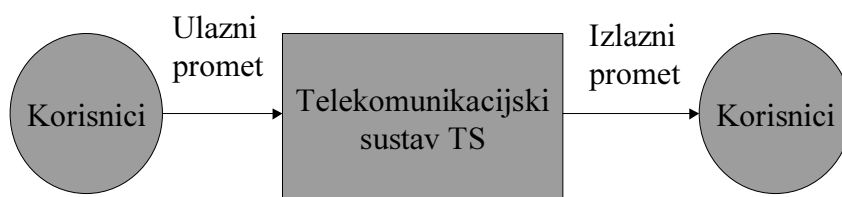
7.10 Promet telekomunikacijskim sustavom

Telekomunikacijski sustav na usluzi je velikom broju (milijuni) korisnika (slika 4.29.) dakle, možemo ga promatrati kao sustav masovnog posluživanja.



Slika 7.31. Opći telekomunikacijski sustav okružen korisnicima

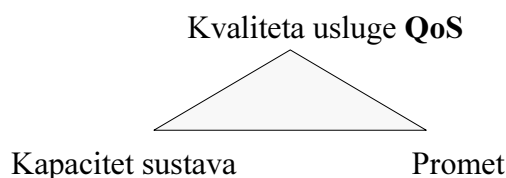
Korisnici su izvor, a ujedno i odredište prometa, te se u modelu telekomunikacijskog sustava s ulazom i izlazom (slika 4.30.) prividno nalaze na dva mjesta.



Slika 7.32. Korisnici su izvor i odredište prometa telekomunikacijskim sustavom

Polazne pretpostavke:

- Sustav poslužitelja (*server*) poslužuje ulazni (dolazni) promet (*traffic*)
- Promet generiraju korisnici (*users*) sustava (slika 4.30.).

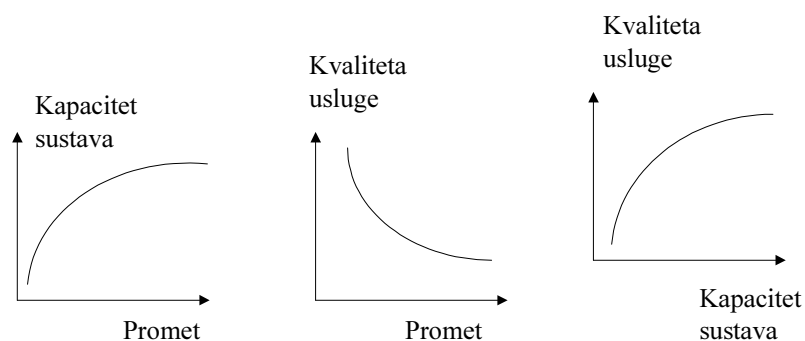


Slika 7.33. Odnos kvalitete usluge, prometa i kapaciteta sustava

Analizom sustava, želimo odgovoriti na slijedeća temeljna pitanja:

- Za određeni sustav i zadani promet, koja je kvaliteta usluge (*QoS*)?
- Za zadani promet i traženu kvalitetu usluge, kako dimenzionirati sustav?
- Za poznati sustav i traženu kvalitetu usluge, koji je maksimalni mogući promet?

Primjer 7.2. : U klasičnom telefonskom komunikacijskom sustavu (*POTS*) temeljna je usluga - telefoniranje. Usluge sustava dostupne su svim subjektima prijavljenim sustavu - pretplatnicima. Kvaliteta usluge (QoS), **vjerojatnost je da telefon na određitu zazvoni**. Uz klasične (PSTN) mreže, suvremeni sustavi (GSM) pružaju usluge sve bogatijeg asortimana.



Slika 7.34. Ovisnost kapaciteta sustava o prometu za zadanu kvalitetu usluge, ovisnost kvalitete usluge o prometu za fiksni kapacitet sustava i ovisnost kvalitete usluge o kapacitetu sustava za određenu veličinu prometa

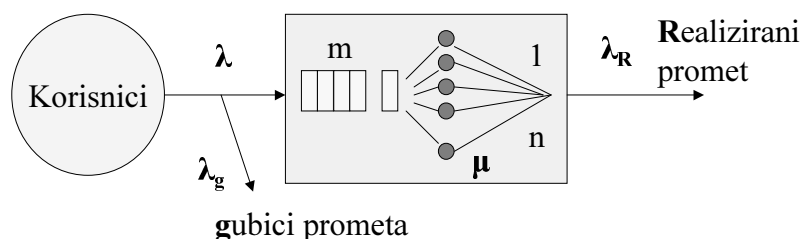
Modeli prometa telekomunikacijskim sustavom su stohastički (vjerojatnostni, probabilistički). Sustav funkcionira deterministički, ako zanemarimo neizvjesne događaje poput kvarova. Reakcije sustava definirane su konfiguracijom i ugrađenim softverom (SPC). Međutim, promet je slučajan; “Nikada se ne zna, kada i tko će nazvati”. Varijable u modelima su slučajne varijable (broj poziva, paketa...). Slučajne varijable opisane su distribucijama, npr. vjerojatnost da nastupi n poziva, ili da je m paketa u memoriji... Stohastički proces opisuje vremenske promjene slučajne varijable. Analiza prometa sustavom povezana je s teorijom vjerojatnosti, stohastičkim procesima, teorijom repova, statističkom analizom, operacijskim istraživanjima, teorijom odlučivanja, simulacijskim modeliranjem... Ciljevi analize su: planiranje mreže, upravljanje mrežom i nadzor mreže.

Modeliranje telekomunikacijskih prometnih sustava ima dvije faze:

- model prometa i
- model sustava.

Dvije su vrste modela:

- sustavi s gubicima prometa (blokade)
- sustavi s čekanjem i repovima čekanja.



Slika 7.35. Grafički model prometa telekomunikacijskim sustavom

Korisnici (Slika 7.35) pristižu prosječnom učestalošću od λ korisnika u jedinici vremena. Srednje međudolazno vrijeme $1/\lambda$ srednji je interval pristizanja korisnika u sustav posluživanja. Korisnike poslužuje n paralelnih poslužitelja. Jedan poslužitelj posluži μ korisnika u jedinici vremena. Prosječno (srednje) trajanje posluživanja jednog korisnika je $1/\mu$. U “čekaonici” ima m mjesta, dakle u sustavu može biti najviše $p=m+n$ korisnika. Blokirani korisnik (koji ne uđe u sustav - u čekaonicu ili do poslužitelja) izgubljen je za sustav.

Standardna je Kendallova notacija sustava posluživanja, A/B/n/p/k.

- **A** označava model ulaza korisnika u sustav posluživanja. Pretpostavka je da se korisnici pojavljuju međusobno neovisno (IID međudolazna vremena). Distribucije međudolaznih vremena su:
 - M, eksponencijalna (bez memorije)
 - D, deterministička
 - G, opća.
- **B** se odnosi na trajanje posluživanja. Pretpostavka je IID vremena posluživanja. Moguće su distribucije jednake prethodnim (M, D i G).
- **n** je broj paralelnih poslužitelja (servera)
- **p** je broj mjesta u sustavu = broj servera + broj mjesta u čekaonici
- **k** je broj korisnika.

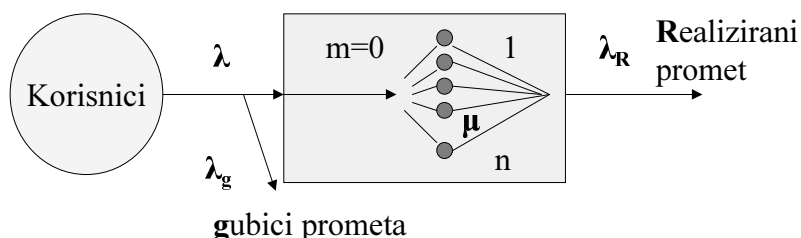
Za telefonski komunikacijski sustav, ako nije drugačije naglašeno, uobičajena je pretpostavka beskonačan broj korisnika $k = \infty$.

Primjeri oznaka: M/M/1, M/D/1, M/G/1, G/G/1, M/M/n, M/M/n/n+m, M/M/ ∞ (Poissonov model), M/M/n/n (Erlangov model), M/M/k/k/k (Binomni model), M/M/n/n/k (Engsetov model, $n < k$).

7.10.1 Model prometa klasičnim telefonskim sustavom

Model s gubicima bez čekanja, a primjenjuje se kao klasični model za telefonsku mrežu s komutacijom kanala (A.K.Erlang 1878-1929). Razmatra se linija (*link*) koja povezuje dva čvora (telefonske centrale), promet tvore odlazni promet centrala. Korisnici su pozivi (*call*) i pristižu učestalošću od λ poziva u jedinici vremena. $1/\lambda$ je srednji interval pristizanja (međudolazno vrijeme) poziva. Uslugu povezivanja centrala pružaju kanali linije.

Čvorove komunikacijskog sustava povezuje n paralelnih kanala (poslužitelja). Poslužitelji su komunikacijski kanali linije koja povezuje dvije centrale i poslužuju μ korisnika u jedinici vremena. $h=1/\mu$ je srednje zauzeće kanala (trajanje veze, posluživanja jednog korisnika). "Čekaonica" ne postoji $m=0$. Blokirani poziv je gubitak za sustav.



Slika 7.36. Model prometa telefonskim telekomunikacijskim sustavom

Poziv je u sistemu masovnoga opsluživanja jedan događaj, zahtjev upućen nekom od blokova centrale. Opterećenje zajedničkih, upravljačkih organa komutacijskoga centra ne čini mali broj dugotrajnih veza, već više kraćih, iako bi u oba slučaja sudionici u komuniciranju mogli razmijeniti istu količinu informacija. Zato je polazište u analizi komutacijskog sustava brzina generiranja poziva $\lambda(t)$. Definira se kao kvocijent matematičkog očekivanja broja poziva X u određenom intervalu vremena τ i duljine tog intervala, prema izrazu (7.2.).

$$\lambda(t) = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{E\{X(t, t + \tau)\}}{\tau} \quad [1/s] \quad (7.2.)$$

Ukupan broj poziva u intervalu vremena τ jednak je:

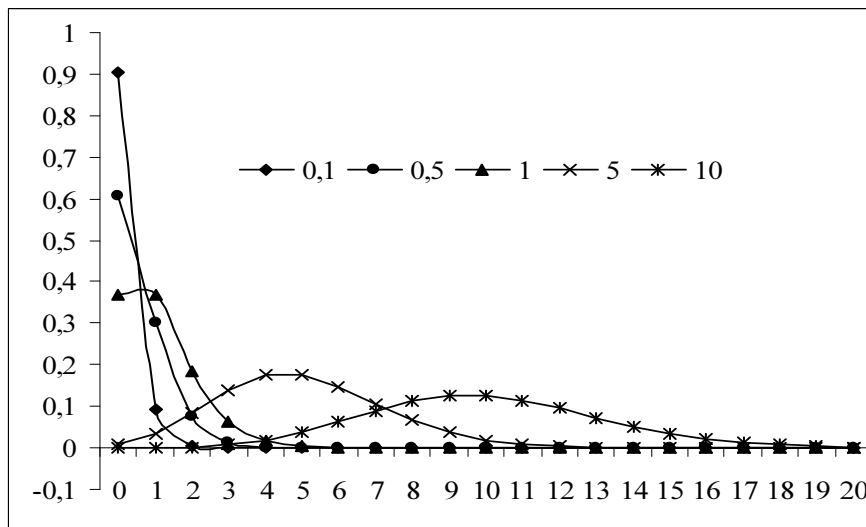
$$c(t, \tau) = \int_t^{t+\tau} \lambda(t) dt \quad (7.3.)$$

Ako je $\lambda(t) = \text{const.}$ tada je

$$c(t) = \lambda \cdot \tau.$$

Poissonova razdioba iskazuje vjerojatnost da u intervalu τ imamo X poziva, ako je poznata brzina generiranja poziva λ :

$$P(X, \tau) = \frac{(\lambda \tau)^X}{X!} e^{-\lambda \tau} \quad \text{za } t \geq 0, \text{ te za } X = 0, 1, 2, \dots \quad (7.4.)$$



Slika 7.37. Grafovi Poissonove razdiobe za $\lambda = 0,1; 0,5; 1; 5$ i 10

Grafovi funkcija Poissonove razdiobe za 0,1 do 10 poziva u minuti, prikazani su na Slika 7.37. Pri manjem broju poziva razdioba je asimetrična, dok za veći broj događaja X , postaje bliska Gaussovoj razdiobi. Može se vidjeti, da u intervalu od jedne minute, najvjerojatnije je da će pristići 10 poziva. Vjerojatnost da bude 5 ili 15 poziva manja je. Interval u kome nastaje najvjerojatnije 20 poziva, trajanje je dvije minute.

Vjerojatnost da u intervalu τ ne bude poziva ($X=0$) iznosi:

$$P(0, \tau) = e^{-\lambda \tau} \quad (7.5.)$$

Vjerojatnost da se slijedeći poziv pojavi do trenutka $t + \tau$ jednaka je

$$P(\tau \leq t) = 1 - e^{-\lambda \tau} \quad (7.6.)$$

U praksi, događa se da se svim zahtjevima ne udovolji, što se naziva gubicima u prometu. Ako je c_A ukupan broj ponuđenih poziva u nekom vremenu, c_V ukupan broj nerealiziranih poziva, tada je iznos gubitaka poziva:

$$B = \frac{c_V}{c_A} \cdot 100\% \quad (7.7.)$$

Intenzitet prometa $y(t)$ veličina je bez dimenzije i označava broj u nekom trenutku uspostavljenih kanala. Iako dimenzije nema, naziva se **[Erl]** po poznatom istraživaču komutacijskih sustava **A. K. Erlangu**.

$$y(t) = \lambda(t) \overline{\tau(t)} \quad (7.8.)$$

U gornjem izrazu, $\overline{\tau(t)}$ srednje je vrijeme trajanja telefonskog razgovora. Promet od 1[Erl] znači, da je (u prosjeku) jedan kanal stalno zauzet.

Primjer 7.3. : Telefonska centrala s 2000 poziva na sat, te s prosječnim trajanjem poziva od $\lambda=3'$, generira promet intenziteta $A = 2000 \cdot 3 / 60 = 100$ erl.

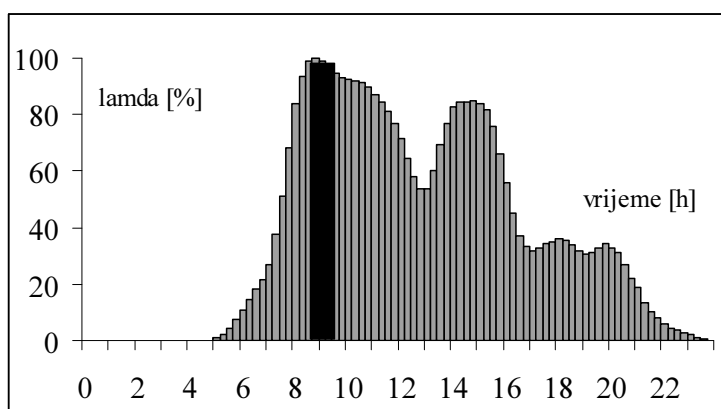
Ako se duže priča, npr. 5' u prosjeku, promet naraste na $A_1 = 2000 \cdot 5 / 60 = 133,3$ erl.

Tipične su vrijednosti prometa:

- privatni pretplatnik: 0,01 - 0,04 erlang
- poslovni pretplatnik: 0,03 - 0,06 erlang
- kućna centrala (PBX): 0,10 - 0,60 erlang
- javna govornica: 0,07 erlang

Dakle, tipični privatni pretplatnik koristi telefonsku liniju 1% to 4% vremena u glavnom prometnom satu. Isto tako, 2250 - 9000 privatnih pretplatnika generira 90 erlanga prometa.

<i>h</i>	λ [%]	<i>h</i>	λ [%]	<i>h</i>	λ [%]	<i>h</i>	λ [%]	<i>h</i>	λ [%]	<i>h</i>	λ [%]	<i>h</i>	λ [%]	<i>h</i>	λ [%]
0	0	3	0	6	10,97	9	98,76	12	71,36	15	83,99	18	35,89	21	18,64
	0		0		14,39		96,32		64,52		81,47		35,7		13,6
	0		0		18,23		94,36		58,06		75,72		33,71		10,45
	0		0		21,57		93,01		54		66,33		31,6		8,04
1	0	4	0	7	26,72	10	92,37	13	53,66	16	55,77	19	30,82	22	6,01
	0		0		37,47		92,18		60,35		45,17		31,45		4,43
	0		0		51,11		91,17		69,11		37,17		32,88		3,57
	0		0		68,32		89,7		76,89		33,22		34,54		2,82
2	0	5	0,86	8	83,84	11	87,34	14	82,71	17	31,79	20	32,92	23	1,95
	0		2,37		93,61		84,14		84,37		32,58		31,04		1,2
	0		4,43		99,17		80,98		84,63		34,2		26,98		0,45
	0		7,55		100		76,74		84,82		35,1		22,13		0



Slika 7.38. Tablica i graf dnevne varijacije prometa, označen je glavni prometni sat

7.10.2 Analiza prometa telefonskim komunikacijskim sustavom

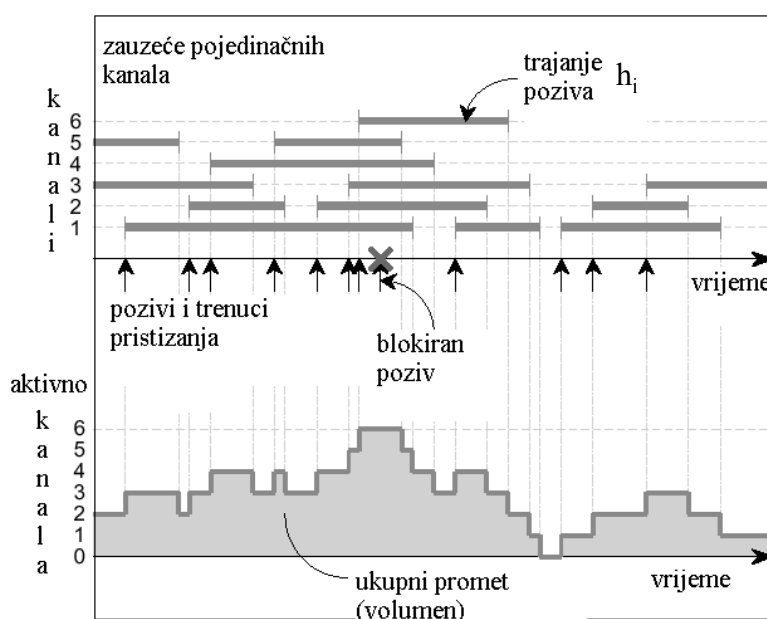
Kapacitet sustava: n broj komunikacijskih kanala na spojnom putu

Prometno opterećenje: A ponuđeni intenzitet prometa

Kvaliteta usluge QoS: $1-B_C$ vjerojatnost realizacije poziva

Pretpostavka je, kako je sustav M/G/n/n sustav s gubicima, tj.

- pozivi se generiraju kao Poissonov proces
- trajanja poziva su neovisna, s jednakom (općenitom) razdiobom, te sa srednjom vrijednošću h .



Poslužitelja (kanala) je $n=6$

Slika 7.39. Blokada u sustavu

U tako opisanom sustavu, promet, kapacitet sustava i kvalitetu usluge povezuje Erlangova B formula¹:

$$B_C(n, A) = \frac{\frac{A^n}{n!}}{\sum_{i=0}^n \frac{A^i}{i!}} \quad (7.9.)$$

¹ Erlangova B formula, Erlangova formula, Erlangova formula gubitaka, Prva Erlangova formula

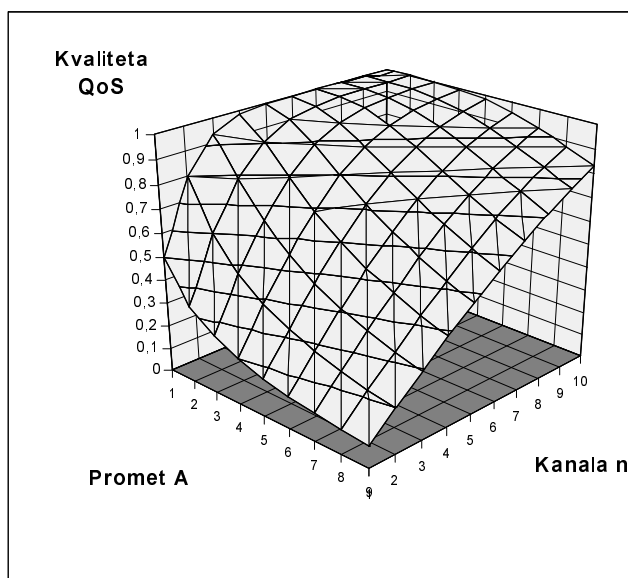
Primjer 7.4. : U sustavu je $n=4$ kanala, $A=2$ Erl.

$$B_C(4,2) = \frac{\frac{2^4}{4!}}{1 + 2 + \frac{2^2}{2!} + \frac{2^3}{3!} + \frac{2^4}{4!}} = \frac{\frac{16}{24}}{1 + 2 + \frac{4}{2} + \frac{8}{6} + \frac{16}{24}} = \frac{2}{21} = 9,5\%$$

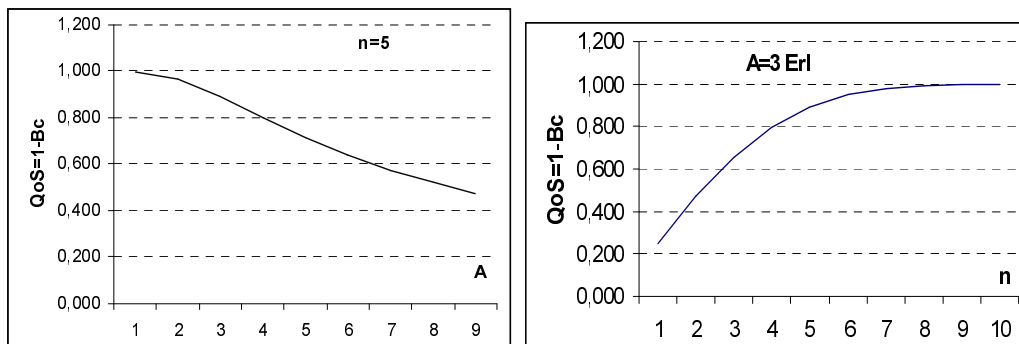
Vjerojatnost blokade je 9,5%, tj. 0,095. Kvaliteta QoS je $1-B_C=0,905$.

A/n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,500	0,800	0,938	0,985	0,997	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000
2	0,333	0,600	0,789	0,905	0,963	0,988	0,997	0,999	1,000	1,000
3	0,250	0,471	0,654	0,794	0,890	0,948	0,978	0,992	0,997	0,999
4	0,200	0,385	0,549	0,689	0,801	0,883	0,937	0,970	0,987	0,995
5	0,167	0,324	0,470	0,602	0,715	0,808	0,879	0,930	0,963	0,982
6	0,143	0,280	0,410	0,530	0,640	0,735	0,815	0,878	0,925	0,957
7	0,125	0,246	0,362	0,473	0,575	0,669	0,751	0,821	0,878	0,921
8	0,111	0,220	0,325	0,425	0,521	0,610	0,692	0,764	0,827	0,878
9	0,100	0,198	0,294	0,386	0,475	0,559	0,638	0,711	0,776	0,832

Tablica 7.1. Tablica kvalitete usluge ($QoS=1-B_C$) prema Erlang B formuli



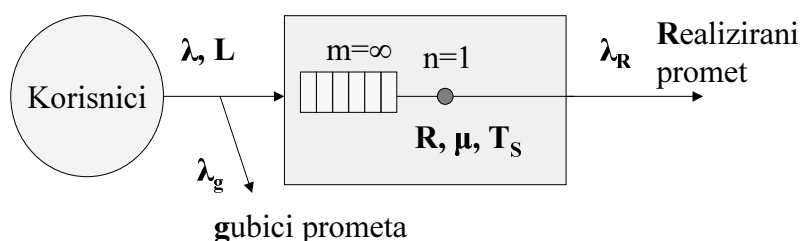
Slika 7.40. Graf QoS u ovisnosti o prometu i broju kanala



Slika 7.41. Grafovi ovisnosti kvalitete QoS o prometu i broju poslužitelja

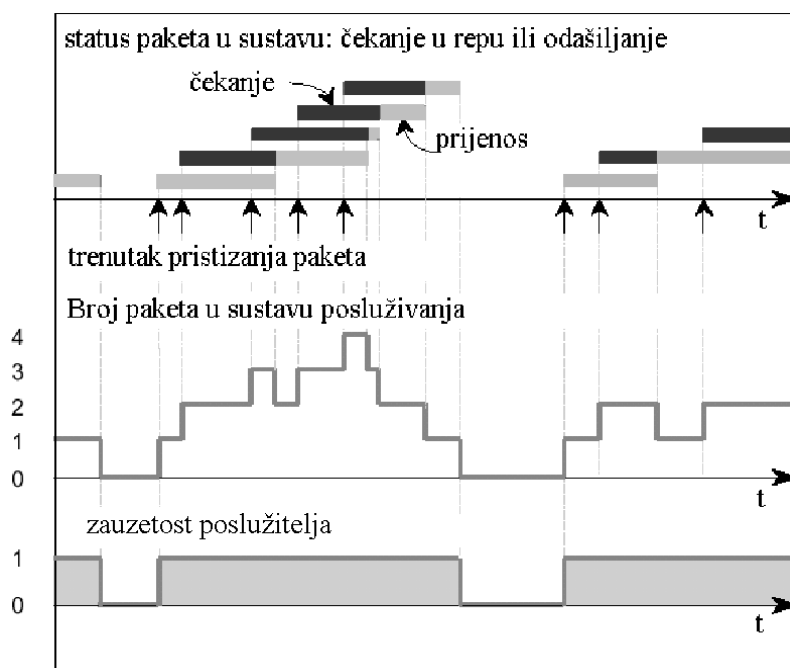
7.11 Promet podatkovnim komunikacijskim sustavom

U sustavima prijenosa podataka, pogodnija je komutacija paketa od komutacije kanala. Usmjerivač (eng. *router*) je čvor u podatkovnoj mreži i zadaća mu je prihvati paketa iz dolaznih grana mreže i usmjeravanje u odlazne grane mreže. U analizi prometa podatkovnom mrežom, razmatra se veza dvaju usmjerivača. Model je jednostavni sustav s čekanjem ($m=\infty$) i jednim poslužiteljem ($n=1$). Paketi (korisnici) pristižu s učestalošću λ [1/s], što znači da je srednje međudolazno vrijeme $T_A=1/\lambda$ [s]. Duljina paketa je L [b] (konstantna ili srednja vrijednost). Brzina prijenosa (obrade i otpremanja) podataka R [b/s], ili brzina posluživanja $\mu=1/T_S=R/L$ [1/s] paketa u sekundi. Srednja vrijednost trajanja posluživanja, trajanje je obrade i prijenosa paketa $T_S= L/R$ [s].



Slika 7.42. Model prometa podatkovnim telekomunikacijskim sustavom

“Čekaonica” je neograničene dužine ($m = \infty$), te niti jedan paket - korisnik usluge neće biti blokiran ali, može se dogoditi da mora sačekati na uslugu, tj. otpremu paketa. Ako paketi brže ulaze u sustav posluživanja nego što izlaze iz sustava, nastaje rastući rep čekanja. Sustav je **nestabilan**! Za korisnika, umjesto vjerojatnosti blokiranja B_C važna je vjerojatnost da paket



čeka na uslugu duže od dopustivog vremenskog intervala. Za sustav (vlasnika) važno je, koji je faktor iskoristivosti poslužitelja (servera), izražen u postotku vremena u kojemu server radi.

Slika 7.43. Promet u sustavu s čekanjem

7.11.1 Littleova formula (teorem)

Razmatramo sustav u kojega korisnici (paketi) ulaze s učestalošću λ . Sustav je stabilan, što znači da se korisnici ne nakupljaju (akumuliraju) u sustavu, te je sustav povremeno prazan. Posljedica je, da je učestalost izlaza korisnika iz sustava jednaka ulaznoj učestalosti i iznosi λ . Srednje trajanje posluživanja je T_S . Littleova formula odnosi se na srednji broj korisnika koji se nalaze u sustavu N :

$$N = \lambda \cdot T_S \quad (7.10.)$$

Prometno opterećenje ρ definirano je kao omjer brzina pristizanja i posluživanja paketa:

$$\rho = \lambda / \mu \quad (7.11.)$$

$$\rho = \lambda \cdot L / R \quad (7.12.)$$

što je jednako količniku trajanja posluživanja i međudolaznog vremena:

$$\rho = T_S / T_A \quad (7.13.)$$

Prometno opterećenje nema dimenzije.

Prometno opterećenje odgovara intenzitetu prometa u telefonskom sustavu.

Prema Littleovoj formuli, prometno opterećenje iskazuje faktor iskorištenja poslužitelja servera. Na prethodnoj slici (Slika 7.43), to je omjer ukupnog vremena zauzetog poslužitelja (1) i trajanja intervala promatranja (1&0).

Primjer 7.5. : Pretpostavimo, da ruteru pristiže 10 paketa u sekundi, $\lambda=10$ [1/s]. Srednja duljina paketa $L_B=400$ [Byte]. Brzina komunikacije je $\mu=64$ [kb/s].

Prometno opterećenje je

$$\rho = \lambda \cdot L_B / \mu$$

$$\rho = 10 \cdot 400 \cdot 8 / 64000 = 0,5 = 50\%$$

Ista veličine, ali izražena u paketima:

Brzina komunikacije je $\mu = 64000 / (400 \cdot 8) = 20$ paketa u sekundi.

$$\rho = \lambda / \mu$$

$$\rho = 10 / 20 = 0,5 = 50\%$$

Ako se brzina komunikacije poveća na $\mu = 10$ [Mb/s], opterećenje je:

$$\rho = 10 \cdot 400 \cdot 8 / 107 = 0,0032 = 0,32 \%$$

Ili, $\rho = 10\,000\,000 / (400 \cdot 8) = 3125$ paketa u sekundi

$$\rho = 10 / 3125 = 0,0032 = 0,32 \%$$

7.11.2 Analiza prometa podatkovnim sustavom

U sustav ulazi:

- paketa u sekundi λ [1/s]
- prosječna duljina paketa u bitima L [b]

Kapacitet sustava, brzina posluživanja R [b/s]

- brzina posluživanja $\mu = R/L$ [1/s] paketa u sekundi

Opterećenje sustava je $\rho = \lambda/\mu = \lambda \cdot T_S = T_S/T_A$

Trajanje čekanja na posluživanje određuje funkcija vjerojatnosti

$$W(t) = 1 - \exp(-2 \cdot v \cdot t / \sigma^2), \quad t \geq 0 \quad (7.14.)$$

ili funkcija gustoće vjerojatnosti:

$$w(t) = \frac{dW(t)}{dt} = -\frac{2 \cdot v}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{2vt}{\sigma^2}\right) \quad (7.15.)$$

v je veličina “suprotna” opterećenju sustava ρ :

$$v = \rho - 1 \quad (7.16.)$$

σ^2 drugi je moment slučajne varijable posluživanja T_S

$$\sigma^2 = \lambda \cdot (\sigma_{TS}^2 + T_S^2) \quad (7.17.)$$

Promatra se sustav M/M/1:

Paketi pristižu s međudolaznim vremenima t_a Poissonovog procesa (eksponencijalna razdioba) srednje vrijednosti λ paketa u sekundi. Duljine paketa međusobno su neovisne, s eksponencijalnom razdiobom i srednjom vrijednošću L .

Trajanje posluživanja t_s također je s eksponencijalnom razdiobom:

$$\sigma_{TS}^2 = T_S^2 \quad (7.18.)$$

$$\sigma^2 = \lambda \cdot (\sigma_{TS}^2 + T_S^2) = 2 \cdot \lambda \cdot T_S^2 \quad (7.19.)$$

Matematičko očekivanje čekanje u repu je:

$$T_w = \int_0^{\infty} t \cdot w(t) dt = -\frac{\sigma^2}{2 \cdot v} \quad (7.20.)$$

Za M/M/1 sustav, prosječno vrijeme čekanja u repu je:

$$T_w = -\frac{2\lambda T_s^2}{2(\rho-1)} = \frac{\rho \cdot T_s}{1-\rho} \quad (7.21.)$$

Prosječna duljina repa je:

$$L_w = \lambda \cdot T_w = \frac{\rho^2}{1-\rho} \quad (7.22.)$$

Boravak u sustavu prosječno traje:

$$T_Q = T_w + T_s = \frac{\rho \cdot T_s}{1-\rho} + T_s = \frac{T_s}{1-\rho} \quad (7.23.)$$

U sustavu je L_w korisnika i "jedan· ρ " kojega se poslužuje, ukupno:

$$L_Q = L_w + \rho = \frac{\rho^2}{1-\rho} + \rho \quad (7.24.)$$

ili

$$L_Q = \lambda \cdot T_Q = \frac{\rho}{1-\rho} \quad (7.25.)$$

Kvaliteta posluživanja QoS, kako je korisnik vidi, vjerojatnost P_z da paket čeka dulje od $z[s]$:

$$P_z = W(t > z) = \begin{cases} \exp\left(\frac{2 \cdot v}{\sigma^2} z\right) & \text{ako je } \rho < 1; \lambda \cdot L < R; \lambda < \mu \\ 1 & \text{ako je } \rho \geq 1; \lambda \cdot L \geq R; \lambda \geq \mu \end{cases} \quad (7.26.)$$

z dopušteno čekanje [s]

λ paketa u sekundi [1/s]

R brzina prijenosa [b/s]

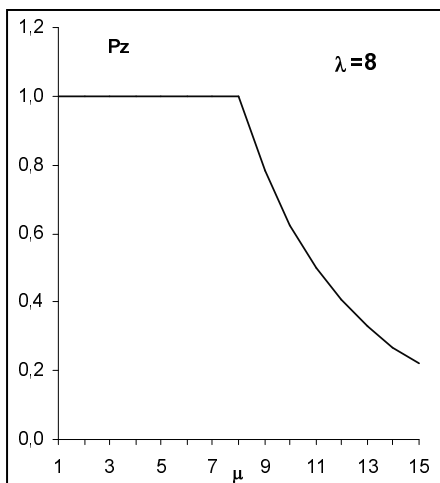
L duljina paketa [b]

$\mu=R/L$ brzina prijenosa u paketima [1/s]

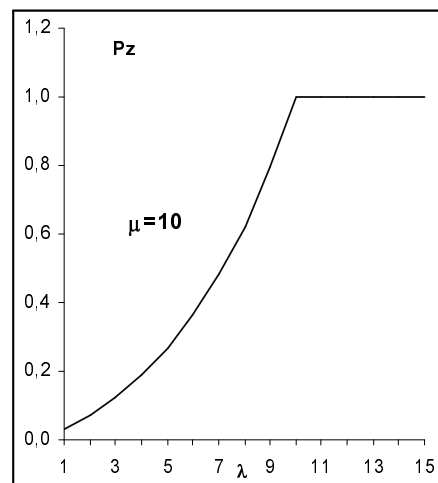
$v = \rho - 1$

$\sigma^2 = 2\lambda T_s^2$ za M/M/1 model

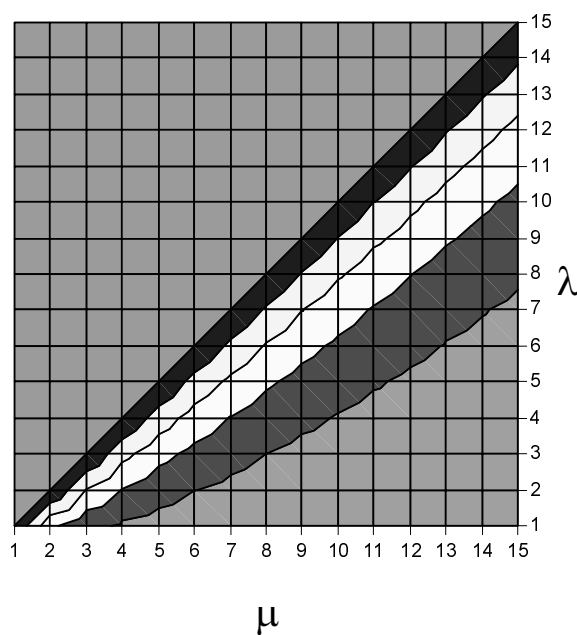
$\sigma^2 = \lambda T_s^2$ za M/D/1 model



Slika 4.43. Vjerojatnost čekanja $z=0,125$ s u ovisnosti o brzini prijenosa μ za zadani intenzitet ulazaka $\lambda=8$



Slika 4.44. Vjerojatnost čekanja $z=0,125$ s u ovisnosti o intenzitetu ulazaka λ za zadanu brzinu prijenosa $\mu=10$



Slika 4.45. Vjerojatnost čekanja u ovisnosti o intenzitetu ulazaka λ i brzini prijenosa μ

Primjer 7.6. :

$R=64$ kb/s brzina prijenosa
 $\lambda=50$ 1/s paketa u sekundi
 $L=1$ kb duljina paketa

$z = 0,1$ s dopušteno čekanje

$\rho = \lambda L / R = 50 \cdot 1 / 64 = 0,78125 < 1$, sustav je stabilan

$\mu = R / L = 64$ 1/s

$\nu = \rho - 1 = -0,21875$

$\sigma^2 = 2\lambda T_s^2 = 2 \cdot 50 \cdot (1/64)^2 = 0,024414$

$$P_z = \exp\left(-\frac{2 \cdot 0,21875}{0,024414} 0,1\right)$$

$P_z = 0,193 = 16,7\%$

Kao usporedbu, pogledajmo i sustav M/D/1

$$\sigma_{TS}^2 = 0$$

$$\sigma^2 = \lambda \cdot (\sigma_{TS}^2 + T_s^2) = \lambda \cdot T_s^2$$

Za M/D/1 sustav, prosječno vrijeme čekanja u repu je:

$$T_w = -\frac{\sigma^2}{2 \cdot \nu} = \frac{\rho \cdot T_s}{2 \cdot (1 - \rho)}$$

Boravak u sustavu traje prosječno:

$$T_Q = T_w + T_s = \frac{\rho \cdot T_s}{2(1 - \rho)} + T_s = \frac{T_s}{1 - \rho} \left(1 - \frac{\rho}{2}\right)$$

Prosječna duljina repa je:

$$L_w = \lambda \cdot T_w = \frac{\rho^2}{2(1 - \rho)}$$

Prosječan broj korisnika u sustavu je:

$$L_Q = \lambda \cdot T_Q = \frac{\rho}{1 - \rho} \left(1 - \frac{\rho}{2}\right)$$