

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA**

DIPLOMSKI RAD br. 1868

**ALGORITMI ZA OPTIMIZACIJU
PRIJENOSNE TELEKOMUNIKACIJSKE
MREŽE**

Matija Mikac

Zagreb, rujan 2000.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. ŠIROKOPOJASNA MREŽA INTEGRIRANIH USLUGA	4
2.1. Prijenosni sustav SDH/SONET	6
2.1.1. Prednosti i osnovna svojstva SDH	6
2.1.2. Struktura STM-1 okvira	7
2.1.3. Elementi SDH mreže. SDH oprema	9
2.1.4. Topologije SDH mreže	11
2.1.5. ATM mreža na SDH	11
3. PROBLEMI DIZAJNA ŠIROKOPOJASNIH MREŽA	13
3.1. Topologije mreža	15
3.2. Model mreže. Dvostruka povezanost	17
3.3. Metode dizajna topologije mreža	19
3.3.1. <i>Greedy-Ears</i> metoda	21
3.3.2. Metoda dva stabla	21
3.3.2.1. Unaprijeđenje metode dva stabla	23
3.3.3. Metoda prstena	24
3.3.3.1. Poboljšanje metode prstena	27
3.3.4. Metoda prstena s dodatnim granama	29
3.3.5. Lokalne transformacije	30
3.4. Problemi dizajna u praksi. Unaprijeđenje postojeće koncentrirane optičke mreže	33
3.4.1. Koncentrirana optička mreža	33
3.4.2. Zaštitno komutiranje	34
3.4.3. Dvostruko udomljivanje	36
3.4.4. Preusmjeravanje puteva	37
3.4.5. Samooporavljivi SDH prstenovi	38
3.5. Pouzdanost mreže	39
3.5.1. Abrahamov algoritam	40

4. PROGRAMSKO RJEŠENJE ZA DIZAJN MREŽE	41
4.1. Izvedba programskog sustava	41
4.2. Korisničko sučelje i rad s programom	42
4.3. Podržane metode dizajna	46
4.4. Dodatne mogućnosti	47
5. REZULTATI DIZAJNA MREŽE	49
5.1. Funkcioniranje osnovnih metoda	49
5.2. Rezultati dobiveni pratećim programskim rješenjem	51
5.2.1. Standardni model mreže	51
5.2.2. Model koncentrirane optičke mreže	57
6. ZAKLJUČAK	61

LITERATURA

1. UVOD

Standardna telefonija dugo je vremena dominirala u odnosu na ostale telekomunikacijske mreže. No, s razvojem novih, sve pristupačnijih tehnologija (optika, poluvodiči) sredinom osamdesetih javlja se tendencija razvoja novih digitalnih mreža za prijenos podataka. Nove mreže trebale su, kao odgovor na sve veće i složenije zahtjeve korisnika, ponuditi kvalitetna osnovna rješenja koja bi se kasnije mogla lako i što jednostavnije unaprijeđivati. Kao i uvijek, s jedne strane nalazili su se korisnici koji su zahtjevali više usluga (inteligentne mreže), veće brzine prijenosa (širokopojasne mreže) i određenu razinu kvalitete usluge (pouzdanost, raspoloživost, kašnjenje) – sve to uz prihvatljive uvjete (cijenu, dostupnost), a s druge strane davatelji usluga koji su to sve željeli omogućiti korisnicima, pri tome pazeći da ostvare što veću zaradu. Dakle, gradeći modernu mrežu koja će ponuditi nove usluge i veće brzine prijenosa, davatelji usluga morali su ponuditi cijenu koja će privući što više korisnika, a isto su tako i nastojali što više smanjiti vlastita ulaganja.

Upravo pristupačne cijene raspoložive tehnologije i neprestani razvoj i napredak novih tehnologija omogućile su ostvarenje tih smjernica razvoja telekomunikacijskih mreža. U prvom redu tu su transmisijski mediji i oprema bazirana na optici, koja se i dalje razvija i povećava mogućnosti uz istu ili još nižu cijenu, te neprestano unaprijeđivanje poluvodičkih tehnologija. Naravno, nije se išlo u nagle promjene pristupnih mreža, niti se je težilo zatiranju postojeće telefonske mreže (još uvijek najzastupljenija mreža) – prije svega počinje ugradnja novih tehnologija u temeljnu (*backbone*) mrežu, dok se kasnije izvode i promjene prema samom korisniku u pristupnim mrežama. Digitalna telefonska mreža sa brzinama do 64kbit/s do korisnika nije zadovoljavala nove rastuće zahtjeve za prijenosom podataka, pa se ide na razvoj brzih mreža – uvodi se uskopojasna digitalna mreža integriranih usluga - N-ISDN (*Narrowband Integrated Services Digital Network*), koji je omogućio maksimalnu brzinu prijenosa od 144 (128+16) kbit/s u osnovnom, odnosno 2Mbit/s u primarnom prijenosu, što je još uvijek bilo nedovoljno za implementaciju prijenosa zahtjevnih multimedijских sadržaja koju su korisnici zahtjevali. N-ISDN omogućio je više vrsta usluga (integrirana mreža), što je bila novost. Pristupna mreža i dalje je bila bazirana na bakru, s tendencijom prelaska na optiku.

Zbog relativno malih brzina koje nisu mogle podržati sve zahtjeve korisnika za novim uslugama, uskoro počinje razvoj širokopojasne digitalne mreže integriranih usluga - B-ISDN (*Broadband ISDN*). Nudeći i širok spektar usluga i velike brzine prijenosa takva mreža postaje idealno rješenje, no problem izvedbe i uvođenja takvih mreža usporava

njihovu širu upotrebu. Sama temeljna mreža u B-ISDN bazira se, prema preporuci ITU-T, na ATM-u (*Asynchronous Transfer Mode*) – paketskoj tehnici komutiranja, multipleksiranja i prijenosa podataka. Zbog postojeće mrežne infrastrukture rijetko se prijenos podataka koristi sam ATM – najčešće se radi o prijenosu ATM ćelija unutar SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) ili PDH (*Plesiochronous Digital Hierarchy*) okvira. Dakle, na fizičkom sloju mreže koristi se sinkrona, odnosno pleziokrona digitalna hijerarhija. Pakiranje ATM ćelija u PDH i SDH okvire standardizirano je od strane ITU-T (*International Telecommunication Union – Telecommunications Standards Sector*). Pakiranje u PDH omogućava iskorištavanje postojeće raširene PDH infrastrukture. U budućnosti se može očekivati i korištenje ‘čistog’ ATM-a za prijenos na fizičkom sloju – izravni prijenos ćelija (*cell-based transmission*).

Uvođenje širokopojasne temeljne mreže mora se izvesti transparentno prema postojećim uslugama (dominira telefonija i uskopojasne usluge), pa u početnoj fazi izgradnje takvih mreža nije potrebno ulaziti u izgradnju novih ni preinaku postojećih pristupnih mreža. No, nakon početne faze koja obuhvaća isključivo unapređenje temeljne mreže, mora se pristupiti i promjenama u pristupnim mrežama. Postoji niz različitih pristupa koje propagiraju vodeći svjetski ponuđači usluga. Od naprednih pretplatničkih linija xDSL (*Digital Subscriber Line*) koje su i dalje bazirane na bakru, a ipak omogućuju veće brzine prijenosa, do uvođenja optike do samog korisnika ili korisničkih blokova FTTx (*Fiber to the...*) i korištenja postojeće infrastrukture (pretežno koaksijalni kablovi) postavljene za kablovske TV sustave.

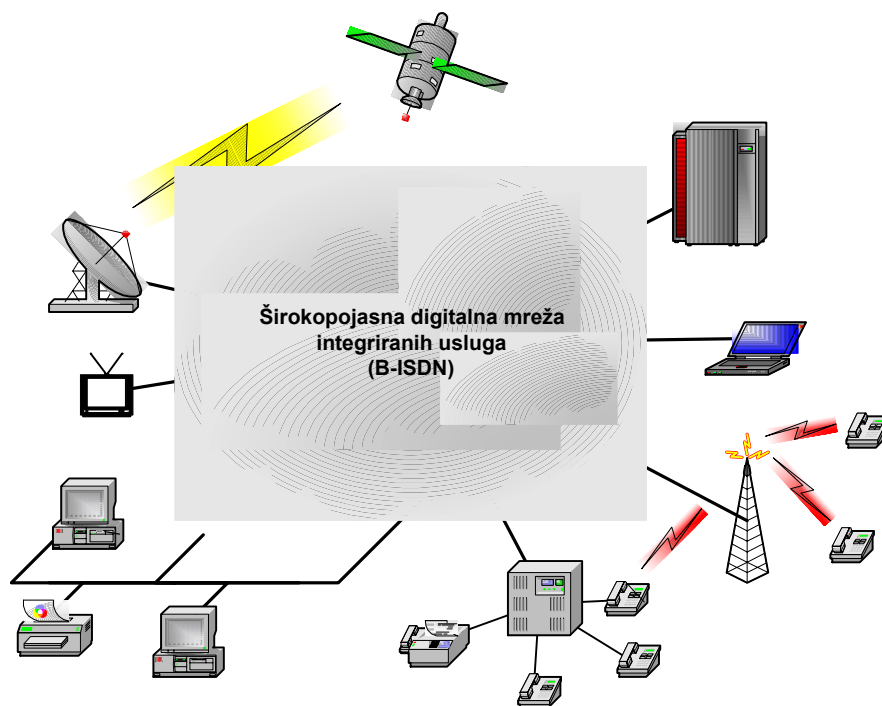
Praksa uvođenja novih tehnologija i razvoj širokopojasne mreže integriranih usluga ukazala je i na potrebu promjena u procesu dizajna mreže. Osim postizanja što niže cijene mreže (interes davatelja usluga) nužno je osigurati i višu razinu raspoloživosti i pouzdanosti mreže (kako bi korisnički zahtjevi bili zadovoljeni, te kako bi se spriječili prometni gubici uslijed kvarova u informacijski vrlo zahtjevnim mrežama). Budući da optički medij posjeduje izuzetno velik prometni kapacitet, pojedinim prijenosnim medijima prolaze velike količine podataka. Eventualni kvar medija uzrokovao bi goleme informacijske gubitke, što nikako ne smijemo dozvoliti. Upravo stoga potrebno je ostvariti pouzdan prijenos podataka što se najčešće ostvaruje uključivanjem alternativnih prijenosnih puteva u topologiju mreže. U slučaju kvara na dijelu mreže na taj je način omogućeno preusmjeravanje prometa na alternativni put, svojevrsna zaštita od nastalog kvara, te samim time povećanje pouzdanosti mreže. Korištenjem alternativnih puteva dobivamo višestruku povezanost među čvorovima u mreži. Takvo povećanje razine povezanosti povlači za sobom i povećanje cijene mreže. Upravo pronalaženje optimalnog odnosa cijene i pouzdanosti mreže je glavni zadatak kojeg

nove metode dizajna moraju riješiti. Pokazalo se, da optimalni odnos cijene i pouzdanosti dobivamo u dvostruko povezanim mrežama (Wu, 1988; Monma, 1989). To su mreže u kojima između svaka dva čvora mreže postoje dva neovisna, disjunktna puta – primarni i sekundarni. Iz disjunktosti i neovisnosti puteva proizlazi, da u slučaju jednostrukog kvara mreže na primarnom putu, taj kvar neće utjecati na sekundarni put. U tom slučaju, promet koji je išao primarnim putem, preusmjeravamo na sekundarni put. Dodatna zalihost (redundancija) veza u mreži može biti uvjetovana nužnošću smanjenja kašnjenja zbog prolaska kroz čvorove mreže (digitalni prospojici, add-drop multipleskopi), ili pak dodatnim zahtjevima u slučaju mogućih većih kvarova (prirodne nepogode, ostali slučajevi sa katastrofalnim posljedicama) pri kojima se u samoj mreži mogu pojaviti višestruki kvarovi. No, dodavanje dodatne zalihosti u mrežu, rezultirati će i povišenjem cijene mreže, pa je uvijek potrebno voditi računa o tome da li su takve intervencije opravdane ili nisu.

Cilj ovog diplomskog rada je dati prikaz nekih algoritama i metoda koje mogu biti korištene u dizajnu topologije mreže otporne na eventualne kvarove. Poseban se naglasak daje na SDH kao preporučeno rješenje fizičkog sloja buduće širokopolasne mreže bazirane na ATM-u. U drugom poglavlju opisuju se osnovna svojstva širokopolasne mreže integriranih usluga, s posebnom naznakom korištenja SDH kao fizičkog sloja mreže. Dan je i šturi opis SDH standarda, te opreme i mogućnosti koje taj standard nudi. Treće poglavlje daje osvrt na probleme dizajna optimalne topologije mreže, posebice dizajna oporavljive širokopolasne mreže – detaljno su opisani modeli i metode dizajna implementirane u prateće programsko rješenje, uz prikaz rezultata pojedinih metoda nad primjerima mreža. Prikazan je i odnos pouzdanosti i cijene mreže koji u stvari najbolje pokazuje kvalitetu rezultata. Prateće programsko rješenje opisano je u četvrtom poglavlju. U petom poglavlju dan je prikaz korištenja različitih metoda dizajna, te pregled rezultata dizajna topologije dobivenih za nekoliko testnih mreža korištenjem pratećeg programskog rješenja. Izvedeno je razmatranje rezultata, zajedno sa zapažanjima. U zaključku je još jednom dan pregled razvoja buduće širokopolasne mreže, te pozicionirana uloga kvalitetnog dizajna fizičkog sloja u svemu tome. Dana su i neka razmišljanja o dodatnim mogućnostima poboljšanja ponuđenih rješenja dizajna.

2. ŠIROKOPOJASNA MREŽA INTEGRIRANIH USLUGA

Unazad desetak godina svjedoci smo agresivnog zamaha razvoja novih tehnologija. Telekomunikacije kao jedno od visokotehnoloških područja nisu bile zaobidene u tom razvoju. Čak štoviše, uz razvoj tehnologije, javljaju se i ideje o dodatnom unaprijeđenju postojeće telefonske mreže, povećava se promet u mrežama za prijenos podataka, a korisnici svakim danom postavljaju nove zahtjeve za većom propusnošću i većim brojem usluga. S vremenom se uvode digitalni komutacijski sustavi, kao transmisijski medij temeljnih mreža počinje prevladavati optika, povećavaju se brzine lokalnih mreža... Nakon uvođenja N-ISDN (*Narrowband Integrated Services Digital Network* – uskopojasna digitalna mreža integriranih usluga) 1984. godine, koji je korisnicima nudio osnovne brzine od 144 (128+16) kbit/s i 2.048 Mbit/s uvidjelo se da te brzine prijenosa ne mogu zadovoljiti sve zahtjeve korisnika, posebice nakon pojačanog širenja korištenja Interneta, te dodatnih korisničkih zahtjeva za većim brzinama podatkovnog prijenosa. Zbog toga započinje razvoj širokopojasne digitalne mreže integriranih usluga B-ISDN (*Broadband Integrated Services Digital Network*). Takva mreža morala je zadovoljiti sve zahtjeve korisnika – od povezivanja LAN-ova, preko prijenosa slike i videa, do implementacija digitalne televizije visoke razlučivosti (HDTV). Naravno, mreža mora podržavati sve postojeće usluge, nudeći transparentnost prema postojećim rješenjima, te biti spremna za eventualne nadogradnje u budućnosti.

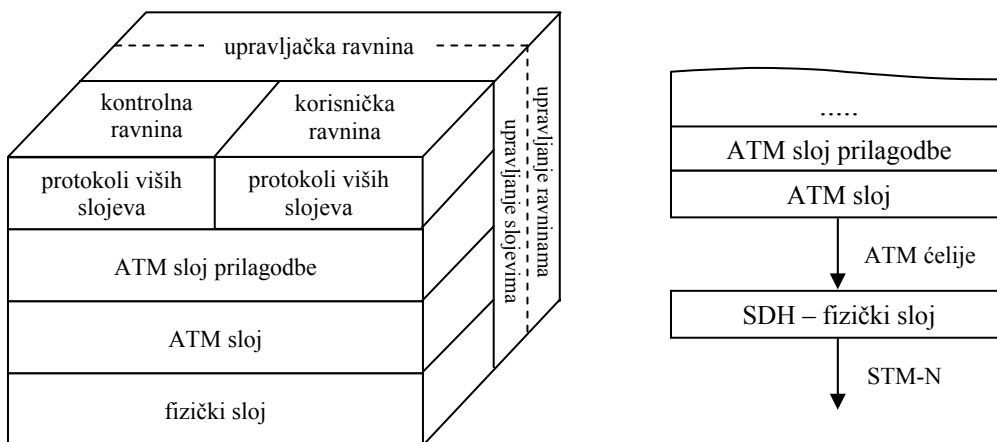


Slika 2.1 : Širokopojasna mreža

Preporukama od strane ITU-T (prije CCITT) kao osnovna tehnologija na kojoj se takva širokopojasna mreža integriranih usluga mora bazirati navodi se ATM (*Asynchronous Transfer Mode*). Iako ATM osim tehnika komutiranja i multipleskiranja, nudi i mogućnost prijenosa podataka (*Cell Based Transmission*), zbog postojeće infrastrukture temeljne mreže, te zbog razrađenih mehanizama prijenosa različitih vrsta prometa, na fizičkom sloju širokopojasne mreže proporuča se korištenje sinkrone digitalne prijenosne hijerarhije (SDH). Preporukama ITU-T definiran je i prijenos korištenjem nešto starije, još uvijek dosta zastupljene, pleziokrone digitalne prijenosne hijerarhije (PDH).

Dakle, aktualni B-ISDN modeli mreža koriste univerzalnost koju nudi ATM mehanizmima prijenosa različitih vrsta prometa, s mogućnošću kontrole i kvalitete prijenosa, te ju djelomično kombiniraju i udružuju sa postojećom SDH/PDH infrastrukturom. Takva mreža ostaje otvorena za nadogradnju, te trenutno predstavlja najbolju osnovu za rješavanje problema izgradnje širokopojasne mreže budućnosti.

Prikaz takvog modela mreže prema slojevima podudara se sa prikazom standardne ATM mreže, s jedinom razlikom u fizičkom sloju gdje se koristi SDH/PDH.



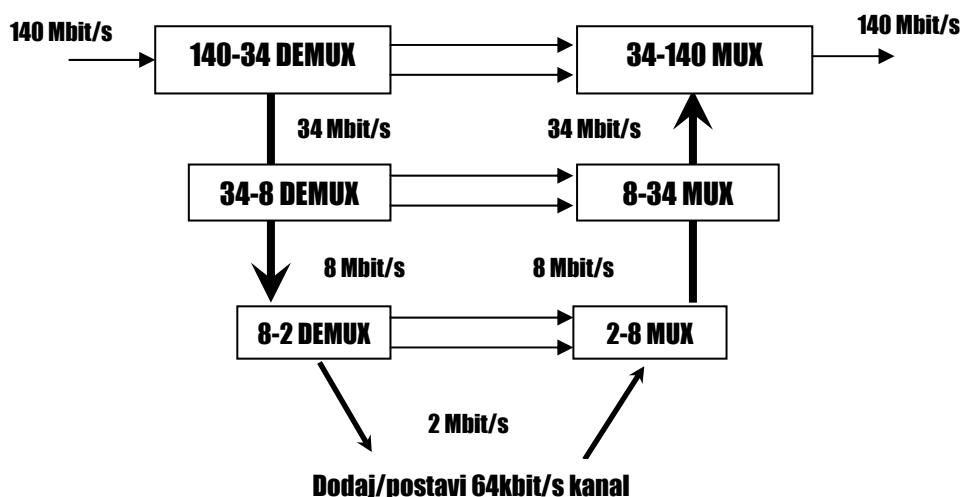
Slika 2.2 : ATM širokopojasna mreža po slojevima

2.1. Prijenosni sustav SDH/SONET

Početak razvoja brzih temeljnih digitalnih mreža koristila se isključivo PDH, no daljnjim razvojem i uvođenjem dodatnih poboljšanja različiti proizvođači telekomunikacijske opreme koristili su različite standarde spajanja svoje visokopropusne opreme. Stoga 1992. ITU-T uvodi SDH standard koji je omogućio izgradnju temeljne mreže bazirane na optici neovisno o opremi različitih proizvođača. Osim sučelja prema optičkim prijenosnim sustavima, SDH ima definirana sučelja za korištenje bežičnih radio i satelitskih veza. Od standardizacije, SDH nezadrživo povećava svoj udio u mrežama, što je dovelo i do ITU-T preporuka prema kojima se upravo SDH preporuča kao fizički sloj buduće širokopolasne mreže bazirane na ATM-u.

2.1.1. Prednosti i osnovna svojstva SDH

Do uvođenja SDH najzastupljeniji standard za prijenos bio je PDH. Iako vrlo zastupljen, taj standard nema definirana sučelja za brzine iznad 140 Mbit/s, što ga čini nepovoljnim za korištenje u budućoj mreži. Ipak, struktura širokopolasne mreže podrazumijeva transparentnost i prema tom standardu. Pleziokrona digitalna hijerarhija multipleksiranja i demultipleksiranja izvodi u nekoliko koraka (slika 2.2.), što usporava i otežava prijenos podataka.



Slika 2.3 : PDH multipleksiranje i demultipleksiranje

Tako npr. da bi izdvojili određeni 64 kbit/s signal iz 140 Mbit/s toka, na PDH multipleksoru trebamo provesti demultipleksiranje na 34 Mbit/s, zatim na 8 Mbit/s i na kraju na 2 Mbit/s, te nakon toga iz E1 signala pročitati dio za traženi kanal. Multipleksiranje i

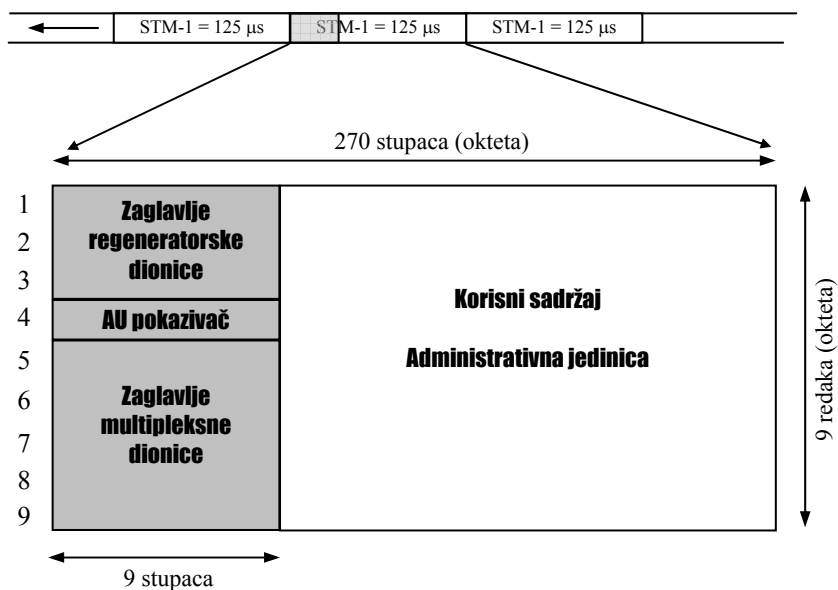
demultipleksiranje 64 kbit/s kanala (30 + 2 kanala) u 2,048 MBit/s E1 sustav obavlja se oktet po oktet, dok se na višim razinama to obavlja bit po bit, što strukturu multipleksiranja čini složenom.

Upravo zbog složenog multipleksa PDH bazirana mreža sastoji se od niza veza od točke do točke, što onemogućuje nadzor veze s kraja na kraj. Ograničenje u korištenju PDH predstavlja i mogućnost korištenja jedino diskretnih brzina prijenosa ($n \times DS0$), a jedan od nedostataka svakako je i razlika u standardima korištenim u SAD, Japanu i Europi.

Sinkrona digitalna hijerarhija (SDH) rješava većinu problema i nedostataka pleziokrone digitalne hijerarhije (PDH). SDH podržava nadzor veza s kraja na kraj, jednostavnije multipleksiranje i demultipleksiranje umetanjem okteta, uvijek moguć pristup do pojedinog kanala, omogućujući pritom i centralizirani nadzor mrežnih elemenata, što može biti osobito korisno pri detekciji i rješavanju problema kvarova u mreži. U nastavku je dan šturi prikaz SDH, s dodatnim naglaskom na korištenje ATM-a.

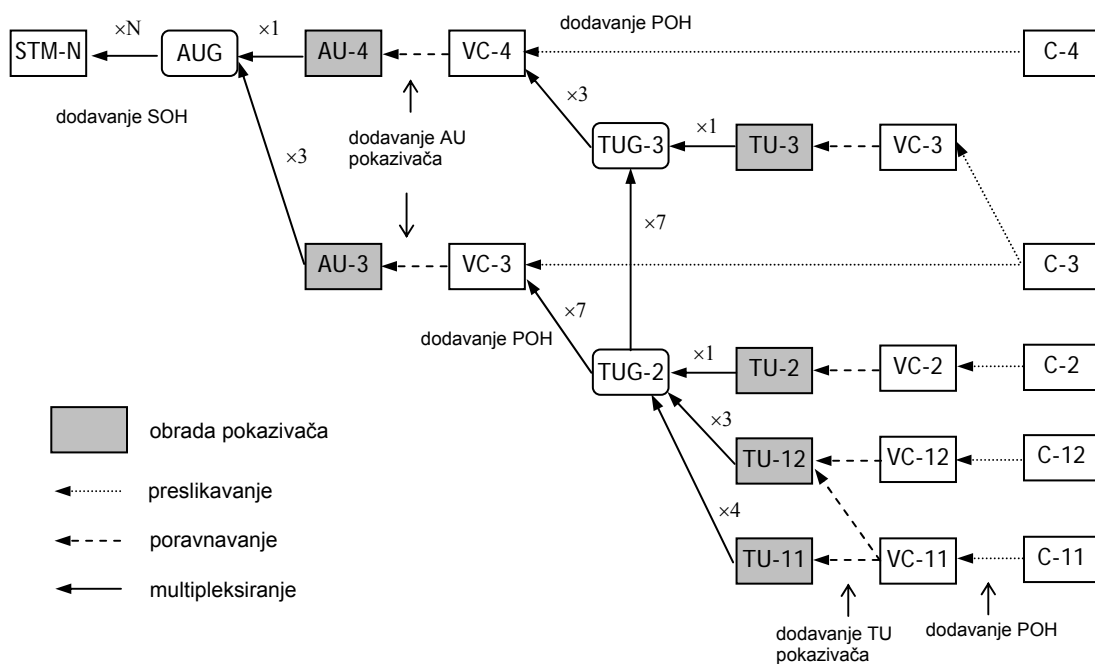
2.1.2. Struktura STM-1 okvira

Okviri prema SDH standardu organizirani su u STM (*Synchronous Transfer Module*). Osnovni okvir kapaciteta 155,520 MBit/s naziva se STM-1 okvirom i prikazan je na slici 2.4. Sastoji se od 270 stupaca i 9 redaka, gdje svaki element sadrži jedan oktet bitova. Prvih 9 stupaca koristi se za zaglavlja regeneratorske i multipleksne dionice, te za pokazivač administrativne jedinice, dok ostalih 261 stupac prenose korisni sadržaj.



Slika 2.4 : Struktura osnovnog STM okvira

Korištenjem pokazivača omogućeno je kvalitetno sinkroniziranje i lako lociranje administrativnih jedinica unutar strukture okvira. Prijenos korisnih informacija iz izvora različitih brzina unutar STM-N okvira omogućen je stvaranjem virtualnih kontejnera, tributarija i administrativnih jedinica. Tributariji i administrativne jedinice nastaju dodavanjem pokazivača na virtualne kontejnere. Virtualni kontejneri su strukture koje se prenose s jednog kraja mreže na drugi, dok sve ostale strukture odlikuje veza od točke do točke (dionicama), s mogućnošću kontrole pojedine dionice pomoću zaglavlja dionica (SOH – *Section Overhead*) koje se dodaju pri različitim stupnjevima multipleksa. Standard multipleksiranja/demultipleksiranja u SDH prikazan je na slici 2.5.



Slika 2.5 : Standard multipleksiranja i demultipleksiranja u SDH

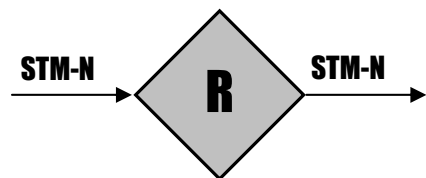
Sam SDH dijeli transportne funkcije mreže na tri sloja – regeneratorsku dionicu (*Regenerator Section*), multipleksnu dionicu (*Multiplex Section*) i put (*Path*). Put u SDH odgovara putu s jednog kraja mreže na drugi (od početnog do krajnjeg SDH terminala (terminalnog multipleksora ili neke druge opreme)), a njime se neovisno o ostalim dionicama prenose virtualni kontejneri sa podatkovnim sadržajima. Multipleksna dionica je dionica između dva multipleksora u mreži, a regeneratorska dionica je dionica između bilo kojeg elementa mreže i regeneratora. Prelascima na nove multipleksne, odnosno regeneratorske dionice, mijenjaju se i zaglavlja dionica (unutar SOH – RSOH = zaglavlje regeneratorske dionice, MSOH = zaglavlje multipleksne dionice). Na razini dionica omogućena je kontrola

toka, detekcija pogrešaka, a predviđeni su i automatski modeli zaštitnog komutiranja (APS – *Automatic Protection Switching*). Prikaz dionica unutar SDH dan je na slici X, zajedno sa dionicama karakterističnim za više ATM slojeve širokopojasne mreže.

2.1.3. Elementi SDH mreže. SDH oprema.

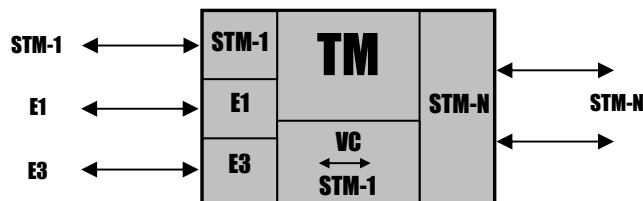
Nakon početnih razlika u sučeljima i ‘standardima’ povezivanja širokopojasne opreme različitih proizvođača, uvođenje i standardizacija ITU-T sinkrone digitalne hijerarhije dovela je do izjednačavanja svih sučelja i mogućnosti međudjelovanja opreme svih proizvođača. S razvojem novih ideja i pravaca u postavljanju osnova širokopojasne mreže, te s unaprijeđivanjem tehnoloških procesa proizvodnje SDH oprema postaje sve sofisticiranija, nudeći niz novih mogućnosti (ATM sučelje sa direktnim mapiranjem ATM ćelija u STM-N okvire, automatsko zaštitno komutiranje APS...). SDH uređaje funkcionalno dijelimo na : regeneratore, multipleksore i digitalne prospojenike (DXC, DCS – Digital CrossConnect).

Regeneratori se koriste na dužim dionicama puteva, u slučajevima kada dolazi do slabljenja signala u optičkim vlaknima. Regeneratori tada obavljaju pojačanje signala, te mijenjaju RSOH (zaglavlje regeneratorske dionice), dok zaglavlja multipleksne dionice i zaglavlja puta ostavljaju netaknutima. Shema regeneratora prikazana je na slici 2.6.



Slika 2.6 : SDH regenerator

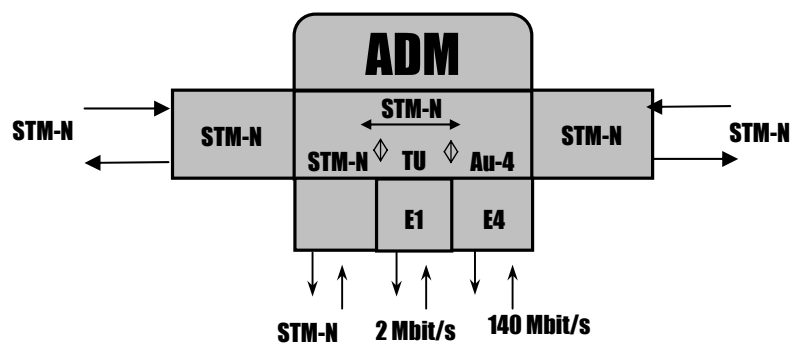
Multipleksori/demultipleksori se koriste za dodavanje, izdvajanje i prijenos signala nižih brzina u brže tokove. Osnovna podjela multipleksora je na krajnje multipleksore (TM – Terminal Multiplexor), te na multipleksore za dodavanje i izdvajanje signala (ADM – Add/Drop Multiplexor).



Slika 2.7 : SDH terminalni multipleksor

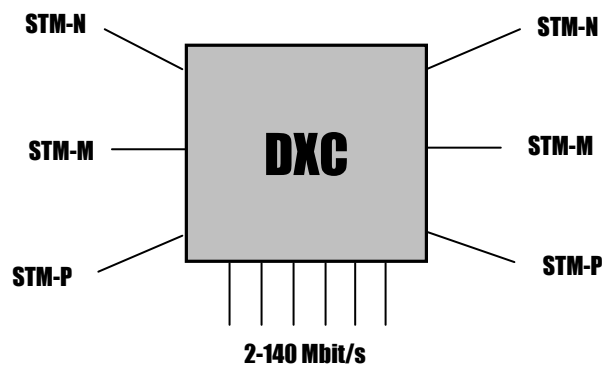
Krajnji multipleksori (slika 2.7.) obavljaju multipleks signala nižih brzina u brže tokove. Npr. uključuju se E1 i STM-1 signali, kreiraju se zaglavljiva dionica, virtualni kontejneri i sve se uključuje u npr. STM-4 signal. Dakle, u TM se obavlja kompletni multipleks signala, a naravno moguć je i demultipleks. TM se postavljaju na krajeve mreže, a njihovu ulogu u određenim strukturama mreže mogu preuzeti i ADM.

ADM obavlja izdvajanje i dodavanje signala u tok. Po potrebi se obavlja i samo izdvajanje toka, uz nastavljanje prijenosa istog toka (*Drop and Continue Mux*), što se može iskoristiti u APS pri izgradnji zaštitnih ADM prstenova.



Slika 2.8 : SDH multipleksor s dodavanjem i izdvajanjem toka

Digitalni prospojnici su najsloženiji SDH mrežni elementi sa vrlo velikim mogućnostima. Posjeduju veliki broj sučelja spremnih za korištenje, podržavaju dodatnu kontrolu prometa (daljinsko upravljanje i slično), te se koriste za upravljanje u kritičnim situacijama. Najčešće se izvodi centralizirana kontrola nad više DXC-ova čime se postiže kompletna kontrola nad prometom određene mreže ili njenog dijela. Ipak, zbog složenosti i više cijene često se umjesto njih koriste jači ADM.



Slika 2.9 : SDH digitalni prospojnik

2.1.4. Topologije SDH mreža

Univerzalnost SDH bazirane mreže omogućuje korištenje različitih topoloških rješenja mreže. Od najjednostavniji veza točka do točke, preko točka do više točaka, sve do složenih topologija u kojima se kombiniraju višestruki ADM zaštitni prstenovi.

Za ostvarenje veze od točke do točke dovoljna su dva terminalna multipleksora uz eventualno korištenje regeneratora zbog većih udaljenosti između terminala.

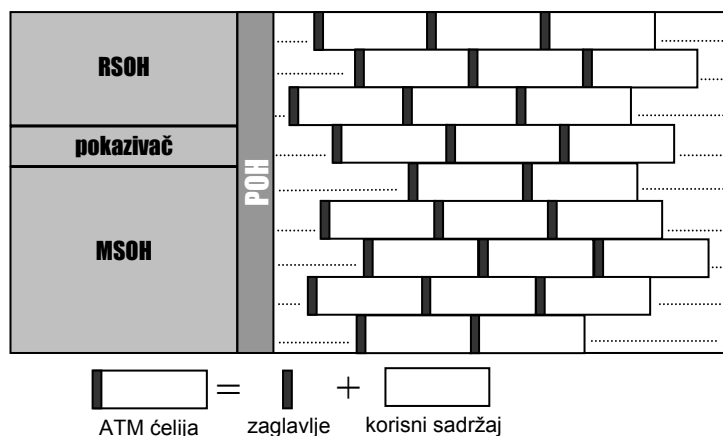
Veza od točke prema više točaka uz terminalne multipleksore i eventualno potrebne regeneratore, koristi i ADM za usmjeravanje prometa prema ostalim terminalima. Kombiniranjem veza od točke do točke ili više točaka nastaju mreže karakterizirane zvjezdastom i/ili prstenastom topologijom.

Topologija mreže (*mesh topology*) kombinira korištenje DXC i ADM, te se u takvoj mreži za zaštitu od kvarova koriste mogućnosti podržane u digitalnim prospojnicima, uz mogućí centralizirani nadzor pojedinih mrežnih elemenata. Takva, može se reći prijelazna, topologija je zastupljena u mrežama koje su od standardnih telefonskih mreža postepeno unaprijeđivane, i u stvari je međukorak prema razvoju najpouzdanijeg SDH modela sa zaštitnim prstenovima.

Najčešće korišteni pri izgradnji novih mreže, te u budućnosti najpoželjniji topološki model SDH mreže je model sa zaštitnim ADM prstenovima. U takvim mrežama korištenjem ugrađene podrške za APS u multipleksnim dionicama omogućena je zaštita prijenosa podataka u slučaju kvarova.

2.1.5. ATM mreža na SDH

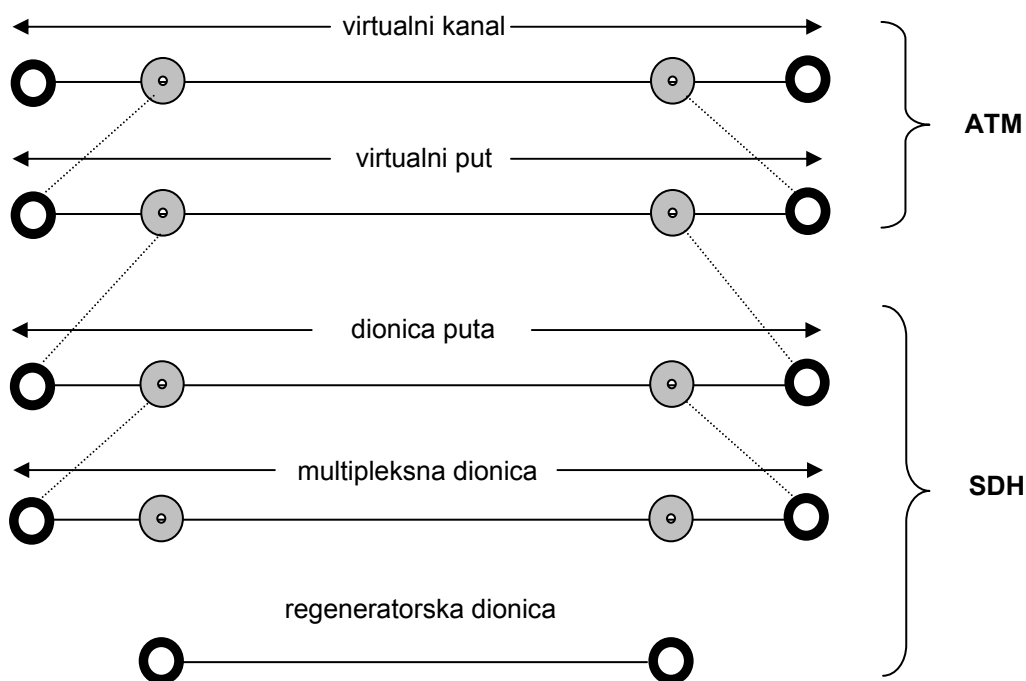
Struktura SDH standarda omogućava njegovu široku primjenu. Nakon uvođenja u standardnu telefonsku mrežu naglo je rasla njegova zastupljenost, te je nastavljen razvoj preporuka i modela. ITU-T je preporučio korištenje SDH kao fizičkog sloja za buduću širokopojasnu mrežu integriranih usluga baziranu na ATM-u. Osnovna prednost ATM-a je efikasna podrška za širok spektar usluga i brzina prijenosa zbog njegove asinkronosti i male veličine ćelija. Mapiranje ATM ćelija u SDH okvire u potpunosti je definirano (slika 2.10.), a postoje i standardi za mapiranje u PDH, koji se također mogu koristiti na postojećoj PDH infrastrukturi.



Slika 2.10 : Pakiranje ATM ćelija u SDH okvir

Male ćelije od 53 okteta pokazale su se vrlo efikasnim u prijenosu različitih podataka, a razvijena su i sučelja prema ostalim standardima prijenosa (ATM LAN-ovi, IP over ATM, FDDI...).

Slojevita struktura rada sa virtualnim kanalima i virtualnim putevima karakteristična za ATM nadograđuje se na puteve definirane u SDH (slika 2.11).



Slika 2.11 : Dionice ATM mreže bazirane na SDH

3. PROBLEMI DIZAJNA ŠIROKOPOJASNIH MREŽA

Telekomunikacije spadaju u jedno od tehnološki najrazvijenijih i najrazvijanijih područja znanosti. Posljednja desetljeća karakterizira snažno zadiranje računalnih znanosti u telekomunikacijsku struku. Integracijom niza dotad razdvojenih područja ušli smo u informacijsko doba (*Information Age*) u kome informacije postaju najznačajnije mjerilo vrijednosti. Popularizacijom Interneta i njegovim enormnim rastom informacije postaju dostupne svakome, na svakom mjestu u svako vrijeme. Značajni zamah ostvaren je u poslovnom području (*e-commerce, e-business*), medicini (*Telemedicine*), te gotovo da nema područja ljudske djelatnosti koje barem dijelom nije uključeno u to.

Sav taj razvoj postavio je nove zahtjeve na mrežnu infrastrukturu. Postojeća telefonska mreža sa ograničenim brzinama analognog prijenosa podataka u govornom području (modulacija i demodulacija modemima) nije mogla zadovoljiti zahtjeve naprednijih korisnika, pa se pristupa razvoju uskopojasne digitalne mreže integriranih usluga (N-ISDN – *Narrowband Integrated Service Digital Network*) koja je predstavljala prijelazno rješenje prema širokopojasnom ISDN-u (B-ISDN – *Broadband ISDN*). Daljnje unaprijeđenje prema širokopojasnim mrežama pretpostavlja promjene kako u transmisivnim tako i u komutacijskim dijelovima mreža. Umjesto bakrenih vodiča u mrežu se uvodi optika – optička vlakna prvo se uvode u temeljnu mrežu koja povezuje komutacijsko sklopovlje, a tendencija je približavanja optičkih zaključenja (OLT) sve bliže i bliže korisniku (FTTx). Optičko vlakno nudi niz prednosti u odnosu na bakrenu paricu – veći prijenosni kapacitet, veću pouzdanost, manju podložnost vanjskim utjecajima, slabije prigušenje, manje dimenzije i cijenu. U prijelaznom razdoblju koriste se kombinirane metode korištenja postojećih bakrenih parica ili koaksijalnih kablova korištenih za kablovsku televiziju (CATV). Parice se iskorištavaju za prijenos na kraćim udaljenostima korištenjem digitalnih pretplatničkih linija (xDSL).

Razvoj tehnologije i unaprijeđivanje proizvodnje dovodi do dodatnog poboljšanja svojstava ionako već nadmoćnih optičkih prijenosnih medija i opreme, razvoj poluvodičkih tehnologija daje bolja rješenja za razvoj optičkih prijemnika i predajnika, te ostale opreme. S druge strane, neprestano unaprijeđivanje dovodi do pada cijene tehnologije i sve se nastavlja vrtjeti u krug, nudeći dizajnerima mreže mnoge mogućnosti izvedbe rješenja buduće širokopojasne mreže.

Dakle, mogućnosti koje tehnologija nudi su vrlo velike. No, razvoj nove mreže donosi i niz noviteta u samom dizajnu u odnosu na tradicionalnu mrežu. Veći zahtjevi korisnika kako prema brzinama prijenosa, tako i prema kvaliteti usluga predstavljaju nove

izazove za dizajnere mreža. Ogroman promet informacija kroz mrežu povlači i velike probleme i gubitke u slučaju kvarova u mreži. Eventualni ispad pojedinog čvora ili prekid i kvar na nekom od optičkih kablova može dovesti do vrlo velikih informacijskih gubitaka. Dakle, buduća mreža zahtijeva i dodatnu zaštitu radi povećanja pouzdanosti i raspoloživosti mreže u slučaju kvarova. Zbog toga je nužno u mrežu uvesti dodatnu redundanciju i dodatne modele zaštite informacija, kako bi se u slučaju kvara mogao nesmetano odvijati prijenos informacija prema korisnicima kojima su te informacije namijenjene. Drugim riječima, osnovni zahtjev koji se postavlja pred novu širokopoljnu mrežu je njena oporavljivost u slučaju kvarova (*survivability*). Ovisno o načinu izvedbe mreža se automatski oporavlja od kvara ili pak je nužno dodatno posredovanje operatora.

Osnovno rješenje za povećanje pouzdanosti mreže je dodavanje dodatnih puteva između čvorova, kojima bi se obavljao promet u slučaju kvarova. Međutim, svako dodatno povećanje broja puteva (grana) u mreži za sobom povlači dodatne troškove i povećava ukupnu cijenu mreže. Stoga je potrebno naći optimalni odnos cijene i mogućnosti, odnosno cijene i pouzdanosti mreže. Pokazalo se da se takav optimalni odnos dobija u tzv. mrežama dvostruke povezanosti. Dvostruko povezana mreža je mreža u kojoj između svih čvorova postoje dvostruki, neovisni putevi - u slučaju kvara jednog od njih promet se preusmjerava na alternativni i mreža uspije 'preživjeti' kvar. Takva, dvostruko povezana mreža, garantira održivost mreže u slučaju jednostrukog kvara čvora ili grane u mreži.

Dizajn mreže dijeli se na dva dijela : dizajn topologije mreže i dizajn i dimenzioniranje mreže ovisno o prometnim zahtjevima. Dizajn topologije je jednostavan i sastoji se u određivanju optimalne strukture puteva u mreži – vodi se računa samo o cijenovnim parametrima mreže i to isključivo vezano za ožičenje u mreži. Razmatraju se i osnovni troškovi opreme, ali oni nisu od primarnog značenja. S druge strane, dizajn i dimenzioniranje mreže prema prometnim zahtjevima dodaje složenije proračune kapaciteta veza i čvorova u mreži, te nudi kompletno rješenje za postavljanje opreme – u osnovi se bazira na topologijama dobivenim prvotnim dizajnom, ali uključuje niz promjena u strukturi mreže ovisno o prometu

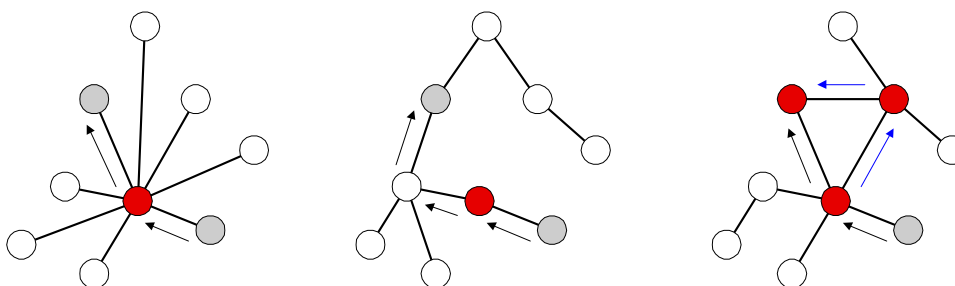
Metode optimalnog dizajna topologije mreže sa zahtjevom njene održivosti u slučaju jednostrukog kvara najčešće se svode na izgradnju zaštitnog prstena (*protection ring*) koji uključuje prometno najzahtjevnije čvorove – prsten omogućava dvostruku povezanost, te naknadno uključivanje ostalih prometno manje zahtjevnih čvorova, direktno u prsten ili u minimalna stabla koja se nadodaju na čvorove uključene u prsten.

U ovom poglavlju opisan je osnovni model mreže koji će se primjenjivati u metodama dizajna topologije mreže, prikazano je stanje i izgradnja mreža u praksi, dan je

naglasak na osnovna svojstva dvostruko povezanih mreža i neke posebnosti koje se uvode u model mreže s ciljem dodatne redukcije troškova, te je opisan niz metoda koje se koriste u dizajnu topologija širokopoljnih mreža i koje su implementirane u pratećem programskom rješenju.

3.1. Topologije mreža

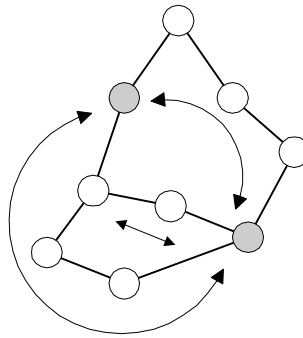
Tradicionalna telefonska mreža organizirana u nekoliko razina nije nudila posebnu zaštitu korisnika u slučaju kvarova mreže, pa se problem dizajna svodio na nalaženje najniže cijene ukupne mreže – rješenje se je nudilo u obliku najkraćih stabala (MST) ili se išlo na povezivanje čvorova najkraćim granama, ovisno o razini u kojoj se određeni čvor nalazio. Takvu mrežu karakterizirala je topologija stabla i/ili topologija zvijezde. Unaprijeđenjem standardne telefonske mreže novim naprednim elementima dolazi do početnih konceptijskih promjena u dizajnu. S uvođenjem SDH kao prijenosnog sustava popularizira se izgradnja koncentrirane optičke mreže (FHN -*Fiber Hubed Network*) u kojoj se među čvorove unosi dodatna hijerarhija – podjela na *gateway*-e i *hub*-ove. Takva mreža topološki kombinira prstenove, zvijezde i stabla i omogućuje djelomičnu ili potpunu zaštitu od kvarova, ovisno o zahtjevima i ulaganjima u mrežu. Sve tri osnovne topologije prikazane su na slici 3.1.



Slika 3.1 : Topologije mreže – zvijezda, stablo, kombinirana

Početno izgrađena koncentrirana optička mreža posjeduje elemente dvostruke ili višestruke povezanosti najbitnijih čvorova (*gatewaya* – u principu su to ADM ili DXC s mogućnošću centraliziranog nadzora), osiguravajući zaštitu od kvara na granama koje ih povezuju. U slučaju kvara tih čvorova prometni gubici ne mogu se izbjeći, te se stoga razvijaju dodatni zaštitni modeli od kojih su najznačajniji : dvostruko udobljivanje čvorova (*dual homing*), i automatsko zaštitno komutiranje korištenjem ADM i/ili DXC sa centralnim nadzorom. Cilj je izgradnja mreže bazirane na topologiji samooporavljivih prstenova (*self-*

healing ring), no ponekad dodatna svojstva takve mreže ne opravdavaju ulaganje u preinake postojeće mreže, a nekad i nije potrebno izvoditi takve promjene jer ne postoje dodatni zahtjevi za to. Ipak, očekuje se da će buduća širokopojasna mreža biti izgrađena upravo na bazi zaštitnih samooporavljivih prstenova. Naravno, gotovo sva unaprijeđenja mreže dižu troškove i cijenu mreže, ali nude bolju pouzdanost i raspoloživost mreže.



Slika 3.2 : Topologija prstena

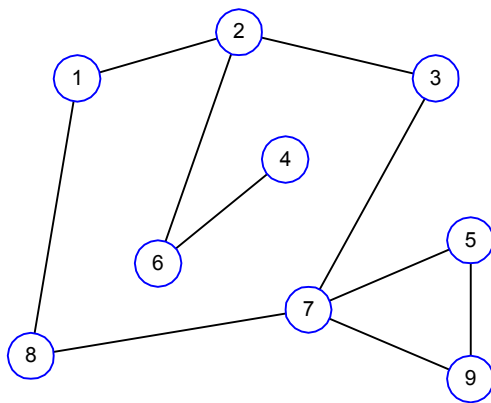
Iz navedenog je očito da su metode dizajna koje se koriste u novim mrežama daleko složenije i brojnije, te ovise o postojećim rješenjima i zahtjevima operatora koji ulažu svoj novac u izgradnju mreže.

3.2. Model mreže. Dvostruka povezanost.

Da bi mogli obavljati matematičko-analitičke operacije topološkog dizajna u mreži, moramo definirati model kojim ćemo moći opisati svaku mrežu koja nam je zadana. Općenito, prilikom dizajniranja topologije mreže mi promatramo fizički sloj mreže, neovisno o tehnološkoj izvedbi – nije bitno da li se radi o SDH, PDH ili nekoj drugoj mreži – bitno je da svim čvorovima i granama pridružimo neka svojstva koja više ili manje odgovaraju njihovim stvarnim svojstvima u mreži. Naravno, naknadno je potrebno uzeti u obzir o kakvoj se vrsti mreže radi, jer razne vrste mreža posjeduju specifična svojstva koja se mogu dobro iskoristiti u iznalaženju još boljih dizajnerskih rješenja.

Mrežu M ćemo na fizičkom sloju promatrati kao skup čvorova N (*nodes, vertex*) i grana E (*edges*). Svaki čvor v iz skupa N mora imati koordinate koje opisuju njegovu poziciju u odnosu na druge čvorove, te parametar r_v koji opisuje stupanj njegove povezanosti sa ostatkom mreže. Svaka grana između dva čvora (u,v) iz skupa E posjeduje parametar cijene c_{uv} koji je kod optike proporcionalan duljini grane l_{uv} – duljinu grane dobijemo

računski iz koordinata čvorova. Da bi opisali mrežu možemo alternativno koristiti i matricu povezanosti C , koja ukazuje na to koji su čvorovi međusobno direktno povezani, a koji ne. Uz matricu povezanosti dovoljno je poznavati skup čvorova N , da bi definicija mreže bila jednoznačna kao i uz poznavanje N i E . Prema matrici povezanosti možemo iz skupa čvorova N dobiti skup grana E . Kad dizajniramo novu mrežu pretpostavljamo potpuno povezanu mrežu – svi čvorovi su direktno povezani sa svima ostalima. Kod unaprijeđenja već postojećih mreža, matrica povezanosti odgovara postojećoj topologiji, pa se i novi proračuni oslanjaju na to čime se eliminiraju nepotrebni troškovi zbog izgradnje novih veza – naravno, katkad je bolje dodati nove veze kako bi se omogućili alternativni putovi među čvorovima.



a) Model mreže sa slike pomoću N i E

$$N = \{N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7, N8, N9\}$$

$$E = \{(1,2), (1,8), (2,3), (2,6), (3,7), (4,6), (5,7), (5,9), (7,8), (7,9)\}$$

b) Model mreže sa slike pomoću N i C

$$N = \{N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7, N8, N9\}$$

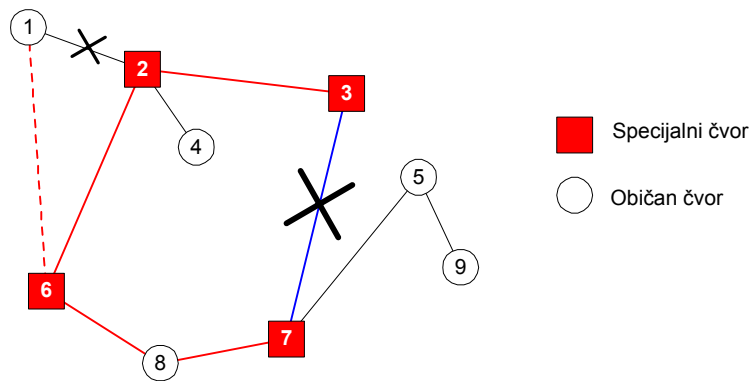
$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Slika 3.3 : Osnovni model mreže

Kao što je već napomenuto, optimalni odnos cijene i pouzdanosti dobiva se u mrežama dvostruke povezanosti. Povezanost višeg stupnja iziskuje dodavanje dodatnih redundantnih veza u mrežu i time uvelike povisuje cijenu cjelokupne mreže. Poboljšanje svojstava pouzdanosti i raspoloživosti, uslijed višestruke povezanosti ponekad nije dovoljno veliko da bi opravdalo investiciju, pa se pri odlučivanju najčešće izvode i dodatni proračuni opravdanosti zahvata.

Dodatno smanjenje cijene mreže može se postići uvođenjem klasifikacije mrežnih čvorova. U tom slučaju možemo odrediti da manje prometno zahtjevni čvorovi (npr. udaljeni pretplatnički stupnjevi manjeg kapaciteta) ne moraju imati osigurane alternativne puteve prema drugim čvorovima. Time eliminiramo određeni broj grana i smanjujemo cijenu mreže.

U našem modelu dvostruke povezanosti uvest ćemo podjelu čvorova na dvije vrste – obične (*ordinary*) i specijalne (*special*) čvorove. Pod specijalnim čvorovima podrazumijevamo čvorove koji imaju veće prometne zahtjeve i koji su na neki način bitniji od ostalih (u dizajnu fizičkog sloja baziranog na SDH tu uključujemo digitalne prospojnike (DXC), multipleksore s dodavanjem i izdvajanjem toka (ADM)). Zbog svoje važnosti oni zahtijevaju i veću povezanost – njima pridjeljujemo povezanost $r=2$. Ostali čvorovi su tzv. obični čvorovi (krajnji multipleksori (TM) s manjim zahtjevima...) i imaju povezanost $r=1$. Tako definirana mreža sastojati će se od dvostruko povezanog dijela (optimalna struktura = prsten) i dijela mreže koji je jednostruko vezan na dvostruko povezani dio (slika 3.4.).



Slika 3.4 : Mreža sa podjelom čvorova na specijalne i obične čvorove

U primjeru na slici odmah se može uočiti prsten specijalnih čvorova, te obični čvorovi uključeni u mrežu na različite načine. Pogledajmo npr. komunikaciju između čvorova 1 i 5. Kod mreže koja normalno funkcionira, znači kod koje nema kvarova, između ta dva čvora postoje dva neovisna puta – (1-2-3-7-5) i (1-2-6-8-7-5). Ovisno o izvedbi mreže komunikacija između čvorova odvija se, najčešće, po jednom od tih puteva, dok se drugi koristi kao alternativni put u slučaju problema. Dode li do prekida grane 3-7, prvi od puteva više se neće moći koristiti i ulogu glavnog komunikacijskog puta između čvorova preuzima alternativni, sekundarni put. Dakle, iako je došlo do velikog kvara u mreži, komunikacija će se nesmetano odvijati. Međutim, u prikazanoj mreži postoji zaštita samo od kvarova na zaštitnom prstenu. Ako se npr. dogodi prekid grane 1-2, komunikacija između čvora 1 i bilo kojeg drugog čvora biti će onemogućena. To je slučaj nekog manje bitnog čvora u mreži koji nema dodatnu zaštitu. Naknadno se i taj čvor može zaštititi tako da se poveže sa još jednim čvorom na prstenu. To je princip dvostrukog udomljivanja čvora.

3.3. Metode dizajna topologije mreže

Razlike u pristupima dizajnu nove širokopojasne mreže uvjetovale su postojanje velikog broja manje ili više složenih metoda za dizajn mreža. U ovom radu opisane su samo metode koje se koriste u dizajnu dvostrukopovezanih mreža. Mreže više razine povezanosti nisu opisivane, iako u praksi mogu biti zastupljene ovisno o strukturi mreže u kojoj se koriste (stalna unaprijeđivanja postojećih rješenja često dovode do višestruko povezanih mreža – eventualno uklanjanje grana koje su višak ne bi bilo financijski isplativije od njihovog korištenja i dodatnog poboljšanja svojstava mreže). Isto tako, dodatne metode dizajna koje se koriste u slučajevima kada postoje određena ograničenja na broj čvorova u jednostavnim mrežnim strukturama (prstenovi), dodaju dodatne grane, omogućujući indirektno i višu razinu povezanosti mreže. No, principijelno, sve te metode za izgradnju dvostruko povezane mreže objedinjuju zajednički pristup – prvo se izgrađuje dvostruko povezani dio mreže, a zatim se u njega na različite načine uključuju preostali čvorovi kod kojih se ne inzistira na dvostrukoj povezanost.

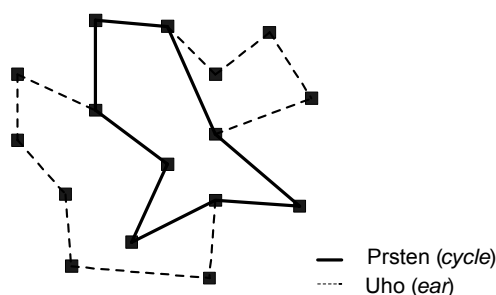
Cilj dizajna mreže je, osim ostvarivanja kvalitetnog rješenja, postizanje što niže cijene kompletnog rješenja. Dakle, uz osiguranje zahtjevanih svojstava nastoji se i ukupna cijena mreže načiniti minimalnom. Sama mreža se sastoji od mrežnih elemenata koji imaju svoju cijenu i od kablova koji povezuju te elemente. Nakon što se zadaju svi podaci o čvorovima mreže njihova cijena je konstantna i ostaje konstanta neovisno o ostalim troškovima. S druge strane, cijena postavljena kablova je upravo ta koja varira i koju se nastoji minimizirati. U cijenu kablova treba uračunati i cijenu eventualno korištenih regeneratorsa na većim dionicama. Općenito, cijena kablova biti će manje ili više proporcionalna duljini grana. Kod optičkih kablova taj je odnos gotovo linearan, dok se kod bakrenih vodiča koriste standardni modeli odnosa duljine i cijene.

Znači, cijena mreže direktno ovisi o cijeni kablova, odnosno duljini kablova, te za minimiziranje cijene mreže trebamo minimizirati cijenu, odnosno duljinu kablova. Ako je cijena kabela (grane) c_{uv} funkcija duljine l_{uv} , a minimiziramo ukupnu cijenu mreže DI , matematički to zapisujemo kao :

$$\min DI = \min \sum_{(u,v) \in E} c_{uv} = \min \sum_{(u,v) \in E} f(l_{uv})$$

Dizajn topologije mreže ima zadatak pronaći cjenovno prihvatljivo rješenje veza u mreži. No, dobivena topologija često uvjetuje promjenu karakteristika pojedinih čvorova u mreži, što znači da cijena opreme, a samim time i kompletne mreže, raste. Postupak određivanja dodatnih karakteristika opreme vrši se prilikom drugog koraka dizajna mreže – dimenzioniranja kapaciteta mreže, te taj dio dizajna može značajno promijeniti cijenu mreže. Ovaj rad razrađuje samo dizajn topologije mreže, pa pretpostavlja cijenu mreže proporcionalnom cijeni tj. duljini kablova.

Većina metoda za formiranje osnovne dvostruko povezane mreže bazira se na dodavanju ‘ušiju’ (*ears*) u rješenje. Naime, uvijek možemo formirati neki prsten (*cycle, ring*) (bilo po nekim pravilima, bilo slučajnim izborom čvorova) na podskupu čvorova mreže, a zatim na njega dodajemo preostale čvorove tako da grane koje dodajemo čine ‘uši’ (postupak se engl. naziva *ear composition*). ‘Uši’ formiramo tako da odaberemo neki od čvorova na prstenu, a zatim po nekom pravilu određujemo slijedeće čvorove koji još nisu na rješenju. ‘Uho’ završava kad se opet odabere neki čvor na prstenu različit od početnog (*Slika 3.5*).



Slika 3.5 : Prsten i formiranje ‘uši’

U nastavku su opisane metode za dizajn dvostruko povezane mreže : *Greedy-Ears* metoda, *Two-Trees* metoda, te nekoliko metoda baziranih na metodi prstena.

Sve te metode kao rezultat daju neka početna rješenja mreže, koja mogu naknadno biti obrađena dodatnim lokalnim transformacijama, a sve s ciljem postizanja boljih svojstava i niže cijene mreže. Neke od tih lokalnih transformacija su opisane u nastavku, no one u pratećem programskom rješenju nisu izvedene !

3.3.1. Greedy-Ears metoda

Ova metoda bazirana je na već opisanoj metodi konstrukcije kombiniranjem prstena i ‘ušiju’ koja se dodaju na njega. Metoda se koristi na tzv. rijetkim (*sparse*) mrežama kod kojih je povezanost mreže manja od 50%. Takva je većina mreža baziranih na optici. Korištenjem na mrežama visoke povezanosti daje slabije rezultate, te se za takve mreže preporuča korištenje metode dva stabla.

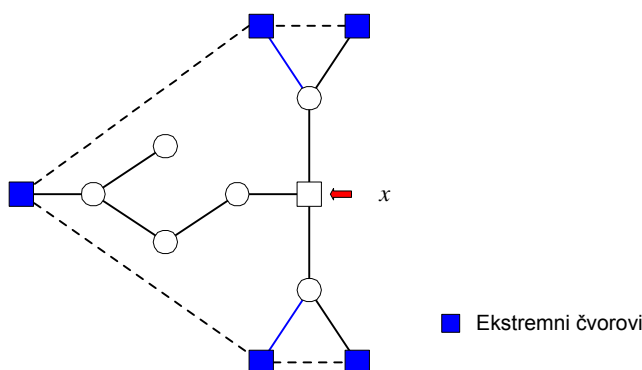
- (1) Konstrukcija početnog rješenja koje se sastoji od prstena C koji sadrži podskup specijalnih čvorova
 - odaberemo specijalni čvor v iz N
 - pronađemo specijalni čvor w kojeg je najkraći put P do v najdulji od svih puteva specijalnih čvorova (čvor w je specijalni čvor najudaljeniji od v)
 - pronađemo čvor u , koji je slijedeći od w na putu P – napravimo kratki prsten C kroz (u,w) nalazeći najkraći put od u do w koji ne koristi granu (u,w)
- (2) Dodajemo kratke ‘uši’ tako dugo dok svi specijalni čvorovi ne budu u rješenju – na dvostruko ili višestruko povezanoj mreži
 - odredimo specijalni čvor z koji još nije na rješenju takav da mu je najkraći put P do parcijalnog rješenja (1) najdulji od svih specijalnih čvorova koji još nisu uključeni (z je specijalni čvor najudaljeniji od parcijalnog rješenja)
 - nalazimo novi put Q (slijedeći najkraći) od z do mreže koji ne uključuje ni jednu granu iz P i koji završava na rješenju na čvoru w različitom od v
 - kombinacija P i Q sadrži ‘uho’ koje je dodano na rješenje

3.3.2. Metoda dva stabla

U ovoj metodi rješenje dobijemo kombinacijom dva minimalna stabla u mreži (slika 3.6.).

- (1) Prvo nalazimo minimalno stablo T kroz skup čvorova mreže N .
 - specijalni čvor nazivamo ekstremom u T ako se ne nalazi na nijednom putu između neka druga dva specijalna čvora u T

- (2) Nalazimo minimalno stablo T' kroz ekstremne specijalne čvorove u T tako da se ne koristi niti jedna grana koja je već uključena u T . Minimalno stablo T' se određuje prema minimalnoj cijeni (u našem modelu je to identično stablu koje se određuje prema minimalnoj duljini).



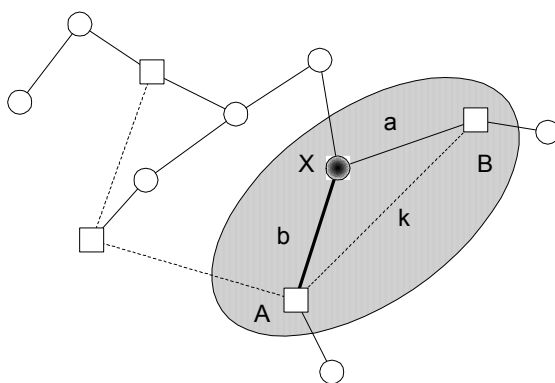
Slika 3.6 : Metoda dva stabla

Na slici 3.6. dan je primjer mreže sa specijalnim i običnim čvorovima. Punom crtom iscrtane su grane koje čine minimalno stablo T , dok su crtkanom crtom označene grane u minimalnom stablu T' koje uključuje ekstremne čvorove iz stabla T . Bitno je uočiti specijalni čvor x koji nije ekstrem jer se nalazi na putu između drugih specijalnih čvorova. Metoda dva stabla implementirana u prateće programsko rješenje naziva se **TwoTrees**.

Opisane *GreedyEars* i *TwoTrees* metode standardne su metode za dizajn topologije dvostruko povezane mreže (Monma, 1989). Međutim, u osnovi postoji velika razlika između njihovog korištenja. *GreedyEars* metoda preporuča za izgradnju optimalne dvostruko povezane topologije na već postojećim modelima mreža koje nemaju pretjerano veliku razinu povezanosti – broj grana <50% ukupnog broja mogućih grana – to su tzv. rijetke (*sparse*) mreže. S druge strane, *TwoTrees* metoda koristi se u gusto (*dense*) povezanim mrežama i u njima daje bolje rezultate. Naravno, nije potrebno isključivati korištenje pojedine od njih u drugim mrežama, ali rezultati koje daju najbolje se ogledaju upravo u modelima za koje su metode specificirane.

3.3.2.1. Unaprijeđenje metode dva stabla

Već iz primjera danog na slici 3.6. vidljivo je da rješenje koje se dobije **TwoTrees** metodom nije optimalno, već da ono sadrži dodatnu redundanciju veza u mreži čime cijena dizajnirane mreže nepotrebno raste. Na slici su plavom bojom označene dvije grane koje u stvari predstavljaju nepotreban trošak – ako ih eliminiramo i dalje zadržavamo dvostruku povezanost među čvorovima. Dakle, moguće je eliminirati suvišnu redundanciju sa ciljem dobivanja jeftinijeg rješenja koje i dalje ispunjava uvjet dvostruke povezanosti. U nastavku je opisana metoda koja može pomoći sniženju cijene mreže. Pripadajući slikovni prikaz (slika 3.7.) daje zorniji pogled na problem.



Slika 3.7 : Pomoćna metoda **Exclude_Triangle**

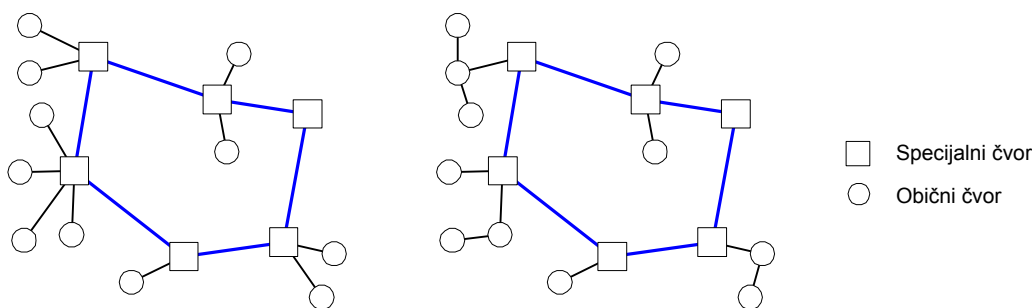
Na slici 3.7. prikazana je mreža dobivena metodom dva stabla. Isprekidanom linijom iscrtano je minimalno stablo T' koje povezuje specijalne ekstremne čvorove (na ovoj mreži to su sva četiri specijalna čvora). Ostale grane iscrtane punom linijom sastavni su dijelovi osnovnog minimalnog stabla T . Posebno je označeno područje u kojem se može izvesti jednostavna lokalna optimizacija s ciljem postizanja boljeg rješenja mreže u pogledu cijene.

Vidimo da je običan čvor X vezan granama a i b na specijalne ekstremne čvorove A i B . Budući da su ekstremni čvorovi A i B direktno povezani lako je uočiti da ukidanjem grane b ne utječemo na smanjenje povezanosti specijalnih čvorova. To možemo i poopćiti na sve obične čvorove koji su spojeni na dva ekstremna specijalna čvora. Ako je jedan od specijalnih čvorova krajnji čvor u stablu T' onda možemo ukinuti granu prema drugom ekstremu. Ako niti jedan od ekstrema nije krajnji brišemo dulju granu. Ovaj jednostavni postupak koji provjerava sve postojeće trokute koji se sastoje od dva ekstremna čvora i jednog običnog čvora implementiran je kao **Exclude_Triangle** metoda u programskom rješenju.

Ipak, u prikazu rezultata dizajna topologije testnih mreža (poglavlje 5.) ne mogu se uočiti poboljšanja, prije svega jer je općenito struktura složenijih mreža takva da se rijetko formiraju opisani trokuti. No, na jednostavnom primjeru sa slike ostvareno je poboljšanje rezultata od 6,5% ukidanjem samo jedne jedine grane.

3.3.3. Metoda prstena

Kao što je već istaknuto, topologija tradicionalnih mreža nije uključivala zaštitne puteve koji bi omogućili funkcioniranje mreže u slučaju kvarova. Čvorovi u mreži povezivali su se ili u zvjezdaste strukture ili u stabla. Minimalna cijena kablova postizala se korištenjem minimalnog stabla (MST). Nove mreže, sa zahtjevima zaštite od kvarova, uvode višu razinu povezanosti među čvorovima i topologije postaju složenije. Optimalni odnos cijene i pouzdanosti postiže se izgradnjom dvostruko povezane mreže, u kojoj svi čvorovi sa posebnim zahtjevima (specijalni čvorovi) obavezno moraju biti barem dvostruko povezani sa ostatkom mreže. Preostali čvorovi dodaju se u mrežu ili zvjezdastim strukturama ili u obliku stabla. Međutim, matematički minimalna mreža, neće odgovarati praktičnoj izvedbi. Često je potrebno dodati dodatne grane i time pojedini čvorovi dobivaju višestruku (trostruku ili višu) povezanost s preostalom mrežom. Matematički model topologije može se dobro iskoristiti kod manjih mreža, no veće mreže zahtijevaju dodatne mehanizme dizajna.



Slika 3.8 : Specijalni prsten i obični čvorovi – zvijezde i stabla

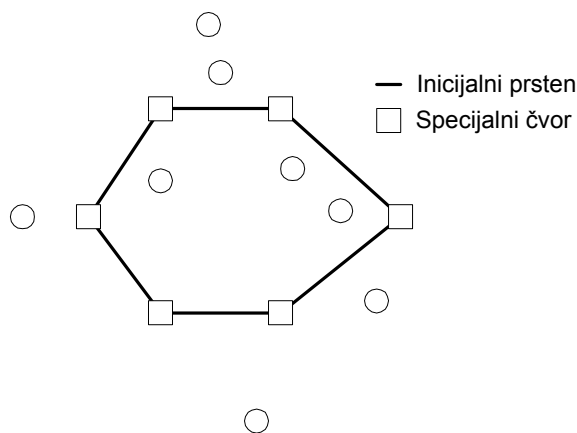
Minimalna dvostruko povezana struktura je prsten. Dakle, dvostruko povezana mreža minimalne cijene mora biti bazirana na prstenu koji povezuje sve specijalne čvorove. Ostali, obični čvorovi, potom se dodaju na prsten specijalnih čvorova. Moguće ih je dodati na najbliže specijalne čvorove u zvijezdu, ili pak korištenjem minimalnih stabala (slika 3.8.).

Metode koje implementiraju taj model dizajna u pratećem programskom rješenju nazivaju se : **Ring** (prsten čvorova), **RingStar** (prsten sa dodanim običnim čvorovima u strukturu zvijezde), **RingMST** (prsten sa dodanim običnim čvorovima u strukturu minimalnog stabla).

Definiranje prstena u mreži moguće je izvesti na nekoliko načina. U pratećem programskom rješenju implementirana su dva načina određivanja prstena. Razlikuju se prije svega po vremenu izvođenja. Brža metoda ne garantira siguran pronalazak minimalnog prstena, ali ga u većini slučajeva pronalazi. Sporija metoda sigurno pronalazi minimalni prsten, ali joj za to treba puno više vremena nego bržoj. Dok brža metoda prema nekom kriteriju (najkraća ili najduža grana) određuje početni čvor, sporija metoda provjerava sve čvorove kao početne prstenove. Nemogućnost pronalaska minimalnog prstena brže metode javlja se isključivo kod rasporeda specijalnih čvorova u obliku paralelograma.

Od opisanih metoda prstena najbolje rješenje daje metoda uključivanja običnih čvorova u najkraća stabla. No, postoji dodatna grupa metoda koja još može smanjiti cijenu mreže, a bez narušavanja uvjeta dvostruke povezanosti specijalnih čvorova. Čak štoviše, metoda dodaje dvostruku povezanost nekim od običnih čvorova, time dodatno povećavajući pouzdanost mreže. Osnovna metoda je **Ring2Ord**, a postoje još i unaprijeđene metode - **Ring4Ord** i **Ring6Ord**.

Metoda prstena **Ring2Ord** podijeljena je na dva dijela. U prvom dijelu određuje se inicijalni prsten koji sadrži sve specijalne čvorove i samim time već osigurava svojstvo dvostruke povezanosti za sve specijalne čvorove. Nakon toga nastoji se uključiti sve preostale (obične) čvorove u rješenje, vodeći računa o povećanju cijene uslijed takvih zahvata. Iako bi na prvi pogled najbolje rješenje bilo dodati sve obične čvorove u minimalna stabla i vezati ih na najbliže specijalne čvorove, takvo rješenje je daleko od optimalnog ! Na slici 3.9. prikazan je raspored čvorova u mreži koju ćemo kreirati metodom prstena, sa posebno istaknutim inicijalnim prstenom koji prolazi svim specijalnim čvorovima.



Slika 3.9 : Čvorovi mreže i inicijalni prsten

Preostalo je uključivanje ostalih običnih čvorova u mrežu. Redom uzimamo obične čvorove i tražimo dva najbliža čvora koja se nalaze na postojećem rješenju (u početku je to inicijalni prsten). Neka su običnom čvoru A dva najbliža čvora na rješenju X i Y . Duljina (cijena) grane (A,X) je cX , a grane (A,Y) cY . Ako čvorovi X i Y nisu direktno povezani obični čvor A preskačemo u početnom razmatranju i idemo na slijedeći čvor koji još nije uključen u rješenje. Ako su čvorovi X i Y direktno povezani duljinu grane (X,Y) označimo sa cZ . Dodavanje čvora A u postojeće mreže može se izvesti na dva načina :

1. Dodavanje čvora u prsten
2. Dodavanje čvora direktnom granom na najbliži čvor na rješenju

Naravno, odabire se mogućnost koja će ponuditi nižu cijenu rješenja nakon dodavanja čvora u mrežu. Uvjeti su slijedeći :

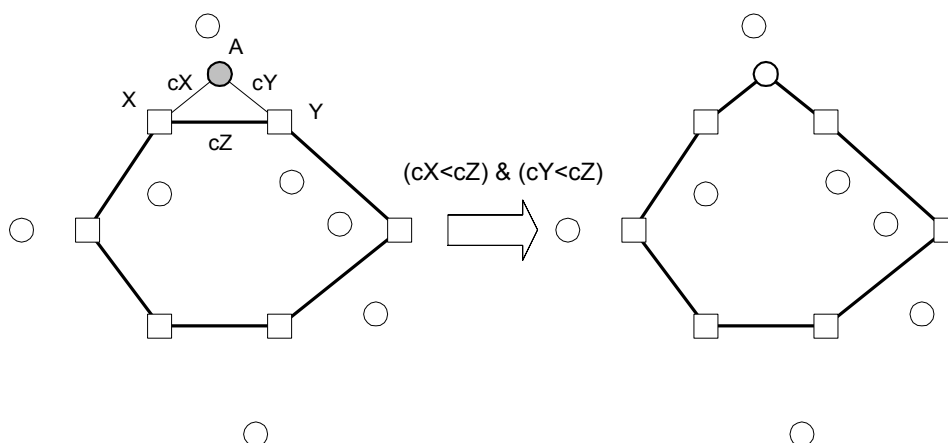
1. Čvor dodajemo u prsten samo ako vrijedi :

$$cX + cY < cZ + cX \quad \text{i} \quad cX + cY < cZ + cY,$$

$$\text{odnosno ako vrijedi : } cX < cZ \quad \text{i} \quad cY < cZ$$

U tom slučaju cijena dodavanja u prsten je niža nego li bi bila cijena dodavanja najkraće grane, a uz ostavljanje grane (X,Y) u prstenu !

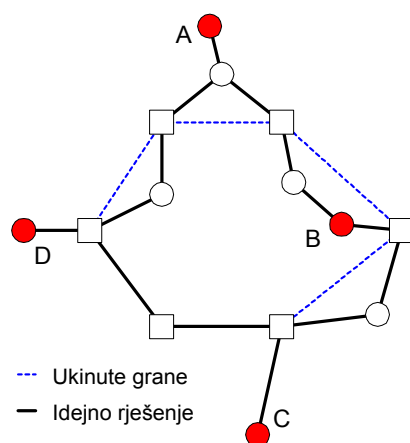
2. Čvor dodajemo preko najkraće grane ako gornji uvjeti nisu zadovoljeni



Slika 3.10 : Dodavanje čvora A u prsten

Dodavanje pod 2. ne počinjemo tako dugo dok ne iscrpimo sve mogućnosti dodavanja čvora direktno u prsten (svakim dodanim čvorom u prsten mijenja se struktura mreže pa se uvijek može otvoriti mogućnost za dodavanje neuključenog čvora u novo rješenje). Prikaz dodavanja jednog od čvorova u prsten uz zadovoljene opisane uvjete dan je na slici 3.10.

Na slici 3.11. prikazano je konačno rješenje dobiveno metodom prstena.



Slika 3.11 : Konačno rješenje dobiveno metodom **Ring2Ord**

Na slici 3.11. izdvojena su četiri čvora A, B, C i D , kako bi se mogli uočiti neki od elemenata danih u opisu metode. Vidimo da je čvor A dodan u mrežu preko najkraće grane jer nije postojala mogućnost njegovog uključivanja u prsten bez povišenja cijene mreže. Isto vrijedi za čvorove C i D , ali se u njihovoj okolini, za razliku od okoline čvora A , nije dodavalo nove čvorove u prsten. Čvor B je dodan u prsten, nakon što je i njegov susjed dodan u prsten.

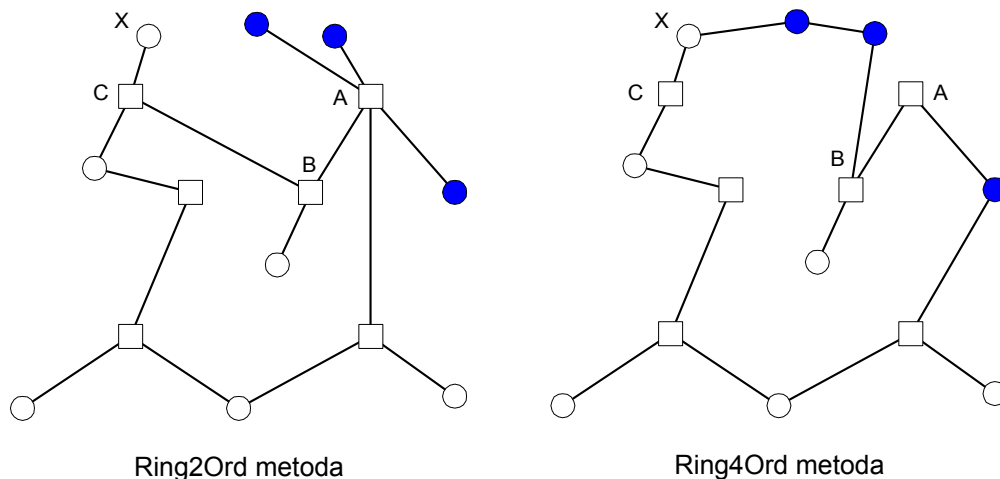
3.3.3.1. Poboljšanje metode prstena

Metoda prstena **Ring2Ord** daje vrlo dobre rezultate, no i nju je moguće unaprijediti. Iako daje gotovo idealna rješenja u jednostavnijim slučajevima, ipak kod složenijih mreža do izražaja dolazi njena ‘kratkovidnost’, a katkad na konačne rezultate utječe i odabir inicijalnog prstena.

Odabiranje inicijalnog prstena može se izvesti na nekoliko načina : slučajno, odabirom početnog čvora prstena iz najkraće grane među specijalnim čvorovima, odabirom početnog čvora prstena iz najdulje grane među specijalnim čvorovima, a najbolja rješenja

dobiju se ako se od svih mogućih prstena odabere najjeftiniji. Posljednji način odabira ujedno je i najsporiji jer treba provjeriti sve postojeće prstene specijalnih čvorova, uvijek počinjanjući od nekog drugog čvora, no garantira najjeftiniji početni prsten. Ali, ni to ne garantira najjeftinije konačno rješenje nakon dodavanja preostalih čvorova.

Kratkovidnost također može utjecati na slabija svojstva konačne mreže, posebice ako se radi o složenijim mrežama. Naime, osnovna metoda prstena prilikom provjere mogućnosti dodavanja čvorova u prsten pregledava samo dva najbliža čvora, te na osnovu toga donosi zaključke koji utječu na daljnji tok algoritma i izgradnju rješenja. Primjer negativnog utjecaja kratkovidnosti na rješenje dizajna mreže, te mogućnost poboljšanja korištenjem poboljšanih metoda prikazan je na slici 3.12., gdje je primijenjena **Ring4Ord** metoda.



Slika 3.12 : Negativan utjecaj kratkovidnosti **Ring2Ord** metode

Da bi se umanjio negativan utjecaj kratkovidnosti, dodana su dva poboljšanja postojeće metode prstena. U jednoj od metoda implementirana je šira provjera najbližih čvorova, pa se umjesto dva čvora promatraju četiri najbliža čvora. Tu metodu nazivamo **Ring4Ord**. Za još bolje rezultate ugrađenja je i **Ring6Ord** metoda koja za svaki običan čvor traži šest najbližih čvorova. Obje metode daju jednake (najgori slučaj, nemoguće poboljšanje) ili bolje rezultate od **Ring2Ord**.

Na slici 3.12. posebno su istaknuta tri obična čvora za koje vrijedi da su im dva najbliža čvora na rješenju specijalni čvorovi A i B, ali svi su u takvom položaju da ne mogu biti dodani u prsten, te nepotrebno povećavaju cijenu mreže. Korištenje **Ring4Ord** metode

daje mnogo bolje rješenje jer za ta tri čvora pronalazi i ostale specijalne čvorove koji su u njihovoj blizini te im tako omogućava dodavanje u prsten.

Zaključujemo da unaprijeđene metode prstena formiraju prsten koji osim specijalnih čvorova uključuje i određeni broj običnih čvorova, osiguravajući time dvostruku povezanost i tih običnih čvorova, a sve uz cijenu nižu od one koju bi mreža imala uz izričito zadržavanje jednostruke povezanosti običnih čvorova. To se može jako dobro iskoristiti u budućim unaprijeđenjima mreže jer se obični čvor dvostruke povezanosti jednostavno ‘unaprijedi’ u specijalni čvor. Naravno, u praksi situacija nije toliko jednostavna. ‘Unaprijeđenje’ čvora iz običnog u specijalni može značiti kompletnu promjenu čvora, što nije jeftino, pa ne mora značiti da će ovakva rješenja uvijek na kraju ispasti jeftinija.

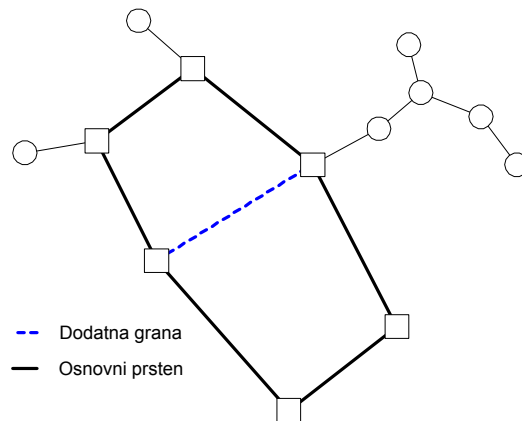
Podjela na obične i specijalne čvorove dobro se može iskoristiti u teoriji dizajna, ali u praksi je osim na tu podjelu bitno obratiti pozornost i na vrstu čvorova – dakle, o kojem se elementu mreže radi. Bez dodatnih provjera i intervencija pri izgradnji mreže topološki model nije moguće provesti u praksu.

3.3.4. Metode prstena s dodatnim granama

Naprijed opisane metode prstena daju zadovoljavajuća rješenja na mrežama sa manjim brojem čvorova i na mrežama kod kojih se inicijalno ne promatra eventualno kašnjenje nastalo prilikom prolaska signala kroz velik broj čvorova ili potreba uvođenja dodatnih regeneratora. Zbog toga su jasno definirani tzv. HOP-ovi koji određuju koliko se čvorova može nalaziti u jednoj ‘liniji’ kašnjenja ili duljini neregenerirane dionice. Kašnjenje ili potreba uvođenja regeneratora uzrokuje nezadovoljavanje uvjeta koji se postavljaju na dizajn mreže. Kašnjenje smanjuje performanse mreže, a novi regeneratori povećavaju cijenu mreže. Oba problema mogu se riješiti uvođenjem dodatnih grana – uvođenje nove grane, tj. postavljanje novog kabla najčešće je jeftinije od dodavanja novog regeneratora. Uvođenjem ograničenja na broj HOP-ova moguće je na već dobivena optimalna rješenja za metodu prstena dodati nove grane koje će povećati cijenu mreže, ali i eliminirati probleme koji nastaju u praksi. Postupak dodavanja se svodi na proračune minimalne cijene novih grana tj. jednostavno se dodaje određeni broj grana na postojeće rješenje, vodeći računa o tome da njihova ukupna duljina (cijena postavljanja) bude minimalna.

Metode implementirane u pratećem programskom rješenju nadogradnja su prije opisanih metoda prstena – nazivaju se **RingHOP**, **RingHOP_Star**, **RingHOP_MST**.

Postupak je prikazan na slici 3.13. na mreži dobivenoj metodom **RingHOP_MST**.



Slika 3.13 : Dodavanje dodatnih grana u prsten

3.3.5. Lokalne transformacije

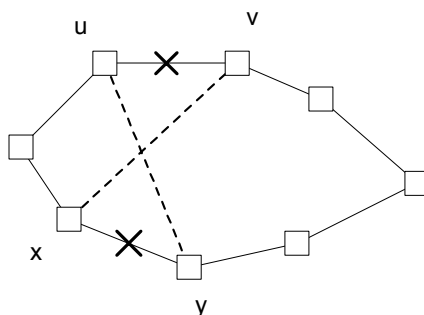
Nakon dobivanja početnog rješenja mreže nekom od naprijed opisanih metoda, nekad postoji mogućnost dodatnog poboljšanja svojstava (cijene) takvih mreža. Metode za poboljšavanje svojstava (cijene) mreže baziraju se na korištenju lokalnih transformacija nad već postojećim strukturama mreže – bilo dobivenim prethodno opisanim metodama, bilo na već postojećim mrežama.

Svaka dvostruko povezana mreža sadrži barem jedan prsten. U određenim okolnostima promjenom veza unutra prstena, uz zadržavanje dvostruke povezanosti specijalnih čvorova, moguće je smanjiti cijenu mreže.

Prve dvije opisane metode za poboljšanje svojstava mreže : *Two-optimal Cycle* i *Three-optimal Cycle* u osnovi ne mijenjaju strukturu mreže jer postojeći prsten zamijene novim izvedenim iz postojećeg. Metode *Pretzel* i *Quetzal* pak unose promjenu u samu strukturu jer prsten zamijene složenijim strukturama.

3.3.5.1. Two-Optimal Cycle

U prstenu C ovom se metodom dvije grane (u,v) i (x,y) zamijene novima (u,y) i (v,x) čime nastaje novi prsten C' koji može biti niže cijene (Slika 3.14.).



Slika 3.14 : Lokalna transformacija zamjene grana

Postupak uvođenja transformacije je slijedeći :

- (1) Slučajno odredimo prsten C (*depth-first-search* stablo od slučajno odabranog čvora i određivanjem grane koji nije u stablu...)
- (2) Obavimo zamjenu grana ukoliko time smanjujemo cijenu mreže – dobiveni prsten C' uključujemo u rješenje umjesto prvobitnog prstena C
- (3) Ponavljamo (1) i (2) sve dok ne možemo dobiti nova poboljšanja

3.3.5.2. Three-Optimal Cycle

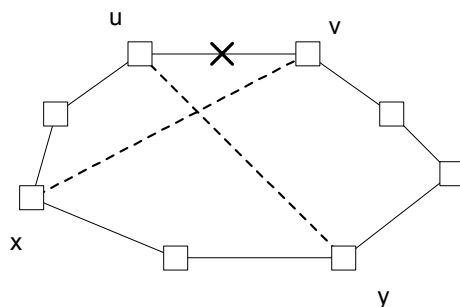
Kao i u prethodno opisanoj transformaciji tako i ovdje izvodimo zamjenu grana, samo što sad mijenjamo tri grane (u,v) , (x,y) i (w,z) sa (u,w) , (z,x) i (v,y) .

Postupak je identičan opisanom kod *Two-optimal Cycle* metode.

Da bi proračuni bili efikasniji uvodimo veličinu prozora W kojom određujemo koliko najmanje moraju biti udaljene one grane koje izbacujemo – u slučaju malog prstena najvjerojatnije ne bi poboljšali mrežu, pa je sama transformacija nepotrebna pa korištenjem W kao ograničenja unaprijed možemo preskočiti transformaciju i time ubrzati ukupni postupak optimizacije.

3.3.5.3. Pretzel i Quetzel metode

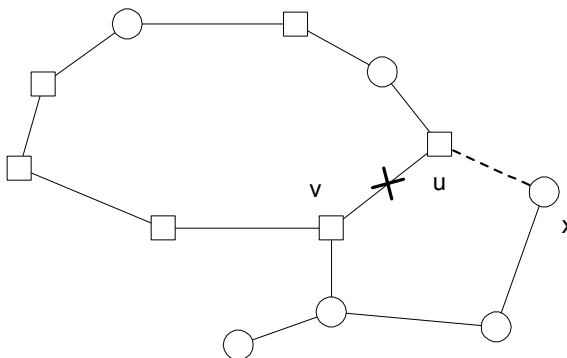
Transformacije koje se koriste u *Pretzel* i *Quetzel* metodama su reverzne. *Pretzel* unosi promjenu u strukturu jer u postojećem prstenu C uklanja granu (u,v) , a dodaje dvije nove grane koje se križaju (u,y) i (v,x) , čime se formira ‘perec’ P . (Slika 3.15.). *Quetzel* radi suprotno – dvije grane koje se križaju zamijeni granom koja od postojećeg ‘pereca’ P stvara prsten C .



Slika 3.15 : Prikaz *Pretzel* i *Quetzel* metoda

3.3.5.4. One-Optimal metoda

Za razliku od svih prije opisanih metoda za poboljšanje mreže *One-Optimal* obavlja transformacije nad čitavom mrežom, a ne samo na dvostruko povezanom dijelu mreže. Pokušava se izbaciti granu (u,v) iz rješenja i zamijeniti ju nekom drugom granom (u,x) , tako da novo rješenje ima nižu cijenu (Slika 3.16.).



Slika 3.16 : One-Optimal metoda

Odaberemo čvor u i promatramo sve grane (u,v) kao kandidate za izbacivanje iz rješenja. Definiramo veličinu prozora W koja određuje broj grana koliko minimalno mora biti udaljen čvor x od čvora u u postojećem rješenju, a da bi ga mogli uzeti u obzir za dodavanje grane (u,x) . Ukoliko promjena smanjuje cijenu mreže uključuje se u rješenje.

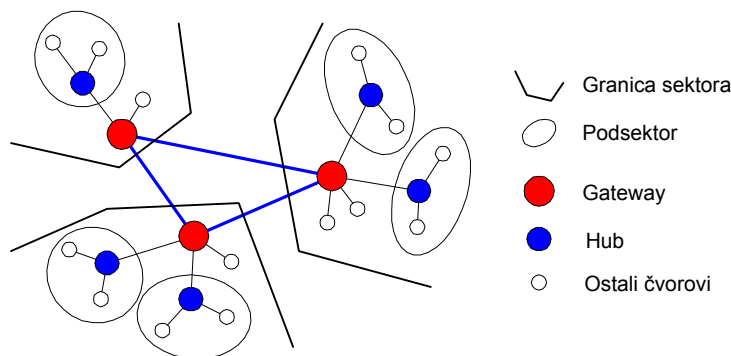
Metode koje lokalnim transformacijama poboljšavaju cijenu mreže nisu implementirane u prateće programsko rješenje !

3.4. Problemi dizajna u praksi. Unaprijeđenja postojeće koncentrirane optičke mreže

Kao što je već prije navedeno, u praksi operatori češće postepeno razvijaju i unaprijeđuju postojeću telefonsku mrežu, nego li prilaze izgradnji kompletno nove mreže. Postepeno uvođenje novih tehnologija nastoji se izvesti što transparentnije i što jeftinije, s planiranjem budućih troškova i eventualnim eliminiranjem ili smanjenjem budućih troškova već prilikom razmatranja dizajna mreže. Pokazalo se je da je najbolje rješenje dizajna prilikom postepenog razvoja mreže model koncentrirane optičke mreže (FHN - *Fiber Hubbed Network*). U početnim fazama razvoja, takva mreža posjeduje samo osnovne elemente zaštite i oporavljivosti, dok se daljnjim unaprijeđenjem i ulaganjima postiže viša razina zaštite, što na kraju rezultira relativno jeftinom mrežom oporavljivom od kvarova. Međutim, postepena ulaganja povisuju cijenu osnovne mreže i ponekad neće biti isplativa, pa je u procesu unaprijeđenja dizajna bitno voditi brigu o tome. Tako izgrađenu mrežu nakon nekog stupnja razvoja biti će jeftinije 'prevesti' u standardnu, najpoželjniju vrstu oporavljive mreže – samooporavljive prstenove (*Self-Healing Rings* - SHR), nego vršiti daljnja unaprijeđenja.

3.4.1. Koncentrirana optička mreža

Unutar FHN postoji određena hijerarhija mrežnih čvorova – osim podjele na obične i specijalne čvorove, prema definiciji mrežnog modela, čvorovi se dijele i na *gateway*-e kao ulazne čvorove u pojedine sektore mreže, *hub*-ove kao čvorove koji koncentriraju promet ostalih čvorova u blizini (ti čvorovi čine podsektor, zajedno sa *hub*-om), te na standardne čvorove (centrale – CO *central office*). Kao što je prikazano na slici 3.17., svi *gateway*-i su međusobno povezani (bilo prsten, bilo potpuna povezanost) i samim time ostvarena je mogućnost nesmetanog prometovanja podacima u slučaju kvara na vodovima među njima.



Slika 3.17 : Dijelovi koncentrirane optičke mreže

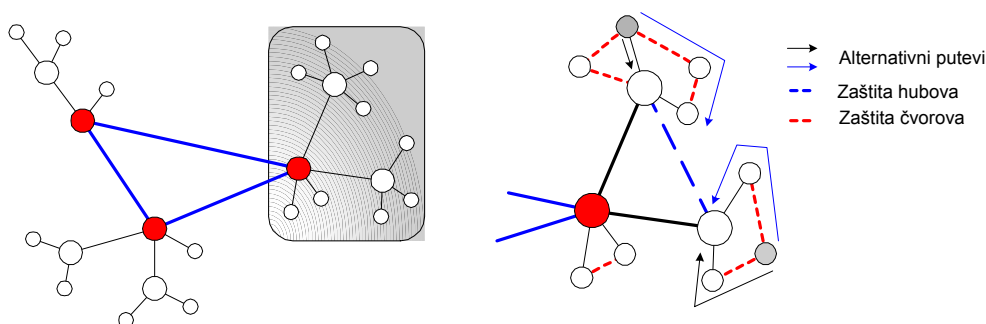
No, u slučaju kvara pojedinog *gateway*-a u takvoj mreži će kompletni sektor vezan na dotičan čvor biti odsječen od ostatka mreže, te će jedino biti moguća komunikacija unutar sektora među čvorovima koji imaju zajedničke hubove (ako je to omogućeno od strane davatelja usluga). Isto tako, u slučaju kvara na nekom od *hub*-ova, svi čvorovi vezani na taj *hub* biti će odsječeni od ostatka mreže i neće moći sudjelovati u komunikaciji.

Postoji nekoliko načina zaštite koji se koriste u praksi, a koji rješavaju opisane probleme. To su : zaštitno komutiranje (*Protection Switching*), dvostruko udomljivanje čvorova (*Dual Homing*) i preusmjeravanje puteva (*Path Rearrangement*). Te metode najčešće se kombiniraju i kao rezultat daju koncentriranu mrežu više razine zaštite od kvarova. U budućnosti, takva mreža se dodatnim zahvatima može unaprijediti u standardne SDH samooporavljive prstenove (*SDH Self Healing Rings*). Sama praktična izvedba pojedinih mehanizama ovisi o opremi koja se koristi, te upravo u praksi mogu nastati problemi s izvedbom – potrebno je voditi računa o dodatnim parametrima – kapacitetu grana i ostalim zahtjevima. Izrada topologije mreže za zadane mehanizme ne predstavlja problem i jednostavno ju je implementirati u alate za dizajn mreža.

3.4.2. Zaštitno komutiranje

Često korištena metoda unaprijeđenja postojeće mreže u pogledu pouzdanosti je mehanizam zaštitnog komutiranja. Zaštitno komutiranje može se izvesti poluautomatski ili automatski, ovisno o ulaganju u opremu. Postoji nekoliko različitih modela zaštitnog komutiranja, svaki od njih ima neke prednosti i mane. Moguće je zaštititi N optičkih niti korištenjem jedne zaštitne – tzv. 1:N zaštitno komutiraje, no u tom slučaju je potreban

prilično kompliciran mehanizam automatskog zaštitnog komutiranja, što poskupljuje izvedbu. Isto tako, takav mehanizam ne daje dobre rezultate u slučaju višestrukih kvarova. S druge strane postoji mogućnost zaštite svake optičke niti drugom optičkom niti – tzv. 1:1 zaštitno komutiranje. Taj način zaštite pojednostavljuje mehanizam automatske zaštite, te daje jaku zaštitu od kvarova kablova. Najbolji rezultati zaštitnog komutiranja se postižu kad se zaštitne niti provode drugim kablovima od niti koje zaštićuju, jer se time eliminira mogućnost da u slučaju kvara kompletnog kabla (fizičko oštećenje i sl.) i zaštićene i zaštitne niti budu pokvarene, što onemogućuje pokretanje mehanizma zaštite.



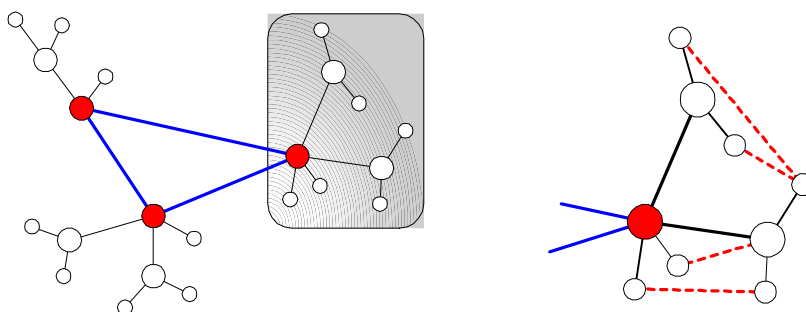
Slika 3.18 : Topologija za podršku zaštitnom komutiranju

Na slici 3.18. je prikazana mreža i sektor mreže na kojem je prikazan jedan od načina promjene topologije za ostvarivanje mogućnosti zaštitnog komutiranja. Osim zaštite krajnjih čvorova (sitno iscrtkane linije), moguće je zaštititi i *hub*-ove (deblja iscrtkana linija označava dodatnu granu). Strelicama je naznačena mogućnost zaštite u slučaju kvara na jednom od puteva. Nakon uspostave dodatnih veza među zaštićenim čvorovima, potrebno je pripremiti sustav za automatsku zaštitu.

Mogućnost korištenja alternativnih puteva za sve čvorove i hubove svodi se na izgradnju više razina prstenova – osim glavnog prstena ili mreže višeg stupnja povezanosti među *gateway*-ima grade se i prstenovi među svim *hub*-ovima pridruženim pojedinom *gateway*-u, te među svim čvorovima pridruženim pojedinom *hub*-u. Dodatna povezanost čvorova podiže pouzdanost, ali i cijenu mreže, pa se model sa kombiniranjem više razina prstenova može smatrati najisplativijim. Takva topologija vrlo je slična topologiji samooporavljivih SDH prstenova, pa je moguće i unaprijeđenje takve mreže isključivo unaprijeđenjem mrežnih elemenata – eventualno postojeći terminalni multipleksori se unaprijeđuju u multipleksore s dodavanjem i izdvajanjem ili u digitalne prospojnice. Pri tome se sustav mehanizma automatske ili poluautomatske zaštite postepeno pojednostavljuje.

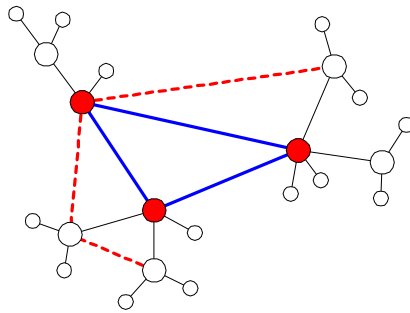
3.4.3. Dvostruko udomljivanje

Drugi način unaprijeđenja koncentrirane optičke mreže je postupkom dvostrukog udomljivanja čvorova. Kao što je prije opisano mreža se dijeli na sektore i podsektore. Svaki sektor sadrži jedan od *gateway*-a i njemu priključene *hub*-ove, zajedno sa njima pripadajućim čvorovima. Taj sektor se dijeli na više podsektora – svaki podsektor uključuje pojedini *hub* i njemu pridružene čvorove. U standardnom modelu mreže *hub*-ovi su vezani na *gateway*-e topologijom zvijezde. Isto tako, čvorovi su vezani na *hub*-ove ili topologijom zvijezde ili minimalnim stablima (MST). Dakle, ne postoji višestruka povezanost među *gateway*-ima i *hub*-ovima, niti među *hub*-ovima i ostalim čvorovima. U tom slučaju kvar na *gateway*-u automatski uzrokuje ispadanje čitavog mrežnog sektora iz funkcije, a kvar na *hub*-u ispadanje čitavog podsektora. Da bi se povećala pouzdanost osnovnog modela mreže moguće je izvesti dvostruko udomljivanje čvorova – *hub*-ovi se vežu na dva susjedna *gateway*-a, ostali čvorovi na dva susjedna *hub*-a ili na najbliže čvorove iz drugih sektora i sl. (slika 3.19.)



Slika 3.19 : Dvostruko udomljivanje običnih čvorova

Nakon toga, u slučaju kvara promet se preusmjeri, korištenjem standardnih mrežnih mehanizama, na ispravan dio mreže i mreža funkcionira koliko-toliko ispravno – naravno, postoji mogućnost narušavanja kvalitete usluga, ali to je ovisno o podešenosti opreme i korištenim mehanizmima preusmjeravanja prometa.



Slika 3.20 : Primjer dvostrukog udomljivanja *hub*-ova

Na slikama su prikazana dva načina dvostrukog udomljivanja – na slici 3.19. su neki od čvorova u podsektorima vezani na čvorove/*hub*-ove drugih podsektora. Na slici 3.20. dvostruko su udomljeni neki od *hub*-ova – oni su vezani na *gateway*-e drugih sektora i time su ostvareni alternativni putevi u slučaju kvara na pojedinim *gateway*-ima. Naravno, postoji više načina na koje se dvostruko udomljivanje može postići – moguće je direktno vezanje na ostale čvorove ili pak korištenje kombinacija prstenova. Udomljivanje može biti i višestruko tj. moguće je stvaranje više alternativnih puteva povezivanjem na više dodatnih čvorova.

3.4.4. Preusmjeravanje puteva

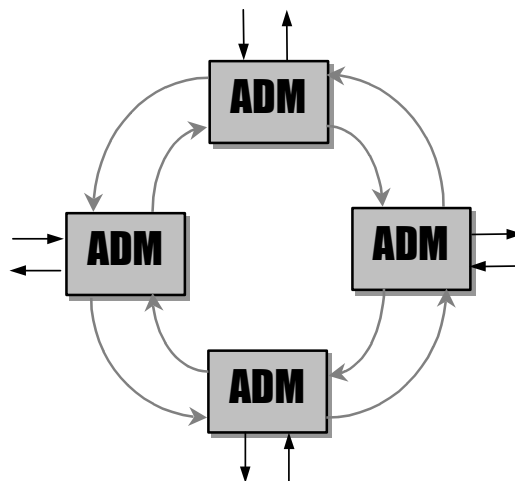
Preusmjeravanje puteva, kao način poboljšanja svojstava mreže, u stvari je kombinacija dvostrukog udomljivanja i mogućnosti zaštitnog komutiranja. Prilikom dizajna mreže pretpostavlja se postojanje alternativnih puteva (njihova izgradnja bazira se na dvostrukom udomljivanju i korištenju zaštitnog komutiranja), te njihovo korištenje za preusmjeravanje prometa u slučaju kvarova. Dakle, radi se u stvari o izgradnji mehanizma preusmjeravanja korištenjem ponuđenih alternativnih puteva.

U pratećem programskom rješenju implementirana je mogućnost izgradnje osnovne topologije koncentrirane optičke mreže. Metoda koja to obavlja naziva se **BuildFHN**, a omogućuje nekoliko podmetoda, ovisno o načinu povezivanja među *gateway*-ima i topologijama korištenim za povezivanje ostalih čvorova na *hub*-ove (minimalna stabla ili zvijezde). Metoda **BuildFHN+PS** implementira mogućnost izgradnje topologije za podršku zaštitnom komutiranju. Postoji niz podmetoda, ovisno o načinu povezivanja *gateway*-a (prsten, potpuna povezanost), *hub*-ova (prsten, direktna veza na *gateway*), te ostalih čvorova (prsten, zvijezda ili stablo prema pridruženom *hub*-u). Metoda **BuildFHN+DH** implementira dvostruko udomljivanje. Postoji nekoliko podmetoda – omogućeno je dvostruko

udomljivanje *hub*-ova i običnih čvorova, udomljivanje se može vršiti direktno ili prema najbližim elementima susjednih podsektora.

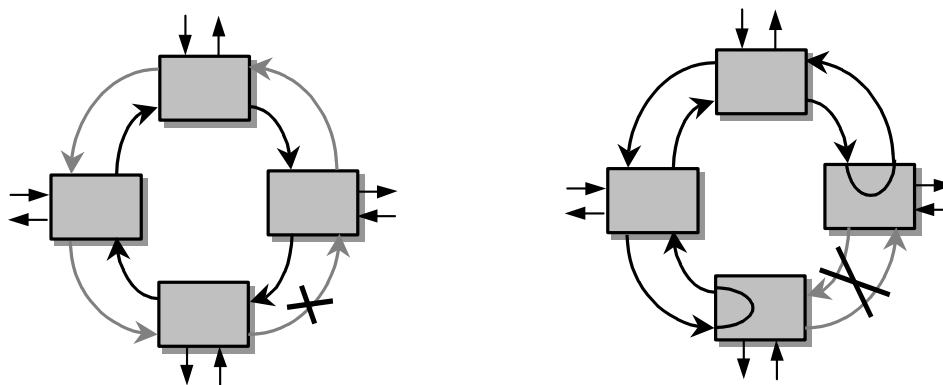
3.4.5. Samooporavljivi SDH prstenovi

Najbolje topološko rješenje mreže, po pitanju sprečavanja gubitka informacija i zaštite komunikacije u slučaju kvarova, predstavlja topologija SDH samooporavljivih prstenova. SDH samooporavljivi prstenovi sastoje se od određenog broja multipleksora s mogućnošću dodavanja i izdvajanja informacija iz toka, odnosno prijenosa toka bez intervencija, povezanih u dvostruke prstenove. Takva topologija omogućuje nesmetan tok informacija, nudeći napredne automatizirane mehanizme zaštite u slučaju kvarova. Na slici 3.21. prikazan je jedan takav prsten u normalnom načinu rada. U tom slučaju promet se može odvijati po bilo kojem od prstenova.



Slika 3.21 : Samooporavljivi SDH zaštitni prsten

Na slici 3.22. su dani primjeri funkcioniranja u slučaju kvarova na jednom odnosno oba prstena koji povezuju multipleksore. U slučaju kvara na jednom od prstenova sav promet se jednostavno prebacuje na drugi prsten. Ako pak dođe do kvara na oba prstena, mehanizmi ugrađeni u samu mrežu omogućuju prijenos informacija kombiniranim korištenjem ispravnog i neispravnog prstena.



Slika 3.22 : Uspostava prometa u slučaju kvarova na prstenu

Da bi se izgradila topologija za SDH samooporavljiv prsten mogu se iskoristiti metode prstena ugrađene u popratno programsko rješenje. No, izgradnja samooporavljivih prstena je prije svega pitanje praktične izvedbe prstenova, što ovisi o korištenoj opremi i njenim mogućnostima. Pri dizajnu topologije treba voditi računa o maksimalnom broju multipleksora u pojedinom prstenu i sl.

3.5. Pouzdanost mreže.

Opisani algoritmi koji se koriste u dizajnu mreža isključivo formiraju mreže s minimalnim cijenama, odnosno duljinama. Međutim, da bi kvantitativno opisali rješenja i da bi ih bolje mogli usporediti nije nam dovoljan samo podatak o cijeni mreže, već koristimo i dodatne parametre. Najkorisniji parametar mreže, koji nam uz cijenu daje vrlo bitnu informaciju o mreži je pouzdanost. Ovisno o modelu proračun pouzdanosti može se iskoristiti i u proračunu raspoloživosti mreže.

Proračun pouzdanosti vrši se korištenjem standardnih modela mreža (B.Mikac, 1998). Kao metode koriste se Abrahamov algoritam, K-tablice ili metode simulacije koje mogu kao rezultat dati vremensku ovisnost pouzdanosti mreže (pr. Monte Carlo simulacija). Programsko rješenje za dizajn mreže uključuje proračun pouzdanosti/raspoloživosti korištenjem implementiranog Abrahamovog algoritma. Opis algoritma nalazi se u (B.Mikac, 1998).

3.5.1. Abrahamov algoritam

Da bi odredili pouzdanost komunikacije među određenim čvorovima, moramo znati puteve kojima su ti čvorovi povezani. Često ti putevi nisu disjunktni, pa nije moguće jednostavno izračunavanje pouzdanosti iz samog popisa puteva, već je potrebno odrediti disjunktne puteve ili dijelove puteva. Abrahamov algoritam je algoritam za određivanje disjunktih članova puteva među čvorovima. Kao ulazi u algoritam koriste se podaci o elementarnim putevima između dva čvora, a kao izlaz se dobije unija disjunktih članova – pouzdanost puta nakon toga određuje se jednostavnim zbrojem pouzdanosti pojedinih članova.

Međutim, rezultat algoritma omogućava nam da odredimo pouzdanost komunikacije između dva čvora. To, naravno, ne odgovara pouzdanosti cijele mreže. Pouzdanost mreže je jednaka minimalnoj pouzdanosti komunikacije između čvorova u mreži. Dakle, da bi odredili pouzdanost mreže, trebamo izračunati pouzdanosti komunikacije među svim parovima čvorova, a rezultat je minimalna pouzdanost od izračunatih.

$$R(N) = \min_{i,j} [R(i, j)]$$

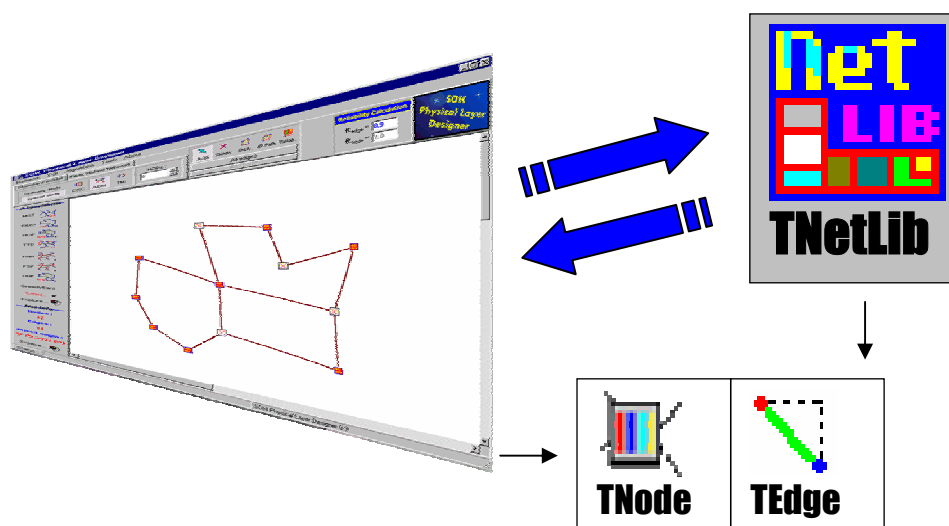
Detaljan opis Abrahamovog algoritma dan je u (B.Mikac, 1998.).

4. PROGRAMSKO RJEŠENJE ZA DIZAJN MREŽE

Diplomskom radu priloženo je programsko rješenje koje implementira većinu razmatranih metoda za dizajn topologije mreža. Program *SDH Topology Designer* može se izvoditi na PC kompatibilnim računalima koja koriste Microsoft Windows 9x/2000/NT operacijske sustave. Program je izrađen korištenjem programskog alata *C++ Builder*, tvrtke *Inprise/Borland International*.

4.1. Izvedba programskog sustava

Svi algoritmi i metode dizajna implementirane su u zajedničku VCL komponentu (Borlandov naziv za posebno definirane biblioteke klasa – moguće korištenje u svim Borlandovim alatima) *TNetLib*, tako da sam program u stvari predstavlja sučelje između korisnika i metoda implementiranih u komponenti. Takvim programskim modelom ostvarena je otvorenost i laka nadogradnja postojećih metoda, te njihova prenosivost i mogućnost korištenja u drugim programima za dizajn mreža. Prikaz mreže također je ostvaren korištenjem dodatnih komponenti koje se pridružuju pojedinom čvoru (TEdge) i grani (TNode). Struktura tako izgrađenog programskog sustava dana je na slici 4.1.



Slika 4.1 : Struktura programskog sustava

Objektno orijentirani, vizualni, pristup omogućio je lako definiranje svojstava čvorova i grana mreže. Svaki čvor i svaka grana promatraju se kao objekti sa pridruženim svojstvima. U nastavku je dan prikaz svojstava svake grupe objekata.

Objekt čvor : TNode

Svojstva :

- koordinate na ekranu (X,Y)
- geografske koordinate
(GeoX,GeoY,GeoZ)
- vrsta čvora (običan ili specijalan)
- tip SDH čvora (TM,ADM ili DXC)
- naziv

Objekt grana : TEdge

Svojstva :

- početni i krajnji čvor
- duljina – ekranska, geografska
- faktor cijene
- duljina
- kašnjenje
- metrika (euklidska ili Manhattan)
- naziv
- + objekt uključuje metode za
proračun duljine i cijene

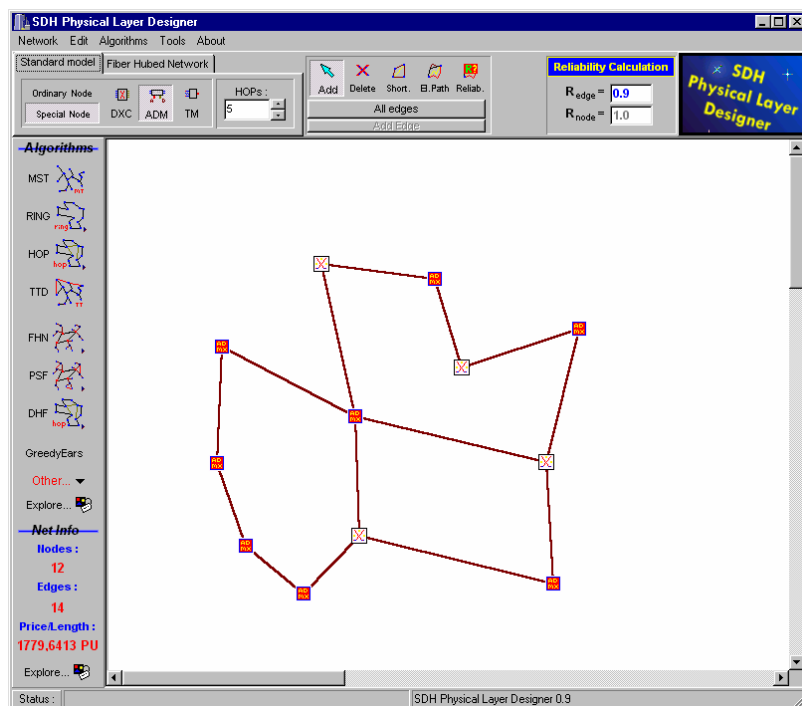
Korištenjem tih osnovnih svojstava (objekti posjeduju još nekoliko svojstava, ali se ona ne koriste u programu, već su namijenjeni za specijalnu potrebu u drugim aplikacijama) dobiva se kvalitetan uvid u kompletnu mrežu.

U *TNetLib* implementirano je i niz pomoćnih funkcija za rad sa grupama čvorova i grana, za određivanje cijene mreže, pretraživanje i pronalaženje najkraćih puteva itd.

4.2. Korisničko sučelje i rad s programom

4.2.1. Glavni prozor

Program koristi jednostavno grafičko korisničko sučelje. Glavni prozor (slika 4.2.) dijeli se na glavni izbornik, pomoćni panel sa osnovnim funkcijama (dodavanje i brisanje čvorova, traženje najkraćeg puta, elementarnih puteva među čvorovima, pouzdanosti...), panela za brzo pokretanje metoda dizajna, te radne plohe na kojoj se prikazuje mreža i rezultati dizajna.

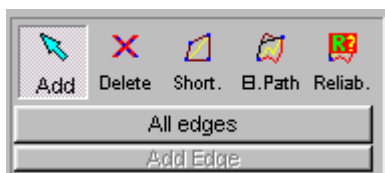


Slika 4.2 : Glavni prozor u programu

Prilikom pokretanja pojedinih funkcija (najkraći putevi, elementarni putevi, pouzdanost) program otvara dodatne informativne prozore u kojima korisniku daje iscrpne informacije o dobivenome. U svakom trenutku vidljiva je cijena aktualne mreže, te informacija o broju čvorova i grana u njoj.

4.2.2. Dodavanje i brisanje čvorova

U gornjem panelu moguće je izabrati vrstu čvora – običan/specijalan, TM/ADM/DXC. Čvor se jednostavnim pozicioniranjem na radnoj plohi i pritiskom na miša dodaje u mrežu. Da bi se čvor obrisao iz mreže potrebno je uključiti brisanje u gornjem panelu (ikona *Delete*), te mišem kliknuti na čvor koji se želi obrisati. Daljnje dodavanje moguće je uključivanjem ikone *Add* (slika 4.3.).



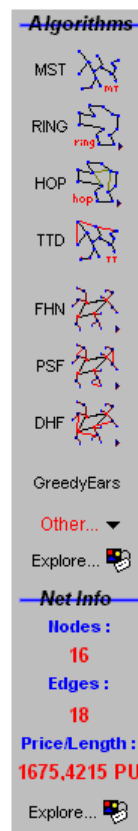
Slika 4.3 : Dodavanje i brisanje čvorova

4.2.3. Određivanje topologije

Nakon što su definirani čvorovi u mreži pristupa se izgradnji topologije mreže. To se obavlja odabirom jedne od ponuđenih metoda u lijevom panelu (slika 4.3) ili pak u glavnom izborniku pod *Algorithms*.

Metode su grupirane, pa je za svaku grupu metoda moguće izabrati neku od podmetoda iz dodatnog izbornika koji se prikaže nakon klika na ikone grupa metoda (ikone imaju malu strelicu s desne strane – ikone *Ring*, *HOP*, *FHN*, *PSF*, *DHF*).

Bitno je napomenuti da program pretpostavlja izgradnju nove mreže, pa prije pronalaženja topologije omogućuje korištenje svih mogućih grana u mreži – mreža je inicijalno potpuno povezana. To daje zadovoljavajuće rezultate sa većinom metoda, no valja istaknuti *GreedyEars* metodu koja je primarno namijenjena rijetkim (*sparse*) mrežama, pa u tom slučaju njeno izvođenje dulje traje, a rezultati nisu potpuno zadovoljavajući. Zbog toga postoji i mogućnost njena korištenja na aktualnim (obavezno dvostruko ili više povezanim) mrežama, dakle bez potpuno povezane inicijalne mreže.

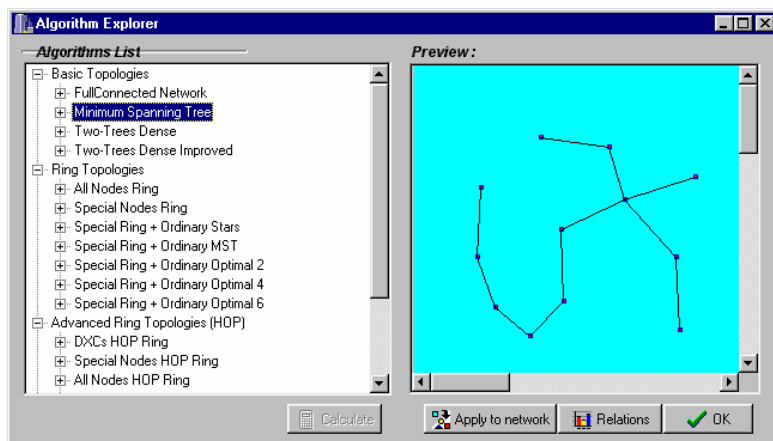


Slika 4.4 : Određivanje topologije

4.2.4. Ostale funkcije

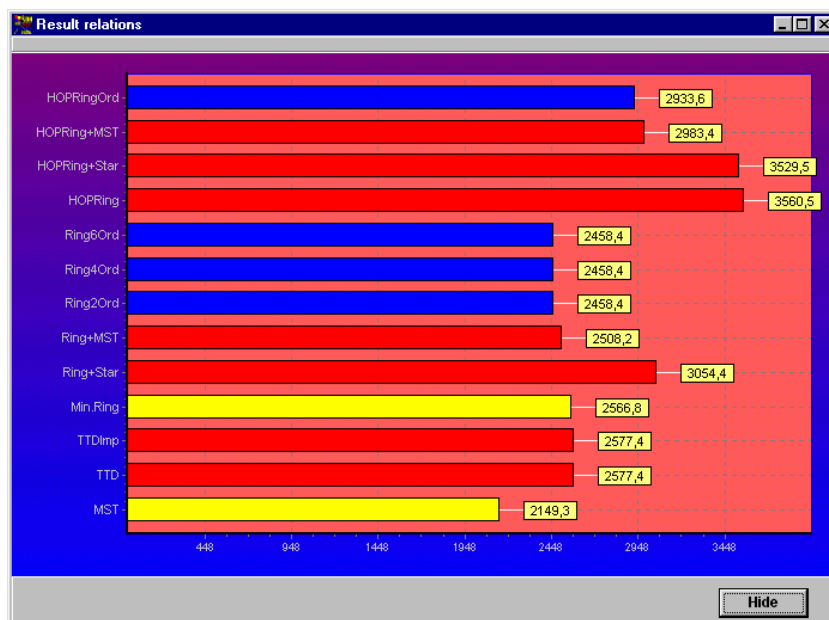
Osim izgradnje topologije, program omogućava i naknadnu analizu rješenja. Moguće je određivanje najkraćih puteva među čvorovima, svih elementarnih puteva između čvorova, te pouzdanosti komunikacije uz uvjet da su čvorovi idealno pouzdani – dakle, određuje se u stvari pouzdanost koja ovisi samo o granama i njihovim pouzdanostima.

Omogućen je brzi pregled svih algoritama, te grafički prikaz cijene svih ponuđenih rješenja. Na taj način je omogućen odabir upravo onog algoritma koji daje najbolje rezultate. Dio programa zadužen za pregled naziva se *Algorithm Explorer* (slika 4.5).



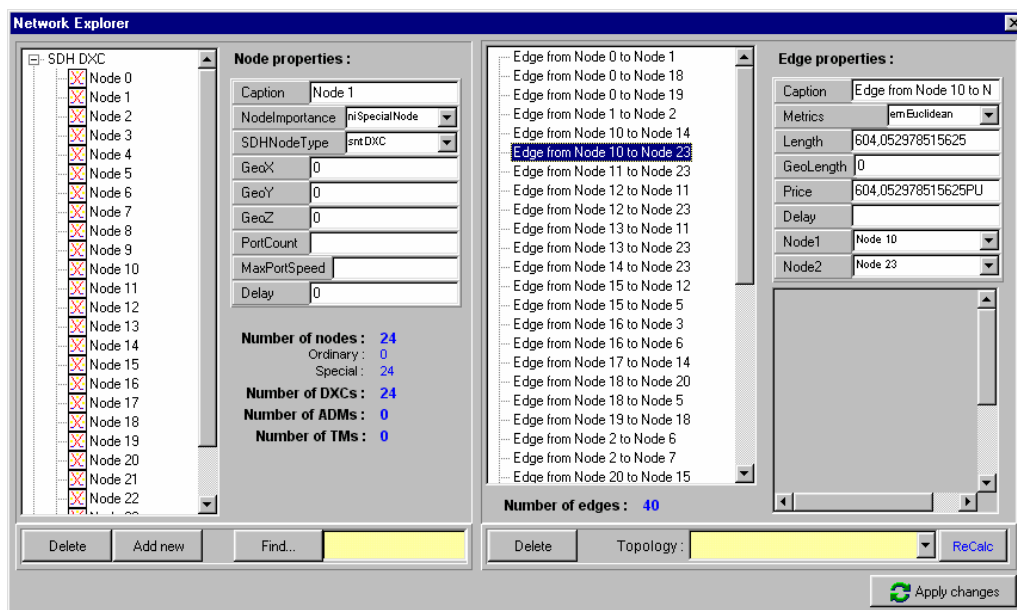
Slika 4.5 : Algorithm Explorer

Da bi dobili prikaz odnosa cijena (slika 4.6.) korištenih metoda kliknite na gumb *Relations* u prozoru *Algorithm Explorer*-a.



Slika 4.6 : Odnos cijena topologija

Potpunu informaciju o strukturi mreže daje *Network Explorer* (slika 4.7.). Dobiva se popis čvorova sa njihovim svojstima, te popis aktualnih grana i njihovih svojstava, te još niz općenitih informacija o strukturi mreže.



Slika 4.7 : Network Explorer

4.3. Podržane metode dizajna

Implementacija uključuje većinu prije opisanih metoda za traženje optimalne topologije mreže. Metode lokalnih transformacija za poboljšanje svojstava mreže nisu implementirane ! Velik broj metoda moguće je izvoditi uz različito postavljane uvjete, pa se dobija mnogo 'podmetoda' koje u različitim slučajevima mogu dati zanimljiva rješenja. Popis svih implementiranih metoda dan je u tablici.

Naziv metode	Opis
MST	najkraće stablo, jednostruka povezanost
TwoTrees	Two-Trees metoda, dodatna podmetoda za provjeru trokuta
GreedyEars	Greedy Ears metoda, moguće korištenje na svim početnim rješenjima
RingMST	zaštitni prsten uz dodavanje preostalih čvorova u najkraća stabla
RingStar	zaštitni prsten uz dodavanje preostalih čvorova u zvijezde
RingOrd	zaštitni prsten, dodavanje preostalih čvorova u prsten ili MST
RingHOP_MST	prsten s dodatnim granama, ostali čvorovi u najkraćim stablima
RingHOP_Star	prsten s dodatnim granama, ostali čvorovi u zvijezde
RingHOPOrd	prsten s dodatnim granama, ostali čvorovi u prsten ili MST
FHN	Fiber Hubbed Network topologija, različiti podmodeli
FHN+PS	Fiber Hubbed Network topologija, zaštitno komutiranje, podmodeli
FHN+DH	Fiber Hubbed Network, dvostruko udomljivanje, različiti podmodeli

Tablica 4.1 : Implementirane metode dizajna topologija

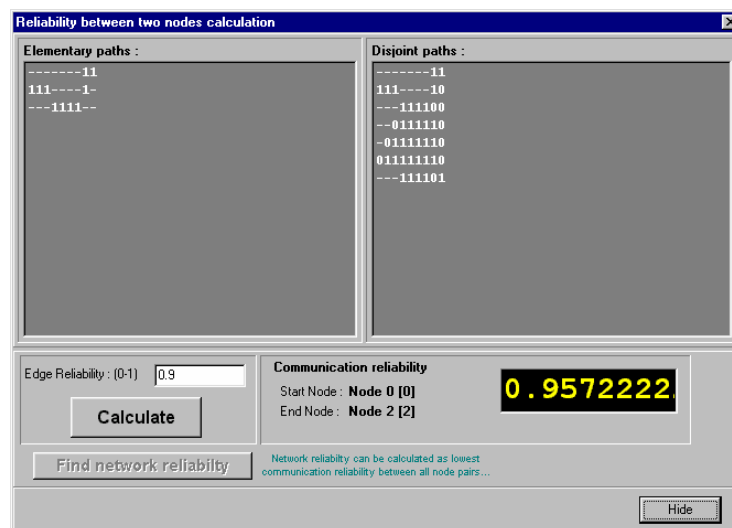
Program općenito razlikuje dva osnovna modela mreža – standardni model i centralizirani model (FHN – fiber hubbed network). Zbog jednostavnosti uvedena je mogućnost rada sa istim čvorovima u oba modela, ali uz uvjet da se kod izgradnje FHN mreže koristi slijedeći odnos terminologije čvorova i vrsta čvorova :

Gateway u FHN mreži u programu i u modelu se prikazuje DXC čvorom
Hub u FHN mreži u programu i u modelu se prikazuje ADM čvorom
Office u FHN mreži u programu i u modelu se prikazuje TM čvorom

Pri izradi topologije FHN mreže moguć je veliki broj različitih modela mreže – kombiniraju se svi, prije opisani, FHN modeli dizajna. Rezultati i prikazi rezultata dobiveni različitim metodama dani su u slijedećem poglavlju.

4.4. Dodatne mogućnosti

Program sadrži nekoliko dodatnih algoritama koji mogu biti korisni u procesu izgradnje mreže. ‘Najjači’ od njih je Abrahamov algoritam za određivanje pouzdanosti komunikacije među čvorovima. Njegovom implementacijom dobivena je mogućnost da se predloženo rješenje topologije izrazi još jednim kvantitativnim parametrom, osim već proračunate cijene. Pouzdanost je vrlo bitno svojstvo mreže. Daje uvid u kvalitetu postojećih zaštitnih redundantnih struktura i zbog toga se i o tom parametru mora voditi računa.

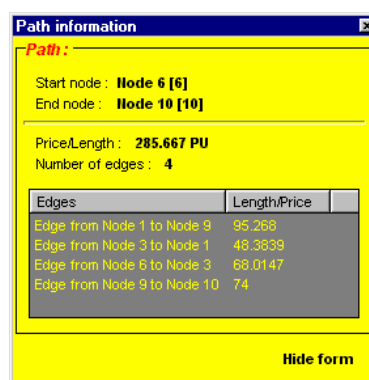


Slika 4.8 : Proračun pouzdanosti među čvorovima

Trenutno implementirana metoda određivanja pouzdanosti pretpostavlja nemogućnost kvara čvorova, tj. pretpostavlja idealnu pouzdanost čvorova ($R_{Node}=1$). Drugo

ograničenje implementirane metode je to da pretpostavlja jednaku pouzdanost svih pojedinih grana u mreži. Nakon što se odaberu čvorovi za proračun otvara se prozor prikazan na slici 4.8., koji prikazuje popis elementarnih puteva među čvorovima, proračunate disjunktne članove prema Abrahamovom algoritmu (B.Mikac, 1998)., te rezultat ovisno o pouzdanosti grana.

Druga od zanimljivih mogućnosti je pronalaženje najkraćeg puta između dva čvora u mreži. Dovoljno je označiti čvorove između kojih se traži najkraći put – nakon označavanja program iscrtava najkraći put, te prikazuje dodatne informacije o tom putu – broj i karakteristike grana, ukupnu duljinu... (slika 4.9.)



Slika 4.9 : Informacije o najkraćem putu

Kao što je uz opis metoda prstena (3.3.3.) bilo napomenuto, postoje dva algoritma pronalaženja početnog prstena – sporiji koji uvijek pronalazi minimalni prsten i brži koji u nekim posebnim slučajevima (paralelogrami) ne uspijeva naći minimalni prsten, no zato radi mnogo brže, a u većini slučajeva daje isti rezultat. Omogućeno je uključivanje i isključivanje korištenja bržeg algoritma stavkom u izborniku *Edit -> Fast Ring Calculation*

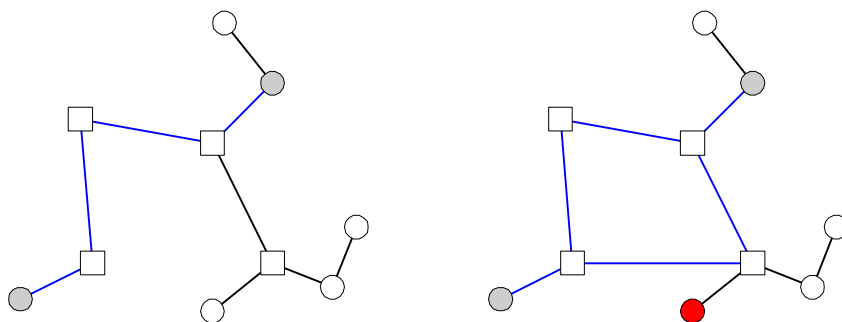
5. REZULTATI DIZAJNA MREŽE

U prvom dijelu ovog poglavlja prikazan je način funkcioniranja nekoliko osnovnih metoda nad jednostavnim modelom mreže, postupci su popraćeni komentarima i zaključcima. U drugom dijelu promatraju se tri referentna modela mreža, te se daje prikaz rezultata dizajna topologije mreža dobivenih korištenjem pratećeg programskog rješenja. Dan je tablični prikaz odnosa cijena topologija dobivenih različitim implementiranim metodama dizajna, te grafički prikaz nekih od rezultata.

5.1. Funkcioniranje osnovnih metoda

Način funkcioniranja prikazan je na testnoj mreži koju je moguće jednostavno interpretirati i bez računala uočiti osnovne odnose bitne za razvoj dizajna. Testna mreža sastoji se od 10 čvorova, od toga 4 specijalna čvora i preostalih 6 običnih čvorova.

Na slici 5.1. prikazana je osnovna razlika između jednostruko i dvostruko povezane mreže. Na lijevoj strani slike prikazano je minimalno stablo unutar zadane mreže – to je model jednostruko povezane mreže – između svaka dva pojedina čvora postoji samo jedan put. Budući da put među njima nije minimalan mogući (minimalno stablo znači najkraću, odnosno najjeftiniju ukupnu strukturu mreže, ali ne nudi najkraće puteve među pojedinim čvorovima), te da se najčešće sastoji od određenog broja grana, u pitanje dolaze pouzdanost komunikacije – neredundantna (serijska) veza među elementima određene pouzdanosti ima ukupnu pouzdanost manju od pojedinačnih pouzdanosti ($R_{uk} = R_1 R_2 \dots R_n$).

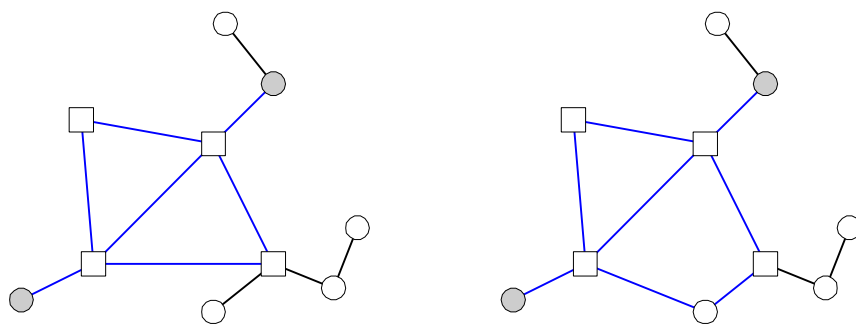


Slika 5.1 : Minimalno stablo i metoda prstena

Desni dio slike prikazuje izvođenje metode koja izgrađuje prsten među specijalnim čvorovima, a zatim na njega dodaje obične čvorove u obliku najkraćih stabala. Lako je primijetiti da veza između dva označena čvora sada može biti ostvarena na dva neovisna puta – zahvaljujući prstenu, pa je i pouzdanost komunikacije među čvorovima veća nego u

slučaju jednostruke veze. Na desnoj slici je naznačen čvor koji se dodatnim poboljšanjem (metode **Ring2Ord**, **Ring4Ord**, **Ring6Ord** opisane u 3.3.3. i 3.3.3.1) može dodati na prsten.

Dodatno povećanje pouzdanosti komunikacije moguće je ostvariti dodavanjem novih grana u prsten. Te grane rješavaju problem kašnjenja toka prilikom prolaska kroz cijeli prsten, a ujedno i poboljšavaju svojstvo pouzdanosti mreže. Naravno, cijena mreže u tom slučaju raste, pa je potrebno, na osnovi ostalih parametara i svojstava mreže, odlučiti o isplativosti takve izvedbe. Na slici 5.2 lijevo prikazano je rješenje topologije koje se dobije metodom **RingHOP_MST**. Vidi se nova grana koja je dodana u prsten (kraća od obje dijagonale u četverokutnom prstenu). Budući da i ona sada može sudjelovati u komunikaciji među označenim čvorovima dobijemo tri neovisna puta unutar samog prstena, što povećava pouzdanost komunikacije u odnosu na topološki model prikazan na slici 5.1. desno.



Slika 5.2 : Dodatne grane u prstenu

Na desnom dijelu slike prikazan je rezultat dobiven metodom **RingHOPOrd** – na slici 5.1. desno posebno označeni čvor dodan je u prsten. Opravdanost investicije ispituje se ovisno o stanju koje je u mreži nastalo. Zbog dodavanja u prsten, taj obični čvor sada posjeduje svojstvo dvostruke povezanosti. S druge strane, pouzdanost komunikacije među označenim čvorovima neznatno se smanjuje zbog dodavanja grane u jedan od neovisnih puteva. Cijena kablova mreže je niža nego u slučaju bez dodavanja običnog čvora u mreži, no to ne mora nužno značiti i nižu cijenu mreže – sve ovisi o tipu običnog čvora – ako se radi o krajnjem multipleksoru mora ga se unaprijediti/zamijeniti sa multipleksorom sa izdvajanjem i dodavanjem, pa cijena opet raste. Dakle, iako naoko vrlo slične, prikazane topologije posjeduju mnogo razlika. Upravo o tim razlikama ovisiti će i odluka o prihvaćanju jednog ili drugog rješenja od strane dizajnera mreže. Odluka nije laka i najčešće je potrebno mnogo dodatnih proračuna i unaprijeđenja ponuđenog dizajna da bi se došlo do nje.

Već na prikazanom, jednostavnom primjeru, razlike među topologijama postoje, no najčešće nisu uočljive na prvi pogled. Same razlike u izgledu rješenja – dakle ponuđenom modelu rasporeda kablova nisu velike, ali iza njih se često kriju mnogi problemi.

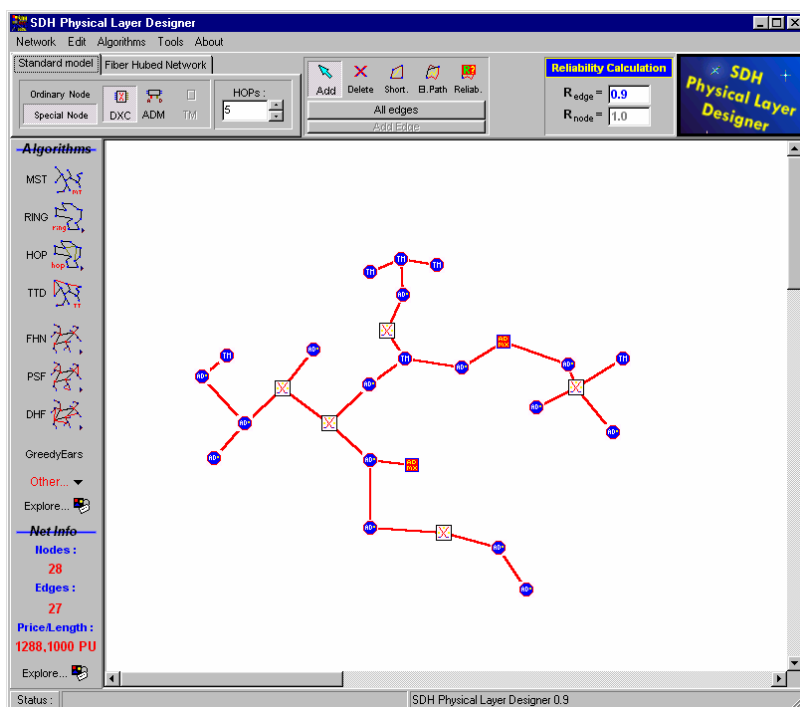
5.2. Rezultati dobiveni pratećim programskim rješenjem

U poglavlju 4. opisano je prateće programsko rješenje. U nastavku je dan prikaz rezultata dobivenih na testnim mrežama, korištenjem različitih metoda implementiranih u program. Testne mreže čine dvije mreže konstruirane prema standardnom modelu, kojima se analiziraju rezultati osnovnih metoda (prsten, dva stabla, prsten s dodatnim granama), te jedna mreža konstruirana tako da omogući testiranje drugog podržanog modela mreže – koncentrirane optičke mreže (FHN).

Sve mreže su prvo prikazane u obliku minimalnog stabla da se dobije prikaz rasporeda čvorova u njima. Prva mreža sastoji se od 7 specijalnih i 20 običnih čvorova, dok druga mreža ima 15 specijalnih i 30 običnih čvorova. Mreža za analizu FHN ima ukupno 54 čvorova – 4 *gateway*-a, 15 *hub*-ova i 35 standardnih čvorova. Pojedina rješenja topologije prikazana su slikovno, dok je kompletni popis rezultata prikazan tablično.

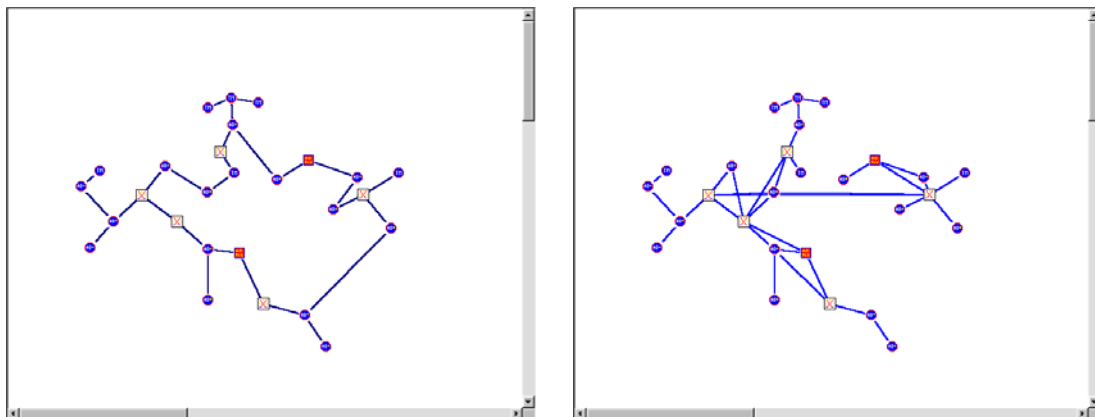
5.2.1. Standardni model mreže

Za prikaz rezultata dizajna dobivenog metodama implementiranim u programskom rješenju koriste se dvije testne mreže : **Mreža 1** i **Mreža 2**. **Mreža 1** sastoji se od 7 specijalnih čvorova (5 digitalnih prospojnika i 2 multipleksora), i 20 običnih čvorova. Raspored čvorova prikazan je na slici 5.3., a na slici su čvorovi povezni jednostruko, korištenjem MST implementirane metode.

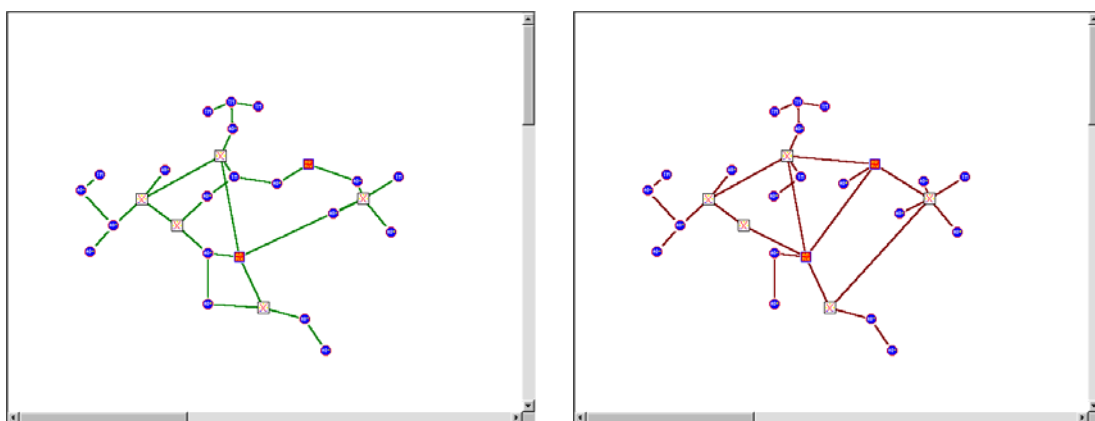


Slika 5.3 : Model mreže 1, minimalno stablo

Na slijedećim slikama prikazani su rezultati dobiveni nekim od implementiranih metoda. Prikazani su rezultati dobiveni metodama **Ring4Ord**, **GreedyEars**, **TwoTrees**, te **RingHOP_MST**.

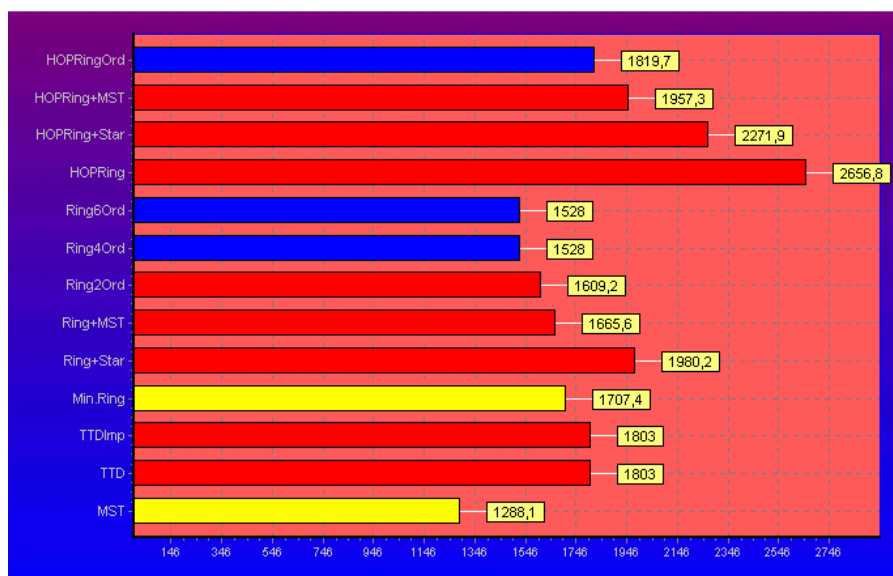


Slika 5.4 : Rezultati dobiveni metodama **Ring4Ord** i **GreedyEars**



Slika 5.5 : Rezultati dobiveni metodama **TwoTrees** i **RingHOP_MST**

Na slikama je lako uočiti postojanje dodatne zalihosti grana u rješenjima dobivenim metodama **GreedyEars**, **TwoTrees** i **RingHOP_MST**. Odmah se uočava i 'posebnost' rješenja dobivenog metodom **GreedyEars**. To rješenje cijenom dosta odskaje od ostalih (cijena 2302 novčane jedinice), a uzrok tome leži u tome što metoda nije namijenjena korištenju pri izradi nove mreže, što je ovdje slučaj. Na slici 5.6. dan je preslik grafikona s informacijama o cijenama predloženih mreža, dobivenih korištenjem osnovnih metoda implementiranih u programu (*AlgorithmExplorer -> Relations*).

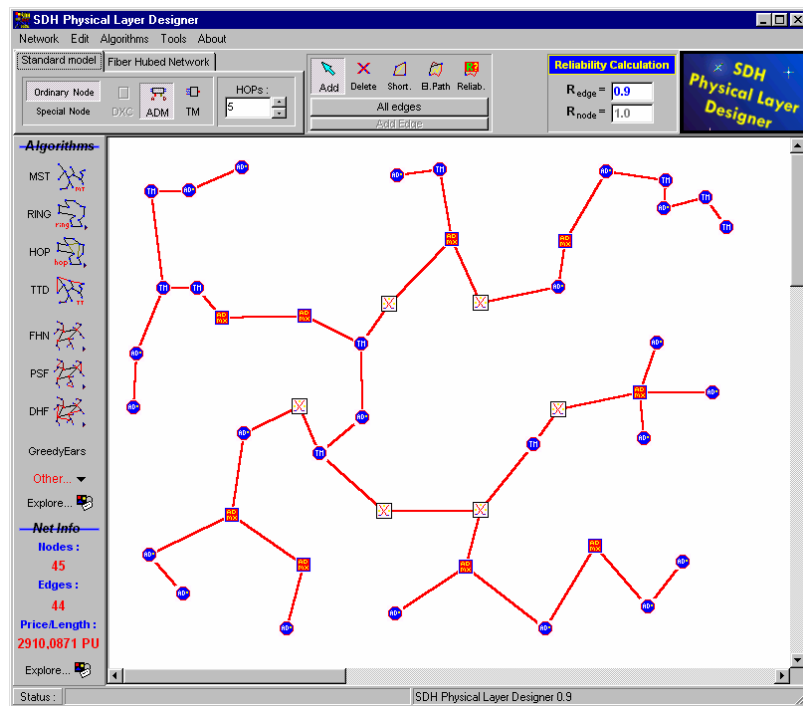


Slika 5.6 : Odnos cijena predloženih topologija – mreža 1

Moguće je uočiti da cjenovno najbolje rješenje daje metoda **Ring4Ord** (1528 novčanih jedinica). To je tek 18% povećanje cijene/duljine mreže u odnosu na jednostruko povezano minimalno stablo, a zauzvrat se nudi dvostruka povezanost specijalnih i nekolicine običnih čvorova, te povećana pouzdanost komunikacije među čvorovima u mreži.

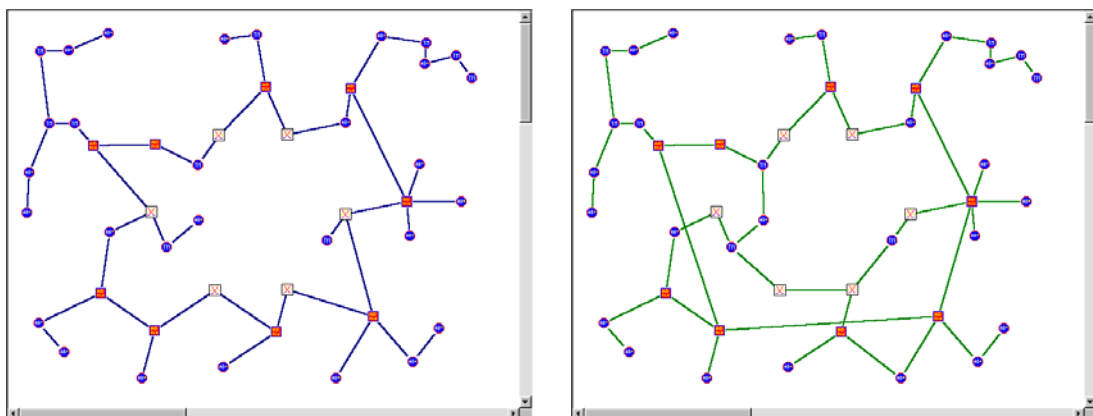
Tek kao ilustraciju navedimo pouzdanost komunikacije između dva krajnja čvorova u slučaju različitih topologija. Pretpostavka koju uzimamo pri proračunu pouzdanosti u programu – idealni čvorovi ($R_{Node}=1$), sve grane jednake pouzdanosti ($R_{Edge}=0,95$). Pouzdanost komunikacije kod minimalnog stabla iznosi 0,5989, dok kod modela **RingMST** pouzdanost iznosi 0,7536. Kod modela **RingHOP_MST** uz parametar HOP=3 pouzdanost iznosi čak 0,8486. Znači, korištenjem metoda koje dodaju nove grane, povećavamo pouzdanost komunikacije među krajnjim čvorovima do 25%. U istom slučaju cijena mreže može narasti za više od 50%, pa odluka o primjeni topologije mora uključiti i neke dodatne parametre.

Model mreže 2, kao nešto veće i složenije mreže prikazan je na slici 5.7. Mreža se sastoji od 45 čvorova – 15 specijalnih (6 digitalnih prospojnika i 9 multipleksora) i 30 običnih čvorova.

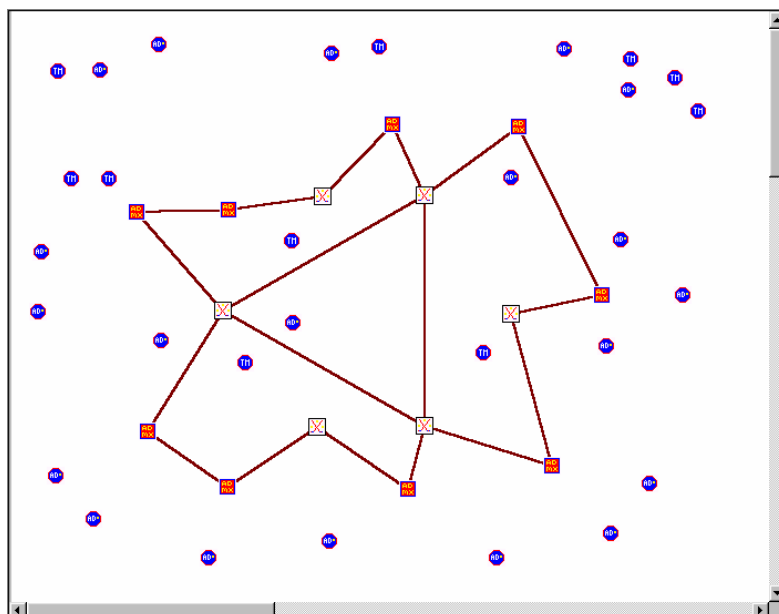


Slika 5.7 : Prikaz mreže 2, minimalno stablo

Rezultati dobiveni nekim od implementiranih metoda slikovno su prikazani u nastavku.

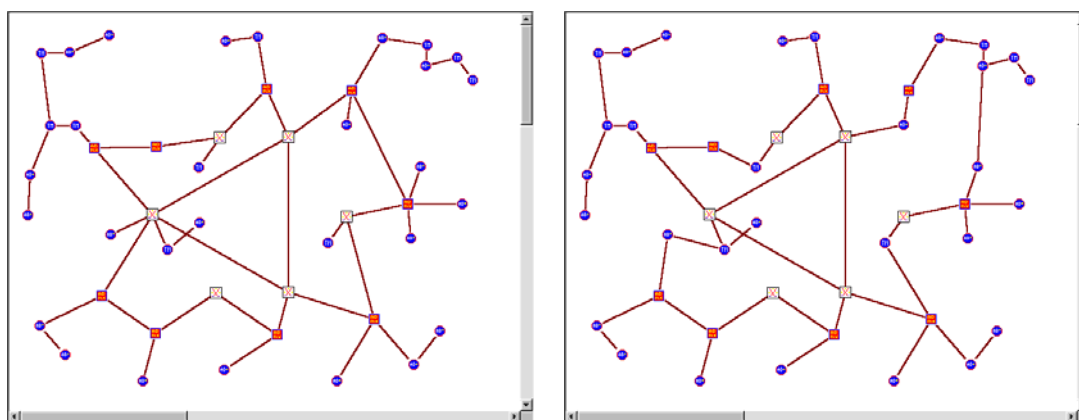


Slika 5.8 : Rezultati dobiveni metodom RingMST i TwoTrees



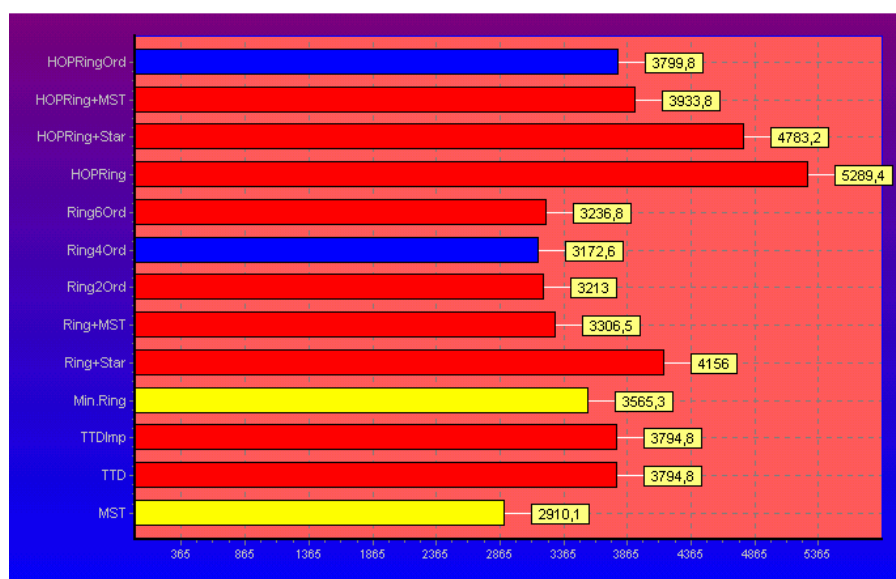
Slika 5.9 : Prsten specijalnih čvorova sa dodatnim granama

Na slici 5.9. prikazan je samo prsten specijalnih čvorova s dodatnim granama – on je početno rješenje svih metoda koje koriste prstene s dodatnim granama. To je vidljivo na slici 5.10. gdje je prikazan rezultat dobiven metodama **RingHOP_MST** i **RingHOPOrd**. Kod prve metode prsten ostaje nepromijenjen, te se na njega dodaju preostali obični čvorovi u strukturama minimalnih stabala. Kod druge pak metode, dolazi do promjena osnovnog prstena jer se neki od običnih čvorova mogu dodati u prsten, a da se pri tome smanji cijena mreže, u odnosu na cijenu kad se ti čvorovi ne bi dodali u dvostruko povezanu mrežu. Iako to na papiru izgleda dobro, u praksi takve preinake običnih čvorova u specijalne ne moraju biti jednostavno izvedive, pa je često potrebno obavljati dodatne preinake u dizajnu.



Slika 5.10 : Rezultati dobiveni metodama **RingHOP_MST** i **RingHOPOrd**

Pregled cijena ponuđenih rješenja za mrežu 2 prikazan je na slici 5.11.



Slika 5.11 : Odnos cijena predloženih topologija - mreža 2

U tablici 5.1. dan je pregled rezultata za obje testne mreže, prikazano je postotno povećanje cijene u odnosu na optimalnu jednostruko povezanu strukturu (minimalno stablo), te su istaknuti algoritmi koji su dali najbolja rješenja.

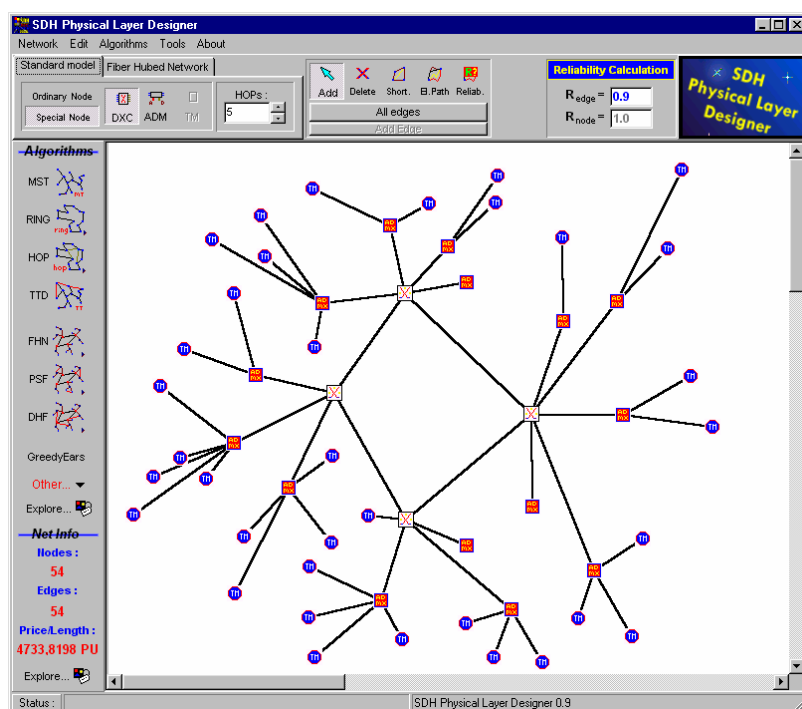
	Mreža 1		Mreža 2	
	Cijena	Razlika	Cijena	Razlika
MST	1288		2910	
RingMST	1665	29 %	3306	13 %
RingStar	1980	53 %	4156	43 %
Ring4Ord	1528	18 %	3172	9 %
HOP_MST	1957	52 %	3933	35 %
HOP_Star	2271	76 %	4783	64 %
HOPOrd	1820	41 %	3800	30 %
TwoTrees	1803	40 %	3795	30 %

Tablica 5.1 : Odnos cijena za ponuđene topologije

Rezultati nedvojbeno ukazuju na kvalitetu tzv. **Ord** metoda koje inteligentno dodaju obične čvorove na dvostruko povezanu mrežu. Međutim, kao što je već nekoliko puta upozoreno, tako dobiveno rješenje u praksi neće nužno biti najpovoljnije zbog potrebnih intervencija na samim čvorovima ! O tome je uvijek potrebno voditi računa.

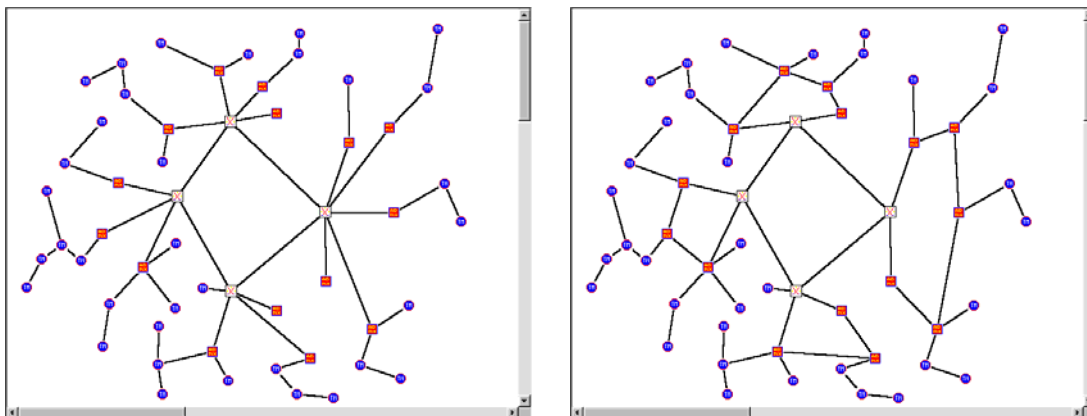
5.2.2. Model koncentrirane optičke mreže

Osim standardnog modela mreže, programsko rješenje podržava i mogućnost izgradnje raznih modela topologija baziranih na topologiji koncentrirane optičke mreže. Prikaz nekih od modela dan je u nastavku, a testiranja su vršena na mreži koja se sastoji od ukupno 54 čvorova - 4 *gateway* čvorova, 15 *hub*-ova i 35 standardnih čvorova. Osnovna FHN topologija prikazana je na slici 5.12.



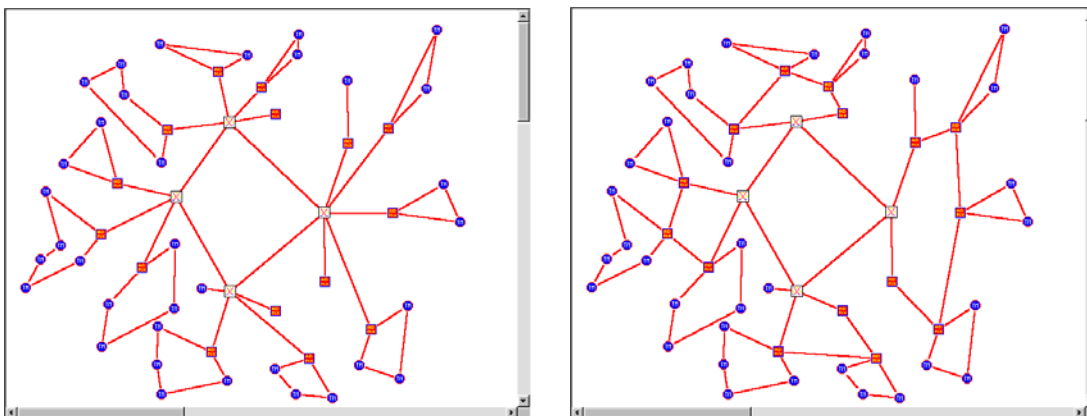
Slika 5.12 : Testna mreža za model koncentrirane optičke mreže

Na osnovnoj topologiji mogu se uočiti sva pravila izgradnje koncentrirane optičke mreže. Na *gateway*-e su vezani *hub*-ovi (svaki *hub* na najbliži *gateway* korištenjem topologije zvijezde), a na *hub*-ove ostali čvorovi, također u zvijezdama. Program podržava nekoliko vrsta osnovnih topologija. One su prikazane na slici 5.13. – moguće je povezivanje ostalih čvorova na *hub*-ove u obliku minimalnih stabala čime se smanjuje cijena mreže, ali se smanji i pouzdanost komunikacije među vanjskim čvorovima jer u tom slučaju promet ide kroz veći broj grana. Isto tako moguće je povezivanje *hub*-ova, zajedno sa najbližim *gateway*-om u dodatne zaštitne prstene, čime se povećava pouzdanost, ali i cijena mreže.



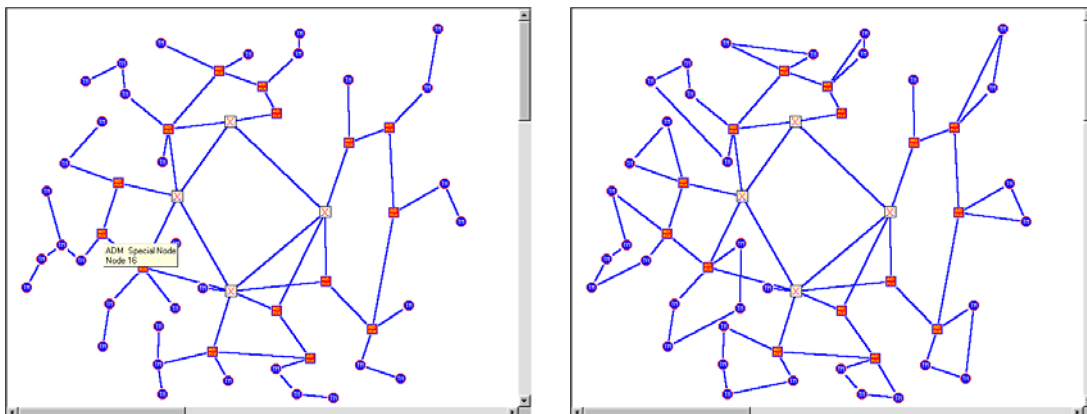
Slika 5.13 : Različiti modeli osnovne topologije koncentrirane optičke mreže

Metode za određivanje topologije uz korištenje dodatne zaštite – zaštitnog komutiranja ili dvostrukog udumljivanja također su implementirane, svaka sa nekoliko različitih podmodela. Na slici 5.14. su prikazani rezultati dobiveni implementiranim metodama za topologiju uz zaštitno komutiranje. U osnovi tih metoda je uključivanje ostalih čvorova u zaštitne prstenove, čime i oni postaju dodatno zaštićeni. Moguće je kombiniranje sa prstenovima *hub*-ova, pa se u tom slučaju dobiju tri razine prstenova u mreži (slika 5.14. desno).



Slika 5.14 : Topologije za podršku zaštitnom komutiranju u FHN

Dvostruko udumljivanje, kao još jedna metoda zaštite, je također implementirano u program. Omogućeno je dvostruko udumljivanje *hub*-ova, ili svih, ili samo po jednog iz svakog prstena *hub*-ova. Naravno, moguće su i kombinacije sa ostalim metodama.



Slika 5.15 : Modeli dvostrukog udobljivanja *hub*-ova u FHN

Na slici 5.15. prikazan je rezultat dobiven implementiranim metodama dvostrukog udobljivanja, na lijevoj strani uz povezivanje ostalih čvorova u minimalna stabla, a na desnoj u dodatne zaštitne prstenove.

U tablici 5.2. popisane su cijene topologija dobivenih implementiranim metodama.

Metoda	Cijena
Standardna FHN topologija	4734
FHN sa ostalim čvorovima u stablima	4069
FHN sa <i>hub</i> -ovima u prstenovima	4925
FHN sa <i>hub</i> -ovima u prstenovima, ostalo stabla	4258
Zaštitno komutiranje – ostali u prstenovima	5268
Zaštitno komutiranje – <i>hub</i> prstenovi + ostali	5457
Dvostruko udobljivanje – ostali u prstenovima	5945
Dvostruko udobljivanje – ostali u stablima	4745

Tablica 5.2 : Cijene dobivenih topologija

Cijena mreže s dvostrukim udobljivanjem je dosta visoka, što je jedan od razloga da se u praksi rijetko koristi na većem broju čvorova. Radije se prilazi izgradnji SDH samooporavljivih prstenova jer oni nude još bolje mogućnosti zaštite od kvarova, a cijenom su sve prihvatljiviji.

Ovim pregledom dobivenih rezultata prikazane su osnovne mogućnosti programskog rješenja koje predstavlja praktični dio ovog diplomskog rada. Budućom doradom i nadogradnjom programa jednostavno se može omogućiti dodatno kombiniranje već implementiranih metoda, a zbog njegove otvorenosti i dodavanje novih metoda ne predstavlja problem. Sama uloga programa kao pomoćnog sredstva za razvoj topologije mreže može se povećati njegovom nadogradnjom dodatnim mehanizmima dizajna i dimenzioniranja mreže. Tek tako dobio bi se kvalitetan i snažan alat za dizajn topologije mreže.

6. ZAKLJUČAK

Ovim diplomskim radom i pratećim praktičnim dijelom rada – programskim rješenjem za dizajn topologije mreža, pokušalo se dati uvid u neke od metoda koje se mogu primijeniti u dizajnu topologije dvostruko povezane mreže otporne na kvarove. Razmatrane su različite metode koje daju manje ili više prihvatljiva rješenja, komentirani su njihovi nedostaci i prednosti. Razmotren je i model koncentrirane optičke mreže, zajedno sa metodama za unaprijeđenje njene topologije, a sve s ciljem izgradnje topologije, koja će biti sposobna podržati razne mehanizme zaštite podataka. Određeni rezultati su i postignuti – posebice samostalno razvijenim metodama **RingOrd** i **RingHOPOrd** koje inteligentno dodaju čvorove u prstenove, ukoliko to smanjuje cijenu mreže.

Međutim, osnovni problem, na koji se nailazi pri dizajnu topologije, je kako razvijenu topologiju prenijeti u praksu, te da li je to uopće moguće!? Pokazuje se, naime, da dobra topologija sama po sebi nije dovoljna za izgradnju kvalitetne mreže. Postoji niz drugih parametara koje treba pratiti – jedan od njih je i pouzdanost komunikacije, koje izračunavanje već je implementirano u programsko rješenje. No, osim pouzdanosti, postoji još bitnijih faktora, koji se isključivo javljaju u praksi, a odnose se na odluke o vrsti korištene opreme, kapacitetima opreme i slično. Bez dobrog proučavanja tih parametara ne možemo govoriti o kvalitetnom dizajnerskom rješenju mreže. Npr. topologija mreže može biti ‘savršena’, potpuno provjerena, sa izvrsnim odnosom cijene i pouzdanosti, ali se u praksi može pokazati neisplativom, skupom za održavanje ili je uopće prelazak na nju sa postojećeg stanja preskup. Zato se nikako ne može govoriti o dobrim ili lošim rješenjima topologije, barem ne dok se svi ostali faktor detaljno ne prouče.

Metode za dizajn mreže i topologija mreža su brojne. Postoji niz alata koji pomažu u dizajnu mreža, sve veće telekomunikacijske kompanije koriste svoja rješenja, te se svakodnevno razvijaju sve bolji i bolji alati. Isto tako, razvoj opreme je nezaustavljiv, pa je i to jedan od faktora o kome treba voditi računa.

Metode implementirane u praktičnom dijelu ovog diplomskog rada lako su nadogradive i predstavljaju solidnu osnovu za daljnji razvoj. U nekima od njih još ima mjesta za nadopunu i optimizaciju, čime bi postale još brže za izvođenje, te samim time pristupačnije za korisnike dizajnerskih alata.

Literatura

T.Wu, *Fiber Network Service Survivability*, Artech House, Boston-London, 1992.

V. Sinković, *Informacijske mreže*, Školska knjiga, Zagreb, 1994.

A. Kershenbaum, *Telecommunications Network Design Algorithms*, McGraw-Hill, Singapore, 1993.

M.Kos, A.Bažant, Ž.Ilić, J.Jurić, D.Parun, S.Pilipović, E.Šehović, *Uvod u ATM*, Seminar, MIPRO '97, Opatija, 1997.

C.L. Monma, D.F. Shallcross, Methods for Designing Communications Networks with Certain Two-connected Survivability Constraints, *Operations Research*, Vol. 37 (1989), pp. 531-541

T. Wu, D.J. Kolar, R.H. Cardwell, Survivable Network Architectures for Broad-Band Fiber Optic Networks : Model and Performance Comparison, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 6 (1988), pp. 1698-1709

B.Mikac, Ž.Car, Pouzdanost telekomunikacijskih sustava, *Skripta*, 1998.