

# Heuristički model komunikacijskih mreža u povezivanju brodskih sustava primjenom svjetlovodne tehnologije

---

Jurdana, Irena

Doctoral thesis / Disertacija

2011

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:188:614428>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-18**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka Library - SVKRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET U RIJECI**

**Irena Jurdana**

**HEURISTIČKI MODEL  
KOMUNIKACIJSKIH MREŽA U  
POVEZIVANJU BRODSKIH SUSTAVA  
PRIMJENOM SVJETLOVODNE  
TEHNOLOGIJE**

**Doktorski rad**

**Rijeka, 2011.**

Mr.sc. Irena Jurdana, rođena 29. svibnja 1966. u Rijeci izradila je doktorski rad pod naslovom:

**Heuristički model komunikacijskih mreža u povezivanju brodskih sustava  
primjenom svjetlovodne tehnologije**

kojeg je obranila dana 8. prosinca 2011. godine pred povjerenstvom za obranu u sastavu:

1. Dr.sc. Serđo Kos, redoviti profesor Pomorskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, predsjednik
2. Dr.sc. Vinko Tomas, redoviti profesor Pomorskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, mentor i član
3. Dr.sc. Josip Kasum, redoviti profesor Pomorskog fakulteta Sveučilišta u Splitu. član

čime je stekla akademski stupanj: DOKTOR ZNANOSTI iz znanstvenog područja tehničkih znanosti, polja tehnologija prometa i transport, grane pomorski i riječni promet kao i sva prava koja joj po propisima pripadaju.

## SAŽETAK

Za učinkovito upravljanje brodom, koji je složena tehnička cjelina, od iznimne je važnosti da svi njegovi sustavi rade ispravno i pouzdano. Da bi se sustavima moglo upravljati i nadzirati potrebno je povezati sve komponente sustava komunikacijskom mrežom. Kroz doktorski rad prikazana je primjena svjetlovodnih sustava prijenosa informacija u povezivanju brodskih sustava.

Kako bi se osiguralo djelotvorno i pouzdano povezivanje brodskih sustava analizirani su svi elementi koji čine komunikacijski sustav za prijenos informacija te utvrđeni elementi koji najviše utječu na ukupnu raspoloživost sustava. Na osnovu tih istraživanja izrađen je matematički model svjetlovodne komunikacijske mreže.

Modelom su obuhvaćeni svi elementi mreže, te na osnovi podataka o kvarovima, izračunati ulazni podatci potrebni za analizu raspoloživosti mreže. Uz standardni način izračuna raspoloživosti uvedena je i nova metoda izračuna koja uključuje faktore utjecaja temeljene na načinu izgradnje kableske mreže.

Da bi se model mreže mogao koristiti za mreže različitih topologija, veličine, načina izgradnje i namjene, izrađen je algoritam za izračun raspoloživosti komunikacijske mreže. Osim izračuna raspoloživosti cjelokupne strukture, algoritam pronalazi optimalne putove u mreži i računa prigušenje svjetlosnog signala za sve pronađene putove. U izračune su ugrađeni podatci o vrstama i uzrocima kvarova na postojećim brodskim komunikacijskim mrežama, čime se dobiveni realni ulazni parametri a time i točniji izračun raspoloživosti. Povezivanjem podataka iz prakse s dosadašnjim istraživanjima na području otpornosti svjetlovodnih mreža ostvaruje se realna podloga za daljnja akademska istraživanja.

Uporabom algoritma analizirano je nekoliko mrežnih modela. Kroz modele je prikazan utjecaj primjene zaštitne trase, promjene vrijednosti faktora utjecaja, udvostručavanja optičkih linijskih modula i kabela te utjecaj različitih duljina kableske mreže na ukupnu raspoloživost konekcije.

Predstavljenim heurističkim modelom komunikacijskih mreža u povezivanju brodskih sustava primjenom svjetlovodne tehnologije, izračunate su raspoloživosti pojedinih komponenti i cijele mreže, utvrđen utjecaj raspoloživosti pojedinačnih

komponentata na raspoloživost sustava, određeni optimalni načini povezivanja brodskih sustava i metode zaštite komunikacijske mreže.

Na temelju provedenih istraživanja određeno je ponašanje sustava pri pojavi kvarova te mogućnost pronalaska optimalnih i pouzdanih načina povezivanja brodskih sustava, čime se pridonosi ukupnoj pouzdanosti brodskih sustava i broda u cjelini.

Korištenjem dobivenih rezultata istraživanja moguće je unaprijediti postojeću tehnologiju gradnje brodskih komunikacijskih mreža i njihovu raspoloživost, na način da se predloženi model koristi pri dizajniranju novih mreža ili pri analizi postojećih mreža.

## **KLJUČNE RIJEČI**

Svjetlovodna tehnologija, komunikacije, raspoloživost, model komunikacijske mreže, pomorstvo, brodski sustavi.

## **SUMMARY**

For an efficient operation of a ship, which is a complex technical unit, it is essential that all its systems work properly and reliably. In order to be able to control and monitor the systems, it is necessary to connect all of the systems' components with a communication network. The application of optical fibre transmission systems in connecting ship's systems is presented through the PhD thesis.

To ensure effective and reliable connecting of ship's systems, all the elements which constitute the communication system for information transmission were analyzed, and the elements which affect the most the overall system's availability were identified. Based on these studies, a mathematical model of optical communication network has been developed.

The model includes all the network's elements, and, based on the failure data, it calculates the input data required for the analysis of network availability. Besides the standard method of availability calculation, a new method of calculation has been introduced, which includes the impact factors based on the cable network construction mode.

In order to enable the usage of the network model for networks of different topology, size, construction modes and purposes, an algorithm for calculating the communication network's availability has been created. Other than calculating the availability of the entire structure, the algorithm finds the optimal paths in the network and calculates the optical signal attenuation for all detected paths. The calculations comprise data on the types and causes of failures in existing ship's communication networks, which enables the real input parameters to be obtained and thus the acquirement of more accurate availability calculation as well. By connecting the data from practice with the previous studies in the field of optical network resilience, a realistic basis for further academic research is being accomplished.

Using the algorithm, several network models have been analyzed. The influences of protection path application, impact factor value changes, optical line modules and cables doubling, as well as the influence of various cable network lengths on the overall availability of the connection have been presented through the models.

Through presented heuristic model of communication networks in connecting ship's systems using optical fibre technology, the availabilities of individual components and the whole network have been calculated, the impact of individual components' availability on the availability of the system has been established, the optimal modes of connecting the ship's systems and the methods of communication networks protection have been defined.

Based on the conducted researches, the behaviour of the system in the event of failures and the possibility of finding optimal and reliable modes of connecting ship's systems have been determined, thus contributing to the overall reliability of ship's systems and of a ship as a whole.

By using the obtained research results, it is possible to improve the existing technology of constructing ship's communication networks as well as their availability, in such a way that the proposed model is used in designing new networks or in analysing the existing ones.

## **KEY WORDS**

Optical fibre technology, communications, availability, communication network model, maritime transport, ship's systems.

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Obrazloženje teme doktorskog rada.....	1
1.2. Cilj i hipoteza istraživanja.....	2
1.3. Pregled dosadašnjih istraživanja .....	4
1.4. Metode istraživanja .....	6
1.5. Struktura doktorskog rada .....	7
2. PRIMJENA SVJETLOVODNE TEHNOLOGIJE U POMORSTVU .....	11
2.1. Svjetlovodne komunikacijske mreže .....	11
2.2. Optički senzorski sustavi .....	13
2.3. Bežični svjetlovodni sustavi prijenosa .....	19
2.4. Prijenos radio-signalu svjetlovodnom niti.....	22
2.5. Optički žiroskop .....	25
3. SVJETLOVODNI SUSTAVI PRIJENOSA .....	28
3.1. Principi rasprostiranja svjetlosti.....	28
3.1.1. Svjetlovodne komunikacije .....	29
3.1.2. Konstrukcija svjetlovodne niti.....	31
3.1.3. Rasprostiranje svjetlosnog signala.....	31
3.1.4. Prijenosne karakteristike.....	34
3.2. Komponente svjetlovodnih sustava prijenosa.....	37
3.2.1. Svjetlovodne niti.....	37
3.2.1.1. Standardi i preporuke .....	39
3.2.2. Svjetlovodni kabeli .....	40
3.2.3. Optički izvori.....	41
3.2.4. Optički detektori .....	42
3.2.5. Optičke komponente.....	42
3.3. Mjerenja na svjetlovodnim sustavima prijenosa .....	44
3.3.1. Mjerenja na svjetlovodnim nitima i kabelima .....	44
3.3.2. Mjerenja prijenosnih parametara .....	45
3.3.3. Mjerne metode i uređaji.....	47
3.3.3.1. Optički reflektometar .....	48



3.3.3.2. Princip rada optičkog reflektometra.....	50
3.3.3.3. Mjerenje optičkim reflektometrom .....	51
3.3.3.4. Mjerenje prigušenja mjeračem snage.....	53
4. SVJETLOVODNA KOMUNIKACIJSKA MREŽA NA BRODU .....	54
4.1. Primjena .....	55
4.1.1. Svjetlovodna komunikacijska mreža za upravljanje brodskim motorima.....	55
4.1.2. Primjena svjetlovoda u sustavu satelitske televizije.....	59
4.2. Struktura mreže .....	63
4.3. Topologija mreže .....	65
4.4. Komponente mreže .....	66
4.4.1. Optički linijski moduli.....	66
4.4.2. Svjetlovodni kabeli za primjenu na brodu .....	69
4.5. Proračun prigušenja kabela dionice.....	72
4.6. Nadzor i održavanje komunikacijske mreže .....	74
5. MODEL SVJETLOVODNE KOMUNIKACIJSKE MREŽE U POVEZIVANJU BRODSKIH SUSTAVA .....	77
5.1. Osnovne postavke teorije pouzdanosti.....	78
5.1.1. Otpornost mreže.....	85
5.1.2. Sagledavanje mrežne topologije sa pozicije preživljavanja od kvarova .....	89
5.1.3. Vrste konekcija obzirom na primijenjenu zaštitu .....	90
5.2. Model raspoloživosti brodske komunikacijske mreže .....	92
5.3. Analiza osjetljivosti.....	96
5.4. Utjecaj svjetlovodne kabela konfiguracije na raspoloživost mreže.....	99
5.4.1. Metoda izračuna raspoloživosti mreže primjenom faktora utjecaja .	102
5.5. Studijski slučaj .....	104
6. ALGORITAM ZA IZRAČUN RASPOLOŽIVOSTI SVJETLOVODNE KOMUNIKACIJSKE MREŽE .....	106
6.1. Pseudokod algoritma za izračun raspoloživosti mreže .....	110

6.2. Prikaz korisničkog sučelja programa za izračun raspoloživosti brodske komunikacijske mreže.....	114
7. MODELI MREŽE .....	118
8. ZAKLJUČAK.....	128
9. LITERATURA .....	133
PRILOZI.....	137
1. Popis standarda i preporuka za svjetlovodne sustave prijenosa .....	137
2. Popis tablica.....	138
3. Popis slika.....	139
4. Kratice .....	143
5. Životopis.....	145

# 1. UVOD

## 1.1. Obrazloženje teme doktorskog rada

Zbog svojih je prednosti u prijenosu podataka i jednostavnosti izvedbe nad klasičnim tehnologijama prijenosa informacija svjetlovodna tehnologija u proteklih dva desetljeća potpuno prevladala na području telekomunikacijskih i računalnih mreža. Osim u komunikacijskim sustavima svjetlovodi su se počeli primjenjivati i kao senzori za razne neelektrične i električne veličine. U oba slučaja, njihove vrlo male dimenzije, jednostavno instaliranje, neosjetljivost na vanjske elektromagnetske utjecaje, veliki prijenosni kapacitet te dobra pouzdanost opravdavaju ugradnju svjetlovodnih mreža i senzora u zahtjevnim okolišima kao što su brodovi.

Za učinkovito upravljanje brodom, koji je složena tehnička cjelina, od iznimne je važnosti da svi njegovi sustavi rade ispravno i pouzdano. Da bi se sustavima moglo upravljati i nadzirati potrebno je povezati sve komponente sustava komunikacijskom mrežom. Kroz doktorski rad prikazana je primjena svjetlovodnih sustava prijenosa informacija u povezivanju brodskih sustava te primjena u povezivanju broda na javnu telekomunikacijsku mrežu. Također, dat je i pregled mogućnosti primjene optičkih senzorskih sustava za mjerenje nivoa tekućine u brodskim tankovima i stonovima te za mjerenje gaza broda, senzora za nadzor uzdužne čvrstoće broda i parametričnog valjanja broda te vibracija. Uz navedene mreže kod kojih se povezivanja ostvaruju svjetlovodnom niti kao valovodom svjetlosnog signala, opisane su i bežične svjetlovodne mreže, primjena prijenosa VHF radio-signala svjetlovodnom niti te optički žiroskop.

Kako bi se osiguralo djelotvorno i pouzdano povezivanje brodskih sustava potrebno je analizirati sve elemente sustava koji čine komunikacijski sustav za prijenos informacija između komponenata sustava, utvrditi koji elementi najviše utječu na ukupnu raspoloživost sustava te na osnovu tih istraživanja izraditi matematički model mreže. Raspoloživost svjetlovodne komunikacijske mreže bitno utječe i na raspoloživost složenih tehničkih sustava kao što su brodski sustavi. Matematičko modeliranje raspoloživosti mreže značajna je pomoć pri razmatranju efikasnosti predložene mrežne arhitekture, određivanju raspoloživosti pojedinih komponenti i

cijelog sustava. Osim što se modelima može prikazati planirano stanje od iznimne je važnosti i mogućnost prikazivanja realne situacije, a time i mogućnost predviđanja kvarova i utvrđivanja eventualnih „slabih karika“ u mreži. Preduvjet za stvaranje realističnog modela raspoloživosti mreže je analiza ponašanja mreže pri pojavi kvarova, te detektiranje i vrednovanje faktora koji utječu na rizik od kvarova.

U doktorskom radu predstavljen je model svjetlovodne komunikacijske mreže u povezivanju brodskih sustava. Modelom su obuhvaćeni svi elementi mreže, te na osnovi podataka o kvarovima, izračunati ulazni podatci potrebni za analizu raspoloživosti mreže. Uz standardni način izračuna raspoloživosti uvedena je i nova metoda izračuna koja uključuje faktore utjecaja temeljene na načinu izgradnje kableske mreže.

Da bi se model mreže mogao koristiti za mreže različitih topologija, veličine, načina izgradnje i namjene, izrađen je algoritam za izračun raspoloživosti komunikacijske mreže. Osim izračuna raspoloživosti cjelokupne strukture, algoritam pronalazi optimalne putove u mreži i računa prigušenje svjetlosnog signala za sve pronađene putove. U izračune su ugrađeni podatci o vrstama i uzrocima kvarova na postojećim brodskim komunikacijskim mrežama, čime se dobiveni realni ulazni parametri a time i točniji izračun raspoloživosti.

Uz primjenu algoritma za izračun raspoloživosti analizirano je nekoliko modela mreže, te sagledan utjecaj kvarova i vremena popravaka elemenata mreže, različite konfiguracije mreže i primjene zaštitnih metoda na ukupnu raspoloživost mreže.

## **1.2. Cilj i hipoteza istraživanja**

Osnovna tema dokorskog rada je primjena svjetlovodnih komunikacijskih mreža u povezivanju brodskih sustava te izrada modela i izračun raspoloživosti komunikacijske mreže. Iz navedenog proizlazi potreba definiranja osnovnih parametara za izračun raspoloživosti kao i metoda za povećanje otpornosti mreže na kvarove.

Predstavljenim istraživanjem cilj je modelirati i analizirati raspoloživost mreže uz primjenu zaštitne metode te uvođenje dodatnih parametara koji opisuju način izgradnje kableske mreže. Parametri su klasificirani i vrednovani sagledavanjem

postojećih komunikacijskih mreža odnosno mogućnostima polaganja svjetlovodnih kabela. Modelom je utvrđen utjecaj parametara raspoloživosti pojedinih komponenata sustava na ukupnu raspoloživost mreže. Time se postiže približavanje matematičkog modela realnoj situaciji u mreži i točnija procjena raspoloživosti, što je dokazano kompariranjem rezultata izračuna raspoloživosti idealiziranog i realnog modela mreže.

Predloženi model je heuristički, jer smo u praksi zadovoljni s „dovoljno dobrim“ rješenjima, koja možemo pronaći brzo, bez skupih sofisticiranih alata i programskih rješenja.

Na temelju izloženog predmeta istraživanja, a u svezi s izabranim problemom, postavljena je slijedeća hipoteza: heurističkim modelom komunikacijskih mreža u povezivanju brodskih sustava primjenom svjetlovodne tehnologije, moguće je izračunati raspoloživost pojedinih komponenti i cijele mreže, utvrditi utjecaj raspoloživosti pojedinačnih komponenata na raspoloživost sustava, odrediti optimalne načine povezivanja i zaštitne metode te time pridonijeti ukupnoj pouzdanosti brodskih sustava i broda u cjelini.

Također, jedan od ciljeva je ostvariti realnu podlogu za daljnja akademska istraživanja, povezujući podatke iz prakse s dosadašnjim istraživanjima na području otpornosti svjetlovodnih mreža.

Na temelju tih istraživanja određeno je ponašanje sustava pri pojavi kvarova te mogućnost pronalaska optimalnih i pouzdanih načina povezivanja brodskih sustava. Time se povećava pouzdanost upravljanjem i nadzorom brodskih sustava što je od izuzetnog značaja za upravljanje i sigurnost samog broda.

Rezultati znanstvenog istraživanja prezentirani u doktorskom radu trebali bi implicirati znanstveni doprinos u teorijskom i praktičnom smislu.

Korištenjem dobivenih rezultata istraživanja moguće je unaprijediti postojeću tehnologiju gradnje brodskih komunikacijskih mreža i njihovu raspoloživost, na način da se predloženi model koristi pri dizajniranju novih mreža ili pri analizi postojećih mreža.

### 1.3. Pregled dosadašnjih istraživanja

Brodski komunikacijski sustavi većinom su opisani kroz stručnu i znanstvenu literaturu u sklopu obrađivanja većih tehničkih cjelina, kao što su sustav upravljanja brodom, sustav poriva, sustav energetskog napajanja i distribucije te sustav rukovanja teretom. Obzirom da je komunikacijski sustav samo jedan segment navedenih cjelina, većinom je prikazan samo kao sredstvo za prijenos podataka potrebnih za nadzor i upravljanje ili različitih mjernih podataka bez detaljnijeg opisivanja strukture, elemenata i načina gradnje takve vrste komunikacijske mreže.

Uvođenje svjetlovodne tehnologije u pomorstvu još uvijek nije zaživjelo u onoj mjeri kao u drugim granama industrije i prometa a poglavito u telekomunikacijama. Najveći dio dostupne literature odnosi se na telekomunikacijski segment uporabe svjetlovodnih sustava za prijenos informacija. Na primjerima telekomunikacijske mreže razrađen je cijeli niz modela i algoritama za izračun raspoloživosti, optimizacije i pronalaženja najkraćih putova kroz mrežu te metoda za zaštitu i obnavljanje prometa. Također je vidljiv i nedostatak podataka iz prakse te se istraživanja uglavnom temelje na pretpostavkama i simulacijama idealiziranih modela mreža. Drugi vid uporabe svjetlovoda kao mjernih senzora za različite električne i neelektrične veličine obrađuje se u publikacijama koje opisuju metode mjerenja i primjenu u različitim okruženjima. Najveći dio odnosi se na primjene u građevinarstvu, visokonaponskoj elektroenergetici i industriji za proizvodnju nafte i plina.

Obzirom da se predmetni rad bavi istraživanjem i analizom modela raspoloživosti komunikacijske mreže u povezivanju brodskih sustava, korištena su i srodna razmatranja iz dostupne literature (knjiga, članaka s tematskih konferencija i tehničkih izvještaja regulatornih telekomunikacijskih organizacija).

Područje istraživanja doktorskog rada nastavlja se na dosadašnji rad na području modeliranja i analize raspoloživosti svjetlovodne transmisijske mreže te primjeni optičkih senzora na brodu. Stoga se koriste radovi objavljeni na nekoliko međunarodnih konferencija i u časopisu „Pomorstvo“, a navedeni su u popisu literature [1, 7-13, 19, 20, 40-42, 64-67].

U knjigama [32] B.S. Dhillon, *Design reliability: Fundamentals and Applications*, CRC Press, 1999. i [33] D. Crowe, A. Feinberg, *Design for Reliability*,

CRC Press 2001. opisane su osnovne postavke teorije pouzdanosti i raspoloživosti, dok se u knjigama [34] W.D. Grover, *Mesh-based Survivable Networks: Options and strategies for Optical, MPLS, SONET and ATM networking*, Prentice Hall PTR, 2004., [35] J.P. Vasseur, M. Pickavet, P. Demeester, *Network recovery: Protection and Restoration of Optical, SONET-SDH, IP, and MPLS*, Elsevier, 2004. i [37] E. Stern, G. Ellinas, K. Bala, *Multiwavelength Optical Networks, Second Edition: Architectures, Design and Control*, Cambridge University Press, 2008. vrlo podrobno analizira primjena teorije pouzdanosti na svjetlovodne telekomunikacijske mreže. U navedenim knjigama opisuju se različite metode zaštite i obnavljanja prometa, primjeri optimizacije te poboljšanja dizajna i nadzora mreža. U knjigama [2, 14-16, 28, 29, 38, 39] obrađuju se osnovni principi prijenosa svjetlosnog signala, elementi svjetlovodnog sustava za prijenos informacija te primjena u telekomunikacijama.

Tematika raspoloživosti i otpornosti telekomunikacijskih svjetlovodnih mreža obrađena je i u cijelom nizu članaka od kojih je dio izdvojen u popisu literature [48-63].

Brodski sustavi kao dijelovi složene tehničke cjeline opisani su u knjigama [22-27], dok se u knjizi [21] I. Šegulja, A. Bukša, V. Tomas, *Održavanje brodskih sustava*, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2009. te člancima [43] M. Tudor, O pouzdanosti brodskih sustava, *Pomorstvo*, god. 17, br. 17, 2003., [44] M. Tudor, Samoodržavanje brodskih sustava, *Pomorstvo*, god. 21, br. 2, 2007. i [45] A. Bukša, I. Šegulja, Pouzdanost brodskih sustava, *Pomorstvo*, god. 22, br. 2, 2008. obrađuje pouzdanost brodskih sustava, posebno sustava goriva, koncept samoodržavanja tehničkih brodskih sustava te pouzdanost s aspekta održavanja sustava.

Knjige [3-6] obrađuju široko područje primjene optičkih senzora, osnovne principe rada, vrste senzora i mjernih metoda.

Popis standarda i preporuka međunarodnih standardizacijskih organizacija ITU-T (*International Telecommunication Union–Telecommunications*) i ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) nalazi se u Prilogu 1. Navedene preporuke odnose se na parametre i metode izračuna pouzdanosti i raspoloživosti svjetlovodnih sustava prijenosa [1], [13], karakteristike standardnih višemodnih i jednomodnih svjetlovodnih niti [2, 3] i niti specijalne izvedbe s poboljšanim prijenosnim karakteristikama [4-7] te podmorskih svjetlovoda [8-12].

## 1.4. Metode istraživanja

Predloženom znanstvenom istraživanju, formuliranju i predstavljanju rezultata istraživanja pristupljeno je najprije identificiranjem problema (ciljevi, ulazni parametri, ograničenja). Nakon toga prišlo se modeliranju problema (model predstavlja pojednostavljenu stvarnost, a to je heuristički model raspoloživosti mreže). Analizom rezultata izračuna korištenjem predloženog modela i algoritma dokazana je postavljena hipoteza.

Obzirom da se predmetni rad bavi istraživanjem i analizom modela raspoloživosti svjetlovodne mreže, korištena su i srodna razmatranja iz dostupne literature (knjiga, članaka s tematskih konferencija i tehničkih izvještaja regulatornih telekomunikacijskih organizacija) iz područja telekomunikacijskih i računalnih mreža.

Model mreže baziran je na temeljnim postavkama teorije pouzdanosti uz standardne ulazne podatke potrebne za izračun raspoloživosti. Uz njih uvedeni su i novi parametri, nazvani faktori utjecaja. Analiziran je njihov utjecaj na raspoloživost pojedinih kablskih putova i cjelokupne strukture mreže. Time se dobiva mogućnost stvaranja realnijeg modela mreže, a time i točnijeg izračuna raspoloživosti. Faktore utjecaja klasificirani su i vrednovani na temelju analize utjecaja izgradnje mreže na raspoloživost. U realnoj komunikacijskoj mreži u povezivanju brodskih sustava česti su slučajevi da se radne i zaštitne svjetlovodne niti nalaze u istoj kablskoj stazi, kablskom paketu ili čak u istom kablju. Te pozicije predstavljaju zajedničku točku kvara i njihov utjecaj na ukupnu raspoloživost može se opisati kroz uvođenje faktora utjecaja u izračun raspoloživosti.

Kao pomoć pri modeliranju izrađen je računalni program u kojem se putem ulaznih podataka opisuju komponente i topologija svjetlovodnih komunikacijskih mreža te kao rezultat dobiva izračun raspoloživosti svih kablskih putova u mreži, ukupna raspoloživost mreže, te mogućnost određivanja radne i rezervne trase na osnovi odabranih parametara. Sustavnom promjenom vrijednosti parametara koji utječu na raspoloživost kablskih putova može se procijeniti koji su modeli mreže uz primijenjenu zaštitnu strategiju optimalni sa pozicije raspoloživosti, koji parametri imaju najnepovoljniji utjecaj, kod kojih se situacija mogu očekivati učestaliji prekidi ili



degradacija signala, koji kablanski putovi su najopterećeniji te ih treba pojačano preventivno i redovno održavati.

Na osnovi rezultata modeliranja primjenom faktora utjecaja dokazan je značaj primjene predstavljenog modela na efikasno korištenje komunikacijskih mreža u povezivanju brodskih sustava.

## **1.5. Struktura doktorskog rada**

Struktura doktorskog rada naslova „**Heuristički model komunikacijskih mreža u povezivanju brodskih sustava primjenom svjetlovodne tehnologije**” proizlazi iz definiranih ciljeva i hipoteza istraživanja, metoda istraživanja te ocjene dosadašnjih istraživanja. Rad je podijeljen u devet povezanih cjelina, kako je prikazano u sadržaju rada.

### 1. Uvod

U uvodnom dijelu obrazložena je tema doktorskog rada te definiran cilj i hipoteza istraživanja. Nakon osvrta na dosadašnja istraživanja o predmetnom području, navedene su metode istraživanja i obrazložena struktura rada.

### 2. Primjena svjetlovodne tehnologije u pomorstvu

U drugom dijelu opisane su neke od mogućih primjena svjetlovodne tehnologije u pomorstvu uz poseban osvrt na pet primjena koje značajno pridonose modernizaciji, pouzdanosti i sigurnosti brodskih sustava. To su svjetlovodne komunikacijske mreže za povezivanje brodskih sustava te mogućnosti povezivanja broda s kopnom telekomunikacijskom mrežom. Slijedi opis optičkih senzorskih sustava za mjerenje raznih električnih i neelektričnih veličina u zahtjevnim okolišima kao što su brodovi, bežični svjetlovodni sustavi prijenosa informacija, prijenos radio-signala svjetlovodnom niti te optički žiroskop.

### 3. Svjetlovodni sustavi prijenosa

U trećem dijelu rada opisani su svjetlovodni sustavi prijenosa s aspekta fizikalnih principa rasprostiranja svjetlosti kroz svjetlovodne niti te nadalje kroz opis konstrukcijskih i prijenosnih karakteristika osnovnih komponenata od kojih se sastoji

svjetlovodni sustav prijenosa: svjetlovodnih niti, kabela, izvora i detektora svjetla te ostalih pasivnih i aktivnih svjetlovodnih komponenata. Navedeni su standardi i preporuke međunarodnih organizacija ITU-T i ETSI koji se odnose na parametre i metode izračuna pouzdanosti i raspoloživosti svjetlovodnih sustava prijenosa, karakteristike standardnih višemodnih i jednomodnih svjetlovodnih niti te niti specijalne izvedbe s poboljšanim prijenosnim karakteristikama.

Posebno su opisana mjerenja na svjetlovodnim sustavima prijenosa. Mjerenja prijenosnih karakteristika prilikom polaganja kabela i ugradnje prijenosnih uređaja, nakon izgradnje te pri održavanju postojećih sustava, od izuzetne su važnosti za kvalitetno i učinkovito korištenje instaliranih sustava. Stoga su opisane vrste mjerenja na svjetlovodnim nitima i kabelima s posebnim osvrtom na mjerenja prijenosnih parametara, kao i mjerne metode i uređaji koji se najčešće koriste u predmetnim sustavima.

#### 4. Svjetlovodna komunikacijska mreža na brodu

Četvrto poglavlje odnosi se na glavnu temu doktorskog rada te se u njemu opisuju dvije specifične primjene svjetlovodnih mreža za povezivanje brodskih sustava: svjetlovodnu komunikacijsku mrežu za upravljanje brodskim motorima i primjenu svjetlovoda u sustavu satelitske televizije. Nadalje, opisana je struktura i topologija mreže te njezine komponente. Podrobnije su opisani optički prijenosni uređaji i svjetlovodni kabeli, njihove konstrukcijske karakteristike, načini instalacije i spajanja. Uz navedene vrste svjetlovodnih niti i uobičajene valne dužine kojima se signal prenosi brodskim komunikacijskim mrežama dat je i način izračuna prigušenja kabljskih dionica te numeričke vrijednosti prigušenja svih elemenata i spojeva koji se ugrađuju u kabljske trase. Osim dizajniranja i izgradnje mreže vrlo je važno sagledati planiranje i postupke preventivnog i redovnog održavanja, nadzor mreže te načine otklanjanja kvarova. Stoga su u ovom dijelu opisane vrste kvarova na mreži i njihovi uzroci te funkcije nadzora i načini testiranja sustava u radu.

#### 5. Model svjetlovodne komunikacijske mreže u povezivanju brodskih sustava

Peto poglavlje odnosi se na matematički model mreže te izračun i analizu raspoloživosti mreže temeljene na osnovnim postavkama teorije pouzdanosti. Objašnjeni su osnovni pojmovi koji se koriste: pouzdanost, raspoloživost, intenzitet

kvarova, intenzitet popravaka, srednje vrijeme prekida, srednje vrijeme do kvara i srednje vrijeme popravka, te navedeni osnovni matematički izrazi za njihov izračun.

Kako bi se povezala dosadašnja akademska istraživanja na polju pouzdanosti i raspoloživosti svjetlovodnih mreža koja su većinom namijenjena javnim telekomunikacijskim mrežama, cilj ovog poglavlja je sistematizirano prikazati strukturu i komponente brodske komunikacijske svjetlovodne mreže, način njezine gradnje, analizirati utjecaj kvarova na raspoloživost mreže te predložiti efikasne metode zaštite od kvarova. Model i izračun raspoloživosti brodske komunikacijske mreže bazira se na podatcima o pouzdanosti i kvarovima za elemente sustava koji se razmatraju dobiveni iz prakse odnosno od brodarara i tvrtki koje ugrađuju i servisiraju brodske elektroničke uređaje.

Da bi se prikazao utjecaj intenziteta kvarova komponenata na ukupnu raspoloživost mreže korištena je analiza osjetljivosti. Analiza osjetljivosti koristi se za utvrđivanje koliko je model „osjetljiv“ na promjene numeričkih vrijednosti parametara modela. Da bi se to postiglo, izrađeno je nekoliko izračuna sa sistematičnim mijenjanjem numeričkih vrijednosti intenziteta kvarova kabela i optičkih prijenosnih uređaja, te izračunala utjecaj njihove promjene na srednje vrijeme prekida mreže.

Predstavljen je utjecaj svjetlovodne kableske konfiguracije na raspoloživost mreže i nova metoda izračuna raspoloživosti mreže primjenom faktora utjecaja, temeljenih na analizi kvarova realnih brodskih komunikacijskih mreža.

Primjena nove metode izračuna raspoloživosti uz uvođenje faktora utjecaja predstavljena je na primjeru komunikacijske mreže za upravljanje brodskim strojevima na trajektu „Hrvat“. Ovaj studijski slučaj primjenjiv je na sve svjetlovodne mreže na trajektima tog tipa zbog unificirane opreme, kabela, spojnog materijala te načina konfiguracije i izgradnje mreže.

#### 6. Algoritam za izračun raspoloživosti svjetlovodne komunikacijske mreže

Za izračun raspoloživosti te pronalaženje optimalnih putova u mreži uz prethodno definirane kriterije izrađen je opisani algoritam, uz navođenje načela rada i ispisa algoritma u pseudokodu. Predstavljeni algoritam može se primijeniti na mrežu bilo koje topologije, veličine i namjene. Osim raspoloživosti dodatna funkcija programa izračunava ukupno prigušenje signala za sve moguće putove u mreži. Preduvjet izračuna

je stvaranje baze podataka o svim kabelskim dionicama i načinu polaganja kabela za promatranu mrežu, komponentama za spajanje i pretvorbu električnog u optički signal.

#### 7. Analiza raspoloživosti mrežnih modela uz primjenu metode izračuna raspoloživosti uvođenjem faktora utjecaja

U sedmom poglavlju analizira se nekoliko mrežnih modela primjenom nove metode izračuna raspoloživosti uvođenjem faktora utjecaja te uz pomoć predstavljenog algoritma. Kroz modele prikazuje se koliko primjena uvođenja zaštitne trase, vrijednosti faktora utjecaja te udvostručavanje optičkih linijskih modula i kabela utječe na ukupnu raspoloživost konekcije. Prikazana je specifična primjena komunikacijske mreže za upravljanje potiskivačem pramca kao i utjecaj različitih duljina kabelske mreže bez zaštite i uz primjenu zaštite puta na raspoloživost odnosno srednje vrijeme prekida.

#### 8. Zaključak

U zaključku su rezimirani rezultati izračuna raspoloživosti dobivene primjenom predloženog heurističkog modela, navedeni temeljni zaključci i znanstveni doprinos istraživanja. Također su predložene smjernice za daljnje istraživanje predmetne primjene svjetlovodne tehnologije, kao i mogućnosti uporabe u postojećim brodskim sustavima te povezivanju broda s kopnenim komunikacijskim mrežama.

#### 9. Literatura

U devetom poglavlju dat je popis knjiga, znanstvenih i stručnih radova korišten pri izradi doktorskog rada. Literatura je numerirana onim redoslijedom kako se pojavljuje u tekstu.

#### Prilozi

U prilogima se nalazi popis standarda i preporuka za svjetlovodne sustave prijenosa, tablica, slika i kratica te životopis autorice rada.

## **2. PRIMJENA SVJETLOVODNE TEHNOLOGIJE U POMORSTVU**

Primjena svjetlovodne tehnologije u pomorstvu samo je jedna od širokih mogućnosti uporabe tog vrlo učinkovitog načina prijenosa informacija. U ovom dijelu rada navest ću samo neke od primjena svjetlovoda na brodovima, koje će se zbog niza svojih prednosti nad konvencionalnim tehnologijama sve više primjenjivati.

Najprije ćemo se osvrnuti na dvojak primjenu svjetlovodnih sustava. Najpoznatija i najrasprostranjenija je njihova uporaba u telekomunikacijskim mrežama te lokalnim računalnim i podatkovnim mrežama, gdje služe za prijenos informacija. Za razliku od prijenosa informacija, u novije vrijeme svjetlo vodi se sve više koriste kao senzori raznih neelektričnih i električnih veličina kao što su temperatura, naprezanje, tlak, pomak, vibracije, brzina, ubrzanje, magnetska i električna polja, električna struja, radijacija, kemijske komponente, protok fluida.

U svjetlovodnim komunikacijskim mrežama na brodu svjetlo vodi služe za prijenos informacija potrebnih za upravljanje i nadzor u brodskim sustavima te raznih mjernih podataka. Takve primjene svjetlovodne tehnologije značajno pridonose modernizaciji, pouzdanosti i sigurnosti brodskih sustava.

Svjetlovodna tehnologija se, osim u brodskim komunikacijskim mrežama, koristi i za povezivanje broda s kopnenom telekomunikacijskom mrežom putem svjetlovodnih kablskih sustava prijenosa a značajna je i primjena optičkih senzorskih sustava za mjerenje raznih električnih i neelektričnih veličina. Uz navedene primjene opisati ću i bežične svjetlovodne sustave prijenosa informacija, prijenose radio-signalu svjetlovodnom niti te optički žiroskop.

### **2.1. Svjetlovodne komunikacijske mreže**

Svjetlo vodi se na brodovima koriste za povezivanje sustava satelitskih i terestričkih komunikacija, radara, dubinomjera, navigacijskih uređaja, sustava za nadzor stroja i tereta u integriranu brodsku mrežu podataka.

Udaljenosti prijenosa signala na brodu su do nekoliko stotina metara što ne zahtijeva uporabu jednomodnih niti i laserskih predajnika. Najčešće se upotrebljavaju plastične a u manjoj mjeri i staklene višemodne niti, koje su i manje zahtjevne prilikom odabira konektora, u kombinaciji sa svjetlećom diodom kao izvorom signala. [1]

Jedan od primjera uporabe svjetlovoda za prijenos informacija je u sustavu nadzora, alarmiranja i daljinskog upravljanja brodskim motorom.

Na novim putničkim brodovima sustavi kabelaške televizije također su izvedeni svjetlovodnim kabelima kao zasebna svjetlovodna mreža.

Najvažniji uvjeti koji sustavi upravljanja i kontrole brodskog pogona moraju ispuniti su pouzdanost i sigurnost. To se postiže ugradnjom redundantnog svjetlovodnog sustava prijenosa podataka, te ukoliko dođe do kvara na jednom sustavu rezervni sustav preuzima sve funkcije uz dojavu kvara operatoru. Takav sustav koristi se za upravljanje sinkronim motorom s dvostrukim kavezom Azipod (*eng. Azimuth Podded Drive*) kao pogonskim strojem na putničkim brodovima. Neki od najvažnijih podataka, koji se prikupljaju i svjetlovodom prenose do upravljačkog dijela, su broj okretaja motora i kut položaja rotora motora, temperatura namotaja motora, temperatura ležaja i ulja za podmazivanje ležaja, te nivo tekućina (ulja i vode). Snažna magnetska polja, koja se javljaju u okolini motora, utjecala bi na kvalitetu signala ukoliko bi se koristili klasični električni vodiči. Zato se koriste svjetlovodi a da se smanji broj vodova u ograničenom prostoru koriste se multiplekseri i demultiplekseri signala.

Svjetlovodna tehnologija je zbog svojih izrazitih transmisijskih i konstrukcijskih prednosti nad konvencionalnim tehnologijama opravdano stekla široku primjenu u svim komunikacijskim mrežama. Neosjetljivost na vanjska elektromagnetska polja, male dimenzije i jednostavna instalacija u vrlo zahtjevan okoliš, kao što je brod, uz praktički neograničen kapacitet prijenosa informacija, te sve jeftinije komponente, dovesti će do sve veće ugradnje takve tehnologije na novim brodovima kao i zamjenu konvencionalnih „bakrenih“ mreža na postojećim brodovima.

U poglavlju 4. detaljnije je opisana primjena, struktura, komponente, te nadzor i održavanje svjetlovodne komunikacijske mreže na brodu, te u poglavlju 5. njezin matematički model.

Svjetlovodni sustavi prijenosa koriste se i za ostvarivanje komunikacijskih veza brodova s obalnim terminalima, npr. za komunikaciju LNG broda za prijevoz ukapljenog plina (*eng. Liquefied Natural Gas*) i LNG obalnog terminala. Preko kabelaške veze omogućen je nadzor ukrcaja, priključak interne i vanjske telefonske linije, telefon za slučaj opasnosti te priključak na Internet mrežu odnosno kabelaška veza s javnom

kopnenom telekomunikacijskom mrežom (eng. *Ship/Shore Communication Link System*). Ovisno o tipu optičkih izvora moguće je povezivanje na udaljenostima i do desetak kilometara (tablica 1).

Tablica 1: Komparacija optičkih izvora za komunikacijske linkove brod-obala

<b>Optički izvor</b>	<b>LED</b>	<b>Laser</b>	<b>Laser</b>
Valna duljina (nm)	850	1310	850
Tip niti	MM	SM	MM
Udaljenost komunikacije (km)	0,6	10	1
Internet komunikacija	ne	da	da

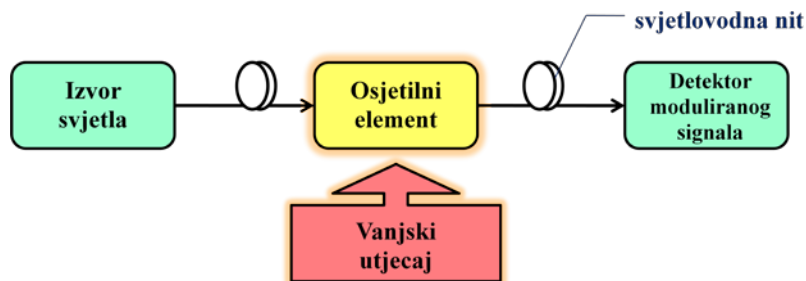
## 2.2. Optički senzorski sustavi

Optički senzori su malih dimenzija, lagani, a osjetljivost, dinamički opseg i rezolucija im je veća od konvencionalnih senzora. Udaljenosti na kojima se mogu izvoditi mjerenja mogu biti vrlo velike i do nekoliko kilometara. Veći broj senzora može se integrirati u cjelovit mjerni sustav. Izrađeni su od dielektričnih materijala i imuni na bilo kakve elektromagnetske utjecaje a mogu podnijeti i relativno visoke temperature. Za sada je njihova cijena i cijena pripadnih mjernih uređaja još uvijek viša od senzora temeljenih na tradicionalnim tehnologijama te stoga njihova primjena na brodovima još nije zaživjela u većoj mjeri.

Optički senzori rade na principu moduliranja svjetlosti unutar niti kao odgovor na vanjsku električnu ili neelektričnu pobudu. Razlikujemo dvije vrste senzora: ekstrinzične i intrinzične. [2 – 6]

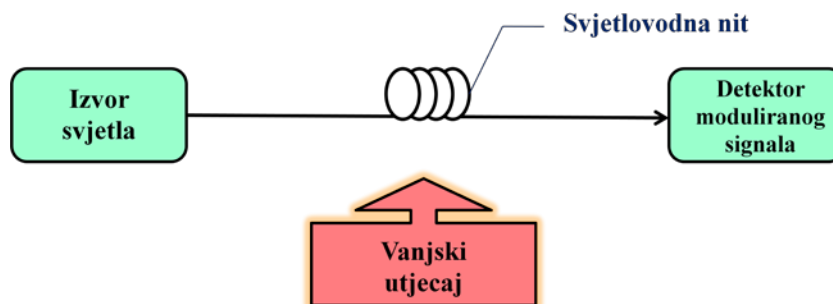
Kod ekstrinzičnih senzora svjetlovodna nit služi za prijenos signala do osjetilnog elementa gdje se signal modulira pod nekim vanjskim utjecajem kojeg želimo mjeriti (slika 1). Signal se dalje vodi svjetlovodnom niti do detektora koji izdvaja željenu informaciju iz moduliranog signala. Informacija u osjetilnom elementu može biti modulirana intenzitetom, fazom, frekvencijom, polarizacijom, spektralnim vrijednostima ili nekih drugim karakteristikama vanjske pobude. Takve senzore koristimo za mjerenje temperature, tlaka, ubrzanja, vibracija, kutnih i rotacijskih položaja, oštećenja i deformacija materijala, protoka, viskoziteta i nivoa tekućina te kod

kemijskih mjerenja. Pri instalaciji ovakvih diskretnih senzora njihova pozicija mora biti prethodno točno definirana a moguće je povezati i više senzora u nizu u jedan cjelovit mjerni sustav.



Slika 1: Ekstrinzični optički senzor

Kod intrinzičnih senzora za mjerenje vanjskog utjecaja koriste se fizikalna svojstva same svjetlovodne niti (slika 2). Svjetlosni signal, koji prolazi kroz nit, modulira se neposredno nekim vanjskim utjecajem ili deformacijom same niti i tako izazvane promjene njenih transmisijskih parametara. Posebna podgrupa intrinzičnih senzora su tzv. distribuirani senzori. Njihovo važno svojstvo je to što se pomoću njih može snimiti prostorna raspodjela mjerne veličine koju želimo pratiti. Dva najraširenija područja primjene tih senzora su distribuirano mjerenje temperature i deformacija materijala.



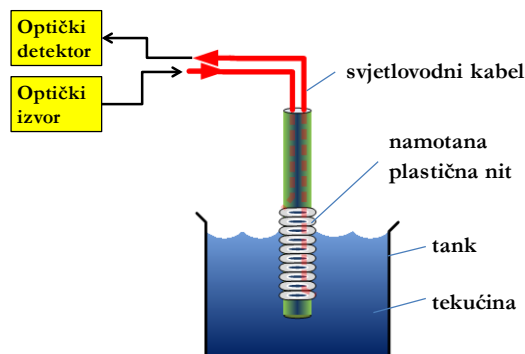
Slika 2: Intrinzični optički senzor

Primjer uporabe distribuiranog senzora je mjerenje nivoa tekućine pomoću plastične svjetlovodne niti omotane oko cilindrične cijevi i vertikalno uronjene u tank s tekućinom (slika 3). Na sredini svakog punog namota oko cijevi nit je ispolirana i uklonjen je dio jezgre niti. Različit indeks loma zraka i tekućine uzrokuje stvaranje signala koji je proporcionalan poziciji uronjene niti odnosno nivou tekućine u tanku.

Sustav za takva mjerenja sastoji se od svjetlovodnog kabela priključenog između optičkog izvora i detektora signala, a u najčešćoj konfiguraciji i predajnik i prijammnik

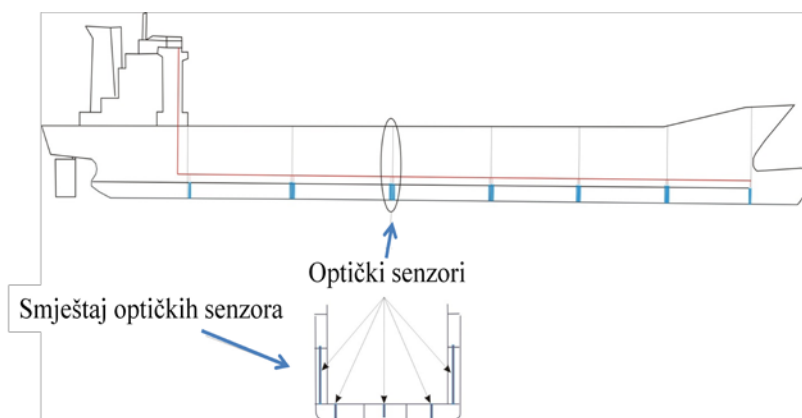


nalaze se na istoj strani. Na prijamnik se priključuje mjerni instrument (optički reflektometar, interferometar, mjerač snage ili optički spektralni analizator), te se na njemu očitava mjerena veličina.



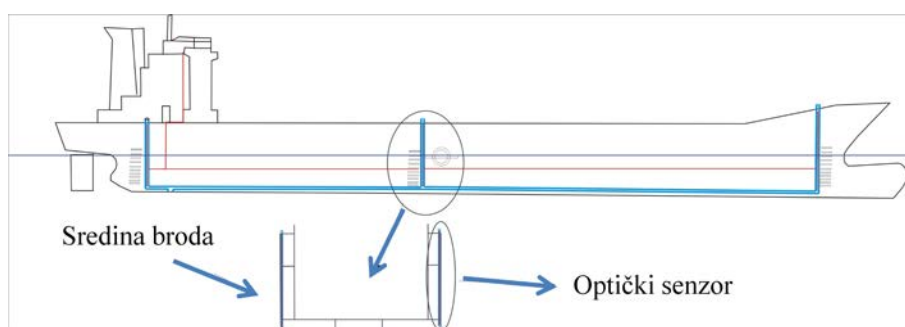
Slika 3: Mjerenje nivoa tekućine optičkim senzorom

Primjena senzora za mjerenje razine tekućine na brodu moguća je u postupku određivanja tekućine u brodskim tankovima i stonovima. Brod se komercijalno iskorištava različitom popunjenošću kapaciteta i različitim količinama tekućina u prostorima tankova. Određivanje poprečne i uzdužne stabilnosti te proračun nosivosti ovise o točnosti određivanja količine tekućine koja može varirati zbog sistematskih i slučajnih pogrešaka, pa je stoga potrebno izbjeći pogrešku pri utvrđivanju količine tekućine u tanku. Uobičajeno se balast, slatka voda, te tekućine u prostorima stonova određuju sondiranjem ili utvrđuje preljevom preko odušnika tanka u slučaju punog tanka. Radi smanjivanja pogreške očitavanja tekućine moguće je postavljanje optičkih senzora za mjerenje razine tekućine u prednji i stražnji dio svakog tanka (slika 4). [7]



Slika 4: Primjena optičkih senzora za očitavanje razine tekućine u tankovima

Od izuzetne je važnosti i točnost u određivanju mase ukrcanog ili iskrcanog tereta, korištenjem metode određivanja mase temeljem očitavanja gaza. Takvo očitavanje varira zbog sustavnih i slučajnih pogrešaka. Analiza navedene metode pokazuje značajan utjecaj pogreške u očitavanju gaza, posebno na oznakama gaza na sredini broda. Primjena optičkih senzora za mjerenje razine mora u sondi sustava poboljšala bi točnost očitavanja zbog velike preciznosti optičkih senzora a isto tako očitavanja gaza s optičkih senzora mogu se prenositi u brodski navigacijski sustav i računalni sustav nadzora tereta (slika 5).



Slika 5: Primjena optičkih senzora za očitavanje gaza broda

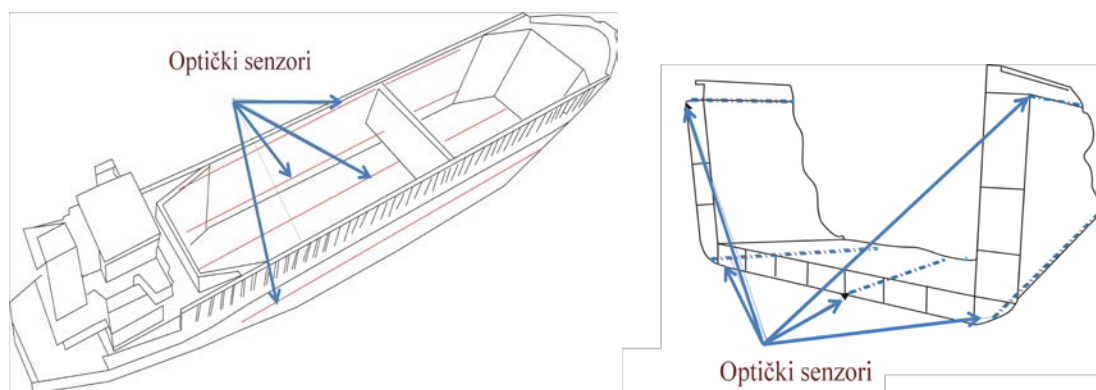
Jedna od izuzetno važnih primjena optičkih senzora na brodovima je i u sustavu nadzora rashladnih kontejnera tijekom pomorsko plovidbenog putovanja. Kapacitet za prihvatanje rashladnih kontejnera na kontejnerskim brodovima je u povećanju posljednjih nekoliko godina. Rashladni kontejneri pružaju optimalne uvjete (primjerenu temperaturu, vlažnost, te u mnogim slučajevima i kontroliranu atmosferu) za prijevoz mesa, ribe, voća, mliječnih proizvoda i ostalog pokvarljivog tereta.

Kontejnerski brodovi, posebice uključeni u glavne linije kontejnerskih servisa, pružaju potrebno električno napajanje kontejnerskim jedinicama, a neki od njih mogu prevoziti i preko 1000 rashladnih kontejnera. Tijekom pomorsko plovidbenog putovanja je neophodno da takvi kontejneri budu redovito nadzirani kao bi se omogućilo da stanje tereta tijekom prijevoza odgovara navedenom u teretnici / manifestu tereta, te tako teret doprije na odredište u neoštećenu stanju.

Da bi se prikupili podaci relevantni za stanje tereta unutar kontejnera potrebno je mjeriti niz neelektričnih veličina kao što su: temperatura, vlaga, tlak, strujanje zraka, kondenzacija, koncentracija CO<sub>2</sub>, etilena, etanola, NH<sub>3</sub> i isparivih supstanci. U svrhu

nadzora navedenih neelektričnih veličina u kontejnere se mogu ugraditi optički senzori povezani bežičnim radio signalima na centralni brodski računalni sustav nadzora tereta. [8]

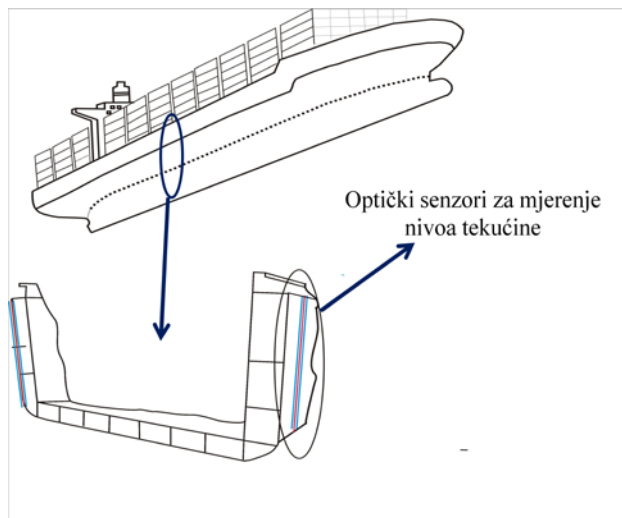
Uzdužna čvrstoća broda predstavlja najznačajniji dio čvrstoće broskog trupa. Uporaba svjetlovodnih senzora moguća je u određivanju uzdužne čvrstoće trupa (slika 6). Prikupljeni podatci su značajni za utvrđivanje poprečne, uzdužne i lokalne čvrstoće, za trenutno stanje nakrcanosti broda, a također mogu poslužiti u slučaju izvanrednih okolnosti. Prikazani sustav ugradnje svjetlovodnih senzora i pripadne mjerne opreme pruža mogućnosti određivanja elemenata uzdužne čvrstoće broda u realnom vremenu. Dobiveni podatci mogu poslužiti za kontinuirano praćenje stanja broskog trupa tijekom eksploatacije broda. [9]



Slika 6: Primjena optičkih senzora za nadzor uzdužne čvrstoće broda

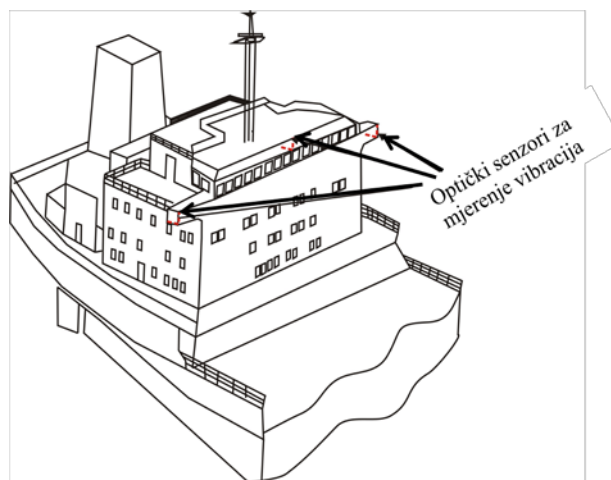
Parametrično valjanje broda u rezonanci je fenomen koji uzrokuje valjanje broda pri djelovanju uzdužnih valova na brod. Takvo valjanje, kod kojeg se pojavljuju veliki kutevi nagiba, pri kojima može doći do prevrnuća, može biti ozbiljna opasnost za brod. Za praćenje razmatranog fenomena značajno je poznavati utjecaj određenih parametara broda. U zadnjih nekoliko godina više matematičkih modela predloženih od strane znanstvenika zahtijevaju podatke o brodu i obilježjima valova. Primjenom optičkih senzora cilj je automatizirati sustav za otkrivanje pojave parametričkog valjanja broda dovoljno rano kako bi se mogle poduzeti odgovarajuće mjere predostrožnosti i pružiti podatke o toj pojavi u stvarnom vremenu (slika 7). Prikupljeni podatci omogućavaju uspostavu integriranog sustava koji bi kontrolirao kretanje broda. Stvarne podatke o stanju mora moguće je prikupiti sa sustavom motrenja valova. Sustav optičkih senzora

omogućuje dobivanje podataka o značajnim elementima valova i njihovom djelovanju na integritet razmatranog kontejnerskog broda. [10]



Slika 7: Primjena optičkih senzora za nadzor parametričnog valjanja broda

Vibracije broda uzrokuju propeler, motor i pomoćni strojevi, pramčani propeler i učinci mora. Vibracije mogu biti tako visoke da mogu uzrokovati štetu trupa, strojeva i opreme. Da bi se to spriječilo potrebno je imati sustav za praćenje i otkrivanje opasnih vibracija broda te dovoljno rano poduzeti odgovarajuće mjere opreza. Prikupljanje podataka u stvarnom vremenu moguće je izvesti sustavom optičkih senzora osjetljivih na vibracije. Taj senzorski sustav dao bi podatke o vibracijama broskog nadgrađa, trupa i strojarnice. Na slici 8 prikazan je smještaj senzora na navigacijskom mostu. Sustav za praćenje vibracija može pomoći u optimizaciji broskog dizajna, pružanju maksimalne operativne raspoloživosti broda, te sprječavanju mogućih šteta. [11]



Slika 8: Primjena optičkih senzora za nadzor vibracija broda

Uz brodove su vezani i razni građevinski objekti kao što su luke, dokovi i pontoni. I u tim strukturama optički senzori su našli svoju primjenu. Prikladni su za nadziranje različitih tipova sidrenja pontona, osobito kad je prisutan problem različite strukture dna, nasipavanja raznog materijala i sl. Polaganjem svjetlovodnih niti uzduž dokova moguć je nadzor uzdužnih i poprečnih deformacija u kratkom i dugom vremenskom razdoblju.

### **2.3. Bežični svjetlovodni sustavi prijenosa**

Brzina prijenosa podataka predstavlja u današnje vrijeme jedan od najvećih problema komunikacije. Potražnja širokopojasnog pristupa informacijama dovela je do razvoja novih tehnologija za ostvarivanje veza, kako žičanih, tako i bežičnih. Jedna od njih je i prijenos svjetlosnih signala bežičnim putem (*eng. FSO – Free Space Optics*). Najveća prednost bežičnih svjetlovodnih sustava u odnosu na konvencionalne tehnologije bežičnog prijenosa podataka leži u činjenici da se njome mogu ostvariti brzine prijenosa usporedive sa sustavima prijenosa putem svjetlovodnih kabela, uz znatnu financijsku i vremensku uštedu u implementaciji jer ne postoji potreba polaganja svjetlovodnih kabela. Upravo činjenica da se signal prenosi zrakom (odnosno kroz slobodni prostor) uvjetuje mogućnost ostvarivanja mobilnosti veze uspostavljene posredstvom bežične optike.

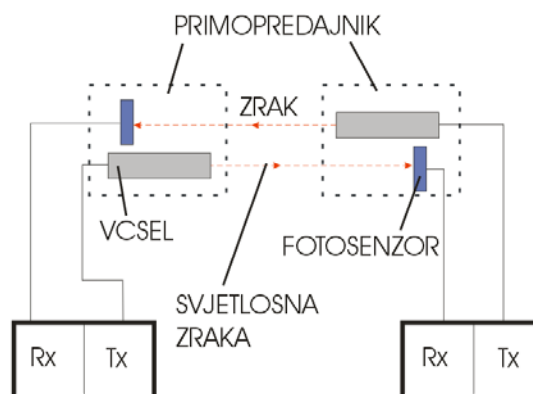
Iako posjeduje određene nedostatke, ova bi tehnologija uz razvoj primjerene infrastrukture pronašla veliku primjenu u pomorstvu za ostvarivanje komunikacijskih mreža brod-brod, te kopno-brod. Sve poznate transmisijske i instalacijske prednosti svjetlovodnih komunikacija mogu se iskoristiti i u zahtjevnom okolišu kao što su brodovi i pripadni pomorski objekti (luke, sidrišta, terminali za prihvat tereta i sl.). Bežične svjetlovodne sustave moguće je primijeniti u povezivanju brodova s terminalom uz mogućnost spajanja i na fiksnu telekomunikacijsku mrežu, umrežavanje sustava za nadzor tereta na brodu s brodskom računalnom mrežom te mogućnost prijenosa signala s milimetarskih radarskih sustava koji bi se koristili za nadzor plovidbe i izvođenje manevra brodova u lučkom morskom području. Takvom bi se komunikacijom mogli prenositi precizni podatci o poziciji broda posebno tijekom

izvođenja manevra priveza i odveza broda, te plovidbom u ograničenim plovnim vodama. [12]

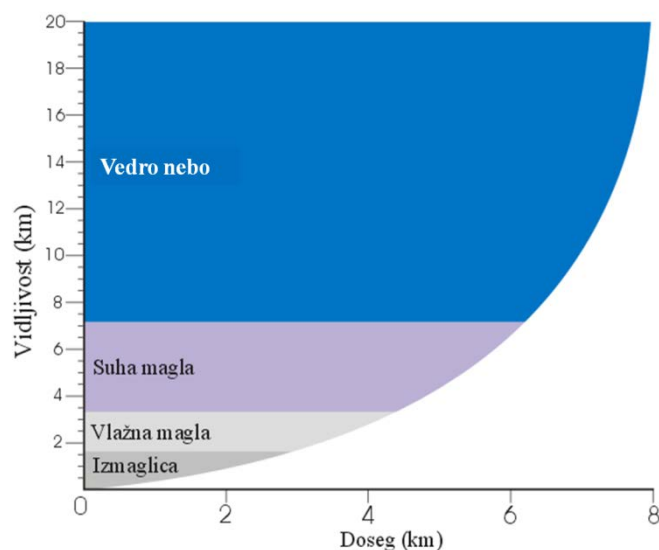
Za razliku od prijenosa radiovalovima, kod svjetlovnog bežičnog prijenosa nije potreban zakup frekvencijskog spektra. Uz to, signali ne utječu jedan na drugoga, odnosno nisu podložni vanjskim elektromagnetskim smetnjama.

Koncepcijski, ova tehnologija ne razlikuje se od prijenosa svjetlovnom niti. Korišteni laser radi u području THz, te emitira svjetlosni signal koji prenosi kodirane podatke. Zraka putuje do prijemnika pravocrtno kroz prostor i stiže u prijemnik odnosno u fotosenzor. Optički detektor (fotosenzor) pretvara svjetlosnu zraku u električne impulse, koji se naknadno obrađuju u samome uređaju, te naposljetku prosljeđuju do korisnika. Kao predajnik, u današnjim se sustavima bežičnih svjetlovnih sustava prijenosa koristi VCSEL laser (eng. *Vertical Cavity Surface Emitting Laser*), a kao prijateljnik fotodioda (slika 9).

Kako bi se ostvarila veza, između predajnika i prijemnika ne smiju postojati fizičke prepreke (npr. visoke zgrade, stabla), odnosno potrebna je čista optička vidljivost (eng. *Clear Line of Sight*). Domet pravilno pozicioniranog predajnika može biti i 2 do 3 km uz povoljne meteorološke uvjete (slika 10).



Slika 9: Shematski prikaz prijenosa podataka pomoću bežičnog svjetlovnog sustava

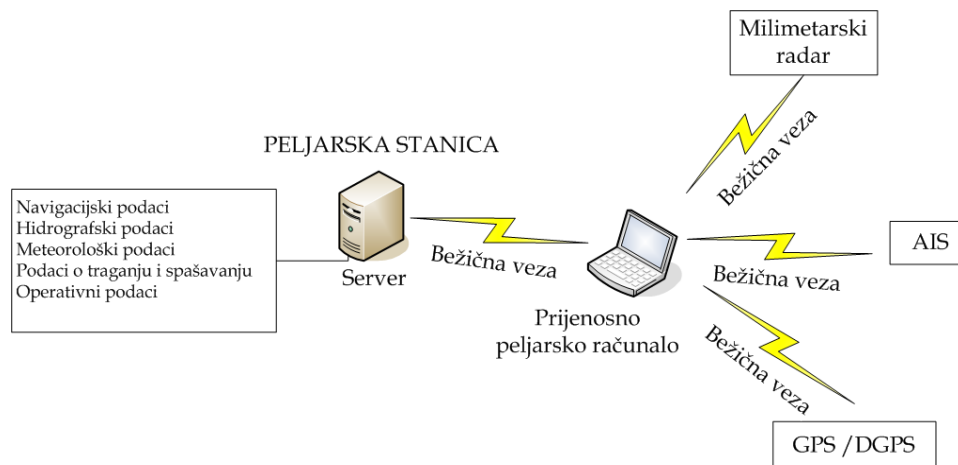


Slika 10: Doseg bežičnog svjetlovodnog signala

Za bežične svjetlovodne komunikacije najčešće se koriste pojasevi valnih dužina od 780 do 900 nm i od 1500 do 1600 nm. Pojas oko 1300 nm koji se inače često koristi u svjetlovodnim sustavima prijenosa nije pogodan za bežične komunikacije zbog slabog isijavanja u atmosferu. Zbog male cijene komponenta sustavi na području valnih dužina od 780 do 900 nm su komercijalno dostupniji. S druge strane prednost pojasa od 1500 do 1600 nm je u mogućnosti sigurnog korištenja lasera veće snage. Svjetlost valne dužine manje od 1400 nm usmjeruje se kroz rožnicu izravno na mrežnicu, što je štetno za ljudsko oko. Međutim, rožnica asimilira valne duljine veće od 1400 nm što omogućuje oku upijanje većeg intenziteta svjetlosnog zračenja.

Trenutno, ova tehnologija omogućava vezu brod - kopno u manjim dometima, poput luka, gdje bi se veze koristile za prijenos informacija kao pomoć pri plovidbi i izvođenju manevra priveza i odveza u morskome području luke te ubrzanja samog manevra. U sprezi s navigacijskim uređajima poput milimetarskog radara, mogla bi se postići veća sigurnost plovidbe u lučkim vodama.

Suvremeno peljarenje brodom, posebice u morskome području luke zahtijeva opremljenost peljara prijenosnim računalom. Sve podatke koji su relevantni za sigurno obavljenno vođenje broda peljarom bili bi dostupni na njegovom računalu koje bi bežičnim putem bilo spojeno na određeni mrežni server. Također bi bežičnim putem mogao prihvatiti radarsku panoramu s milimetarskog radara smještenog na obalnom rubu privezišta (slika 11).



Slika 11: Bežično povezivanje prijenosnog peljarskog računala

Implementacija širokopolasne veze korištenjem bežične optike omogućila bi veliko unapređenje pri upravljanju lukom i zakrčenim plovnim putovima, te na taj način doprinijela razvitku i povećanju plovnog prometa.

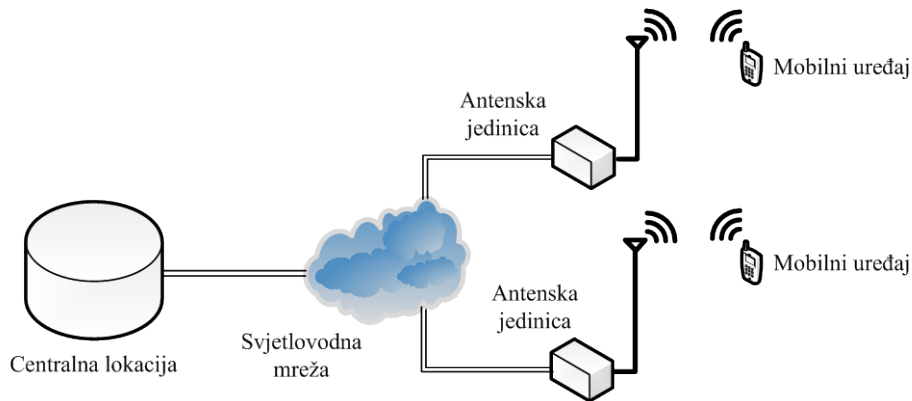
#### 2.4. Prijenos radio-signala svjetlovodnom niti

Prijenos radio-signala svjetlovodom (*eng. Radio-over-fiber*) je tehnologija koja korištenjem svjetlovodne komunikacije omogućuje prijenos radio frekvencijskog (RF) signala od centralne lokacije do antenske jedinice na nekoj udaljenoj lokaciji. Kod uskopolasnih komunikacijskih sustava kao i kod Wireless LAN-a ali i drugih vrsta analogne i digitalne radiofrekvencijske komunikacije, procesiranje radio signala poput pretvorbe frekvencije, modulacija vala nosioca i multipleksiranja obavlja se na baznoj stanici, te se obrađeni signal šalje direktno na antenu. Prijenos radio-signala svjetlovodom omogućuje centraliziranu obradu radio frekvencijskih signala na jednoj lokaciji, te prijenos tih signala putem svjetlovoda, uz vrlo male gubitke (0,3 dB/km za 1550 nm i 0,5 dB/km za 1310 nm valne dužine) do antenske jedinice na udaljenoj lokaciji (slika 12).

Ovakvim pristupom udaljena antenska jedinica može se znatno pojednostaviti s obzirom da obavlja samo pretvorbu svjetlosnog u električni signal i pojačavanje signala. Pri tome centralizirana obrada RF signala omogućuje dijeljene i alokaciju resursa, kao i jednostavnije upravljanje i održavanje sustava. Ove prednosti u konačnici mogu

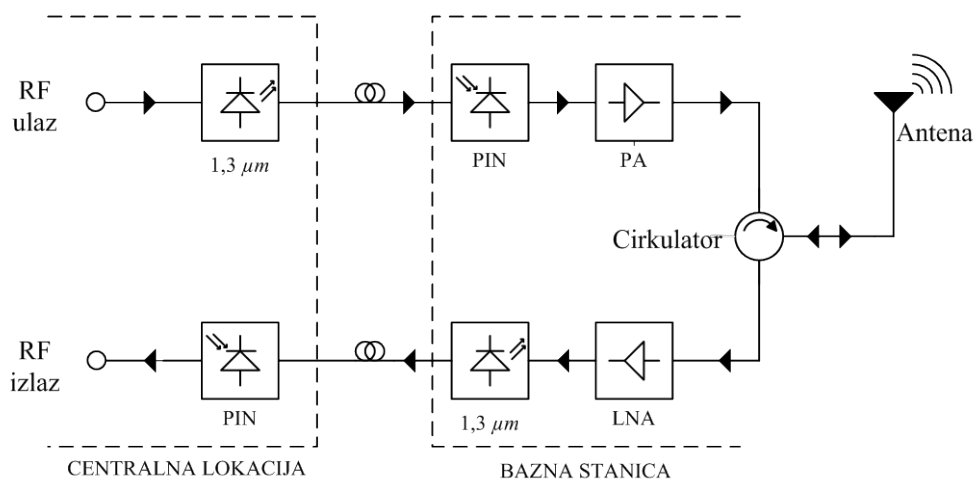


rezultirati znatnim uštedama prilikom implementacije ali i tijekom korištenja sustava, naročito u primjenama koje pokrivaju velika geografska područja gdje je potreban veliki broj baznih stanica, odnosno antenskih jedinica.



Slika 12: Koncept sustava za prijenos radio-signala svjetlovodom

Blok shema osnovnog sustava za prijenos radio-signala svjetlovodom prikazan je na slici 13. Takav sustav moguće je koristiti za prijenos i distribuciju bilo kojeg oblika RF signala. Pri tome RF signal direktno koristi modulaciju laserske diode na centralnoj lokaciji. Dobiveni intenzitetno modulirani signal tada se putem svjetlovoda prenosi do bazne stanice (antenske jedinice). U baznoj stanici se uz pomoć fotodetektora svjetlosni signal pretvara natrag u radiofrekvencijski, te se pojačava i odašilje uz pomoć antene. Povratna veza mobilnog uređaja prema centralnoj lokaciji izvedena je na isti način samo u drugom smjeru.



Slika 13: Blok shema osnovnog sustava za prijenos radio-signala svjetlovodom

Primjena sustava za prijenos radio-signala svjetlovodom mogla bi unaprijediti akcije traganja i spašavanja na moru (*eng. Search And Rescue*), poboljšati zaštitu morskog okoliša i provoditi sigurnosnu zaštitu u hrvatskom priobalju omogućujući izravan prijenos informacija do Nacionalne središnjice za traganje i spašavanje na moru MRCC-a (*eng. Maritime Rescue Coordination Centre*) u realnom vremenu. Služba traganja i spašavanja za pružanje pomoći osobama u pogibelji na moru i obali u Hrvatskoj je osnovana prema zahtjevima Međunarodne konvencije o traganju i spašavanju, usvojene od Vlade Republike Hrvatske. VHF (*eng. Very High Frequency*) primopredajnici hrvatskih obalnih radijskih postaja su klasičnim bakrenim telefonskim linijama spojeni pripadajućim radiopostajama. Takve veze ograničava broj kanala i protok informacija. Tehnologija prijenosa radiosignala svjetlovodnim mrežama pružala bi puno bolje i pouzdanije povezivanje pri razmjeni podataka vezanih uz SAR aktivnosti te drugih podataka između MRCC-a i ostalih sudionika. [13]

U navedenoj primjeni bazne stanice opremljene VHF primopredajnikom izravno bi se svjetlovodnim vezama povezale s MRCC-om. U tu svrhu može se koristiti već izgrađena javna telekomunikacijska svjetlovodna mreža tako da se VHF bazna stanica izravno priključi na postojeće svjetlovodne telekomunikacijske kabele bez dodatnih ulaganja u ovaj segment komunikacijskog sustava. Prijenos VHF signala izvodi se putem standardnih prijenosnih uređaja i svjetlovodnih kabela koji se koriste u javnoj telekomunikacijskoj mreži. Prednost tehnologije prijenosa radio signala svjetlovodnom mrežom je u tome što omogućuje izravnu komunikaciju između zapovjednika akcije traganja i spašavanja s MRCC-om, primanje VHF DSC signala od strane MRCC-a, te praćenje VHF komunikacije brodova i plovila u cijelom VHF području od strane MRCC-a i posebno ovlaštenih državnih agencija. Na slici 14 prikazano je povezivanje VHF radio-signala odaslanog s brodice na VHF baznu stanicu. VHF stanica opremljena je uređajima za pretvorbu radio-signala u svjetlovodni i spojena je na kabelsku svjetlovodnu infrastrukturu. Preko svjetlovodne kabelske mreže VHF komunikacija prenosi se izravno u MRCC u Rijeci.



Slika 14: Povezivanje VHF radio-signala na svjetlovodnu mrežu

## 2.5. Optički žiroskop

Više od stoljeća za mjerenje kursa broda koristi se žiroskop (*eng. gyrocompass*). Njegov rad temelji se na ponašanju zvrka slobodnog u prostoru, čija se osovina raznim dodatcima postavlja u meridijan. Usporedba položaja osovine zvrka i simetrale broda je njegov kurs. Ova naprava ima cijeli niz nedostataka: veliki broj okretaja masivnog zvrka i njegovo održavanje, napajanje zvrka strujom, mnogo pokretnih mehaničkih dijelova, velika masa sustava, veliko vrijeme stabilizacije osi zvrka u meridijan, činjenica da sila koja postavlja zvrk u meridijan pada s kosinusom kuta geografske širine, tako da iznad  $60^\circ$  žiroskop postaje neupotrebljiv.

Sredinom šezdesetih godina prošlog stoljeća počeo je razvoj sustava koji reagira na zakret platforme na kojoj je smješten. Taj sustav temelji se na Sagnac-ovom efektu iz 1913. godine, koji dokazuje da dvije svjetlosne zrake koje ulaze u rotirajući optički prsten u istoj točki imaju različita vremena prolaska punoga kruga. Prvi optički sustav razvijen prema tom efektu bio je laserski žiroskop ili RLG sustav (*eng. Ring Laser Gyro*). Autori sustava zadržali su u nazivu riječ „gyro“ što znači zvrk, iako u sustavu uopće ne postoji zvrk. Nakon RLG-a razvijeni su i drugi slični sustavi pod različitim imenima.

### Sagnac-ov efekt

Pretpostavimo da se dvije laserske zrake, dobivene iz istog izvora, gibaju svjetlovodom oblikovanom u kružnicu radijusa  $R$ , kako to prikazuje slika 15.

Ako sustav miruje (kutna brzina sustava  $\omega = 0$ ) jedna i druga zraka prelaze isti put u vremenu  $t$ , prema izrazu (1), gdje je  $c$  brzina svjetlosti u vakuumu.

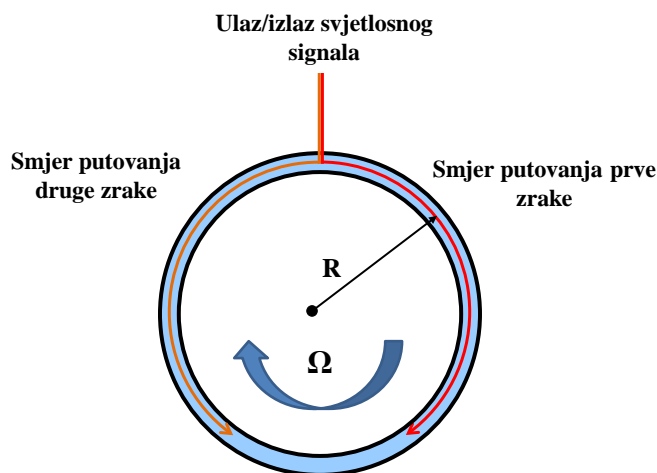
$$t = \frac{2\pi R}{c} \quad (1)$$

Ako pak cijeli sustav rotira kutnom brzinom  $\omega$  u smjeru kazaljke na satu, prvoj zraci put se produžuje a drugoj skraćuje pa se mijenjaju i vremena putovanja. Razlika vremena jednaka je:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2\pi R}{c - R\omega} - \frac{2\pi R}{c + R\omega} = \frac{4\pi R^2 \omega}{c^2 - R^2 \omega^2} \quad (2)$$

Zbog  $R^2 \omega^2 \ll c^2$  izraz (2) se pojednostavnjuje i glasi:

$$\Delta t = \frac{4\pi R^2 \omega}{c^2} \quad (3)$$

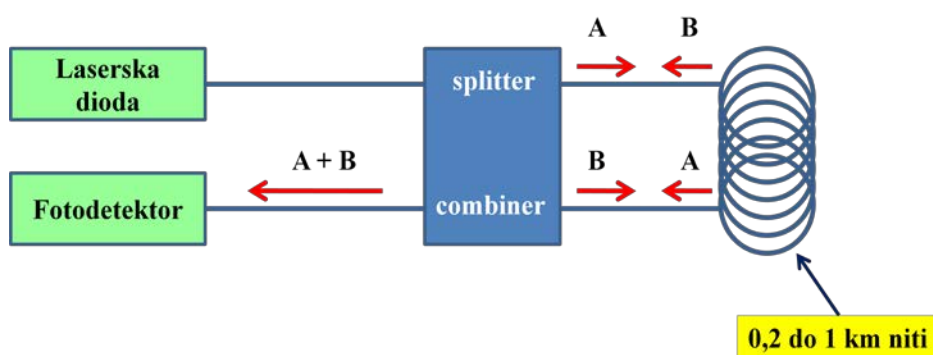


Slika 15: Sagnac-ov efekt

Sedamdesetih godina prošlog stoljeća razvijen je optički žiroskop ili FOG sustav (eng. *Fibre Optic Gyro*), koji je u svojoj osnovi vrlo sličan RLG sustavima. Osnovna razlika između ta dva sustava je što je kod RLG sustava primijenjen optički rezonator, kod kojeg se određuje promjena frekvencije, dok je FOG sustav interferometrijski. Kod FOG sustava je izvor monokromatske koherentne svjetlosti (laser) postavljen izvan sustava. Svjetlost iz lasera se na polupropusnom zrcalu grana i dovodi istodobno na

početak i kraj svjetlovoda koji je namotan kao zavojnica. Zavojnica ima velik broj zavoja, pa se time znatno produljuje put kretanja svjetla kroz medij. Kako svjetlo prevaljuje isti put kroz isti svjetlovod u oba smjera, na detektoru se kod mirovanja sustava pojavljuje svjetlost s određenim razmakom faza primljenih signala. Svako zakretanje sustava u ravnini namotaja za kut  $\omega$  uvjetuje kašnjenje jednog od signala kroz svjetlovod, što se manifestira razlikom u fazi između jednog i drugog signala (slika 16).

Ovi se sustavi ne koriste samo kao kompasi, već u svim situacijama kad je potrebno registrirati i izmjeriti zakret platforme. Tako se oni koriste u mjerenju zakreta broda (*eng. Rate of Turn*), sustavima inercijalne navigacije i sl.

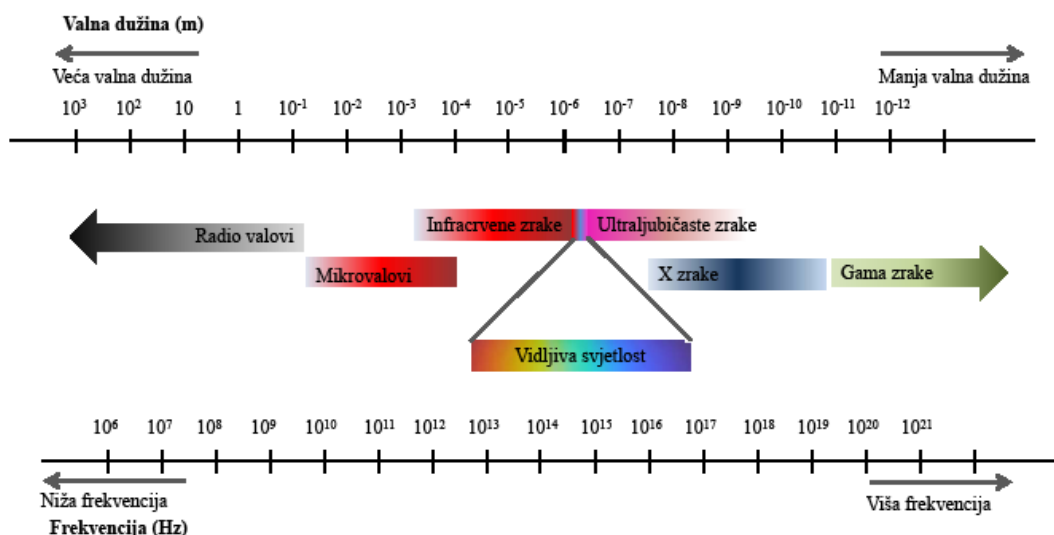


Slika 16: Blok shema optičkog žiroskopa

### 3. SVJETLOVODNI SUSTAVI PRIJENOSA

#### 3.1. Principi rasprostiranja svjetlosti

Svjetlost je samo jedan dio spektra različitih elektromagnetskih valova koji se rasprostiru prostorom. Elektromagnetski spektar čini vrlo široki raspon valova, od radio valova s valnim dužinama od metra do nekoliko kilometara pa sve do x-zraka s valnim dužinama manjim od milijarditog dijela metra. Svjetlosno zračenje nalazi se u dijelu spektra između radio valova i x-valova, čineći jedinstveni spoj osobina koje pokazuju zrake, valovi i elementarne čestice (slika 17). Dio spektra uočljiv ljudskim okom zove se vidljivi spektar. Vidljivo područje pokriva raspon valnih dužina od 390 do 760 nm.



Slika 17: Elektromagnetski spektar

Temeljno svojstvo svjetlosti je valna dužina ( $\lambda$ ) kao omjer brzine širenja u vakuumu ( $c$ ) i frekvencije ( $\vartheta$ ):

$$\lambda = \frac{c}{\vartheta} \quad (4)$$

Poznata je rasprava o valnoj i čestičnoj prirodi svjetlosti, fizičara, matematičara i astronoma 17. stoljeća Christiaana Huygensa i Issaca Newtona. Svjetlost ima dvojn

prirodu: svjetlost kao val karakterizirana je valnom dužinom, frekvencijom i brzinom rasprostiranja, dok se kao čestica prikazuje fotonima. Foton je elementarna čestica, kvant elektromagnetskog zračenja koji se u vakuumu giba brzinom svjetlosti  $c$  ( $c=299.792.458$  m/s). Fotoni ne nose električni naboj, a energija im se izražava kao funkcija broja fotona i valne dužine. Foton ima energiju  $E$ , prema izrazu (5):

$$E = h \cdot \vartheta = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (5)$$

gdje je:

$h$  – Planckova konstanta ( $h= 6,62607 \cdot 10^{-34}$  Js),

$\vartheta$  – frekvencija fotona,

$\lambda$  - valna dužina te

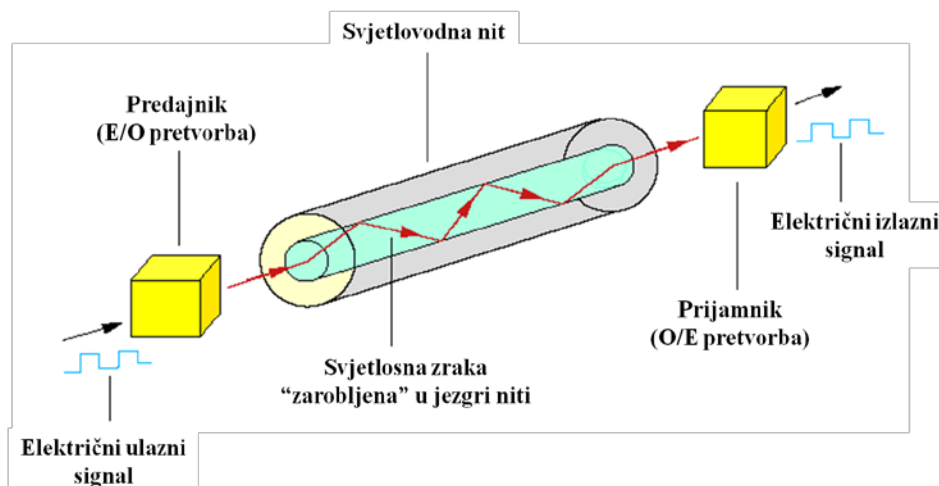
$c$  – brzina širenja svjetlosti u vakuumu.

Detekcija elektromagnetskog zračenja obavlja se interakcijom s električnim nabojem u detektorima ili sensorima. [14, 15, 16]

### 3.1.1. Svjetlovodne komunikacije

Svjetlovodna tehnologija temelji se na emitiranju, prijenosu i prijemu svjetla, odnosno na generiranju svjetlosnog signala električnom pobudom. Ona se je u zadnjih 20-ak godina zbog svojih prednosti u prijenosu informacija i velikih prijenosnih kapaciteta počela primjenjivati u gotovo svim granama tehnologije. Osim u telekomunikacijama, gdje je njena primjena najzastupljenija, svjetlovodna tehnologija se primjenjuje i u ostalim područjima, i to poglavito u graditeljstvu, brodogradnji, zrakoplovnoj industriji, medicini, rudarstvu i svemirskom programu.

Svjetlovodni komunikacijski sustav prenosi svjetlosni signal kroz svjetlovodnu nit do udaljenog prijammika. Električni signal pretvara se u optički signal u predajniku te nakon prijenosa kroz svjetlovodni valovod natrag u izvorni električni signal u prijammiku (slika 18).



Slika 18: Princip rada svjetlovodnog sustava prijenosa

Svjetlovodni sustavi prijenosa signala imaju nekoliko značajnih prednosti nad konvencionalnim prijenosnim tehnologijama zasnovanim na bakrenim i radio komunikacijskim sustavima:

- malo prigušenje i veliki kapacitet prijenosa podataka,
- male dimenzije i težina,
- imunitet na statičku i radio frekvencijsku interferenciju, elektromagnetski impuls EMP, ekstreme uvjete okoline (temperaturne varijacije, hlapljive tekućine i plinovi),
- nemogućnost pojave prenapona, iskrenja, kratkog spoja i požara na nitima,
- proširivanje na veće prijenosne brzine samo zamjenom prijenosnih uređaja,
- mjesto i vrstu oštećenja i kvarova moguće je utvrditi mjerenjem reflektometrom pristupajući samo s jednog kraja,
- visoka pouzdanost svjetlovoda.

Razlikujemo tri glavna čimbenika koja utječu na rasprostiranje svjetlosti u svjetlovodnim sustavima:

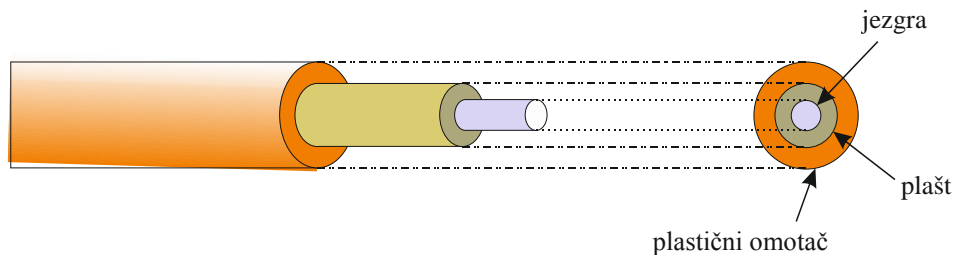
1. Prigušenje: pri prijenosu svjetlosnog signala kroz nit dolazi do gubitka optičke snage, većim dijelom zbog apsorpcije i raspršenja.
2. Pojasna širina: obzirom da je svjetlosni signal sastavljen od različitih frekvencija, svjetlovodna nit ograničava najviše i najniže frekvencije a time i prijenosni kapacitet sustava.



3. Disperzija: pri prijenosu svjetlosti kroz nit optički impuls se širi te pri velikim prijenosnim brzinama i/ili pri prijenosu na velike udaljenosti dolazi do smanjenja prijenosnog kapaciteta.

### 3.1.2. Konstrukcija svjetlovodne niti

Svjetlovodna nit napravljena je od vrlo tanke staklene šipke, koja je omotana zaštitnim plastičnim omotačem. Staklena šipka sastoji se od dva dijela: unutarnji dio naziva se jezgra (*eng. core*) i vanjskog dijela koji se naziva plašt niti (*eng. cladding*) (slika 19). Kao primarna zaštita niti koristi se plastični omotač koji se nanosi oko plašta niti. Svjetlo koje optički izvor ubacuje u jezgru niti, rasprostire se kroz nit uslijed totalne unutarnje refleksije svjetla na granici jezgre i plašta.



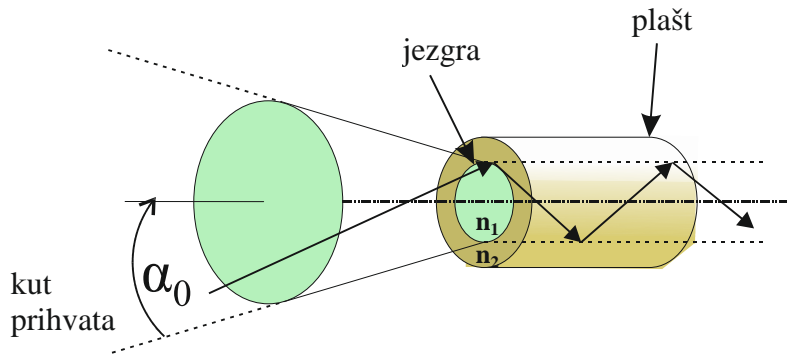
Slika 19: Konstrukcija svjetlovodne niti

### 3.1.3. Rasprostiranje svjetlosnog signala

Svjetlosna zraka ulazi u nit pod malim kutom  $\alpha$ . Sposobnost prihvata svjetla u jezgru niti određena je numeričkom aperturom NA (*eng. numerical aperture*) prema izrazu (6):

$$NA = \sin \alpha_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (6)$$

gdje je  $\alpha_0$  maksimalni kut prihvata,  $n_1$  je indeks loma jezgre a  $n_2$  indeks loma plašta (slika 20).



Slika 20: Numerička apertura – kut prihvata svjetla u svjetlovod

Rasprostiranje svjetlosti u svjetlovodnoj niti podliježe Snell-ovu zakonu loma. Snellov zakon (ili zakon loma) svjetla glasi: svjetlost koja pada na granicu dvaju sredstava indeksa loma  $n_1$  i  $n_2$  prijelazom iz jednog u drugo sredstvo lomi se tako da upadna zraka, okomica na granicu sredstava i lomljena zraka leže u istoj ravnini te kut loma i kut upada zadovoljavaju izraz  $n_1 \cdot \sin(\Phi_1) = n_2 \cdot \sin(\Phi_2)$ , pri čemu su  $n_1$  i  $n_2$  indeksi loma u pojedinom sredstvu a  $\Phi_1$  i  $\Phi_2$  kutovi prema okomici. Samo dio svjetla koji se ubaci u nit pod kutom manjim od kuta prihvata nastavlja se rasprostirati kroz valovod.

### Refrakcija

Refrakcija je lom zrake svjetla na sučelju dvaju medija s različitim indeksima loma. Ako je  $\alpha > \alpha_0$ , tada se zraka u potpunosti lomi i izlazi iz jezgre niti (slika 21).

$$n_1 \sin \alpha_i = n_2 \sin \alpha_r \quad (7)$$

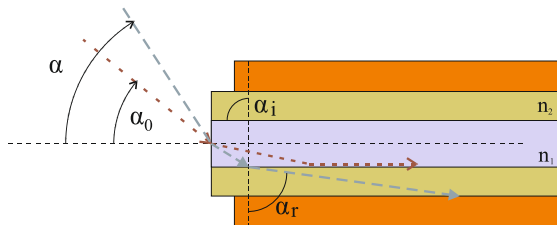
Razliku u indeksima loma jezgre i plašta postiže se dodavanjem različitih elemenata primjesa u materijal prilikom izrade niti. Jezgra uvijek ima neznatno viši indeks loma od plašta.

### Refleksija

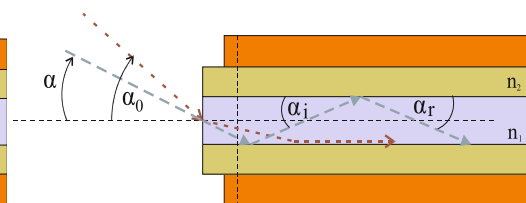
Refleksija je nagla promjena smjera rasprostiranja zrake svjetla na sučelju dvaju medija s različitim indeksima loma. U ovom slučaju zraka se lomi natrag u medij iz

kojeg je došla. Kada je  $\alpha < \alpha_0$ , tada se zraka reflektira natrag u jezgru niti i kroz nju nastavlja rasprostiranje (slika 22).

$$\alpha_i = \alpha_r \quad (8)$$



Slika 21: Refrakcija



Slika 22: Refleksija

### Načelo rasprostiranja svjetla

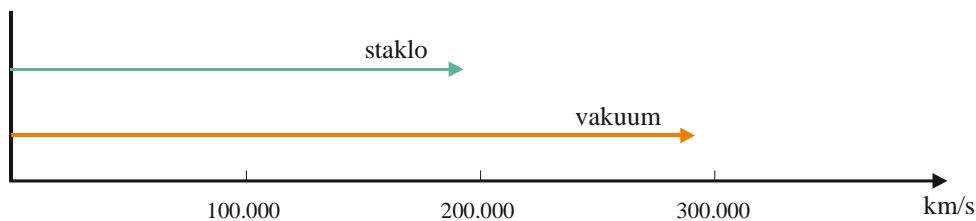
Zrake svjetla ulaze u nit pod različitim kutovima i nastavljaju rasprostiranje različitim putovima. Zraka koja je ušla u jezgru niti pod relativno malim kutom imati će približno ravan put kroz centar jezgre. Zrake koje uđu pod većim kutovima prelaziti će duži put kroz jezgru a time će imati i veće vrijeme rasprostiranja od zraka koje putuju ravno kroz centar jezgre. Svaki put zraka svjetla kroz jezgru definiran je ulaznim kutom upada i točkom ulaza. Tako nastali putovi zraka svjetla ovise o valnoj dužini, indeksu loma i geometriji valovoda, i nazivaju se modovi. Rasprostiranjem modova kroz nit dolazi do određenog stupnja prigušenja svakog moda.

### Brzina

Brzina kojom svjetlo putuje prijenosnim medijem definirana je indeksom loma prijenosnog medija. Indeks loma ( $n$ ) je veličina bez mjerne jedinice, a predstavlja odnos brzine svjetlosti u vakuumu ( $c$ ) i brzine svjetlosti u prijenosnom mediju ( $v$ ).

$$n = \frac{c}{v} \quad (9)$$

Uobičajene vrijednosti indeksa loma za staklo su od 1,45 do 1,55. Prema izrazu (9) vidljivo je da je u mediju s većim indeksom loma brzina rasprostiranja svjetla manja.



Slika 23: Usporedba brzine svjetla u različitim medijima

### 3.1.4. Prijenosne karakteristike

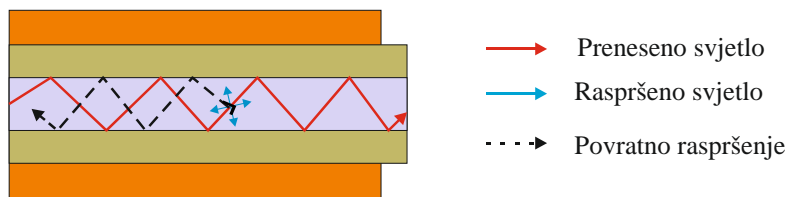
#### Pojasna širina

Pojasna širina (*eng. bandwidth*) definirana je kao širina frekvencijskog opsega koji se može prenijeti kroz svjetlovodnu nit. Pojasna širina određuje maksimum informacijskog kapaciteta kanala, koji se može prenijeti kroz nit na određenu duljinu. Pojasna širina izražava se u MHz·km. Kod višemodnih niti pojasna širina većim dijelom ograničena je modalnom disperzijom dok kod jednomodnih niti ograničenje te vrste ne postoji.

#### Prigušenje

Svjetlosni signal na putu kroz svjetlovodnu nit gubi svoju snagu. Smanjenje optičke snage izražava se u decibelima (dB) ili u gubitcima po jedinici duljine (dB/km).

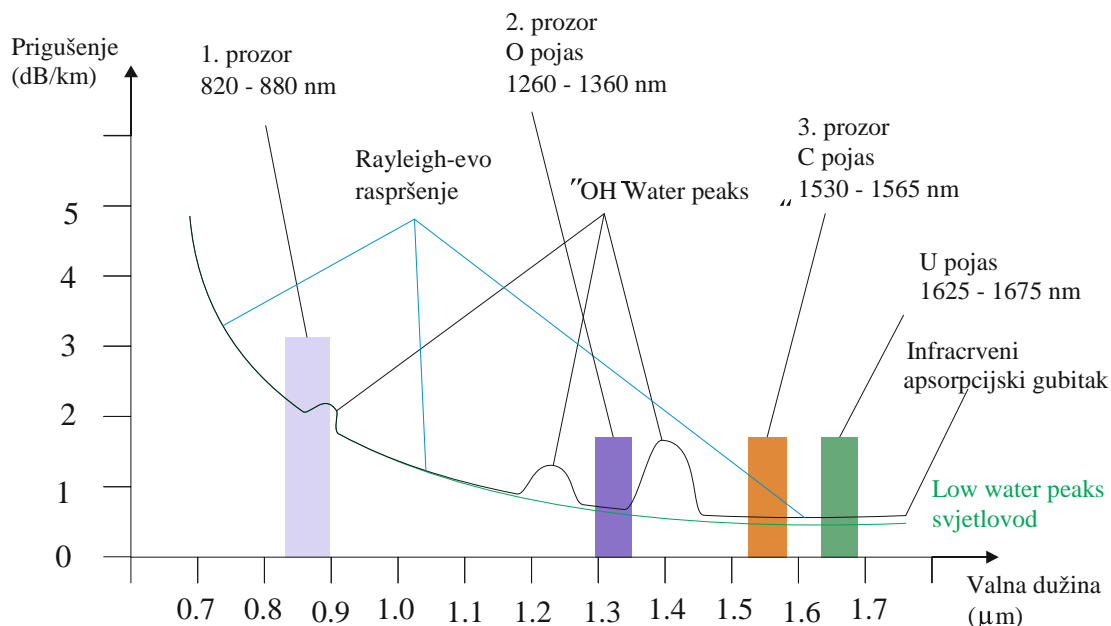
Gubici snage nastaju zbog apsorpcije i raspršenja. Svjetlo se apsorbira u materijalu niti jer se njegova energija pretvara u toplinu zbog molekularne rezonance i valovodnih nečistoća. Raspršenje, i to prvenstveno Rayleigh-ovo, također doprinosi prigušenju signala. Raspršenje uzrokuje rasipanje svjetlosne energije u svim smjerovima, pa dio energije izlazi iz jezgre niti. Mali dio raspršene energije vraća se jezgrom niti prema izvoru signala, te se taj dio naziva povratno raspršenje (*eng. backscattering*) (slika 24). Osim dominantnog Rayleigh-ovog raspršenja javljaju se Raman-ovo i Brillouin-ovo raspršenje, čiji se efekti najčešće koriste u optičkim senzorskim sustavima.



Slika 24: Raspršenje svjetla u svjetlovodnoj niti

Krivulja na slici 25 ilustrira odnos valne dužine ubačenog svjetla i ukupnog prigušenja svjetlovodne niti. Na krivulji su bojama naznačeni pojasevi valnih dužina koji se najčešće koriste za prijenos signala u komunikacijskim mrežama. To su područja s najmanjim prigušenjem svjetlovoda i nazivaju se 1., 2. i 3. prozor a obuhvaćaju valne dužine u područjima oko 850, 1300 i 1550 nm. Za sustave s valnim multipleksiranjem velike gustoće (eng. *DWDM-dense wavelength division multiplexing*) koriste se i pojasevi iznad 1550 nm (1565 – 1675 nm).

OH simbol na krivulji označava valne dužine od 950, 1244 i 1383 nm, na kojima prisutnost vodikovih iona u svjetlovodnom materijalu uzrokuje veliko povećanje prigušenja. Prisutnost vode u materijalu (eng. *water peaks*) nastaje kemijskom reakcijom pri proizvodnji niti ili radi vlage u okolišu. Proizvedene su i nove vrste niti u kojima je povećano prigušenje radi prisutnosti OH iona na 1383 nm poništeno a nazivaju se „niti s niskim vodenim vrhom“ odnosno eng. „*low water peak fibers*“.

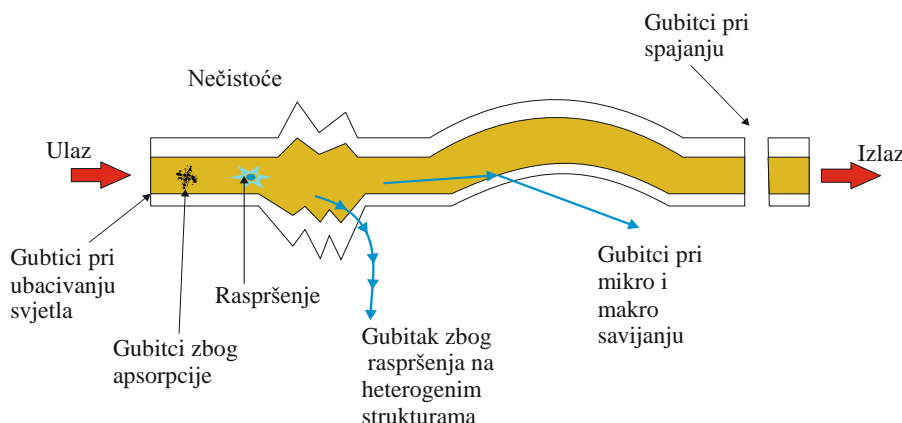


Slika 25: Prigušenje svjetlovodne niti kao funkcija valne dužine

## Mikro i makro savijanja

Mikro i makro savijanja uobičajeni su problem u svim instaliranim kabelskim sustavima jer također mogu izazvati gubitak snage signala. Mikro savijanja prvenstveno nastaju pri proizvodnji niti, mehaničkim nepravilnostima pri ugradnji niti u kabele te nepovoljnim utjecajima okoliša (temperatura, vlažnost, pritisak). Makro savijanja odnose se na veća savijanja niti (polumjera većeg od 2 mm).

Na slici 26 prikazani su svi čimbenici koji utječu na ukupno prigušenje signala, kao što su nečistoće u staklu, raspršenje, te gubici pri savijanju i spajanju niti.



Slika 26: Uzroci smanjenja snage signala u svjetlovodnoj niti

## Disperzija

Disperzija je još jedan važan čimbenik koji djeluje na signal tijekom njegova rasprostiranja kroz svjetlovodnu nit. Ona smanjuje efektivnu pojasnu širinu raspoloživu za prijenos signala. Postoje tri osnovne vrste disperzije: modalna, kromatska i polarizacijska.

Modalna disperzija (*eng. modal dispersion*) javlja se u višemodnim nitima. Kada se vrlo kratki svjetlosni impuls ubaci u nit, sva njegova energija ne dolazi do kraja niti u isto vrijeme. Različiti modovi prenose energiju putujući po niti različitim putovima s različitim duljinama. Na primjer, višemodna nit promjera jezgre 50  $\mu\text{m}$  može podržavati prijenos nekoliko stotina modova. Proširenje impulsa uzrokovano prolaskom modova različitim putovima često se naziva i višemodna disperzija.

Kromatska disperzija (*eng. chromatic dispersion*) nastaje zbog toga jer je svjetlosni impuls sastavljen od različitih valnih dužina, a svaka od njih putuje kroz nit različitom brzinom. Te različite brzine širenja svjetla uzrokuju proširenje impulsa na

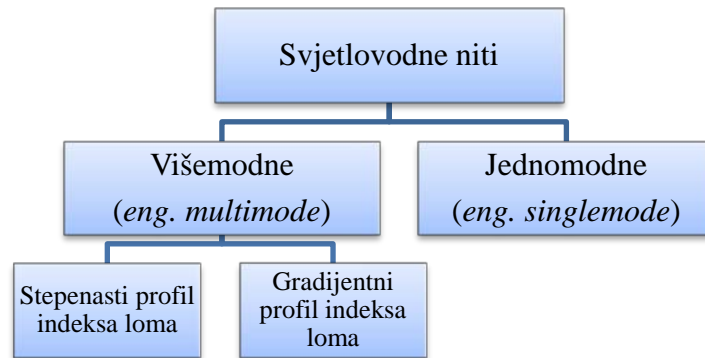
izlazu iz niti. Tako proširen impuls u prijammniku uzrokuje smanjenje odnosa signal/šum kao i povećanje grešaka u prijenosu informacijskih bitova. Kašnjenje impulsa za određenu valnu dužinu izražava se u pikosekundama (ps), a koeficijent disperzije u ps/nm. On odgovara pomaku u kašnjenju kao funkciji valne dužine, te ako je standardiziran na jedan kilometar izražava se u ps/(nm·km). Koeficijent disperzije ovisi o duljini svjetlovodne niti. Kromatska disperzija prvenstveno ovisi o procesu proizvodnje niti. Proizvođači niti razmatraju utjecaj kromatske disperzije pri dizajniranju niti za različite namjene. Osim standardnih niti proizvode se i niti s pomaknutom disperzijom (*eng. dispersion shifted fiber, non-zero dispersion shifted fiber*), koje na određenim valnim dužinama imaju smanjenu kromatsku disperziju u odnosu na standardne niti.

Polarizacijska disperzija (*eng. polarization mode dispersion*) prvenstveno je karakteristika jednomodnih niti. Ona uzrokuje proširenje impulsa signala te ograničava brzinu prijenosa i to poglavito za brzine prijenosa veće od 10 Gbit/s. Pri ulasku svjetlosti iz izvora u svjetlovodnu nit, valna dužina dijeli se u dvije polarizacijske osi, okomite jedna na drugu. Razlika u vremenu dolaska u prijammnik ta dva polarizacijska moda naziva se polarizacijska disperzija, i mjeri se u ps. Koeficijent polarizacijske disperzije izražava se u ps/ $\sqrt{\text{km}}$ . Uobičajeno je da koeficijent polarizacijske disperzije svjetlovodne dionice od jednog kilometra ne smije prijeći vrijednost 1/10 perioda bita. Stoga slijedi da maksimalni koeficijent polarizacijske disperzije za sustave s brzinom prijenosa 2,5 Gbit/s iznosi 40 ps, a za 10 Gbit/s sustave 10 ps.

## **3.2. Komponente svjetlovodnih sustava prijenosa**

### **3.2.1. Svjetlovodne niti**

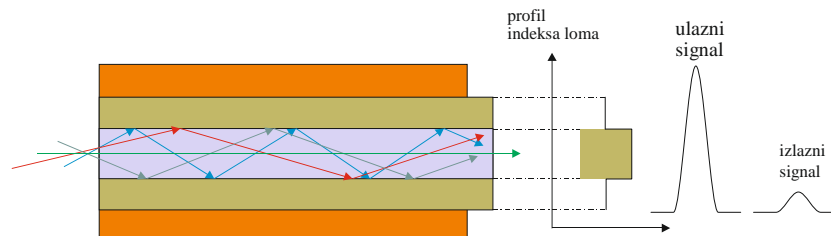
Ovisno o načinu rasprostiranja svjetlosti kroz niti dijelimo ih na dvije vrste: jednomodne i višemodne. Vrste niti određene su i veličinom promjera njihove jezgre i plašta.



Slika 27: Vrste svjetlovodnih niti

Višemodne niti zbog većeg promjera jezgre omogućavaju prijenos većeg broja različitih putova svjetlosnih zraka, no zbog toga su izrazito osjetljive na modalnu disperziju. Osnovna prednost višemodnih niti je mogućnost korištenja izvora svjetlosti sa širim spektrom zračenja te jednostavnije spajanje niti. No, njihovo relativno veliko prigušenje i mala pojasna širina ograničavaju njihovu primjenu na sustave s kratkim dometom i manjim prijenosnim kapacitetom.

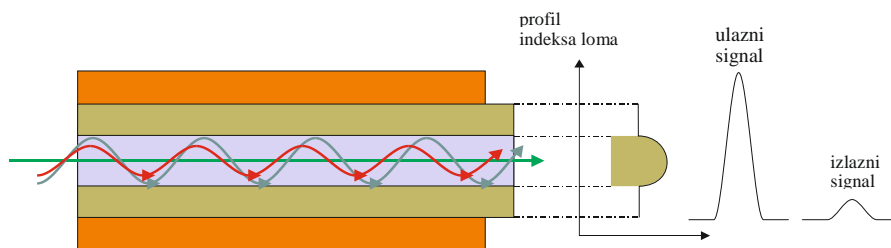
Višemodne niti sa stepenastim profilom indeksa loma (*eng. step-index multimode fiber*) imaju jednoliku raspodjelu indeksa loma u jezgri niti. Promjer jezgre iznosi im 50  $\mu\text{m}$  ili 62,5  $\mu\text{m}$ , promjer plašta od 100 do 140  $\mu\text{m}$  te numerička apertura od 0,2 do 0,5 (slika 28).



Slika 28: Rasprostiranje svjetlosti kroz višemodnu nit sa stepenastim profilom indeksa loma

Jezgra višemodne niti s gradijentnim profilom indeksa loma (*eng. graded-index multimode fiber*) napravljena je na način da se indeks loma gradijentno smanjuje od centra jezgre prema plaštu (slika 29). Takva izvedba indeksa loma omogućava širenje zraka svjetla sinusoidnom putanjom. Zrake koje putuju bliže centru jezgre usporavaju se jer prolaze kroz materijal s višim indeksom loma dok se zrake koje putuju bliže plaštu ubrzavaju. Time se smanjuje utjecaj modalne disperzije.





Slika 29: Rasprostiranje svjetlosti kroz višedomnu nit s gradijentnim profilom indeksa loma

Prednost jednomodnih niti očituje se u njihovom vrlo velikom prijenosnom pojasu i malom prigušenju. Promjer jezgre od samo 8 do 12  $\mu\text{m}$  omogućava prijenos samo jednog moda svjetlosti čime se potpuno eliminira modalna disperzija. Promjer plašta iznosi 125  $\mu\text{m}$ . Jednomodnim nitima moguć je prijenos signala od 40 Gbit/s i više na velikim udaljenostima. Kapacitet prijenosa može se dodatno povećati prijenosom više signala neznatno različitih valnih dužina kroz jednu nit (valno multipleksiranje).

Svjetlovodna nit najčešće se izrađuje od silicijevog dioksida  $\text{SiO}_2$  (tzv. kvarcno staklo). U novije vrijeme niti se izrađuju i od plastike (*POF-Polymer Optical Fiber*) te u specijalnim izvedbama kao niti sa šupljinama (*PCF-Photonic Crystal Fiber*). U brodskim komunikacijskim mrežama česta je uporaba niti sa staklenom jezgrom i plastičnim omotačem (*eng. polymer cladded fiber*). [17, 18]

### 3.2.1.1. Standardi i preporuke

Sve vrste svjetlovodnih niti kategorizirane su i standardizirane prema preporukama specijalizirane ustanove Ujedinjenih Naroda odgovorne za informacijske i komunikacijske tehnologije ITU-T (*International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector*). Osim za svjetlovodne niti i kabele, ITU-T definira smjernice, tehničke karakteristike i specifikacije za telekomunikacijske sustave, mreže, usluge te testnu i mjernu opremu i protokole. Uz ITU-T, ITU organizaciju čine i sektor za radiokomunikacije (ITU-R) te sektor za razvoj telekomunikacija (ITU-D).

Popis ITU-T preporuka za svjetlovodne niti, kabele i mjerne protokole nalazi se u Prilogu 1.

Europski telekomunikacijski standardizacijski institut (*European Telecommunications Standards Institute – ETSI*) zadužen je za standardizaciju

informatijske i komunikacijske tehnologije (*Information and Communication Technologies – ICT*) u Europi. Popis ETSI preporuka vezan uz predmetni rad također se nalazi u Prilogu 1.

### **3.2.2. Svjetlovodni kabeli**

Pri proizvodnji svjetlovodnih kabela posebna pažnja posvećuje se sprječavanju: prevelikog savijanja niti kako ne bi došlo do pucanja niti ili povećanja prigušenja, djelovanju pritiska na niti te zaštiti od vlage. Postoji niz različitih načina slaganja niti u kabele te kablskih zaštitnih plašteva s različitim materijalima i slojevima. Prema namjeni razlikujemo kabele: za polaganje unutar objekata, zaključne i priključne kabele (*eng. pig-tail, patch-cord*), kabele za uvlačenje u cijevi i direktno polaganje u zemlju, samonosive i podvodne kabele te za polaganje na visokonaponske dalekovode.

Postoje i svjetlovodni kabeli za specijalne namjene u vrlo zahtjevnim okolišima sa specifičnim zaštitama, kao što su kabeli za vojne i brodske mreže. Također, i svjetlovodne senzorske mreže zahtijevaju specijalnu konstrukciju kabela.

Svjetlovodi za polaganje na brodovima i naftnim platformama detaljnije su opisani u poglavlju 4.4.

Niti su unutar kabela grupirane u cjevčice, obojane u različite boje radi lakšeg raspoznavanja te ovisno o namjeni zaštićene odgovarajućim plaštevima. Kabeli mogu sadržavati samo jednomodne ili višemodne niti kao i njihovu kombinaciju, ovisno o potrebama korisnika. Priključni kabeli s jednom ili dvije niti namijenjeni su prvenstveno povezivanju transmisijskih i mjernih uređaja, dok je kapacitet ostalih vrsta kabela najčešće od 6 do nekoliko stotina niti u jednom kabelu.

Standardne dužine u kojima se proizvode telekomunikacijski kabeli su 2, 4, 6 km te je za izgradnju dužih veza potrebno spojiti pojedinačne dionice kabela. Ponovna spajanja niti izvode se kod oštećenja i prekida kabela, te kod priključenja transmisijskih uređaja i izvođenja mjerenja optičkih i transmisijskih karakteristika niti.

Svjetlovodne niti spajaju se trajnim spojevima varenjem niti električnim lukom (tzv. fuzijski spojevi) ili rastavljivim spojevima u što spadaju razne vrste optičkih konektora i mehaničkih spojnica. Fuzijski spojevi su najpouzdaniji i unose najmanje prigušenje u sustav (prosječno 0,05 dB) dok konektori imaju prosječno prigušenje od 0,3 dB a mehanički spojevi 0,2 dB.

### 3.2.3. Optički izvori

Optički izvori često se promatraju kao aktivne komponente svjetlovodnih komunikacijskih sustava. Osnovna im je namjena pretvorba električne energije (struje) u optičku energiju (svjetlo) radi efikasnog prenošenja svjetla u nit i rasprostiranja signala po niti do krajnjeg odredišta.

Najčešće se koriste dvije vrste: monokromatski, nekoherentni izvori – svijetleće diode (eng. *Light Emitting Diode-LED*) te monokromatski, koherentni izvori – laseri (eng. *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Monokromatska svjetlost sastoji se od samo jedne valne dužine (boje) i usmjerena je u vrlo uskom snopu. Snop je koherentan, što znači da su elektromagnetski valovi međusobno u istoj fazi i šire se u istom smjeru.

Optički izvori razvrstavaju se prema centralnoj (ili vršnoj) valnoj dužini, valnoj spektralnoj širini i izlaznoj snazi. Centralna valna dužina je ona na kojoj izvor emitira najviše snage. Uobičajene valne dužine za komunikacijske sustave su 850 nm, 1300 nm, 1310 nm, 1550 nm i 1625 nm. Centralna valna dužina obično se specificira uz naznačena odstupanja koja mogu iznositi od  $\pm 30$  nm do  $\pm 3$  nm (za određene temperaturno kontrolirane lasere). Izvor emitira signal koji se sastoji od više valnih dužina grupiranih oko centralne valne dužine. Taj pojas valnih dužina naziva se spektralna širina optičkog izvora. Glavni zahtjev koji izvor mora ispuniti je da njegova izlazna snaga mora biti dovoljna da prijamnik signala na krajnjem odredištu detektira signal.

LED izvori emitiraju širi spektar valnih dužina i manje snage te se obično koriste za prijenos signala na kraće udaljenosti (do nekoliko km) po višemodnim svjetlovodnim nitima.

Laseri se zbog svojih boljih karakteristika (vrlo uskog i stabilnog zračenja i veće izlazne snage) koriste za prijenos signala i do 200 km bez uporabe pojačala, većinom za telekomunikacijske sustave s jednomodnim nitima. U današnjim komunikacijskim sustavima koriste se isključivo poluvodički laseri. Najčešći su Fabry Perot laser i laser s povratnom vezom tzv. DFB laser (eng. *distributed feedback*). Izrađuju se od kombinacija kemijskih elemenata iz grupa 13 – 15 periodnog sustava elemenata (indija (In), galija (Ga), arsena (As) i fosfora (P)). Za kraće valne dužine do 870 nm koriste se

kombinacije GaAs/AsGaAs dok se za valne dužine 1310 nm i 1550 nm koriste poluvodiči sastavljeni od InGaAs i InP kombinacija.

### 3.2.4. Optički detektori

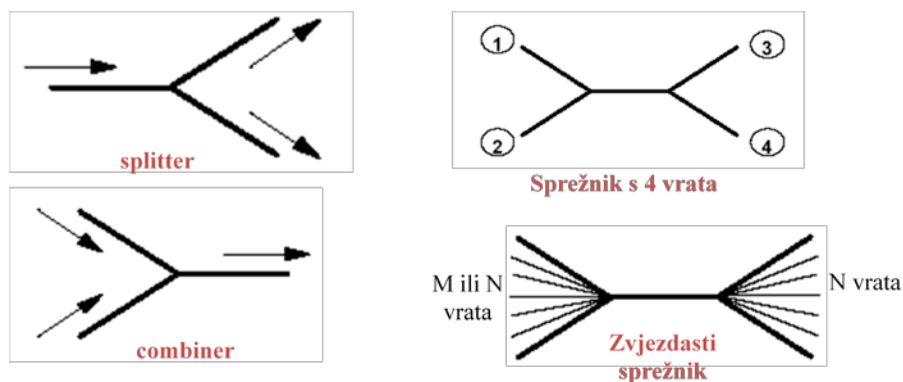
Optički detektori (fotodiode) izvode komplementarnu funkciju od one koju izvode laseri i svijetleće diode. U optičkom detektoru, optička energija pretvara se u električnu energiju. Potom, električni signal može se pojačati korištenjem konvencionalnih elektroničkih pojačala. Najčešće vrste optičkih detektora su: fotodiode p-n tipa, PIN fotodiode i lavinske fotodiode. One se također izrađuju od poluvodiča i to za kraće valne dužine od 850 nm od silicija (Si) te germanija (Ge) i InGaAsP za pojas valnih dužina od 1300 do 1600 nm. U fotodiodama se koristi efekt kojim foton s energijom većom od energetskog procjepa uzrokuje prijelaz elektrona iz valentnog u vodljivi pojas (tzv. apsorpcija). Ukoliko se na fotodiodu narine vanjski napon, tako nastali par elektron-šupljina teći će kroz poluvodič te stvarati električnu struju koja je proporcionalna intenzitetu apsorbirane svjetlosti.

Fotodiode tipa p-n predstavljaju najjednostavniju vrstu detektora i upotrebljavaju se samo za detekciju vidljive svjetlosti. PIN diode mogu se smatrati kao invertirane LED, dok se lavinske fotodiode (*eng. avalanche photodiode-APD*) mogu predstaviti kao ekvivalent laserima. PIN diode su relativno jeftine, dok APD zahtijevaju skuplju popratnu elektroniku te mogu imati i preko 100 puta veće pojačanje.

### 3.2.5. Optičke komponente

U svjetlovodnim sustavima prijenosa osim optičkih izvora i detektora koristi se cijeli niz komponenata baziranih na svjetlovodnoj tehnologiji. To su sprežnici (*eng. couplers*), optičke sklopke (*eng. switches*), izolatori/cirkulatori (*eng. isolators/circulators*), multiplekseri/filteri (*eng. multiplexers/filters*), optička pojačala (*eng. optical amplifiers*), valni konvertori (*eng. wavelength converters*) i optički prospojnici (*eng. optical cross-connects*).

**Sprežnici** su jedan od najjednostavnijih elemenata u optičkom sustavu (pasivni element). Koriste se za razdjeljivanje, spajanje i usmjeravanje signala. Osim engleskog naziva *coupler* koriste se i nazivi *splitter* i *combiner*, ovisno služe li za razdjeljivanje ili sakupljanje signala s dvije na jednu nit (slika 30).



Slika 30: Vrste optičkih sprežnika

Razlikujemo sprežnike osjetljive na valnu dužinu ili selektivne djelitelje i sprežnike neosjetljive na valnu dužinu ili neselektivne djelitelje. Sprežnici osjetljivi na valnu dužinu upotrebljavaju se za sprezanje ili razdvajanje signala različitih valnih dužina u multipleksorima, demultipleksorima ili pri mjerenjima na nitima koje su u radu. Također, koriste se i u optičkim pojačalima za ubacivanje dodatne svjetlosti iz vanjskog izvora na radnu svjetlovodnu nit. Neselektivni sprežnici koriste se za preraspoređivanje svjetlosne snage na više krajnjih uređaja ili kod prijema kontrolnog signala ili signala povratne veze kojim se upravlja snagom optičkog izvora kod optičkih pojačala. Najjednostavniji su djelitelji snage signala 1:2, a oni koji se koriste u javnim pristupnim telekomunikacijskim mrežama povezuju se u kaskadu te postoje sprežnici stupnja sprezanja/dijeljenja 1:8, 1:32, 1:64.

**Optičke sklopke** obično se koriste za preusmjeravanje signala kod testiranja, preusmjeravanja u sklopovima prijenosnih sustava ili kod preusmjeravanja na zaštitne prijenosne sustave. Uobičajeno je to mehanička sklopka koja preusmjerava putanju svjetla. Brzina rada sklopke je vrlo spora, puno manja od tipičnog bitnog intervala. Najjednostavnija im je izvedba s jednim ulazom i jednim ili dva izlaza, a u novijim izvedbama s pomičnim mikro-ogledalima postoje sklopke s 8x8 ulaza/izlaza.

Osnovna zadaća **optičkih filtera** i **multipleksera/demultipleksera** je izdvajanje i ubacivanje svjetlosti određene valne duljine iz i u svjetlovodnu nit. Mogu biti podesivi (*eng. tuneable*) ili fiksno podešeni na jednu valnu dužinu. Postoje razne vrste: Fabry-Perotov podesivi filter, filter s Mach-Zehnderovim interferometrom, Michelsonov filter s rešetkom, akustičko-optički filter.

**Optička pojačala** aktivan su optički element, jer je za njihov rad potrebna dodatna vanjska uzbuda (napajanje elektroničkih elemenata). Optički signal se prigušuje u niti i u optičkim komponentama te može postati preslab za detekciju u prijemu. Zbog toga se u svjetlovodni prijenosni sustav ugrađuju pojačala, uobičajeno na udaljenostima od 100 do 150 km. Sadašnja pojačala pojačavaju signal u optičkoj domeni bez pretvorbe svjetlosnog signala u električni i obratno. Takva pojačala imaju veći pojas pojačanja te pojačavaju sve valne dužine unutar prijenosnog pojasa.

Razlikujemo:

- poluvodička optička pojačala (*eng. Semiconductor Optical Amplifier*), kod kojih se koristi mehanizam stimulirane emisije zračenja što je princip rada poluvodičkih lasera
- optička nitna pojačala (*eng. Optical Fiber Amplifier*), kod kojih je aktivni medij (medij u kojem se obavlja pojačanje) komad specijalne niti spojen na lasersku pumpu. Pri prolasku optičkog ulaznog signala kroz taj dio niti, signal se pojačava. Najpoznatije izvedbe su erbijem dopirano optičko pojačalo EDFA (*eng. Erbium-Doped Fiber Amplifier*) i Raman-ovo pojačalo RFA (*eng. Raman Fiber Amplifier*).

### **3.3. Mjerenja na svjetlovodnim sustavima prijenosa**

#### **3.3.1. Mjerenja na svjetlovodnim nitima i kabelima**

Da bi se osigurao ispravan i pouzdan rad svjetlovodnih niti i kabela tijekom njihova životnog vijeka potrebno je napraviti cijeli niz slijedećih mjerenja i testiranja:

- testiranja mehaničkih karakteristika
- testiranja geometrijskih karakteristika
- mjerenja optičkih parametara
- mjerenja prijenosnih parametara.

Prva tri testiranja od navedenih obavljaju se pri proizvodnji niti i kabela, a zahtijevaju laboratorijske uvjete i instrumente visoke preciznosti. Mjerenja prijenosnih parametara najčešći su oblik mjerenja s kojim se susreću korisnici svjetlovodnih sustava i obavljaju se pri preuzimanju materijala od proizvođača, prije, tijekom i nakon instaliranja te periodično pri ispitivanju ispravnosti sustava koji je u radu. Ta ispitivanja

važna su i kod detekcije i otklanjanja kvarova na prijenosnom mediju i elektronskoj prijenosnoj opremi.

Tablica 2: Mjerenja na svjetlovodnim nitima

Testiranja mehaničkih karakteristika	Testiranja geometrijskih karakteristika	Mjerenja optičkih parametara	Mjerenja prijenosnih parametara
<ul style="list-style-type: none"> <li>- istezanje</li> <li>- uvijanje</li> <li>- savijanje</li> <li>- temperatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- koncentričnost</li> <li>- cilindričnost</li> <li>- promjer jezgre</li> <li>- promjer plašta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- profil indeksa loma</li> <li>- numerička apertura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- pojasna širina</li> <li>- optička snaga</li> <li>- povratni gubitak</li> <li>- kromatska disperzija</li> <li>- polarizacijska disperzija</li> <li>- prigušenje</li> </ul>

### 3.3.2. Mjerenja prijenosnih parametara

#### Mjerne jedinice

Mjerna jedinica koja se najčešće upotrebljava za izražavanje optičkih gubitaka svjetlovoda i prijenosnih uređaja naziva se decibel (dB). Decibeli se računaju prema izrazu (10), gdje su  $P_1$  i  $P_2$  nivoi snage izraženi u vatima (W).

$$dB = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad (10)$$

Decibeli se često koriste u kontekstu odnosa prenesenog signala i šuma (kod lasera i pojačala).

Vrlo često se koristi mjerna jedinica dBm, gdje je dBm broj dB u odnosu na referentnu snagu od 1 mW. Izraz (11) koristi se za određivanje nivoa apsolutne snage, pri čemu se  $P_1$  izražava u mW.

$$P(\text{dBm}) = 10 \log \frac{P_1}{1\text{mW}} \quad (11)$$

Gubitak snage računa se kao razlika dva nivoa snage (izlaznog i ulaznog) prema izrazu (12)

$$\text{Gubitak snage(dB)} = P_{\text{izl}} - P_{\text{ul}} \quad (12)$$

### Mjerni parametri

Da bi se utvrdila mogućnost uporabe svjetlovoda i svjetlovodnih prijenosnih uređaja u prijenosnim sustavima obavlja se nekoliko ključnih mjerenja:

- iznos gubitka snage s kraja na kraj optičkog linka
- iznos prigušenja po jedinici duljine
- iznosi prigušenja konektora, fuzijskih spojeva i sprežnika
- iznos duljine linka odnosno udaljenosti do određenog konektora, spoja i sl.
- optički povratni gubitak
- kromatska disperzija
- polarizacijska disperzija.

### Vrste mjerenja

Mjerenja svjetlovoda na terenu dijele se na tri segmenta: pri instalaciji, održavanju i otklanjanju kvarova.

Prije instalacije svjetlovoda potrebno je provjeriti da kabel preuzet od proizvođača zadovoljava tražene uvjete (duljina, prigušenje, konstrukcija), te da nije oštećen prilikom transporta.

Prilikom instalacije te nakon njenog završetka utvrđuje se kvaliteta izvedenih spojeva i polaganja kabela (prigušenje, pozicija spojeva, montaža kabela i spojnica). Također, mjere se i prijenosne karakteristike da bi se utvrdila sposobnost sustava za prijenos planirane brzine, kapacitet i doseg signala (prigušenje s kraja na kraj, povratni gubitak).

Testovi pri održavanju sustava uključuju periodična mjerenja kako bi se utvrdile eventualne degradacije na kablskom dijelu, povećana prigušenja kabela, fuzijskih spojeva ili konektora. U nekim sustavima, kao što su brodovi i drugi sustavi kojima je održavanje visokog stupnja raspoloživosti od velikog značaja, periodična mjerenja potrebno je provoditi svaki tjedan. Rezultati tih mjerenja spremaju se u bazu podataka te



uspoređuju s prethodnim mjerenjima, čime se može utvrditi tendencija opadanja razine signala ili povremeno pojavljivanje povećanog prigušenja. Time se postiže rano otkrivanje kvarova i uočava slabe elemente u mreži, koji zahtijevaju pojačano održavanje ili izmjenu. Također, mogu se instalirati i automatizirani mjerni uređaji koji prate integritet sustava svakih nekoliko minuta i automatski šalju alarme pri degradaciji signala.

Kod popravaka oštećenja na kablskim sustavima prijenosa najprije se mjerenjem identificira uzrok prekida (predajnik, prijammnik, kabel, konektor, spoj u kablskoj spojnici). Ukoliko se je kvar dogodio na kabelu locira se i točna pozicija kvara usporedbom mjernih rezultata i trase kabela ucrtane u tehničkoj dokumentaciji izvedenog stanja kablске mreže. Nakon popravka provjerava se kvaliteta novih spojeva i kompletne trase kabela.

### **3.3.3. Mjerne metode i uređaji**

Mjerne metode koje se najčešće upotrebljavaju u karakterizaciji svjetlovodnih sustava prijenosa su reflektometrija i interferometrija.

Reflektometrija se bazira na mjerenju povratnog raspršenog signala nastalog na raznim nečistoćama, savijanjima, spojevima i prekidima na svjetlovodnoj niti. Koristi se za mjerenje prigušenja i kromatske disperzije signala, te točno određivanje pozicije kvara na kabelu. Mjerni instrument koji koristi metodu reflektometrije naziva se optički reflektometar (*eng. Optical Time Domain Reflectometer – OTDR*) i uz mjerač optičke snage osnovni je instrument u svjetlovodnim mjerenjima.

Interferometrijska metoda koristi se za mjerenje polarizacijske disperzije i zahtijeva sofisticiranije i skuplje uređaje. Mjerenja se moraju izvoditi priključivanjem optičkog izvora na jedan kraj niti te interferometra na drugi kraj. Kako polarizacijska disperzija predstavlja smetnju tek na prijenosnim brzinama većim od 10 Gbit/s, ovakva mjerenja izvode se samo u javnim telekomunikacijskim mrežama gdje postoje sustavi s velikim prijenosnim brzinama. [19, 20]

### 3.3.3.1. Optički reflektometar

Optički reflektometar (OTDR) je uređaj koji omogućuje detektiranje, lociranje i mjerenje događaja na cijeloj trasi svjetlovodnog kabela. Događaji na niti nazivaju se spojevi, konektori, prekidi, savijanja, nagnječenja, oštećenja, odnosno mjesta na kojima dolazi do degradacije optičkog signala. Prednost mu je što se mjerenja izvode pristupom na nit samo s jednog kraja, na koji se priključuje OTDR, koji u sebi sadrži i predajnik i prijammnik. Standardne udaljenosti na kojima se izvode mjerenja iznose 150 do 200 km a rezolucija je između 4 centimetra i 40 metara.

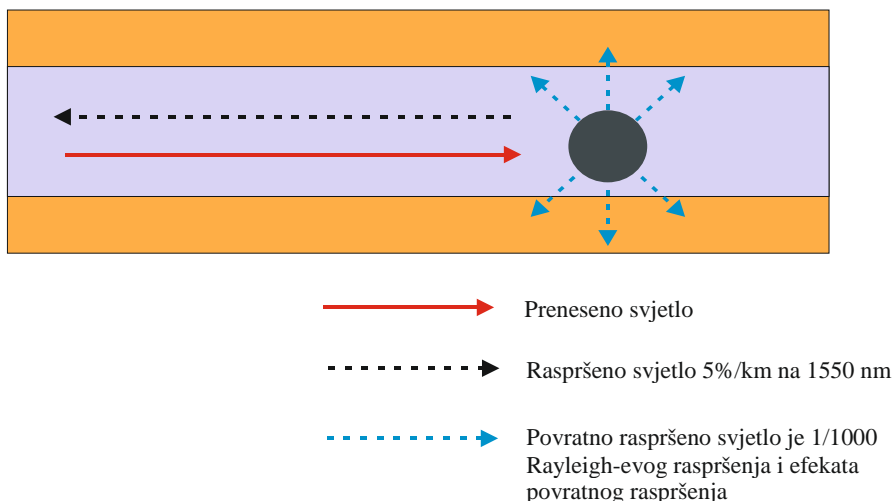
Sposobnost OTDR-a da ispita integritet niti bazira se na detekciji slabog signala koji se vraća u uređaj kao efekt raspršenja jačeg ulaznog signala iz OTDR-a. Taj princip sličan je radarskoj tehnologiji, pa se OTDR naziva i LIDAR (*eng. Light Detecting And Ranging*).

OTDR mjerenja ovise o dvije vrste optičkih fenomena: Rayleigh-evog raspršenja i Fresnel-ove refleksije. Osnovne razlike dvaju navedenih fenomena su sljedeće:

- Rayleigh-evo raspršenje je intrinzično svojstvo materijala i javlja se duž cijele duljine niti. Raspršenje je uniformno duž niti te se diskontinuitet Rayleigh-evog raspršenja koristi za identificiranje anomalija prijenosa signala u niti.
- Fresnel-ova refleksija nastaje samo kada nit dođe u kontakt sa zrakom ili drugim medijem. Ona nastaje na mehaničkim spojevima i konektorima te na prekidu niti.

#### Rayleigh-evo raspršenje i povratno raspršenje

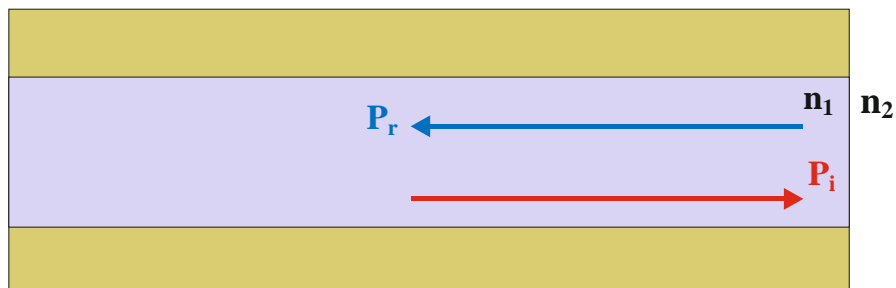
Kada se impuls svjetlosti ubaci u nit, dio fotona rasprši se u slučajnim smjerovima. To se naziva Rayleigh-evo raspršenje. Osim toga, dio svjetlosti rasprši se u smjeru obratnom od širenja impulsa. Taj dio signala naziva se povratno raspršenje. Raspršenje je glavni uzrok gubitku snage signala u telekomunikacijskim sustavima. Uobičajeno, jednomodna nit po kojoj se prenosi signal na 1550 nm, s koeficijentom prigušenja ( $\alpha_s$ ) od 0,20 dB/km, izgubit će 5% prijenosne snage na dionici od 1 km kabelaške trase.



Slika 31: Rayleigh-ovo raspršenje i povratno raspršenje

### Fresnel-ova refleksija i povratna refleksija

Fresnel-ova refleksija nastaje kada se svjetlost reflektira na sučelju dva optički vodljiva materijala s različitim indeksima loma. To se događa na spoju konektora ili na mehaničkom spoju, na nezaključenoj niti ili na prekidu niti. Na slici 32  $P_i$  označava prenesenu optičku snagu a  $P_r$  reflektiranu snagu. Faktor refleksije  $R$  računa se prema izrazu (13).



Slika 32: Fresnel-ova refleksija

Iznos Fresnel-ove refleksije  $R$  ovisi o indeksima loma materijala na kojima nastaje refleksija. Pri prijelazu iz stakla u zrak faktor refleksije  $R$  iznosi približno 4%.

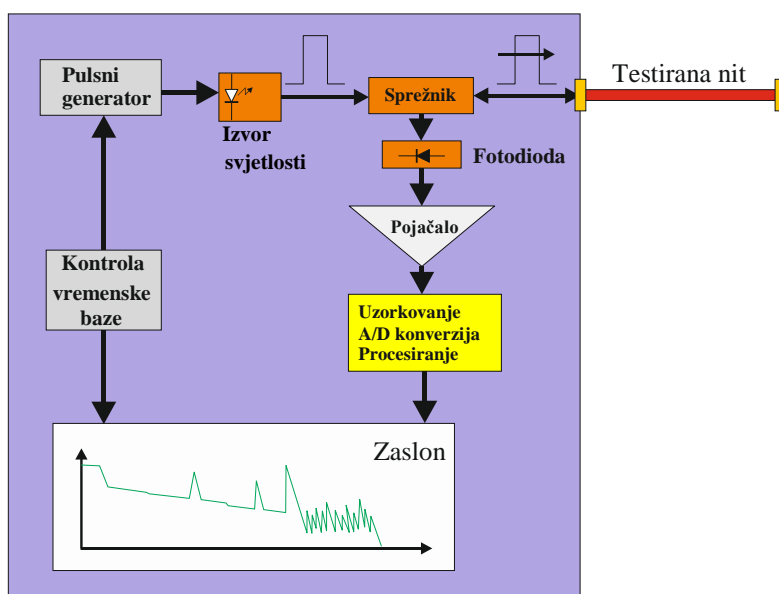
$$R = \frac{P_r}{P_i} = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (13)$$

Povratna refleksija je iznos svjetlosti koja se povratno reflektira od optičkih konektora, mehaničkih i fuzijskih spojeva. Povratna refleksija izražava se u decibelima a računa prema izrazu (14).

$$\text{Povratna refleksija} = 10 \log \frac{P_r}{P_i} \quad (14)$$

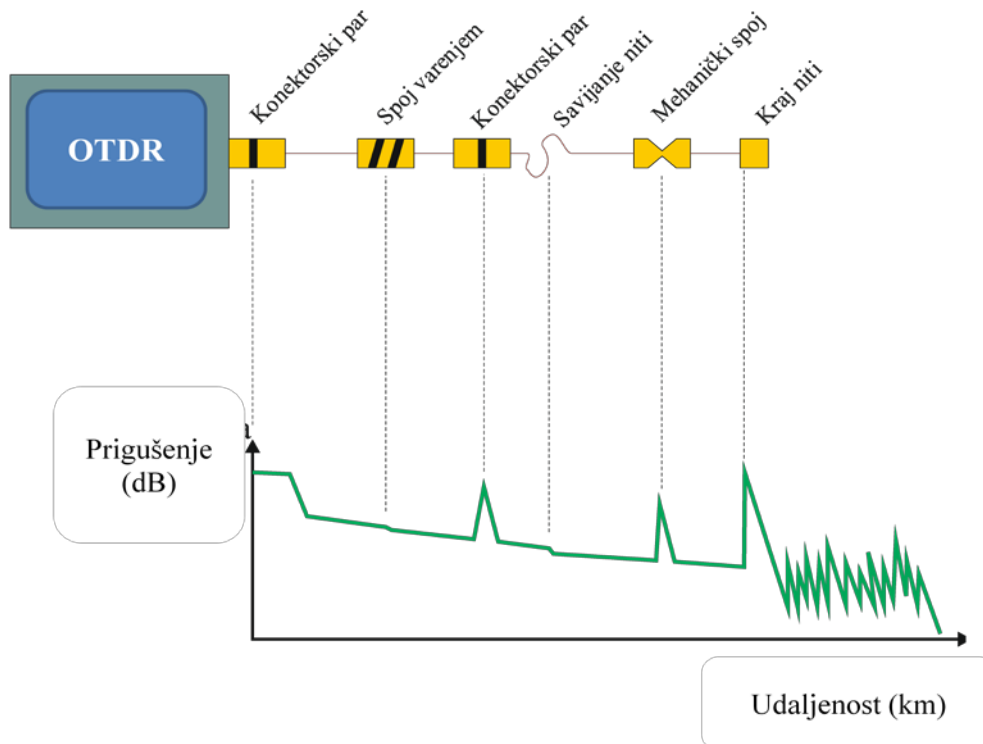
### 3.3.3.2. Princip rada optičkog reflektometra

Optički reflektometar generira svjetlosni impuls i ubacuje ga u svjetlovodnu nit koja se testira. Povratna reflektirana svjetlost razdvaja se od ulaznog signala u optičkom sprežniku i preusmjerava u fotodiodu. Potom se optički signal pretvara u električni, pojačava, uzorkuje i prikazuje na zaslonu instrumenta (slika 33).



Slika 33: Blok dijagram OTDR-a

Na zaslonu OTDR-a prikazuje se krivulja prigušenja optičkog signala u ovisnosti o duljini svjetlovodne niti (slika 34). Na vertikalnoj osi prikazuje se prigušenje izraženo u decibelima a na horizontalnoj osi udaljenost izražena u kilometrima. Na krivulji su vidljivi svi događaji na kompletnoj dužini niti, a oni se manifestiraju naglim promjenama u nagibu krivulje. Stepnasti pad prigušenja nastaje na poziciji fuzijskog spoja ili mjestu pojačanog savijanja kabela ili niti dok špicevi predstavljaju mjesta konektora, mehaničkih spojeva i kraja niti koji je zaključen konektorom. Ukoliko je na niti nastao potpuni prekid ili je nit na svom kraju nezaključena konektorom tada tog špica nema, nego se krivulja samo sagiba do nivoa šuma.



Slika 34: Prikaz prigušenja signala na zaslonu OTDR-a

### 3.3.3.3. Mjerenje optičkim reflektometrom

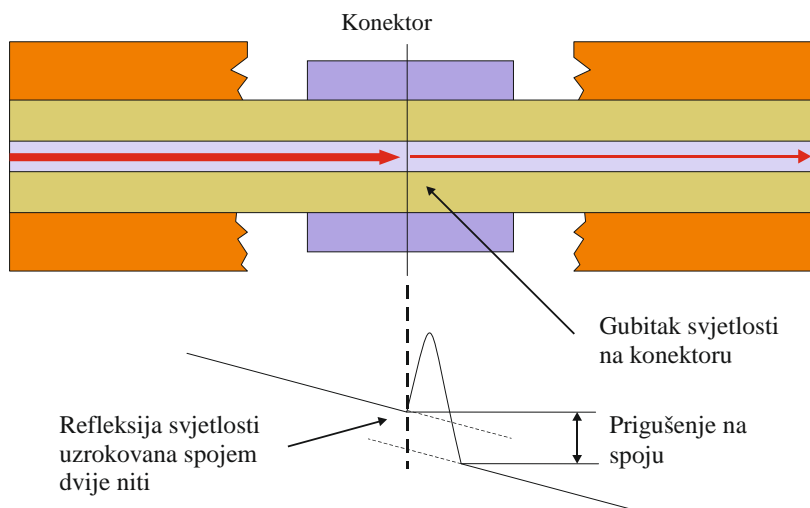
Većina modernih OTDR mjernih uređaja obavlja potpuno automatizirana mjerenja s mogućnošću pohranjivanja i obradom mjernih rezultata standardnim programskim pomagalima na osobnim računalima.

OTDR-om se mogu obaviti sljedeća mjerenja:

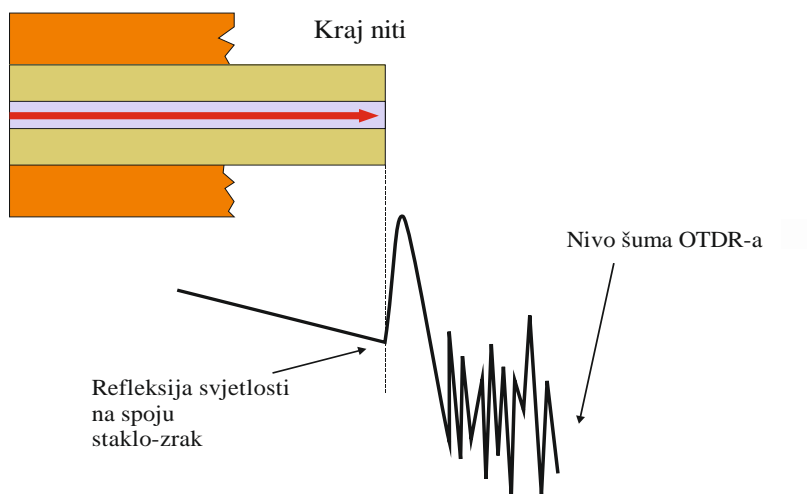
- za svaki događaj na niti: udaljenost do položaja na niti, gubitak, povratnu refleksiju,
- za svaku kabelsku dionicu: duljinu dionice, prigušenje dionice (izraženo u dB i dB/km),
- za kompletan prijenosni sustav: duljinu linka, ukupno prigušenje linka (u dB).

OTDR raspoznaje dva tipa događaja: reflektirajuće i nereflektirajuće.

Reflektirajući događaji nastaju kada se u niti dogodi diskontinuitet i promjena indeksa loma. To se događa na prekidima niti, konektorskim i mehaničkim spojevima ili na krajevima niti koje su zaključene konektorom (slike 35 i 36).

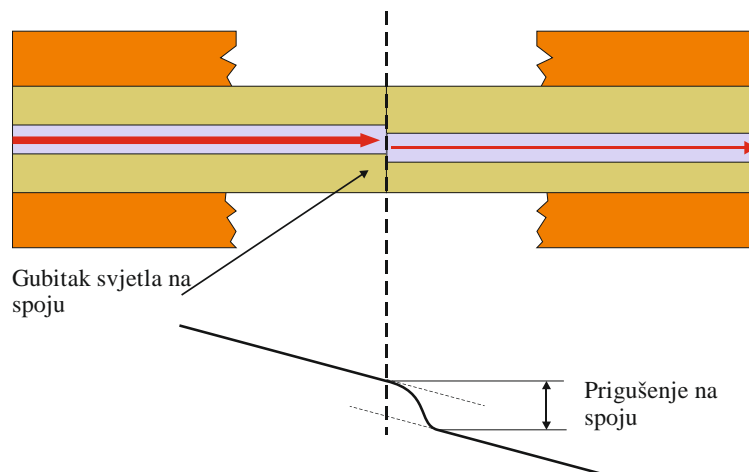


Slika 35: Refleksija na konektorskom spoju



Slika 36: Refleksija na kraju niti

Nereflektirajući događaji nastaju na mjestima gdje ne postoji diskontinuitet u niti. To su fuzijski spojevi niti ili makro savijanja (slika 37).



Slika 37: Nereflektirajući fuzijski spoj niti

### 3.3.3.4. Mjerenje prigušenja mjeranjem snage

Prigušenje optičkog linka određuje maksimalnu dužinu prijenosne dionice, na kojoj je moguće prenijeti određeni signal zadovoljavajuće kvalitete. Zbog toga se mora pojedinačno mjeriti prigušenje svih elemenata koje čine kabelsku dionicu (konektori, spojevi, dionice niti), te ukupno prigušenje linka. Uz poznatu ulaznu snagu signala u nit, mjeri se snaga na izlazu, te razlika ulazne i izlazne snage daje iznos ukupnog prigušenja  $A$  izraženog u dBm, prema izrazu 15.

$$A = P_{ul} - P_{iz} \quad (15)$$



Slika 38: Mjerenje prigušenja mjeranjem snage

Mjerenje prigušenja mjeranjem snage zahtijeva pristup na oba kraja niti, što je vrlo nepraktično u okruženjima s otežanim pristupom do pozicija zaključenja niti.

#### 4. SVJETLOVODNA KOMUNIKACIJSKA MREŽA NA BRODU

Brodski komunikacijski sustavi većinom su opisani kroz stručnu i znanstvenu literaturu u sklopu obrađivanja većih tehničkih cjelina, kao što su sustav upravljanja brodom, sustav poriva, sustav energetske napajanja i distribucije te sustav rukovanja teretom. Obzirom da je komunikacijski sustav samo jedan segment navedenih cjelina, uglavnom je prikazan samo kao sredstvo za prijenos podataka potrebnih za nadzor i upravljanje ili različitih mjernih podataka, bez detaljnijeg opisivanja strukture, elemenata i načina gradnje takve vrste komunikacijske mreže. [21 – 27]

Uvođenje svjetlovodne tehnologije u pomorstvu još uvijek nije zaživjelo u onoj mjeri kao u drugim granama industrije i prometa a poglavito u telekomunikacijama. Najveći dio dostupne literature odnosi se na telekomunikacijski segment uporabe svjetlovodnih sustava za prijenos informacija. Na primjerima telekomunikacijske mreže razrađen je cijeli niz modela i algoritama za izračun raspoloživosti, optimizacije i pronalaženja najkraćih putova kroz mrežu te metoda za zaštitu i obnavljanje prometa. Također, vidljiv je i nedostatak podataka iz prakse te se istraživanja uglavnom temelje na pretpostavkama i simulacijama idealiziranih modela mreža. Drugi vid uporabe svjetlovoda kao mjernih senzora za različite električne i neelektrične veličine, obrađuje se u publikacijama koje opisuju metode mjerenja i primjenu u različitim okruženjima. Najveći dio odnosi se na primjene u građevinarstvu, visoko-naponskoj elektroenergetici i industriji za proizvodnju nafte i plina.

Predmetni doktorski rad bavi se istraživanjem i analizom primjene svjetlovodnih sustava prijenosa informacija u povezivanju brodskih sustava te izradom modela i izračunom raspoloživosti komunikacijske mreže. Iz navedenog proizlazi potreba definiranja strukture i komponenata mreže, načina njezine gradnje, nadzora i održavanja.

Kako bi se ostvario kvalitetan prijenos signala potrebno je prije instaliranja sustava proračunati ukupno prigušenje na kabelskom dijelu mreže. U proračun treba uključiti prigušenja svih komponenata u mreži od izvorišta do odredišta, te ustanoviti da li signal na odredištu ima dovoljan nivo snage za ispravnu detekciju u prijammiku.



## 4.1. Primjena

Svjetlovodna tehnologija je zbog svojih izrazitih transmisijskih i konstrukcijskih prednosti nad konvencionalnim tehnologijama opravdano stekla široku primjenu u svim granama tehnologije. Neosjetljivost na vanjska elektromagnetska polja, male dimenzije i jednostavna instalacija u vrlo zahtjevan okoliš, kao što je brod, uz praktički neograničen kapacitet prijenosa informacija, te sve jeftinije komponente, dovesti će do sve veće ugradnje takve tehnologije na novim brodovima kao i zamjenu konvencionalnih „bakrenih“ mreža na postojećim brodovima.

U ovom poglavlju detaljnije su opisana dva primjera postojećih svjetlovodnih mreža, koji zbog svoje primjene, topologije, načina izgradnje te ugrađenih kabela i uređaja mogu poslužiti kao model za komunikacijske mreže i za druge vrste brodskih sustava. To je moguće zbog činjenice da se prijenos svjetlovodnog signala, prijenosni medij, svjetlovodna nit te optički primopredajnici ne razlikuju obzirom na vrstu primjene odnosno krajnjih uređaja koji se tom mrežom povezuju.

Prvi primjer je ugradnja svjetlovodnih mreža na putničke RO-RO brodove (*eng. Roll On – Roll Off*), uobičajenog naziva trajekti (*eng. ferryboats*). Ova primjena odnosi se na uporabu svjetlovoda za prijenos informacija u sustavu nadzora, alarmiranja i daljinskog upravljanja brodskim motorima.

Drugi primjer je sustav kableske televizije na putničkom brodu izveden svjetlovodnim kabelom kao zasebna svjetlovodna mreža. U ovom slučaju radi se o zamjeni koaksijalnih kabela za prijenos TV signala s novim svjetlovodnim sustavom.

### 4.1.1. Svjetlovodna komunikacijska mreža za upravljanje brodskim motorima

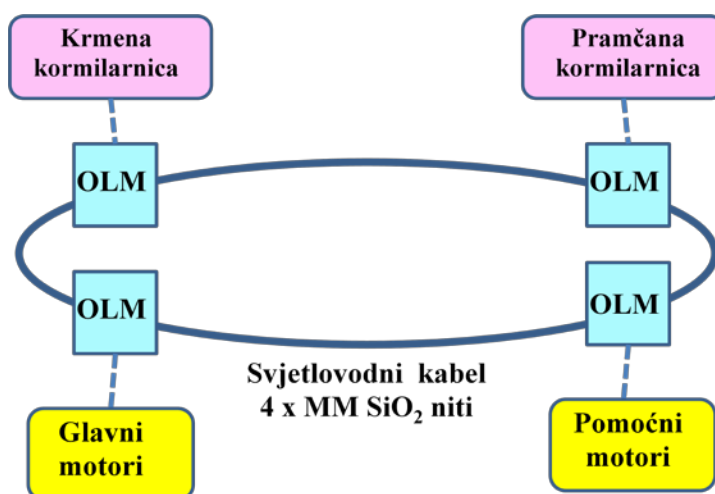
Komunikacijska mreža za upravljanje brodskim motorima ugrađena je na trajekt „Hrvat“ kompanije „Jadrolinija“, društva za linijski pomorski prijevoz putnika i tereta na Jadranu (slika 39). Opisana mreža ugrađivana je na novogradnju trajekta u Brodogradilištu „Kraljevica“, a isto tako ovakve mreže ugrađivane su i na ostale slične trajekte „Jadrolinije“.



Slika 39: Trajekt „Hrvat“

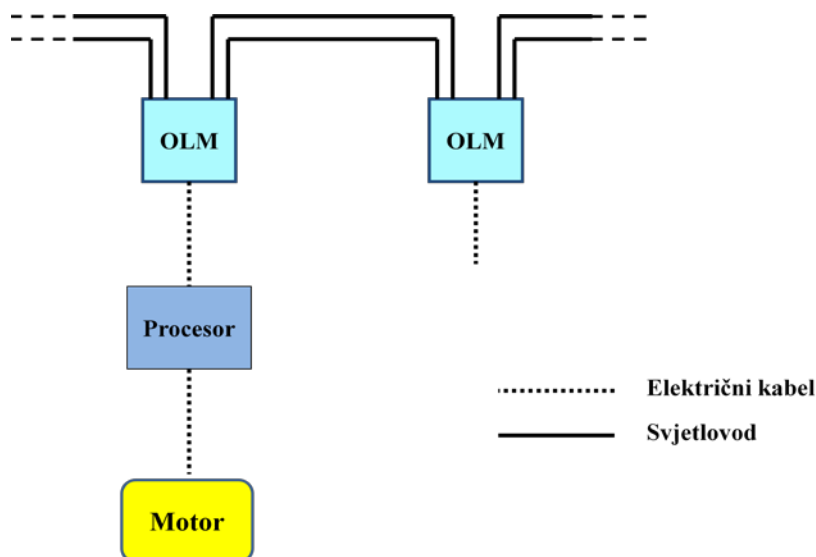
Trajekt „Hrvat“ je dužine preko svega 87,6 m, maksimalne širine 17,5 m, gaza 2,4 m, kapaciteta 1200 putnika i 138 standardnih vozila. Specifičnost mu je što ima pramčanu i krmenu kormilarnicu a opremljen je s 4 glavna i 3 pomoćna motora. Komunikacijska mreža namijenjena je prijenosu informacija iz procesora glavnih i pomoćnih motora u glavni procesor, koji se nalazi u pramčanoj kormilarnici. Procesori sakupljaju i obrađuju mjerne podatke s motora (broj okretaja i temperaturu motora), te ih električnim vodom prenose do optičkog linijskog modula OLM-a (*eng. Optical Line Modul*). U OLM-u se električni signal pretvara u optički, te se putem svjetlovoda signali iz svih optičkih modula prenose do glavnog procesora (slika 40).

U predstavljenu komunikacijsku mrežu trajekta ugrađeno je 360 m specijalnog svjetlovodnog kabela LSZH tipa (*eng. Low-Smoke Zero Halogen*) sa 4 multimodne niti promjera 50/125  $\mu\text{m}$  te 11 OLM-ova.



Slika 40: Blok shema svjetlovodne komunikacijske mreže za upravljanje brodskim motorima

Na slici 41 prikazana je blok shema spajanja OLM-a na procesor i motor. Motor i procesor s OLM-om povezani su električnim kabelom. U OLM-u se električni signal pretvara u svjetlosni te se OLM-ovi međusobno povezuju svjetlovodom. Svi optički moduli povezani su u konfiguraciju prstena kako bi se zaštitio prijenosni put u slučaju prekida kabela.



Slika 41: Blok shema spajanja OLM-a na procesor i motor

Na jedan OLM spojen je glavni motor i pripadni procesor koji nadzire, kontrolira, sakuplja i obrađuje mjerne podatke tog motora. Digitalni ulaz procesora mjeri frekvenciju motora. Na osovini motora nalazi se zupčanik s induktivnim senzorom (slika 42). Induktivni senzor detektira prolaženje zupca zupčanika u neposrednoj blizini i pri svakom njegovom prolasku odašilje električni signal prema procesoru. Procesor broji i obrađuje impulse dobivene iz induktivnog senzora. Dobiveni signal se u OLM-u pretvara u svjetlosni signal koji se svjetlovodom prenosi do glavnog procesora. Glavni procesor na taj način prikuplja podatke i sa svih ostalih procesora glavnih i pomoćnih motora, pregledava ih i uspoređuje, a u slučaju prekoračenja određenih vrijednosti uključuje odgovarajuće alarme. Sve te informacije i alarmi prikazuju se na monitorima na pultu pramčane kormilarnice.

Temperatura je još jedna neelektrična veličina koju nadzire procesor glavnog motora. Temperatura motora se pretvara u procesoru u električni napon. Za 0 °C određena je vrijednost napona od 0,12 V, a 100 °C odgovara vrijednosti napona od 0,5 V. Za određenu temperaturu motora procesor će primiti odgovarajući iznos napona na

digitalnom ulazu. Taj podatak procesor obrađuje i predaje OLM-u, gdje se pretvara u svjetlosni signal i prenosi do glavnog procesora.

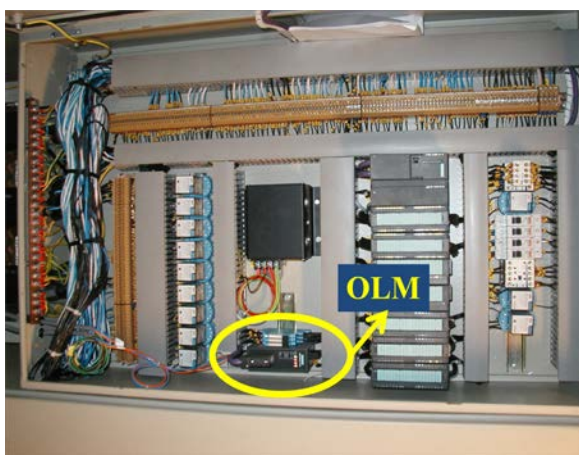
Daljinsko upravljanje brojem okretaja motora i temperaturom, koje stižu na glavni procesor preko svjetlovodne mreže, izvodi se s pulta upravljanja motorima koji se nalazi na komandnom mostu (slika 45).



Slika 42: Induktivni senzor za mjerenje okretaja motora



Slika 43: Alarmna podstanica



Slika 44: Razvodna ploča za prikupljanje alarmnih vrijednosti



Slika 45: Pult upravljanja motorima

#### 4.1.2. Primjena svjetlovoda u sustavu satelitske televizije

Primjena svjetlovoda u povezivanju prijavnika satelitske televizije s kontrolnim uređajem za kontrolu i pozicioniranje satelitske antene prikazana je na primjeru putničkog broda „Legend of the Seas“, kompanije „Royal Caribbean International's“. Brod ima kapacitet prijevoza 2076 putnika i 800 članova posade, a dužina mu je 264 m. Prilikom izgradnje broda satelitski TV sustav bio je izveden koaksijalnim kabelima koji su se zamijenili opisanim svjetlovodnim sustavom. Na slici 46 prikazan je brod s naznačenim pozicijama satelitske TV antene i TV stanice.

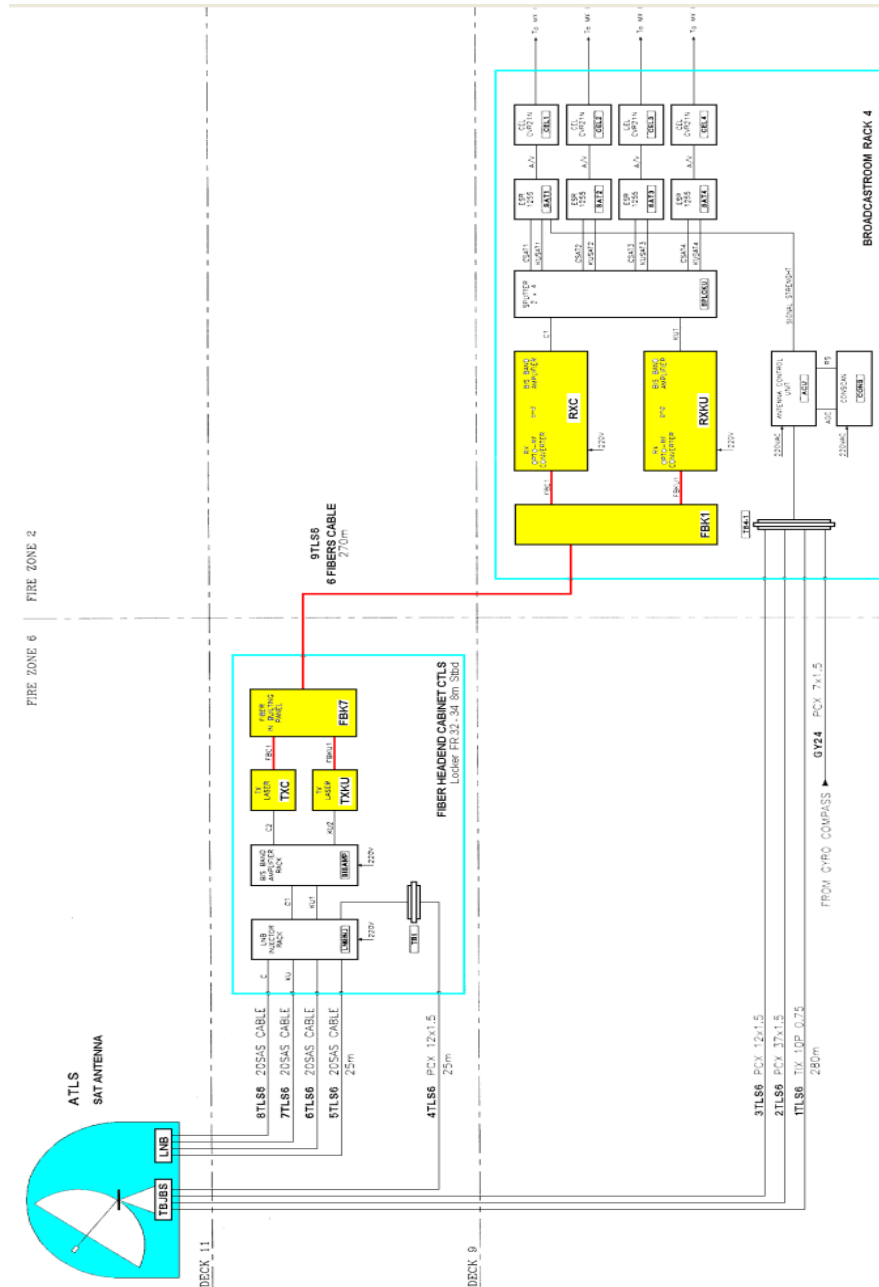


Slika 46: Putnički brod „Legend of the Seas“

TV SAT antena nalazi se na krmnom dijelu broda u visini najviše 11. palube. Njezina lokacija omogućava dobar prijem zbog dovoljne udaljenosti od jarbola i dimnjaka kao i od smetnji pramčanih navigacijskih radara.

TV stanica je smještena na 3. palubi u pramčanom dijelu broda. Ukupna kabelska udaljenost iznosi oko 270 m. Za prijenos SAT signala u frekventnom pojasu od 900 do 2300 MHz koristi se svjetlovod s 6 niti. Ukoliko bi se koristili koaksijalni kabeli, gušenje na takvoj udaljenosti bi iznosilo između 33 i 57dB za kabele srednje kvalitete promjera 10 mm, te između 17 i 30 dB za koaksijalne kabele najbolje kvalitete promjera oko 20 mm i težine oko 327 kg/km. Međutim, takvi kabeli su "kruti" za postavljanje na brodovima jer ih je teško provlačiti, a i minimalni radijus savijanja je 25 cm. Svjetlovodom na toj dužini ostvaruje se zanemarivo gušenje manje od 0,2 dB.

Uzimajući u obzir da je potrebno istovremeno prenijeti 6 različitih SAT frekvencijskih opsega (6 linija) primjena svjetlovođa je neophodna. Električna shema povezivanja satelitskog prijamnika i TV stanice svjetlovodnim sustavom prikazana je na slici 47.



Slika 47: Električna shema satelitskog TV sustava

## Komponente satelitskog antenskog sustava

**SAT antena** - Satelitski kanali primaju se preko parabolične antene promjera 3,7 m (slika 48). Antena pokriva C, Ku low band i Ku high band na H i V polarizaciji. Takva antena ima pojačanje od 50,3 dB na 11,25 GHz. Takvo veliko pojačanje je potrebno da bi se ublažila fluktuacija jačine signala zbog njihanja broda na moru, primanje slabijih signala izvan centra emitiranja satelita te povećani iznos signal/šum zbog neizbježnih gubitaka prolaska signala kroz elektronske sklopove.



Slika 48: Parabolična satelitska antena sa zaštitnom kupolom

**Optički predajnik TXC / TXKU** - Optički predajnik TXC za C band i TXKU za Ku band pretvaraju radio frekventni signal u opsegu od 900 do 1450 MHz i od 900 do 2300 MHz u optički signal valne dužine 1310 nm (slika 49).

**Optički prijamnik RXC / RXKU** - Signal iz razvodne kutije FBK1 pojedinačnim svjetlovodnim kabelima ulaze u pojedine optičke prijamnike RXC / RXKU. Tu se svjetlosni signal pretvara u visokofrekventni radio-signal frekvencije od 900 do 23.000 MHz (slika 50).

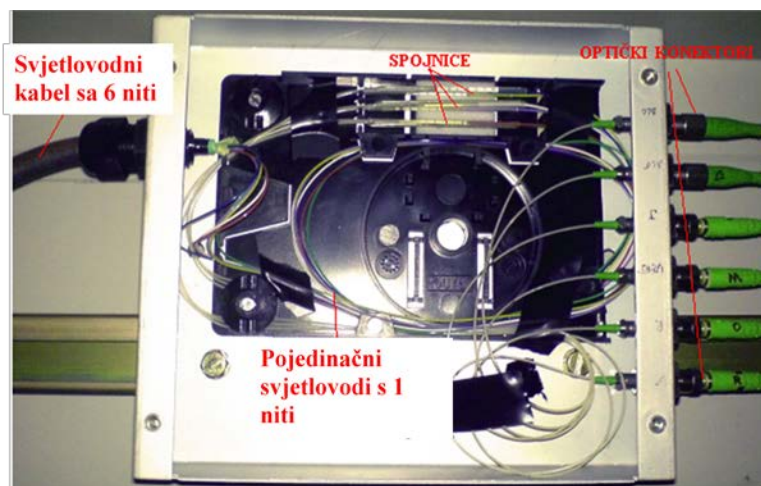


Slika 49: Optički predajnik



Slika 50: Optički prijamnik

**Optička razdjelna kutija** (eng. *Fiber building panel*) (**FBK7 / FBK1**) - Pojedinačni svjetlovodni kabele dolaze u optičku razdjelnu kutiju panela FBK7 gdje se optičkim spojnicama spajaju na svjetlovodni kabel koji dovodi signale do TV stanice. Tu se ponovo optički kabel razdvaja na pojedinačne kabele s jednom niti u razvodnoj kutiji FBK1 (slika 51).



Slika 51: Optička razdjelna kutija (FBK7 / FBK1)

**Kontrolni uređaj za pozicioniranje antene** (eng. *Antena control unit*) - Pored uređaja za distribuciju signala postoji i kontrolni uređaj za pozicioniranje antene koji prima signal sa GPS-a i žirokompasa dajući mu informaciju za traženje satelita. Kontrolni uređaj također prima informaciju sa SAT prijamnika sa zadaćom da održava u fokus izabrani satelit. Veza između antene i kontrolnog uređaja ostvarena je žičanom vezom, a u zadnje vrijeme i to je zamijenjeno svjetlovodnim kabelom.



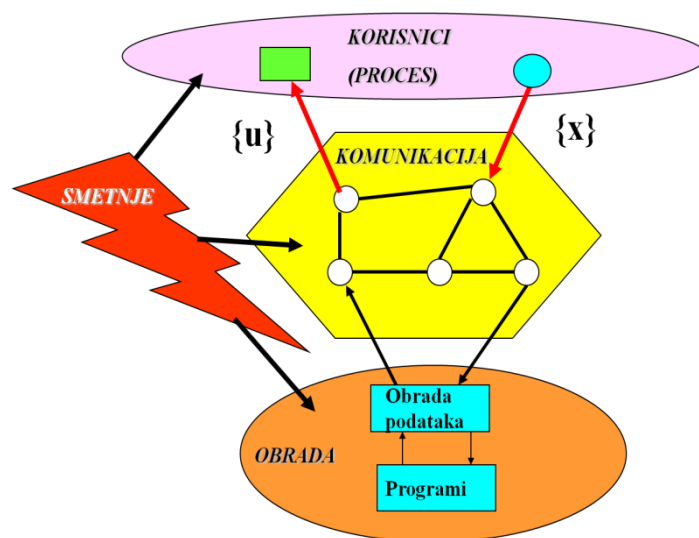
Slika 52: Kontrolni uređaj za kontrolu i pozicioniranje SAT antene



Važno je napomenuti da TV SAT distribucija ima važnu ulogu na brodu iako ne pripada dijelu uređaja za upravljanje brodom. Distribucija raznojezičnih TV kanala omogućava bolje psihofizičko raspoloženje posade i putnika jer se time ne gubi osjećaj da se nalaze na pučini, izolirani od kopna te mogu kontinuirano pratiti vijesti iz svoje zemlje i inozemstva.

## 4.2. Struktura mreže

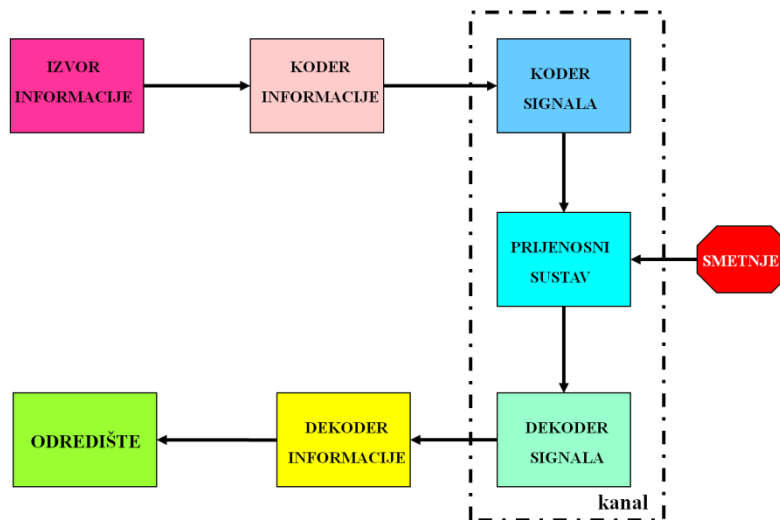
Velikim sustavima može se efikasno upravljati odgovarajućom organizacijom informacijskih mreža. Informacijska mreža obavlja funkcije: prikupljanja, pohranjivanja, prijenosa, usmjeravanja i obrade informacija za korisnike (proces) koji čine sustav. Izvori podataka vezani su uz skup korisnika (proces). Od korisnika se podatci uzimaju putem kontrolnih uređaja (terminalnih predajnika). Skup prikupljenih podataka  $\{x\}$ , opisuje stanje procesa i čini ulazni tok informacijske mreže. Podatci se prenose putem komunikacijske mreže do sustava za obradu podataka, gdje se obrađuju prema određenim algoritmima, uz korištenje baze podataka. Rezultati obrade (skup rezultata  $\{u\}$ ) predaju se putem komunikacije odredištima (terminalnim predajnicima). Nakon toga se izvodi odgovarajući utjecaj na sam proces. Na sve navedene operacije u mreži utječu smetnje i dovode do pogrešaka (slika 53). [28, 29, 30]



Slika 53: Struktura mreže

Zadaća je mreže ostvarivanje komunikacije i pružanje informacijske i/ili komunikacijske usluge uporabom jednog ili više oblika informacija, odnosno jednim ili više medija: govor, zvuk, slika, video, tekst ili podatak.

Brodске komunikacijske mreže većinom su jednosmjerne te se mogu predočiti blok shemom jednosmjernog komunikacijskog sustava prikazanog na slici 54.



Slika 54: Jednosmjerni komunikacijski sustav

**Izvor informacije** je bilo kakav objekt ili operator koji generira informacije. Informacija o stanju nekog sustava ili o bilo kojem drugom događaju može sadržavati razne podatke i imati najrazličitije oblike (govor, glazba, tekst, brojevi, slike, upravljačke naredbe i sl.). Informacije po obliku dijelimo u dvije skupine: diskretne i kontinuirane.

Diskretne informacije izražavaju se nizovima sastavljenim od konačnog broja elementarnih simbola. Takav potpuni skup elementarnih simbola naziva se abeceda. Primjer za diskretne informacije je telegrafija. Kod nje su elementarni simboli dva ili više različitih elementarnih impulsa. Pomoću njih prikazujemo znakove abecede, koji opet čine posebni skup diskretnih simbola. Isto tako, i telemetrija je primjer diskretnih informacija. Telemetrijom se prenose rezultati mjerenja nekog parametra, koji može poprimiti diskretni niz brojčanih vrijednosti, a pod simbolima podrazumijevamo brojke. U decimalnom sustavu abeceda sadrži 10 simbola, a u binarnom sustavu 2 simbola.

Kontinuirane informacije izražavaju se vremenskim funkcijama koje poprimaju neprekinuti skup vrijednosti. Primjeri kontinuirane informacije su prijenos govora, glazbe, televizija i telemetrija (u slučaju da prenosimo rezultate mjerenja parametara

čija se vrijednost mijenja kontinuirano). Kontinuirane informacije možemo s određenom pogreškom pretvoriti u diskretne, npr. pomoću postupka kvantiziranja. Karakterističan primjer za to je prijenos govora odnosno pretvorba analognog signala u digitalni postupkom pulsno-kodne modulacije PCM (*eng. Pulse Code Modulation*).

Većina današnjih prijenosnih sustava koristi digitalni način prijenosa podataka. Digitalni signal je slijed diskretnih, diskontinuiranih naponskih impulsa. Svaki impuls predstavlja jedan signalni element.

**Koder informacije** ima funkciju prikazivanja informacije u nekom od standardnih oblika, npr. u obliku slijeda simbola abecede. Najčešće je to slijed binarnih simbola 0 i 1.

**Koder signala** služi za transformaciju kodirane informacije u signal koji je prilagođen za predaju putem prijenosnog sustava, npr. svjetlost u optici i radio-valovi kod bežičnog prijenosa.

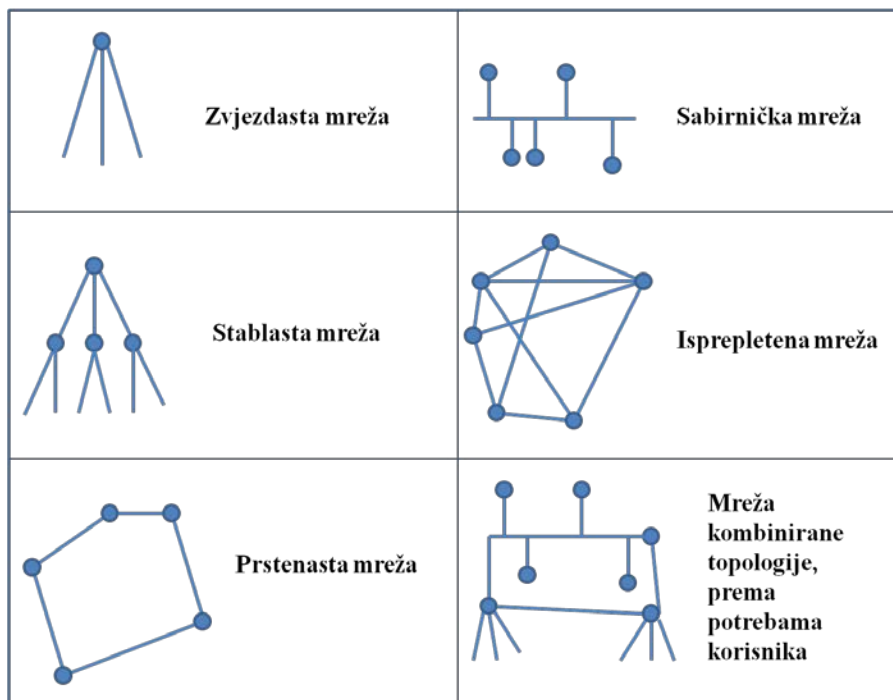
**Prijenosni sustav** je medij putem kojeg se prenose signali od izvora do točke prijema. Mediji za prijenos signala u komunikacijskim mrežama uobičajeno su bakreni kabeli, svjetlovodi, radio-sustavi i sateliti.

Na putu kroz prijenosni sustav signali su podložni najrazličitijim **smetnjama**. Zbog djelovanja smetnji signal se na izlazu iz prijenosnog sustava ne može jednoznačno podudarati sa signalom na ulazu, pa se na osnovi primljenog signala može s određenom vjerojatnošću samo pretpostaviti predaja nekog signala. Zadatak je koder signala da se ostvari takva transformacija kodirane informacije u signal koji će dati minimalnu pogrešku pri određivanju pravilne informacije na izlazu prijenosnog sustava.

**Dekoder signala** i **dekoder informacija** izdvajaju informaciju iz primljenog signala i pretvaraju je u oblik koji je prikladan za analizu u prijammniku.

### 4.3. Topologija mreže

Prema topologiji mreže razlikujemo zvjezdaste, stablaste, prstenaste, sabirničke i isprepletene mreže. U brodskim mrežama najčešće susrećemo mreže točka-točka (*eng. point to point*), koje su u stvari najjednostavniji oblik zvjezdaste mreže sa samo jednim linkom, te prstenaste mreže. Na slici 55 grafički su prikazane osnovne topologije mreža.



Slika 55: Podjela mreža prema topologiji

#### 4.4. Komponente mreže

Osnovne komponente brodskih svjetlovodnih komunikacijskih mreža su optički linijski uređaji, svjetlovodni kabeli i niti te spojni materijal (konektori, mehaničke spojnice, paneli za spajanje kabela). Posebno su opisani optički uređaji i svjetlovođi zbog njihove specifičnosti u konstrukciji, instalaciji i spajanju, dok spojni materijal je standardan kao i za sve svjetlovodne telekomunikacijske i računalne mreže.

##### 4.4.1. Optički linijski moduli

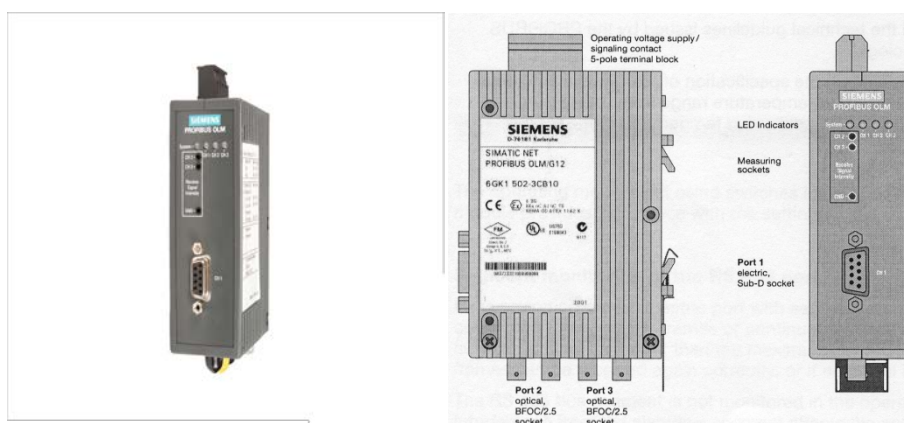
Optički linijski modul koristi se za pretvaranje električnih veličina u svjetlosni signal, te povezivanje više istovrsnih modula svjetlovodnim kabelom u komunikacijsku mrežu. Uobičajeno imaju jedan električni ulaz te jedan ili dva optička ulaza. Mogu se povezivati različitim vrstama svjetlovodnih niti a maksimalne udaljenosti između dva modula ovisno o vrsti niti prikazani su u tablici 3. Svjetlovodne niti spajaju se na linijski modul standardnim SC konektorom promjera ferule 2,5 mm.

Tablica 3: Vrste svjetlovodnih niti i maksimalne udaljenosti između dva modula

Vrsta svjetlovodne niti	Maksimalne udaljenosti između dva modula
Plastična nit 980/1000 $\mu\text{m}$	80 m
PCF nit 200/230 $\mu\text{m}$	400 m
Staklena nit 9/125 $\mu\text{m}$	15 km
Staklena nit 50/125 $\mu\text{m}$	3 – 10 km
Staklena nit 62,5/125 $\mu\text{m}$	3 – 10 km

Brzine prijenosa koje podržava standardni optički linijski modul su: 9,6 kbit/s, 19,2 kbit/s, 45,45 kbit/s, 93,75 kbit/s, 187,5 kbit/s, 500 kbit/s, 1,5 Mbit/s, 3 Mbit/s, 6 Mbit/s i 12 Mbit/s.

Na slici 56 prikazan je optički linijski modu tipa OLM / G12 proizvođača „Siemens“, Njemačka.



Slika 56: Optički linijski modul OLM / G12 proizvođača „Siemens“

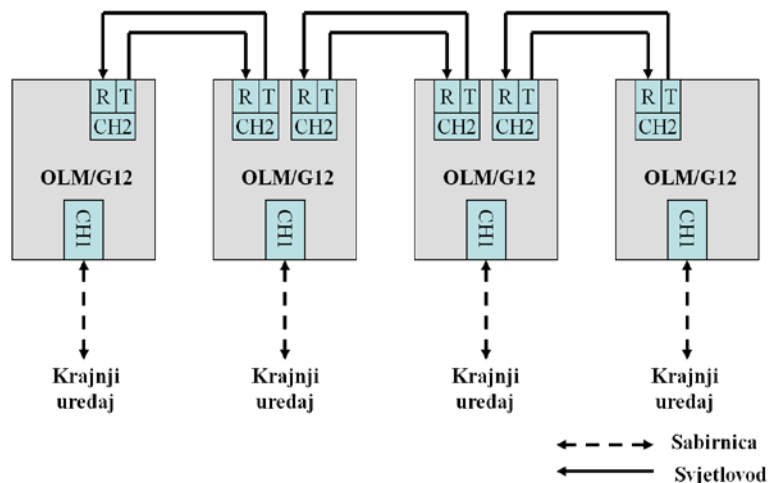
OLM moduli mogu se montirati na 35 mm nosače ili direktno na ravnu podlogu. Uobičajeno se montiraju u kabelske razvodne ormare do kojih se lako pristupa, te je zamjena neispravnog OLM-a vrlo jednostavna.

S OLM modulima mogu se izvesti slijedeće mrežne topologije: točka-točka, linijska (spajanje u seriju), zvjezdasta i prstenasta.

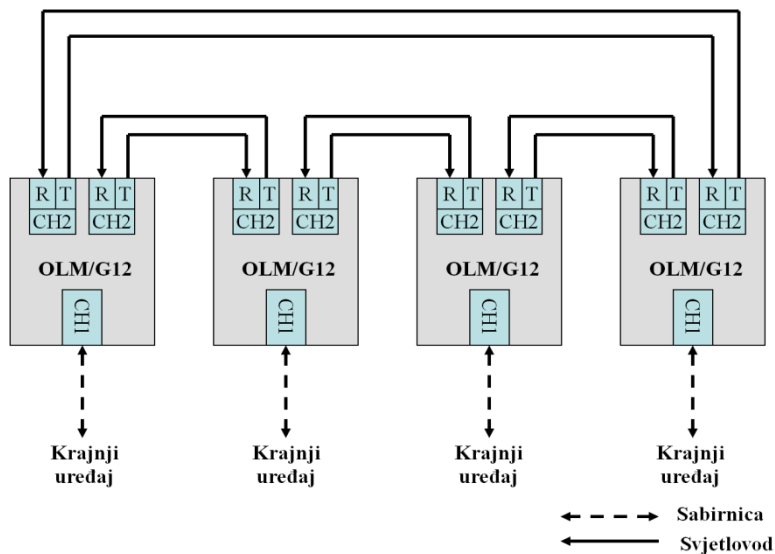
Ukoliko razmatramo pouzdanost i raspoloživost mreže svakako je najbolje linijske module povezati u prsten (slika 58). Na taj način osigurava se rad mreže u slučaju kvara ili prekida na svjetlovodu ili OLM-u. Prekid jedne ili obje svjetlovodne niti između modula, OLM detektira, a prsten se transformira u liniju, odnosno u serijsku

strukturu. Kvarom jednog modula, samo sabirnice ili uređaji koji su spojeni na modul isključeni su iz prstena. Ostatak mreže nastavlja raditi u linijskoj topologiji.

Kod mreže s linijskom topologijom OLM-ovi su povezani u seriju s dvije svjetlovodne niti. Na početku i na kraju linije dovoljni su moduli s jednim optičkim ulazom, dok OLM-ovi u sredini moraju imati dva optička ulaza (slika 57).



Slika 57: Struktura mreže s linijskom topologijom



Slika 58: Struktura mreže s topologijom prstena

#### 4.4.2. Svjetlovodni kabeli za primjenu na brodu

Brodski kabeli podijeljeni su u grupe vezano uz njihovu uporabu i karakteristike. Najveće dužine kabela koji se ugrađuju na brod odnose se na energetske i signalne kabele čije ukupne dužine iznose od 150 do preko 250 kilometara. Telekomunikacijski kabeli većinom su bakreni ili koaksijalni, no njih možemo zamijeniti svjetlovodima te time osim povećanja prijenosnog kapaciteta i pouzdanosti veza smanjujemo zapreminu i težinu kabela čak za 90% u usporedbi s klasičnim bakrenim kabelima.

Svjetlovodni kabeli se na brodovima koriste za prijenos podataka u komunikacijskim mrežama, koje mogu biti fiksne ili privremene. Svjetlovodi, osim prethodno navedenih prijenosnih i konstrukcijskih prednosti u odnosu na klasične bakrene kabele, moraju biti otporni na vodu i koroziju, ne smiju podržavati gorenje, imaju malu emisiju dima te pojačanu savitljivost i mehaničku otpornost. Kapacitet im je obično od 2 do 48 jednomodnih (SM) ili višemosmodnih (MM) niti. Kabeli takvih karakteristika pogodni su i za polaganje na platformama za bušenje nafte i plina u podmorju, te terminalima i brodovima za prijevoz ukapljenog plina.

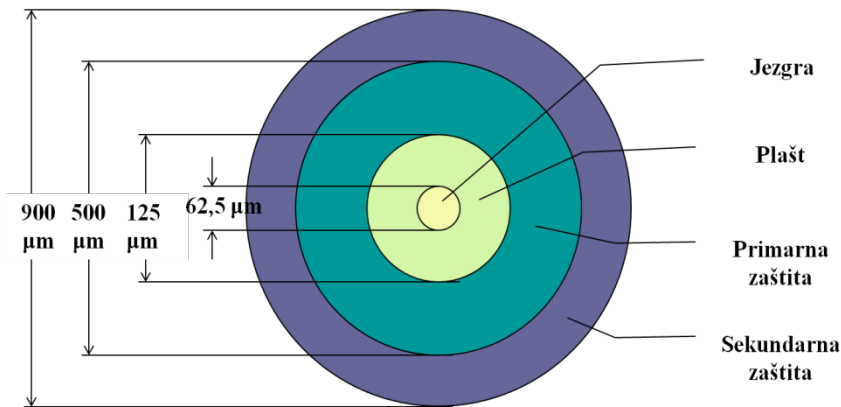
Na brodovima se najčešće polažu kabeli tipa LSZH (*eng. Low-Smoke Zero Halogen*), odnosno kabeli sa smanjenim ispuštanjem dima i otrovnih plinova pri zapaljenju. Uz to imaju i pojačanu otpornost na naftu, struganje, vlagu, sunčevo svjetlo, prljavštinu, gnječenje i udarce. To se postiže oblaganjem niti višestrukim zaštitnim i vodonepropusnim slojevima (slike 60, 61).

Na slici 59 prikazani su svjetlovodni kabeli za primjenu na brodovima i platformama, s različitim tipovima zaštite, proizvodnje tvrtke „General Cable“ iz SAD-a.

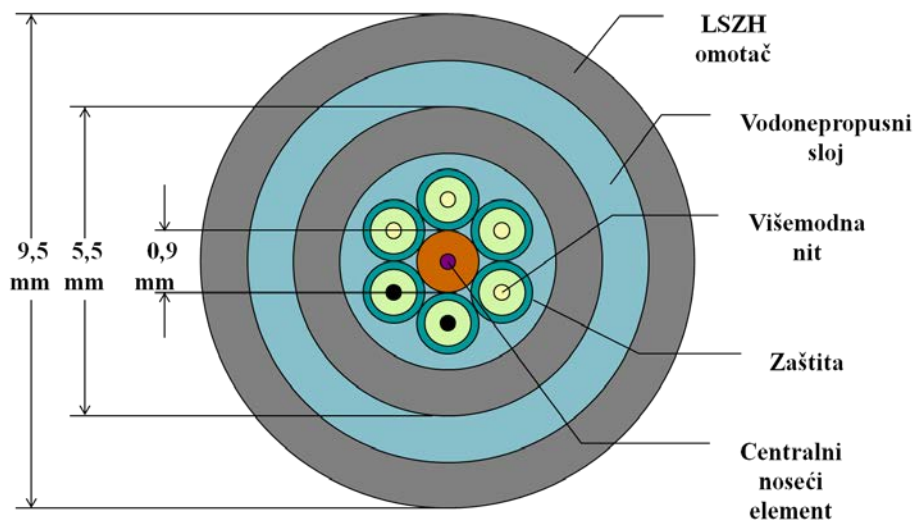


Slika 59: Svjetlovodni kabeli za primjenu na brodovima i platformama

Izvor: *Commodore-Offshore and Marine Shipboard Cables*, [www.generalcable.com](http://www.generalcable.com)



Slika 60: Presjek svjetlovodne višemodne niti promjera 62,5/900 μm



Slika 61: Presjek svjetlovodnog LSZH kabela s 4 višemodne niti

U tablici 4 navedene su neke tipične prijenosne i konstrukcijske karakteristike svjetlovoda za primjenu na brodovima. Težina kabela i polumjer savijanja ovisi o vanjskom promjeru kabela te vrsti i broju zaštitnih omotača, dok ostale navedene konstrukcijske karakteristike mogu neznatno odstupati ovisno o proizvođaču. Prijenosne karakteristike, prigušenja na radnim valnim dužinama, moraju biti u skladu sa standardima navedenim u ITU-T preporukama za jednomodne i višemodne niti. Na taj način osigurava se da su sve niti ugrađene u kabele različitih proizvođača istovjetne po svojim dimenzijama i prijenosnim parametrima te se mogu međusobno spajati varenjem i standardnim konektorima i ako se radi o povezivanju kabela različitih proizvođača.

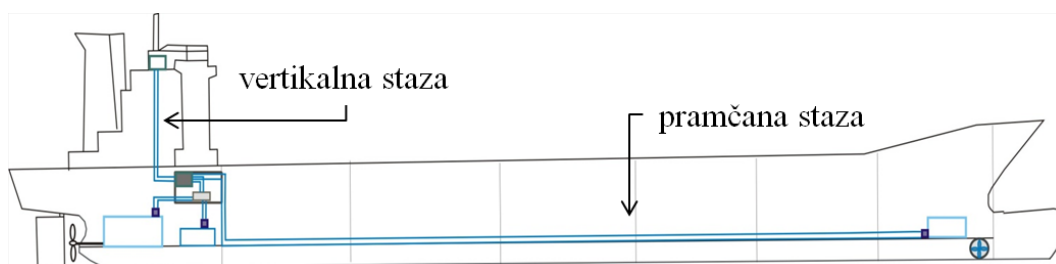


Tablica 4: Karakteristike svjetlovodnih kabela za primjenu na brodovima

Broj / tip niti	2 - 48/ MM i SM
Težina kabela	~ 98 kg/km
Vanjski promjer kabela	~ 4 – 15 mm
Radna temperatura	-40 °C do +85 °C
Temperatura pri instalaciji	-10 °C do +60 °C
Temperatura pri skladištenju	-55 °C do +85 °C
Max. vučna sila pri instalaciji	1200 N
Max. vučna sila u radu	400 N
Min. polumjer savijanja pri instalaciji	20 x vanjski promjer kabela
Min. polumjer savijanja u radu	10 x vanjski promjer kabela
Prigušenje MM niti na 850 nm	3,5 dB/km
Prigušenje MM niti na 1300 nm	1,5 dB/km
Prigušenje SM niti na 1300 nm	0,5 dB/km

#### Polaganje svjetlovodnih kabela na brodu

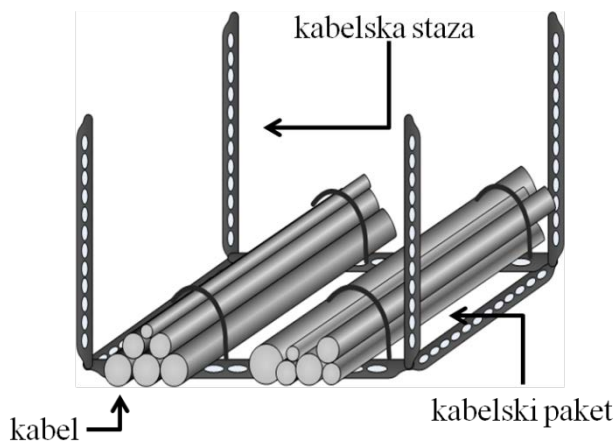
Na brodovima se svjetlo vodi zajedno s ostalim električnim kabelima polažu u prethodno montirane metalne nosače nazvane kabelaške staze. Uobičajeno se izvode vertikalne staze (veza nadgrađe-strojarnica) i pramčane staze (veza pramac-strojarnica) (slika 62).



Slika 62: Kabelaške staze na brodu

Na temelju knjige kabela koja sadrži alfa-numerički popis kabela, smještajnih nacрта kabelaških staza i plana kabela izrađuju se tzv. paketi kabela prema kojima se izvodi rezanje kabela na popisane dužine. Nakon rezanja kablovi se na kolut namataju

obrnutim redoslijedom od polaganja na kabelsku stazu. Polaganje kabela na kabelske staze izvodi se odmotavanjem kabela s koluta i razvlačenjem kabela na kabelsku stazu (slika 63).

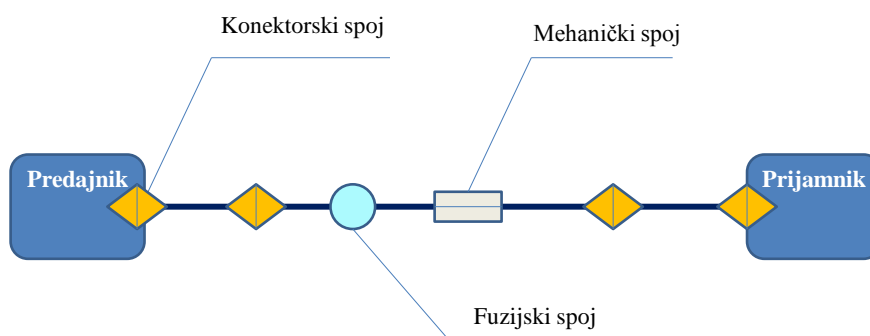


Slika 63: Prikaz polaganja kabela na kabelsku stazu

Kabeli strojarnice i vertikalne staze povlače se ručno, dok se kabeli pramčane staze povlače strojno upotrebom vitla. Kabeli nisu prethodno konektorzirani zbog nemogućnosti provlačenja kroz vrlo ograničene prostore, te se konektori izrađuju nakon povlačenja kabela, na pozicijama montaže OLM-ova.

#### 4.5. Proračun prigušenja kabelske dionice

Prije dizajniranja ili instaliranja svjetlovodnog sustava prijenosa potrebno je provjeriti prigušenje kabelske dionice te time utvrditi podržava li prijenos željenog signala s odgovarajućom kvalitetom. Proračunom se mora provjeriti da optička snaga na prijammniku bude dovoljna za ispravno i kvalitetno detektiranje odaslanog signala. U proračun treba uključiti prigušenja koja unose sve pasivne komponente od izvorišta do odredišta. To su konektori, fuzijski i mehanički spojevi te sama svjetlovodna nit (slika 64). Naravno, ukoliko se na liniji nalaze i optički spreznici, potrebno je u proračun uzeti i njihova prigušenja. Prigušenja spreznika ovise o stupnju njihova spreznjanja ili dijeljenja te mogu iznositi i do desetak dB. Nakon instalacije sustava podatak o prigušenju potrebno je provjeriti mjerenjem prigušenja mjeračem snage. [31]



Slika 64: Prikaz svjetlovodne kabelaške dionice

Za izračun prigušenja kabelaške dionice važan podatak je vrsta svjetlovodne niti i valna dužina na kojoj emitira optički izvor predajnika. Ti podatci iskazani su u tablici 5.

Tablica 5: Vrste svjetlovodnih niti i iznos prigušenja ( $a$ ) niti

Vrsta niti	Promjer jezgre niti ( $\mu\text{m}$ )	Prigušenje na 660 nm (dB/km)	Prigušenje na 850 nm (dB/km)	Prigušenje na 1300nm (dB/km)	Prigušenje na 1310 nm (dB/km)	Prigušenje na 1550 nm (dB/km)
MM	62,5	-	3,5	1,5	1,5	-
MM	50	-	3	1	1	-
SM	9	-	-	0,5	0,36	0,22
PCF	200	10	8	-	-	-

Prigušenje jedne kabelaške dionice, odnosno jedne neprekinute dionice svjetlovodne niti od ishodišne do određene točke, računa se prema izrazu (16) i izražava u decibelima:

$$\alpha = n \cdot K + m \cdot S + a \cdot L + M \quad (16)$$

gdje je:

$n$  - broj konektora

$K$  – prigušenje jednog konektora (dB)

$m$  – broj fuzijskih spojeva

$S$  – prigušenje jednog fuzijskog spoja (dB)

$a$  – prigušenje svjetlovodne niti (dB/km)

$L$  – duljina svjetlovodne niti (km)

$M$  – margina sustava (obično 3 dB)

#### Prigušenje konektora ( $K$ )

MM konektori (tvornički napravljeni) = 0,2 – 0,5 dB; srednja vrijednost = 0,35 dB

MM konektori (napravljeni na terenu) = 0,8 – 1,2 dB; srednja vrijednost = 1 dB

SM konektori (tvornički napravljeni) = 0,1 – 0,2 dB; srednja vrijednost = 0,15 dB

SM konektori (napravljeni na terenu) = 0,5 – 1 dB; srednja vrijednost = 0,75 dB

#### Prigušenje fuzijskog spoja ( $S$ )

MM spojevi = 0,1 – 0,5 dB, uobičajeno 0,3 dB

SM spojevi = manje od 0,05 dB

#### Prigušenje optičkih sprežnika

Stupanj sprezanja/dijeljenja 1:8 = 7 dB

Stupanj sprezanja/dijeljenja 1:32 = 19 dB

Stupanj sprezanja/dijeljenja 1:62 = 25 dB

### **4.6. Nadzor i održavanje komunikacijske mreže**

Da bi mreža mogla preživjeti kvar i nastaviti podržavati zahtijevanu kvalitetu usluga potrebno je napraviti plan zaštite i obnavljanja, koji osigurava rad mreže pod izvanrednim uvjetima kao što su fizički prekidi kabela ili kvarovi na prijenosnim uređajima. Osim izrade planova za otpornost mreže vrlo je važno sagledati planiranje i postupke preventivnog i redovnog održavanja, nadzor mreže te načine otklanjanja kvarova.

Razlikujemo sljedeće vrste kvarova na mreži i njihove uzroke:

- Kvarovi na opremi: nova neispitana tehnologija, slabo dizajnirani uređaji, nedovoljno ili neispravno hlađenje uređaja, slabo otkrivanje i lociranje kvara, nepouzdana obnavljanje konekcije, nepostojanje zaštitnih metoda.

- Kvarovi na računalnim programima: nestrukturirani, kompleksni i slabo dokumentirani kodovi, brzina rada procesora, slabo otkrivanje kvara i spor oporavak, nepouzdana obnavljanje mrežne konekcije.
- Kvarovi na korisničkom sučelju: neadekvatan dizajn korisničkog sučelja koji dovodi do ljudskih pogrešaka, nedovoljna ili nepravilna edukacija korisnika.
- Utjecaj okoliša: okoliš visokog rizika (utjecaj temperature, vlage, električnih udara, vibracija i sl.), loš dizajn lokacija za smještaj opreme.
- Preopterećenje kapaciteta mreže: nedostatak kontrole količine prometa podataka u mreži, nedostatni protokoli za kontrolu prometa.

Da bi se povećala pouzdanost i sigurnost mreže potrebno je nadzirati sve dijelove tako složenog sustava. Funkcije nadzora su: predviđanje kvarova, detekcija kvara, dijagnoza, lociranje kvara te pokretanje mehanizma za otpornost. U komunikacijskim mrežama postoji automatski nadzor kvalitete signala, bilo da se radi o degradaciji snage signala ili o potpunom prekidu, a obavljaju ga sami prijenosni uređaji. Na njima su instalirani zvučni i/ili vizualni alarmni sklopovi kojima se signalizira određena vrsta kvara. Na taj način prati se i stanje kabela veze između uređaja, ali samo onih niti na kojima postoji priključen sustav u radu. Svjetlovodne niti koje nisu u radu moguće je ispitati samo priključivanjem vanjskih mjernih uređaja. Na taj način obavljaju se mjerenja snage i prigušenja signala duž niti.

Takva testiranja u brodskim sustavima provode se periodično, najčešće jednom mjesečno ili polugodišnje. Svi rezultati bilježe se u propisane obrasce te se uspoređuju s prethodno zabilježenim rezultatima mjerenja. Na taj način mogu se pravovremeno uočiti pojave povećanja prigušenja na pojedinim vezama, te na vrijeme pristupiti otklanjanju eventualnih „slabih točaka“ u mreži i izbjeći neželjene posljedice kao što je potpuni gubitak signala. Na slici 65 prikazano je periodično mjerenje snage svjetlosnog signala u sustavu upravljanja brodskim električnim pogonom.



Slika 65: Mjerenje snage svjetlosnog signala

Preventivnim i redovnim održavanjem brodske komunikacijske mreže moguće je predvidjeti i sprječavati kvarove, ubrzati postupke popravaka, te time smanjiti troškove broдача i povećati pouzdanost i sigurnost broda u cjelini.

## **5. MODEL SVJETLOVODNE KOMUNIKACIJSKE MREŽE U POVEZIVANJU BRODSKIH SUSTAVA**

Kako bi se osiguralo djelotvorno i pouzdano povezivanje brodskih sustava potrebno je analizirati sve elemente sustava koji čine komunikacijski sustav za prijenos informacija između komponenata sustava, utvrditi koji elementi najviše utječu na ukupnu raspoloživost sustava te na osnovu tih istraživanja izraditi matematički model mreže. Raspoloživost svjetlovodne komunikacijske mreže bitno utječe i na raspoloživost složenih tehničkih sustava kao što su brodski sustavi. Matematičko modeliranje raspoloživosti mreže značajna je pomoć pri razmatranju efikasnosti predložene mrežne arhitekture, određivanju raspoloživosti pojedinih komponenti i cijelog sustava. Osim što se modelima može prikazati planirano stanje od iznimne je važnosti i mogućnost prikazivanja realne situacije a time i mogućnost predviđanja kvarova i utvrđivanja eventualnih „slabih karika“ u mreži. Preduvjet za stvaranje realističnog modela raspoloživosti mreže je analiza ponašanja mreže pri pojavi kvarova, te detektiranje i valoriziranje faktora koji utječu na rizik od kvarova. Predloženi model je heuristički, jer smo u praksi zadovoljni s „dovoljno dobrim“ rješenjima koja možemo pronaći brzo, bez skupih sofisticiranih alata i programskih rješenja. Model mreže bazirat ću na temeljnim postavkama teorije pouzdanosti uz standardne ulazne podatke potrebne za izračun raspoloživosti.

Heurističkim modelom komunikacijskih mreža u povezivanju brodskih sustava primjenom svjetlovodne tehnologije, moguće je izračunati raspoloživost pojedinih komponenti i cijele mreže, utvrditi utjecaj raspoloživosti pojedinačnih komponenata na raspoloživost sustava, odrediti optimalne načine povezivanja i zaštitne metode te time pridonijeti ukupnoj pouzdanosti brodskih sustava i broda u cjelini.

Predloženim istraživanjem cilj je modelirati i analizirati raspoloživost mreže uz primijenjene zaštitne metode. Kako bi se prikazao utjecaj konfiguracije kablskih putova na ukupnu raspoloživost mreže u izračun raspoloživosti uvodi se nove parametre nazvane „faktori utjecaja“.

Novom metodom izračuna raspoloživosti, koja uključuje faktore utjecaja, postići će se približavanje matematičkog modela realnoj situaciji u mreži i točnija procjena raspoloživosti, što će se pokazati kompariranjem idealiziranog i realnog modela mreže.

Također, jedan od ciljeva je ostvariti realnu podlogu za daljnja akademska istraživanja, povezujući podatke iz prakse s dosadašnjim istraživanjima na području otpornosti svjetlovodnih mreža.

Na temelju tih istraživanja odredit će se ponašanje sustava pri pojavi kvarova te mogućnost pronalaska optimalnih i pouzdanih načina povezivanja brodskih sustava. Time se povećava pouzdanost upravljanjem i nadzorom brodskih sustava što je od izuzetnog značaja za upravljanje i sigurnost samog broda.

## **5.1. Osnovne postavke teorije pouzdanosti**

Teorija pouzdanosti je samostalna znanstvena disciplina koja se temelji na teoriji vjerojatnosti i matematičkoj statistici. Primjenjuje se u svim fazama planiranja, projektiranja, proizvodnje i korištenja tehničkih komponenti i sustava. Teorija pouzdanosti bavi se razvojem matematičkih modela na osnovu kojih se izračunava pouzdanost i raspoloživost pojedinih komponenti sustava kao i sustava u cjelini. Primjenjuju se metode za povećanje pouzdanosti i utvrđivanja pravilnosti pojavljivanja štetnih događaja, te metode za predviđanje ponašanja komponenti u budućnosti.

Proučavanje problema raspoloživosti sustava električnih generatora datira iz ranih 30-ih godina 20. stoljeća. Tijekom II. svjetskog rata, njemački inženjeri koristili su osnovne koncepte teorije raspoloživosti za poboljšanje karakteristika raketa tipa „V1“ i „V2“. 50-ih se godina prošlog stoljeća pouzdanost kao dio elektroničkog inženjerstva počela primjenjivati kod razvoja elektroničkih sustava poglavito u vojnoj industriji. Značajan događaj bio je i publiciranje Weibull-ove statističke funkcije 1952. godine. Ta je funkcija postala poznata pod nazivom Weibull-ova razdioba. Time je započelo sistematično proučavanje podataka o kvarovima, intenzitetu njihova pojavljivanja i utjecaju na raspoloživost komponenti i sustava. [32, 33]



Teorija pouzdanosti je složena znanstvena disciplina povezana sa svim ostalim granama znanosti, a u ovom radu razmatrati će se njezina primjena u brodskim komunikacijskim mrežama, odnosno u analizi svjetlovodnih sustava prijenosa.

Osnovni cilj svih komunikacijskih mreža je pružiti korisnicima kvalitetnu, pouzdanu i brzu uslugu. Komunikacijski sustav treba održavati raspoloživim, sigurnim i cjelovitim, te poboljšavati njegovu sposobnost da se odupre kvarovima na bilo kojem nivou.

Pod pojmom pouzdanosti općenito se smatraju značenja kao što su sigurnost, stalnost, dostatnost. U inženjerskoj praksi pouzdanost je moguće objektivno procijeniti i mjeriti.

Studija pouzdanosti može se podijeliti u četiri dijela:

- a) ponašanje u prošlosti – prati se pojavljivanje kvarova, promatraju se statistički podaci o kvarovima te se na temelju njih formiraju matematički modeli kvarova komponenti,
- b) razvoj matematičkih modela za proračun pouzdanosti sustava i/ili komponenti,
- c) proračun i analiza pouzdanosti i raspoloživosti te utvrđivanje slabih mjesta u sustavu
- d) predviđanje i prognoziranje ponašanja sustava u budućnosti na temelju izračunatih pokazatelja.

Osnovni zadatak metoda za proračun pouzdanosti je na osnovi poznatih podataka o pouzdanosti i raspoloživosti komponente izračunati pokazatelje pouzdanosti sustava u cjelini ili pojedinih njegovih dijelova.

Da bi mogli pristupiti proračunu pouzdanosti i raspoloživosti komponenata i sustava potrebno je najprije objasniti osnovne pojmove koji se javljaju u tim analizama.

Osnovni pojmovi koje koristimo su: pouzdanost, raspoloživost, intenzitet kvarova, intenzitet popravaka, srednje vrijeme prekida, srednje vrijeme do kvara i srednje vrijeme popravka.

U ovom radu koristi se sljedeća definicija za **pouzdanost  $R(t)$**  (*eng. Reliability*):

***Pouzdanost komponente ili sustava je vjerojatnost da će komponenta ili sustav ispravno raditi tijekom predviđenog vremenskog intervala  $t$ , uz definirane radne uvjete.***

Pouzdanost se obično označava sa  $R(t)$ , gdje je  $t$  interval vremena.

Još jedan pojam koji se koristi pri analizi sustava je **raspoloživost  $A(t)$**  (*eng. Availability*), a definira se kako slijedi:

***Raspoloživost komponente ili sustava je vjerojatnost da će komponenta ili sustav raditi ispravno u trenutku promatranja.***

Raspoloživost se označava s  $A(t)$ , gdje je  $t$  vremenski trenutak.

Kada govorimo o pouzdanosti zanima nas hoće li sustav raditi bez kvarova, promatrano vrijeme, odnosno postavljamo pitanje: koja je vjerojatnost da će sustav raditi bez kvarova npr. jednu godinu?

Raspoloživost se koncentrira na vjerojatnost da ćemo sustav zateći u radnom stanju u bilo kojem trenutku kada nam zatreba usluga sustava. Pri tome nas ne zanima u kakvom je stanju sustav bio prije promatranog trenutka.

Grešku (*eng. fault*) definiramo kao nemogućnost entiteta (komponente ili sustava) da obavlja zadanu funkciju.

Greška je uvijek rezultat kvara (*eng. failure*).

Raspoloživost  $A$  se u praktičnoj primjeni određuje kao stacionarna funkcija, tj. odnos ukupnog vremena bez kvara i ukupnog vremena koje se promatra:

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (17)$$

gdje  $MTTF$  (*eng. Mean Time To Failure*) predstavlja srednje vrijeme do kvara, a  $MTTR$  (*eng. Mean Time To Repair*) srednje vrijeme popravka.

Uvodi se i pojam srednjeg vremena među kvarovima  $MTBF$  (*eng. Mean Time Between Failures*) kao

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (18)$$

Ekvivalent formuli (17) je izraz:

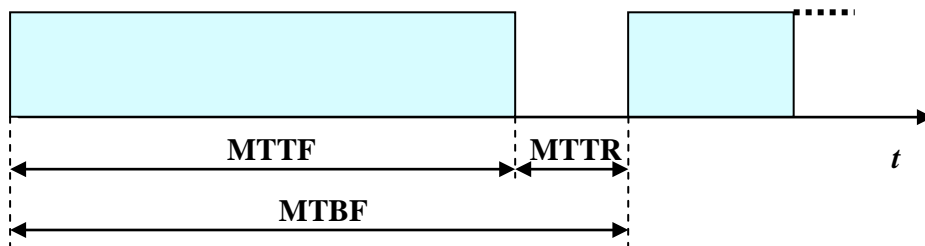
$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (19)$$

gdje je:

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (20)$$

$$\lambda = \frac{1}{MTTF} \quad (21)$$

Intenzitet kvarova (*eng. failure rate*) predstavlja broj kvarova u jedinici vremena i označava se s  $\lambda$ , a  $\mu$  predstavlja intenzitet popravaka (*eng. repair rate*).



Slika 66: „Ciklus kvarova“ sustava s mogućnošću popravaka

Ostali pojmovi vezani uz teoriju pouzdanosti su: neraspoloživost i srednje vrijeme prekida.

Pojam neraspoloživosti  $U$  (*eng. Unavailability*) je vjerojatnostni komplement raspoloživosti:

$$U = 1 - A \quad (22)$$

Često se koristi u analizama pouzdanosti komunikacijskih sustava jer pojednostavljuje matematičke izračune pouzdanosti sustava koji sadrže veći broj komponenti. Kada promatramo sustav koji se sastoji od niza elemenata povezanih u seriju, onda se konceptom „zbrajanja neraspoloživosti“ komponenata umjesto „množenjem raspoloživosti“ postižu značajna olakšanja u računanju i analizi cjelokupnog sustava.

Raspoloživost i neraspoloživost su bezdimenzionalne veličine, tj. vjerojatnosti.

Pri opisivanju karakteristika sustava neraspoloživost se često prikazuje kao srednje vrijeme kada sustav ne radi, odnosno **srednje vrijeme prekida *MDT*** (*eng. Mean Down Time*), a izražava se u minutama na godinu (min/god) prema izrazu 23.

$$MDT = 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot U \quad (23)$$

Ukoliko se *MDT* želi izraziti u satima na godinu (sati/god.) računa se prema izrazu:

$$MDT = 365 \cdot 24 \cdot U \quad (24)$$

Kada razmatramo raspoloživost govorimo o intenzitetu nastanka kvarova, što se može opisati pitanjem: „Koliko se često komponente kvare?“, te o načinima nastanka kvarova, odnosno postavljamo pitanje „Kako se komponente kvare?“.

Pogodnost za održavanje sagledavamo kroz intenzitet popravaka i vrijeme potrebno za održavanje. Posljedice obično izražavamo kao srednje vrijeme prekida prometa u minutama, satima ili danima u promatranom razdoblju, uobičajeno od godine dana.

Mjerna jedinica za intenzitet kvarova  $\lambda$  je FIT (*eng. Failure In Time*), u prijevodu „kvarova u vremenu“. Obzirom da su komponente ili sustavi obično vrlo pouzdani, a da bi se gustoća kvarova mogla izražavati u satima, određeno je razdoblje od  $10^9$  sati kao vremenska jedinica za kvantifikaciju intenziteta kvarova.

Iz navedenog proizlazi da 1 FIT predstavlja 1 kvar u razdoblju od  $t = 10^9$  sati.

Ukoliko nam je poznat iznos intenziteta kvarova  $\lambda$  u FIT-ovima, može se izračunati srednje vrijeme do kvara *MTTF* (izraženo u satima) prema:

$$MTTF = \frac{10^9}{\lambda} \quad (25)$$

Kada imamo poznat *MTTR* i intenzitet kvarova  $\lambda$  izražen u FIT-ovima možemo izračunati neraspoloživost *U* kao:

$$U = \frac{MTTR \cdot \lambda}{10^9} \quad (26)$$

Slijede neke osnovne „konstante“ koje se koriste pri analizi neraspoloživosti komunikacijske mreže:

- 1 godina = 8.766 sati
- 1 kvar/godinu = 114.155 FIT-ova
- 1 FIT = 1 kvar u 114.155 godina
- „raspoloživost tri devetke“  $A = 0,99900 \rightarrow U = 10^{-3} \rightarrow 8,76$  sati prekida na godinu
- „raspoloživost pet devetki“  $A = 0,99999 \rightarrow U = 10^{-5} \rightarrow 5,26$  minuta prekida na godinu.

Svaki tehnički sustav može se prikazati različitim konfiguracijama kako bi se provela analiza raspoloživosti. Uobičajeni prikazi sustava su pomoću blok shema, gdje svaki blok predstavlja raspoloživost odnosno pouzdanost jednog elementa. Sustavi mogu biti složeni od niza elemenata povezanih u seriju, u paralelni spoj ili u kombinaciju ta dva načina povezivanja. [34 – 37]

Najjednostavniji oblik blok sheme raspoloživosti nekog sustava je slučaj kada su elementi sustava, koji se sastoji od  $n$  elemenata, povezani u seriju (slika 67). Svaki blok predstavlja raspoloživost jednog elementa, dok se raspoloživost cijelog sustava ( $A_S$ ) računa kao produkt svih pojedinačnih raspoloživosti.

U ovakvoj strukturi kvar jednog elementa izaziva kvar cijelog sustava. Drugim riječima, svi elementi moraju raditi ispravno da bi cijeli serijski sustav radio ispravno.



Slika 67: Serijska struktura sa  $n$  elemenata

Raspoločivost serijske strukture  $A_S$  sa  $n$  elemenata računa se prema izrazu (27) a neraspoločivost  $U_S$  prema izrazu (28):

$$A_S = \prod_{i=1}^n A_i \quad (27)$$

$$U_s = 1 - \prod_{i=1}^n A_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - U_i) \quad (28)$$

Neraspoloživost serijske strukture  $U_s$  računa se kao suma neraspoloživosti pojedinačnih elemenata (za  $U_i \ll 1$ ), što olakšava izračun pri velikom broju elemenata sustava.

$$U_s = \sum_{i=1}^n U_i \quad (29)$$

Radi pojednostavljenja izračuna moguća je aproksimacija prema izrazu (30):

$$\prod_{i=1}^n A_i \approx 1 - \sum_{i=1}^n U_i \quad (30)$$

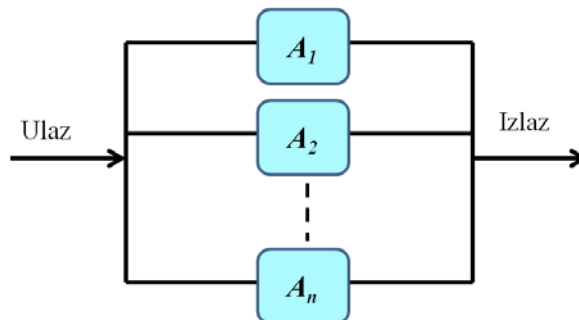
Ukoliko promatramo jednostavni sustav prijenosa topologije točka-točka, možemo ga opisati blok shemom sa strukturom od  $n$  serijskih elemenata. Kvar na bilo kojoj dionici kabela ili u bilo kojem drugom elementu prijenosnog sustava uzrokuje prekid rada cijelog sustava, ukoliko ne postoji zaštita po rezervnom putu ili neka druga vrsta zaštite.

Za paralelnu strukturu sa  $n$  grana, prikazanu na slici 68, raspoloživost  $A_p$  može se izračunati prema:

$$A_p = 1 - \prod_{i=1}^n A_i \quad (31)$$

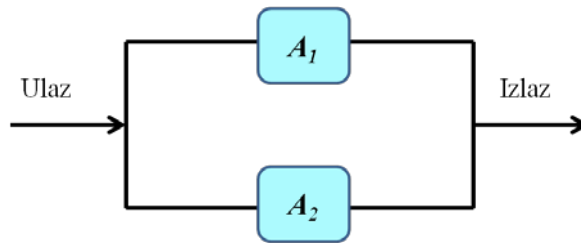
Neraspoloživost paralelne strukture  $U_p$  računa se kao produkt svih pojedinačnih neraspoloživosti, prema izrazu (32):

$$U_p = \prod_{i=1}^n U_i \quad (32)$$



Slika 68: Paralelna struktura sa  $n$  grana

Kod sustava sa zaštitom (radni i zaštitni kabelski put ili dupliranje prijenosnih uređaja) uobičajen je prikaz s elementima u paralelnoj strukturi prema slici 69.

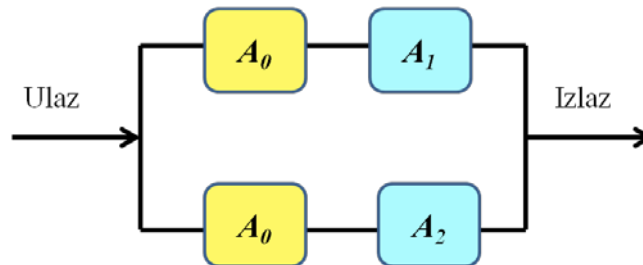


Slika 69: Paralelna struktura s dvije grane

Za prikazanu strukturu raspoloživost se računa prema izrazu (33):

$$A_p = A_1 + A_2 - A_1 \cdot A_2 \quad (33)$$

U realnim komunikacijskim mrežama, koje imaju prstenastu topologiju, čest je slučaj da kabelske dionice nisu potpuno fizički razdvojene iako i dalje tvore prsten na logičkom nivou. Takav slučaj može se prikazati paralelnom strukturom s dvije grane i dodavanjem istog elementa u obje grane (slika 70). Ukupna raspoloživost paralelne strukture s dvije grane i jednim zajedničkim elementom računa se prema izrazu (34).



Slika 70: Paralelna struktura s dvije grane i jednim zajedničkim elementom

$$A_p = A_0 \cdot (A_1 + A_2 - A_1 \cdot A_2) \quad (34)$$

Iz izraza (34) vidljivo je da kvar elementa „0“ uzrokuje smanjenje raspoloživosti paralelne strukture, jer je element „0“ zajednički za obje grane.

### 5.1.1. Otpornost mreže

Otpornost mreže može se opisati kao sposobnost mreže da nastavi pružati usluge i pri pojavi kvarova na mreži. U brodskim komunikacijskim i senzorskim mrežama

jedna svjetlovodna nit odnosno samo jedan komunikacijski kanal može prenositi nekoliko desetaka Gbit/s podataka, što znači da jednostruki kvar izaziva značajan gubitak prometa. To je sa stajališta sigurnosti i pouzdanosti brodskih sustava izuzetno važan parametar, stoga je dizajniranje mreža s mogućnošću preživljavanja od kvarova vrlo interesantno i značajno područje istraživanja. [38 – 42]

Osnovni tipovi kvarova u mreži mogu se podijeliti na kvarove kablskih linkova ili kvarove optičkih linijskih modula. Kvarovi linkova događaju se većinom zbog prekida svjetlovodnih kabela dok se kvarovi u linijskim modulima uglavnom javljaju zbog kvarova na optičkim predajnicima i prijamnicima i pripadnim elektroničkim komponentama te radi problema napajanja te aktivne opreme. Osim navedenog, mogući su i kvarovi na pojedinim pasivnim elementima kao što su konektori, mehaničke spojnice i sprežnici.

Otpornost mreže bazira se na preusmjeravanju prometa sa oštećenih komunikacijskih putova na rezervne ili alternativne putove. Naravno, to zahtijeva dodatne kapacitete u mreži, jer rezervni ili alternativni put mora biti u mogućnosti podržati preusmjereni promet.

Kvarovi na mreži definiraju se kao slučajni prekidi idealnog rada mreže nastali zbog kvara na komponentama ili kabelima. Kvarovi uzrokuju degradaciju ili kompletan prekid signala. Osim kvarova mreža je podložna i napadima. Napadi se definiraju kao namjerno prekidanje normalnog rada i sigurnosti mreže pri čemu se usluge prekidaju ili im se narušava kvaliteta.

Da bi se dizajnirala mreža otporna na kvarove potrebno je provesti proaktivne i reaktivne metode, koje se često nazivaju **zaštita** (*eng. protection*) i **obnavljanje** (*eng. restoration*).

Glavna razlika između prethodno konfiguriranog (fiksno) i dinamičkog pristupa planiranju otpornosti mreže je u postupku odabira rezervnog puta i kapaciteta koji se koriste nakon pojave kvara na primarnom (radnom) putu.

Proaktivni pristup osigurava vrlo brzi oporavak oštećenih putova te je vrijeme obnavljanja kratko i zato prikladno za usluge s garantiranom raspoloživošću. S druge strane, reaktivni pristup treba manje zaštitnih kapaciteta, ali ne može garantirati uspješan oporavak i može imati duže vrijeme obnavljanja prometa.



## A. Metoda zaštite

Zaštitna metoda je po definiciji proaktivni način povećavanja otpornosti mreže. Bazira se na izračunu rezervnog puta za svaki primarni put u mreži prije nego se pojavi kvar u mreži. Taj izračun se može provesti pri planiranju ili nadogradnji mreže. Potrebni kapacitet dodaje se na kabele koji se koriste kao rezervni put. Kada se pojavi kvar promet se jednostavno preusmjeri na rezervni put bez dodatnog donošenja odluke i obrađivanja. Stoga ova metoda brže obnavlja promet u odnosu na metodu obnavljanja. Zaštitne metode više su vezane uz dizajn mreže nego uz upravljanje mrežom.

Kod metoda zaštite kablenskog puta rezervni kapaciteti mogu biti namijenjeni (za jedan radni put) ili zajednički (za više radnih puteva).

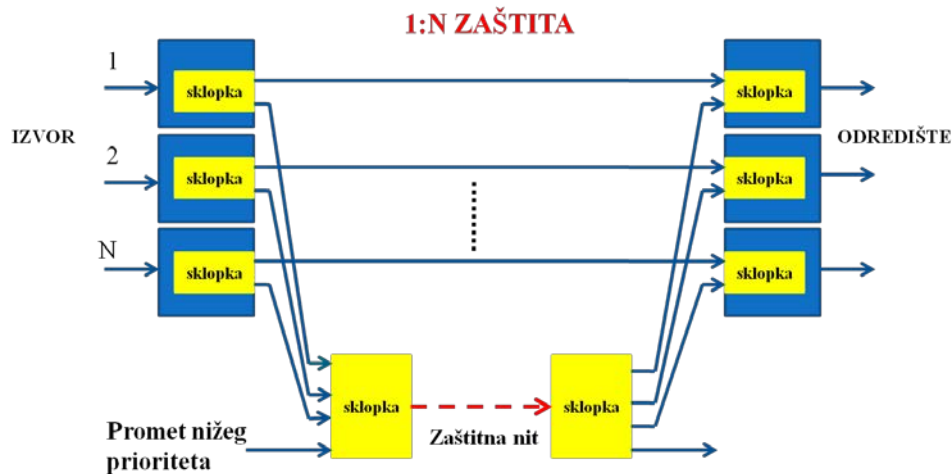
Namijenjene (*eng. dedicated*) zaštitne metode često se označavaju 1+1 ili 1:1 zaštita. U prvom slučaju signal se istovremeno prenosi i po radnom i po zaštitnom putu. Odredište izabire bolji signal (npr. na osnovi odnosa signal/šum). U drugom slučaju zaštitni se kapacitet može koristiti za prijenos prometa nižeg prioriteta sve dok primarni put radi ispravno. Pri pojavi kvara izvorišni i odredišni čvor preusmjeravaju se na zaštitni put te ga preuzimaju od prometa nižeg prioriteta (slika 71).



Slika 71: Namijenjena zaštitna metoda

Zajedničke (*eng. shared*) zaštitne metode, uobičajeno nazvane 1:N ili M:N, omogućavaju da zaštitni put ili više njih (M) zajednički koriste višestruki radni putovi (N). Kriterij za zajedničkim korištenjem rezervnih kapaciteta obično je nezavisnost

radnih putova kako bi se izbjegle situacije da radni putovi koji koriste zajednički zaštitni put budu istovremeno u kvaru pri pojavi jednostrukog kvara (slika 72).



Slika 72: Zajednički zaštitni putovi

## B. Metoda obnavljanja

Metoda obnavljanja je reaktivni način povećavanja otpornosti mreže, gdje potraga za zaštitnim kapacitetima započinje tek nakon pojave kvara na mreži. To je dinamički pristup pri čemu se rezervni put osigurava na zahtjev. Ova metoda se više oslanja na upravljanje mrežom jer se najbolji rezervni put izračunava u trenutku pojave kvara na primarnom putu. Naravno, već u procesu planiranja mreže potrebno je osigurati dovoljno rezervnog kapaciteta na odabranim kabelima kako bi se minimalizirali slučajevi nepronalaženja rezervnih putova radi nedostatka kapaciteta.

Izračun zaštitnih putova može biti centralizirani ili distribuirani. Kod centraliziranog pristupa nadzor mreže obavlja se iz centralnog čvora, koji izračunava zaštitne putove i šalje informacije ostalim čvorovima. Kod distribuiranog načina osiguravanja zaštitnih putova, izvorišni i odredišni čvor puta na kojem je nastupio kvar, traži odgovarajuće zaštitne putove kako bi premostili oštećenu vezu.

U nekim slučajevima zaštitni put također može biti prethodno određen, tako da se može govoriti i o proaktivnoj i reaktivnoj metodi obnavljanja.

Razliku zaštite i obnavljanja može se izraziti i kroz pojam vremena pružanja usluge. Kod metode zaštite zaštitni kapaciteti se proračunavaju za vrijeme trajanja

pružanja usluge, no nakon pojave kvara nema naknadnih proračuna. To znači da ukoliko se dogodi kvar na zaštitnom putu a radni put još nije popravljen, usluga neće biti raspoloživa.

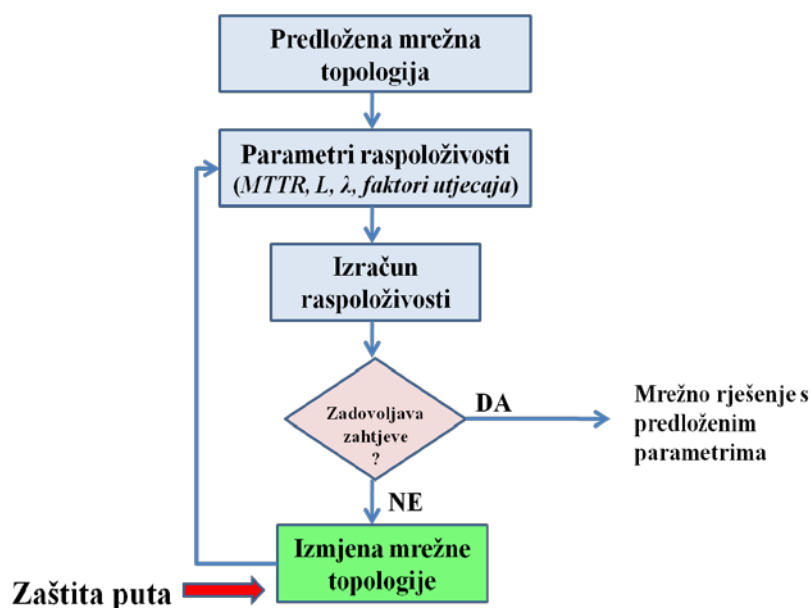
Kod metode obnavljanja zaštitni kapaciteti se osiguravaju za vrijeme trajanja pružanja usluge. Pri normalnom radu veze (bez pojave kvara) kod 1:1 obnavljanja, kao i kod 1:1 zaštite, zaštitni put se može koristiti za prijenos dodatnog prometa. Nakon pojave kvara na primarnom putu promet se prebacuje na zaštitni put i pri tome se može izgubiti dodatni promet. Do ovog koraka metode 1:1 zaštite i 1:1 obnavljanja su jednake. Međutim, kod 1:1 zaštite nakon toga se ne obavljaju nikakvi daljnji postupci, dok se kod metode 1:1 obnavljanja kreće u izračun novog zaštitnog puta.

### **5.1.2. Sagledavanje mrežne topologije sa pozicije preživljavanja od kvarova**

Sagledavanje problema dizajniranja mreže s mogućnošću preživljavanja od kvarova može se grupirati u dva segmenta: na prevenciju i na otklanjanje odnosno ublažavanje posljedica kvarova. Prvi segment odnosi se na sprječavanje i/ili reduciranje učestalosti pojavljivanja kvarova na elektroničkim uređajima i kabelskom dijelu, koji nastaju kao posljedica tehnoloških kvarova, nepovoljnog utjecaja okoliša, proceduralnih kvarova ili prometnih preopterećenja. Kada strategije prevencije nisu dostatne za ostvarenje zadovoljavajuće raspoloživosti odnosno pouzdanosti, potrebno je uvesti strategije za otklanjanje i ublažavanje posljedica pojave kvarova. Taj postupak uključuje postupke mrežne zaštite, udvostručavanja opreme, automatskog programskog oporavljanja od kvarova, usmjeravanja prometa rezervnim putovima te udvostručavanje čvorova. Naravno, navedene postupke potrebno je provoditi selektivno kako bi se minimalizirali troškovi. [43, 44, 45]

Dijagram na slici 73 opisuje proces analize mrežne topologije sa pozicije preživljavanja kvarova. Analiza započinje na predloženoj mrežnoj topologiji gdje se za potrebe izračuna raspoloživosti razmatraju osnovni parametri (*MTTR*, intenzitet kvarova  $\lambda$ , duljina kabelskih dionica *L*), a u novom modelu izračuna raspoloživosti uvode se i novi parametri nazvani „faktori utjecaja“. Nakon provedenog izračuna raspoloživosti ocjenjuje se zadovoljava li rezultat postavljene zahtjeve. Ukoliko su zahtjevi ispunjeni prihvaća se predložena mrežna topologija uz razmatrane parametre. Ukoliko zahtjevi

nisu ispunjeni mijenja se mrežna topologija te se uvodi zaštita puta i ponavlja se izračun raspoloživosti.



Slika 73: Analiza mrežne topologije

### 5.1.3. Vrste konekcija obzirom na primijenjenu zaštitu

U brodskim svjetlovodnim komunikacijskim mrežama konekcija između optičkih linijskih modula izvodi se jednom svjetlovodnom niti. Svaka svjetlovodna nit koristi se za jednosmjerni prijenos podataka, tako da dvosmjerni prijenos zahtijeva uporabu dvije niti u paru. Uvođenje zalihosti kod optičkih linijskih modula podrazumijeva zaštitu 1:1 tipa. Zalihost kablenskog dijela mreže zahtijeva uvođenje alternativnih kablenskih putova, odnosno fizički potpuno razdvojenih radnih i zaštitnih kablenskih trasa. Ručno preusmjeravanje konekcije znači da postoji određeno vremensko razdoblje od pojave kvara pa do prebacivanja konekcije na kablenski put ili uređaj koji nije u kvaru, dok kod automatskog prebacivanja konekcije to vrijeme je 0.

Postoji pet vrsta konekcija obzirom na primijenjenu zaštitu (slika 74):

- a) Konekcija bez zalihosti.
- b) Konekcija sa zalihošću linijske opreme i ručnim preusmjeravanjem. Ovaj način povezivanja omogućava zaštitu jedino pri kvaru na linijskoj opremi. No, ukoliko dođe

do kvara na kabelskoj vezi sustav prestaje s radom. Pri ovoj vrsti zaštite treba uzeti u obzir i vrijeme potrebno za ručno prebacivanje na linijski modul koji je ispravan.

c) Konekcija sa zalihošću linijske opreme i automatskim preusmjeravanjem. Ovaj tip zaštite isti je kao i prethodni osim što je vrijeme potrebno za prebacivanje 0.

d) Konekcija s kabelskom zalihošću. Ovaj tip zaštite podrazumijeva postojanje dva kabelska puta, potpuno fizički razdvojena. Prebacivanje između kabelskog puta koji je u kvaru na zaštitni put je automatsko.

e) Konekcija sa zalihošću linijske opreme i kabelskog puta. Ovakav način zaštite štiti od kvarova linijske opreme i prekida na kabelu. Postoje i dvije podvrste: s automatskim preusmjeravanjem (e1) i bez automatskog preusmjeravanja (e2).



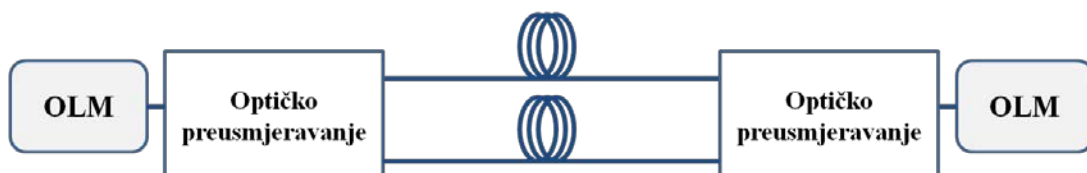
a) Konekcija bez zalihosti



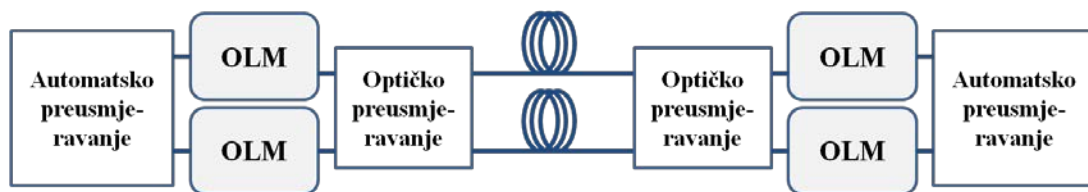
b) Konekcija sa zalihošću linijske opreme i ručnim preusmjeravanjem



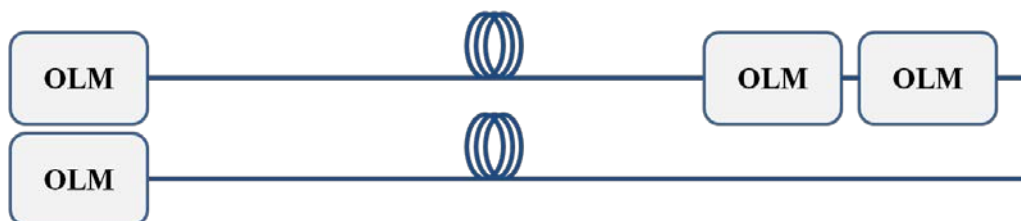
c) Konekcija sa zalihošću linijske opreme i automatskim preusmjeravanjem



d) Konekcija s kabelskom zalihošću



e1) Konekcija sa zalihošću linijske opreme i kablenskog puta automatskim preusmjeravanjem



e2) Konekcija sa zalihošću linijske opreme i kablenskog puta bez automatskog preusmjeravanja

Slika 74: Vrste konekcija obzirom na primijenjenu zaštitu

## 5.2. Model raspoloživosti brodske komunikacijske mreže

Kako bi povezali dosadašnja akademska istraživanja na polju pouzdanosti i raspoloživosti svjetlovodnih mreža koja su većinom namijenjena javnim telekomunikacijskim mrežama, cilj ovog poglavlja je sistematizirano prikazati strukturu i komponente brodske komunikacijske svjetlovodne mreže, način njezine gradnje, analizirati utjecaj kvarova na raspoloživost mreže te predložiti efikasne metode zaštite od kvarova. [46 – 66]

Model i izračun raspoloživosti brodske komunikacijske mreže bazira se na podacima o pouzdanosti za elemente sustava koji se razmatra. To su intenzitet kvarova  $\lambda$  koji se izražava u FIT-ovima i srednje vrijeme popravaka *MTTR* izraženo u satima.

U ovom modelu koristimo podatke o kvarovima brodskih mreža dobivene iz prakse odnosno od brodarka i tvrtki koje ugrađuju i servisiraju brodske elektroničke uređaje. Vrijednosti  $\lambda$  i *MTTR* za kabele i OLM-ove navedene su u tablici 6, a odnose se na brodove starosti do 5 godina.

Optički linijski moduli montiraju se u kabelaške razvodne ormare do kojih se lako pristupa, te je zamjena neispravnog OLM-a vrlo jednostavna. OLM-ovi su montirani na metalnim nosačima-vodilicama tako da za njihovo montiranje i zamjenu ne treba imati specijalni alat. Na brodu se obično nalazi i rezervni linijski modul, tako da izmjenu modula u kvaru može izvesti i stručni član posade broda.

Svjetlovodni kabeli polažu se po brodu uz ostale elektro-instalacije, u snopovima i bez dodatne zaštite. Ukoliko dođe do prekida kabela ili nekog drugog mehaničkog oštećenja, zbog vrlo malog prostora koji je namijenjen instalacijama i povezivanju kabela u kabelaške pakete, oštećeni kabeli se ne izvlače. Umjesto njih se postavljaju novi kabeli. Kabel se na brod donosi namotan na bubnju, neprekinut, a onda se na brodu reže na potrebnu dužinu.

Konektori za spajanje na linijske module izrađuju se na brodu jer se prekonektorizirani kabel, odnosno kabel kojemu su tvornički sve niti zaključene na konektorima, ne može uvlačiti kroz uvodnice, a isto tako teško je procijeniti točnu dužinu kabela potrebnog za zamjenu. Rjeđe se rade spojevi varenjem niti. Za izradu konektora na brodu potreban je specijalan alat te mjerni uređaji za provjeru kvalitete izrade i čistoće konektora. U tu svrhu koristi se ručni mikroskop kojim se provjerava spoj niti na ferulu konektora te kvaliteta poliranja vrha ferule.

Kod popravaka kvarova na kabelaškoj mreži najviše vremena oduzima dolazak na brod stručne ekipe za popravak, što naravno zavisi o trenutnoj poziciji broda i raspoloživosti specijaliziranih servisa za tu vrstu tehnologije. Takvi servisi moraju imati odgovarajuće educirano i osposobljeno osoblje, alat, mjerne instrumente, uređaje za spajanje konektora i varenje niti, te određenu količinu rezervnog materijala (linijskih modula i kabela) jer se na brodu ne može točno dijagnosticirati kvar. Zbog teške procjene potrebnog vremena dolaska stručne ekipe na brod, taj dio vremena za popravak kvara neće se uzimati u obzir pri daljnjim izračunima raspoloživosti mreže.

Iz analize dostupnih baza podataka o kvarovima i iskustvima iz prakse brodara i ovlaštenih servisa brodske elektronike slijedi:

- za zamjenu svjetlovodnih kabela na brodu, uz izvedene pripremne radove te uz zanemarivanje vremena dolaska servisera na brod, potrebno je približno 10 minuta po jednom metru kabela,

- izrada konektora na brodu uz provjeru kvalitete spoja traje od 0,5 do 1 sat, a spajanje varenjem samo jedne niti traje 3 minute bez naknadnog vremena potrebnog za umetanje spoja u optičku spojnicu, zatvaranje i montažu spojnice,
- za zamjenu OLM-a potrebno je prosječno 2 sata, uz preduvjet da se rezervni modul već nalazi na brodu.

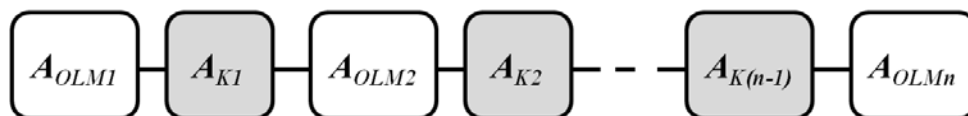
Iz navedene analize slijede podatci o intenzitetu kvarova i srednjem vremenu popravaka za kabele i OLM-ove koji se koriste u svim daljnjim izračunima raspoloživosti u ovom radu (tablica 6).

Tablica 6: Podatci o raspoloživosti elemenata brodske svjetlovodne mreže

	$\lambda$ (FIT)	<b><i>MTTR</i></b> (sati)
<b>Svjetlovodni kabel</b>	500	10
<b>OLM</b>	2000	2

Na temelju osnovnih postavki o raspoloživosti i otpornosti mreže te primjene zaštitnih strategija prikazan je izračun raspoloživosti za konekcije bez zaštite te za konekcije sa zaštitom puta.

Kod modela mreže bez zaštite puta elementi brodske komunikacijske mreže (kabelske dionice i OLM-ovi) spojeni su u seriju (slika 75).



Slika 75: Model raspoloživosti serijske strukture sa  $n$  OLM elemenata i  $(n-1)$  kabelskih sekcija

Svaki element takve serijske strukture ima svoju raspoloživost, dok se raspoloživost cijelog sustava ( $A_s$ ) računa kao produkt svih pojedinačnih raspoloživosti prema izrazu (35).



$$A_S = A_{OLM}^n \cdot \prod_{i=1}^{(n-1)} A_{Ki} \quad (35)$$

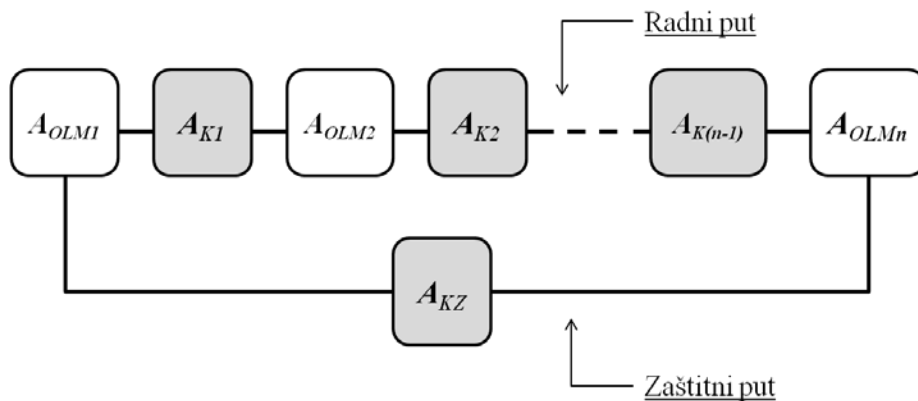
gdje je:

$n$  – broj OLM-ova spojenih u seriju,

$A_{OLM}$  - raspoloživost OLM-a,

$A_K$  – raspoloživost svjetlovodnog kabela.

Primjena zaštite radne trase s redundantnom kabelskom trasom na brodu se može ostvariti na način da se izgrade razdvojene kabelske staze, te na njih polože redundantne kabelske dionice između polazišne i odredišne točke. Kod sustava sa zaštitom puta, koji se sastoji od radnog i zaštitnog puta, uobičajen je prikaz s elementima u paralelnoj strukturi (slika 76). U predstavljenoj konfiguraciji zaštitni put sastoji se samo od kabelske dionice.



Slika 76: Model raspoloživosti paralelne strukture s radnim i zaštitnim putem

Za prikazanu paralelnu strukturu sa zaštitom puta raspoloživost ( $A_{ZP}$ ) računa se prema izrazu (36), gdje je  $A_R$  raspoloživost radnog puta, a  $A_Z$  raspoloživost zaštitnog puta.

$$A_{ZP} = A_R + A_Z - A_R \cdot A_Z \quad (36)$$

Raspoloživost radnog puta a  $A_R$  za primjer brodske mreže računa se prema izrazu (35), a zaštitni put sadrži samo kabelsku komponentu.

U izračunu raspoloživosti koriste se osnovne formule opisane u poglavlju 5.1., a kod opisivanja karakteristika elemenata neraspoloživost se predstavlja srednjim vremenom prekida  $MDT$  prema izrazu (24), koje se izražava u satima na godinu.

Neraspoloživost kablanske dionice ( $U_K$ ) izražava se prema:

$$U_K = L \cdot \lambda_K \cdot \frac{MTTR_K}{10^9} \quad (37)$$

gdje je:

$L$  – duljina kablanske dionice, izražena u metrima,

$\lambda_K$  – intenzitet kvarova kabela,

$MTTR_K$  – srednje vrijeme popravaka kabela.

Neraspoloživost optičkog linijskog modula ( $U_{OLM}$ ) izražava se prema:

$$U_{OLM} = \lambda_{OLM} \cdot \frac{MTTR_{OLM}}{10^9} \quad (38)$$

gdje je:

$\lambda_{OLM}$  – intenzitet kvarova optičkog linijskog modula,

$MTTR_{OLM}$  – srednje vrijeme popravaka optičkog linijskog modula.

Ulazne pretpostavke pri izračunu  $A$  i  $MDT$  za konekciju bez zaštite te uz primjenu zaštite puta su slijedeće: svi optički linijski moduli i sve kablanske dionice imaju iste tehničke i konstrukcijske karakteristike, odnosno iste iznose  $\lambda$  i  $MTTR$ .

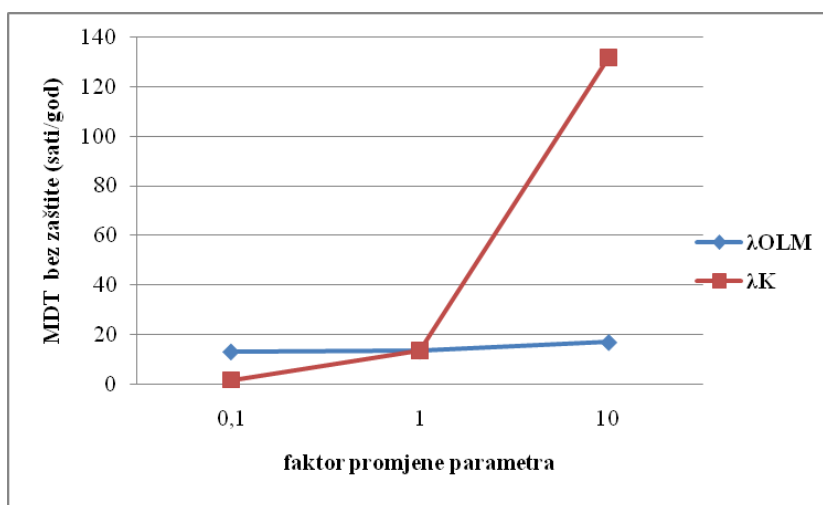
### 5.3. Analiza osjetljivosti

Da bi se prikazao utjecaj intenziteta kvarova komponenata na ukupnu raspoloživost mreže koristi se analiza osjetljivosti. Analiza osjetljivosti koristi se da bi se utvrdilo koliko je neki model „osjetljiv“ na promjenu numeričkih vrijednosti ulaznih parametara. To se postiže nizom izračuna sa sistematičnom promjenom vrijednosti ulaznih parametara.

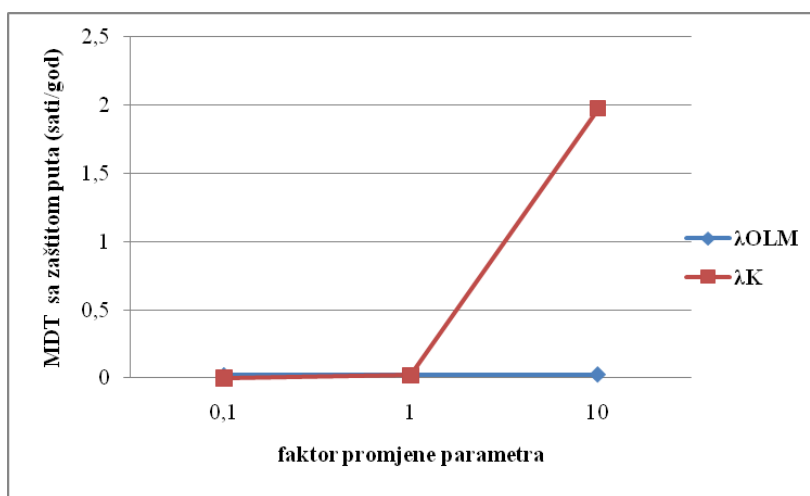
U ovom radu analiza osjetljivosti provedena je mijenjanjem ulaznih parametara  $\lambda_K$  – intenzitet kvarova kabela i  $\lambda_{OLM}$  – intenzitet kvarova optičkog linijskog modula, s faktorom promjene parametara od 0,1 do 10, te promatranjem utjecaja njihove promjene

na srednje vrijeme prekida mreže. Faktor promjene parametra označen s 1 na slikama 77 i 78 predstavlja iznose  $\lambda_K$  i  $\lambda_{OLM}$  iz tablice 6.

Analiza prikazana na slici 77 odnosi se na konekciju bez zaštite, odnosno serijsku strukturu prikazanu na slici 75, dok je druga analiza prikazana na slici 78 temeljena na strukturi sa zaštitom puta prikazanoj na slici 76. Raspoloživost je izračunata prema izrazima (35 - 38). Između ishodišnog i odredišnog modula mrežna struktura ima jedan radni i jedan zaštitni put, a oba imaju istu duljinu od 300 metara, što je prosječna duljina kablskih veza na opisanim trajektima. Rezultati analize osjetljivosti prikazani su kroz  $MDT$  prema formuli (24).



Slika 77:  $MDT_{bez\ zaštite}$  kao funkcija faktora promjene parametara  $\lambda_K$  i  $\lambda_{OLM}$



Slika 78:  $MDT_{sa\ zaštitom\ puta}$  kao funkcija faktora promjene parametara  $\lambda_K$  i  $\lambda_{OLM}$

Tablica 7: Komparacija *MDT*-a uz promjenu vrijednosti  $\lambda_{OLM}$

<b>Faktor promjene parametra</b>	$\lambda_{OLM}$ (FIT)	<b><i>MDT</i> bez zaštite</b> (sati/god.)	<b><i>MDT</i> sa zaštitom puta</b> (sati/god.)
0,1	200	13,18	0,02
1	2.000	13,52	0,02
10	20.000	16,99	0,03

Tablica 8: Komparacija *MDT*-a uz promjenu vrijednosti  $\lambda_K$

<b>Faktor promjene parametra</b>	$\lambda_K$ (FIT)	<b><i>MDT</i> bez zaštite</b> (sati/god.)	<b><i>MDT</i> sa zaštitom puta</b> (sati/god.)
0.1	50	1,70	0,0003
1	500	13,52	0,02
10	5.000	131,78	1,98

U obje analize vidljiv je vrlo mali utjecaj promjene intenziteta kvarova  $\lambda_{OLM}$  na *MDT*. Rezultati pokazuju da u slučaju konekcije bez zaštite promjena intenziteta kvarova OLM-a u promatranom opsegu od 200 do 20.000 FIT-a, ima vrlo mali utjecaj na *MDT* (13,18 – 16,99 sati/god.). Isto tako, i kod konekcije s primjenom zaštite puta utjecaj promjene  $\lambda_{OLM}$  na *MDT* je zanemariv (0,02 – 0,03 sati/god.) (tablica 7).

No, kad promatramo utjecaj intenziteta kvarova kablenskog dijela mreže, rezultati pokazuju značajne promjene *MDT*-a. Varijacija intenziteta kvarova kabela  $\lambda_K$  u opsegu od 50 do 5.000 FIT-a kod mreže bez zaštite značajno utječe na ukupni *MDT* (1,70 – 131,78 sati/god.), dok je kod primjene zaštite puta utjecaj na *MDT* manji (0,0003 – 1,98 sati/god.) (tablica 8).

Smanjivanje intenziteta kvarova OLM-a samo će neznatno poboljšati raspoloživost konekcije, dok promjena intenziteta kvarova kablenskog dijela ima znatno veći utjecaj na promjenu raspoloživosti ukupne konekcije. Povećavanje intenziteta kvarova kabela  $\lambda_K$  značajno će smanjiti ukupnu raspoloživost.

Dobiveni rezultati opravdavaju da se kablskom dijelu mreže trebaju posvetiti dodatna istraživanja, poglavito razmatranju utjecaja  $\lambda_K$  i  $MTTR_K$  na ukupnu raspoloživost. Također je potrebno i dodatno analizirati uvođenje strategije zaštite puta.

To je učinjeno kroz analizu utjecaja načina polaganja kabela na brodu na ukupnu raspoloživost komunikacijske mreže, što je opisano u sljedećem dijelu rada.

#### 5.4. Utjecaj svjetlovodne kableske konfiguracije na raspoloživost mreže

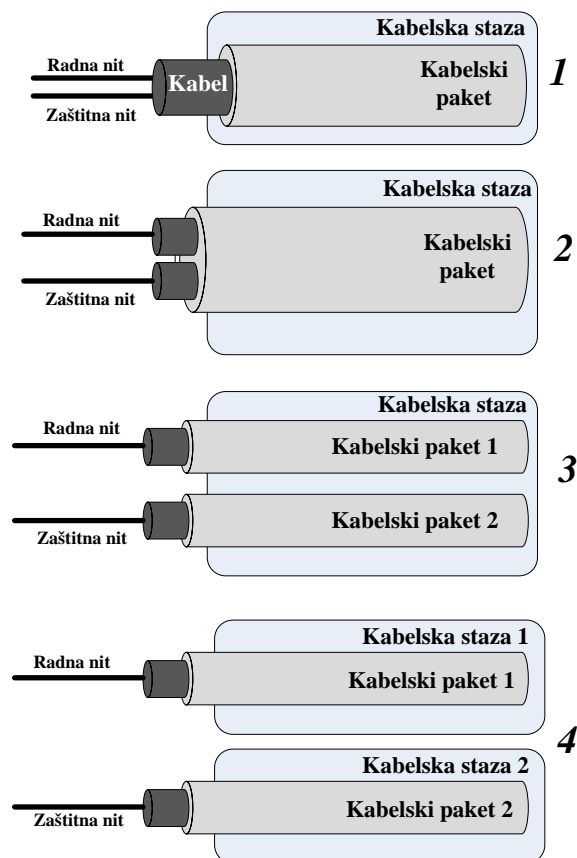
Analizom prijavljenih kvarova na komunikacijskim mrežama izvedenim svjetlovodnom tehnologijom na brodovima ustanovljeno je da srednje vrijeme popravka ovisi o načinu konfiguracije kableske mreže. Na temelju toga razlučena su četiri osnovna načina konfiguracije kabela te izračunata srednja vrijednost trajanja kvarova za svaki pojedini slučaj. U tablici 9 navedena su četiri osnovna načina polaganja kabela i raspodjele radnih i zaštitnih niti u kabelima, kabelskim paketima i kabelskim stazama. Uz svaki od opisanih načina polaganja navedeno je i pripadno srednje vrijeme potrebno za popravak kableskog dijela mreže. Osnovni načini polaganja kabela na kabelskim stazama prikazani su na slici 79.

Kako je prethodna analiza izračuna raspoloživosti mreže bez zaštite i mreže sa zaštitom puta pokazala da se najbolji rezultati postižu primjenom zaštite puta, u ovom dijelu rada sve izračune bazirat ćemo na zaštitnoj strategiji s radnim i zaštitnim kabelskim putem (slika 76).

Tablica 9: Konfiguracija kableske mreže

Br.	Opis polaganja kabela na kabelskim stazama	$MTTR_n$ (sati)
1.	Radne i zaštitne niti u istom kabelu	72
2.	Radne i zaštitne niti u odvojenim kabelima u istom kabelskom paketu	58
3.	Radne i zaštitne niti u odvojenim kabelima i kabelskim paketima u istoj kabelskoj stazi	36
4.	Radne i zaštitne niti u odvojenim kabelskim stazama	10

Slučaj br. 1 kada su radne i zaštitne niti u istom kabelu predstavlja konekciju bez zaštite dok slučaj br. 4 kada su radne i zaštitne niti u odvojenim kabelskim stazama, potpuno fizički razdvojene, predstavlja konekciju s pravom zaštitom puta.



Slika 79: Osnovni načini raspodjele radnih i zaštitnih niti u kabelima, kabelskim paketima i kabelskim stazama

Analiza baze podataka o kvarovima pokazala je da najveći broj kvarova nastaje zbog mehaničkih oštećenja na kabelskim stazama. Pri tome u zanemarivo malom broju slučajeva pri oštećenju jednog kabela dio niti ostane neprekinut. Međutim, može se reći da kad se oštećenja događaju na kabelskoj stazi u kojoj je više kabela u jednom kabelskom paketu, u oko 80% slučajeva oštete se svi kabele u oštećenom paketu dok se na kabelskoj stazi s više kabelskih paketa pri mehaničkom oštećenju u 50% slučajeva prekine ili nagnječe svi paketi i kabele u njima.

Na brodovima zbog specifičnog načina polaganja kabela i ograničenja prostora nije moguće izvlačenje oštećene kableske dionice te uvlačenje nove. Popravci se većinom izvode dok je brod usidren u luci, uz prethodni poziv osposobljenim tvrtkama, koje s potrebnim osobljem i rezervnim materijalom dolaze na brod. Tada se polažu nove dionice kabela a konektori za priključivanje na OLM-ove se naknadno izrađuju.

U slučaju kvara OLM-a, brodovi su opremljeni zamjenskim modulima, te ih se može mijenjati i tijekom plovidbe i od strane osposobljenog osoblja na brodu.

Prethodna analiza pokazala je da raspoloživost uvelike ovisi o srednjem vremenu popravka kabela, dok srednje vrijeme popravka optičkih linijskih modula ima vrlo mali utjecaj na raspoloživost. Smanjivanje intenziteta kvarova na linijskim modulima vrlo malo će doprinijeti poboljšanju ukupne raspoloživosti mreže. Kako bi se poboljšala raspoloživost potrebno je učiniti napore u smanjivanju vremena potrebnog za otklanjanje kvarova na kabelskom dijelu mreže. Stoga se daljnja razmatranja baziraju samo na promatranju utjecaja kabelskog dijela mreže na ukupnu raspoloživost.

Kako bi se prikazao utjecaj konfiguracije kabelskih putova na ukupnu raspoloživost mreže u izračun raspoloživosti uvodi se nove parametre nazvane „faktori utjecaja“, te se promatra njihov utjecaj na raspoloživost pojedinih putova i cjelokupne strukture. Time se dobiva mogućnost stvaranja realnijeg modela mreže a time i točnijeg izračuna raspoloživosti i procjene ponašanja mreže pri promjeni konfiguracije, nadogradnji ili izgradnji novih kabelskih putova.

Klasifikacija i numeričke vrijednosti faktora utjecaja dobiveni su na temelju analize podataka o trajanjima kvarova u realnoj brodskoj svjetlovodnoj mreži. Specifični uvjeti nastali pri izgradnji kabelskog dijela mreže, u kojima se nalaze radni i zaštitni putovi, odgovaraju opisu faktora utjecaja. Odnosi između evidentiranih srednjih vrijednosti trajanja kvarova mogu se preslikati u numeričke vrijednosti faktora utjecaja.

Rizik, odnosno vjerojatnost pojavljivanja kvarova, koji nastupaju pri određenom načinu izgradnje kabelske mreže, može se izraziti iznosom raspoloživosti za promatrani kabelski put.

Ukoliko promatramo mrežu s primjenom zaštite kabelskog puta onda se mogu razlučiti četiri osnovne situacije u kojima svjetlovodne niti radnog i zaštitnog puta mogu biti raspodijeljene unutar kabela, kabelskih paketa i staza, te one predstavljaju **faktore utjecaja (FU)**, označene s  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  i  $f_4$ . Faktori utjecaja i njihove vrijednosti prikazani su u tablici 10. Svaka kabelska dionica u mreži opisana je samo jednim faktorom utjecaja.

Praksa potvrđuje matematičke izračune da je raspoloživost najveća u slučaju potpuno fizički razdvojenih radnih i zaštitnih putova. Za taj idealizirani slučaj, faktoru utjecaja  $f_4$  koji ga opisuje, dodijeljena je numerička vrijednost 1.

Numeričke vrijednosti svih faktora utjecaja računaju se prema izrazu (39):

$$f_n = \frac{MTTR_n}{MTTR_4} \quad (39)$$

gdje je:

$$n = 1 - 4,$$

$$MTTR_4 = 10 \text{ sati},$$

$MTTR_n$  su vrijednosti iz tablice 9.

Tablica 10: Faktori utjecaja

$FU_n$	Opis faktora utjecaja	Vrijednost $FU_n$
$f_1$	Radne i zaštitne niti u istom kabelu	7,2
$f_2$	Radne i zaštitne niti u odvojenim kabelima u istom kabelskom paketu	5,8
$f_3$	Radne i zaštitne niti u odvojenim kabelima i kabelskim paketima u istoj kabelskoj stazi	3,6
$f_4$	Radne i zaštitne niti u odvojenim kabelskim stazama	1

#### 5.4.1. Metoda izračuna raspoloživosti mreže primjenom faktora utjecaja

U ovom radu predstavljena je nova metoda izračuna raspoloživosti uz primjenu novih parametara – faktora utjecaja, temeljenih na analizi kvarova realnih brodskih komunikacijskih mreža.

Izraz za izračun neraspoloživosti kabelske dionice ( $U_K$ ), uz uvođenje faktora utjecaja glasi:

$$U_K = L \cdot \lambda_K \cdot \frac{MTTR_K}{10^9} \cdot FU_n \quad (40)$$



gdje je:

$L$  – duljina kabliske dionice, izražena u metrima,

$\lambda_K$  – intenzitet kvarova kabela,

$MTTR_K$  – srednje vrijeme popravaka kabela,

$FU_n$  – numerička vrijednost faktora utjecaja  $f_1 - f_4$ .

Ukupna raspoloživost kabliskog puta ( $A_{KP}$ ), koji se sastoji od  $n$  kabliskih dionica na kojima se javljaju različiti faktori utjecaja, računa se prema izrazu (41):

$$A_{KP} = 1 - \left\{ \sum_{i=1}^n \left( L_i \cdot \lambda_K \cdot \frac{MTTR_K}{10^9} \cdot FU_n \right) \right\} \quad (41)$$

gdje je:

$n$  – broj kabliskih dionica,

$L_i$  – duljina  $i$ -te kabliske dionice, izražena u metrima.

Osim što se pomoću opisanog modela mogu analizirati utjecaji elemenata i načina gradnje mreže na njezinu ukupnu raspoloživost, značaj uporabe može se sagledavati i sa stajališta troškova potrebnih za planiranje, izgradnju, održavanje i nadzor mreže. Danas, sve brodarske tvrtke nastoje zadovoljiti rastuće zahtjeve tržišta za novim i bržim uslugama uz čim efikasnije iskorištavanje postojećih brodova te ekonomično poslovanje. Troškovi poslovanja tvrtki mogu se podijeliti na dva dijela: na kapitalne (*eng. CapEx – Capital Expenditures*) i na operativne troškove (*eng. OpEx – Operational Expenditures*). Uporaba predloženog modela raspoloživosti mreže i izračuna raspoloživosti može efikasno utjecati na smanjivanje troškova CapEx-a, poglavito pri poboljšavanju planiranja i dizajniranja mreže. Nadalje, modeliranje i analiza izračuna raspoloživosti za realne mreže može voditi smanjenju troškova OpEx-a. To se naročito očituje pri evidentiranju kabliskih trasa i elemenata mreže koji su najpodložniji kvarovima ili ih model istakne kao elemente koji se potencijalno najviše koriste, te se sukladno tome na njih mora obratiti posebna pažnja kod preventivnog i redovnog održavanja te otklanjanja kvarova. Također, ako pojam raspoloživosti komunikacijske mreže promatramo sa stajališta vlasnika broda, oni uz ovakav model i analizu mreže mogu birati željenu raspoloživost pri projektiranju broda i znati s kakvom infrastrukturom raspoložuju na već izgrađenim brodovima.

## 5.5. Studijski slučaj

Primjena nove metode izračuna raspoloživosti uz uvođenje faktora utjecaja predstavljena je na primjeru prethodno opisane komunikacijske mreže za upravljanje brodskim strojevima na trajektu „Hrvat“. Ovaj studijski slučaj primjenjiv je na sve svjetlovodne mreže na trajektima tog tipa zbog unificirane opreme, kabela, spojnog materijala te načina konfiguracije i izgradnje mreže. [67]

Na temelju prethodnih izračuna raspoloživosti i dokazane učinkovitosti primjene strategije zaštite puta, daljnji izračuni temeljiti će se na primjeni zaštite puta (slika 76). U izračunu se koristi model raspoloživosti paralelne strukture s radnim i zaštitnim putom. Na radnom putu montirano je 11 OLM-ova a radni i zaštitni put imaju istu duljinu od 300 metara svjetlovodnog kabela. Za izračun se koriste i pretpostavke da su svi istovrsni elementi sustava jednakih mehaničkih, konstrukcijskih i prijenosnih karakteristika, instalirani i spojeni na jednak način.

Da bi se dokazala opravdanost uvođenja zaštitne strategije primjenom radnog i rezervnog kablenskog puta najprije će se prema izrazima (35–38) izračunati  $MDT$  za referentni primjer trajekta za mrežu bez zaštite te za mrežu s radnim i zaštitnim putom.

Rezultat izračuna pokazuje da je  $MDT_{bez\ zaštite} = 13,52$  sati/god. dok je kod primjene zaštite puta  $MDT_{zaštita\ puta} = 0,02$  sati/god.. Dobivena razlika  $MDT$ -a od čak 13,50 sati/god. opravdava ugradnju dodatnih kablenskih staza te polaganje zaštitnih kablenskih putova. Primjena strategije zaštite puta značajno bi poboljšala ukupnu raspoloživost komunikacijske mreže.

Daljnji izračun raspoloživosti će se stoga temeljiti na primjeni zaštite puta.

Nakon definiranja i klasificiranja četiri faktora utjecaja na temelju analize potrebnog vremena za otklanjanje kvarova, izračunati će se koliki je utjecaj načina izgradnje kablenskih staza i polaganja kabela te odabira radnih i zaštitnih niti na raspoloživost i srednje vrijeme prekida ukupne strukture.

Korištenjem izraza (35–38, 40 i 41) izračunata je ukupna raspoloživost mreže sa zaštitom puta uz uvođenje faktora utjecaja a rezultati su iskazani preko  $MDT$  izraženog u satima/godinu. Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 11.

Tablica 11: Usporedba izračuna *MDT* uz promjenu faktora utjecaja

<b>FU<sub>n</sub></b>	<b><i>MDT</i></b> (sati/god.)
<i>f</i> <sub>1</sub>	1,03
<i>f</i> <sub>2</sub>	0,67
<i>f</i> <sub>3</sub>	0,26
<i>f</i> <sub>4</sub>	0,02

Rezultati izračuna raspoloživosti odnosno *MDT* uz uključene faktore utjecaja pokazuju da način izgradnje kablskih staza i polaganja kabela te odabir radnih i zaštitnih niti također utječu na ukupnu raspoloživost mreže. Razlika *MDT*-a u slučaju potpuno fizički razdvojenih radnih i zaštitnih niti u odnosu kada su niti u istom kabelu iznosi 1,01 sati/godišnje.

Na temelju dobivenih rezultata vidljivo je da se radi povećanja raspoloživosti mreže treba voditi računa o izgradnji kablskih staza već u fazi projektiranja, a predložena metoda zaštite kablskih putova redundantnim putovima i potpuno fizičko razdvajanje radnih i zaštitnih niti pridonijela bi ukupnoj pouzdanosti brodskih sustava i broda u cjelini.

## 6. ALGORITAM ZA IZRAČUN RASPOLOŽIVOSTI SVJETLOVODNE KOMUNIKACIJSKE MREŽE

Za izračun raspoloživosti te pronalaženje optimalnih putova u mreži izrađen je algoritam u koji uz standardne izraze za izračun raspoloživosti koristi i novu metodu s uvođenjem faktora utjecaja. Osim raspoloživosti dodatna funkcija programa je izračunavanje prigušenja signala za sve moguće putove u mreži. Algoritam je izrađen u programskom jeziku PHP – Hypertext Preprocessor a baza podataka pomoću MySQL-a.

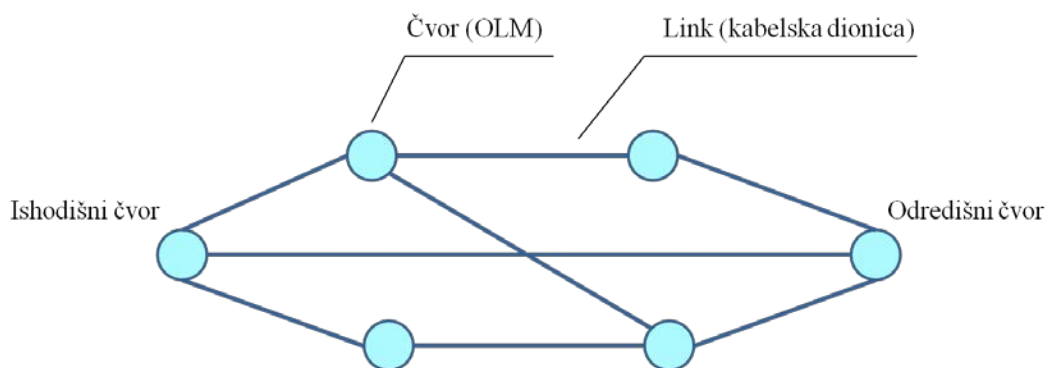
PHP – Hypertext Preprocessor je objektno-orijentiran programski jezik namijenjen prvenstveno izradi web aplikacija. Razvio ga je 1995. godine Rasmus Lerdorf te ga kasnije objavio kao slobodni softver. Danas je to jedan od najzastupljenijih programskih jezika za programiranje web aplikacija.

MySQL sustav koristi se za upravljanje bazom podataka. MySQL baze su relacijskog tipa, koji se pokazao najbolji način skladištenja i pretraživanja velikih količina podataka i u suštini predstavljaju osnovu svakog informacijskog sustava. MySQL i PHP su „open source“ tipa, dakle, mogu se besplatno koristiti.

Algoritam za izračun raspoloživosti komunikacijske mreže prilagođen je za rad na osobnom računalu, no još je značajnija mogućnost korištenja preko web sučelja. Ukoliko se algoritam te svi podaci potrebni za izračun (baze podataka o kvarovima, kablskim trasama, iznosima prigušenja mrežnih komponenata) pohrane na jednom serveru, moguće je pristupiti i koristiti aplikaciju s bilo kojeg računala koje ima pristup internetu. Dodatno unaprjeđenje rada planera i projektanata kablskih mreža je i mogućnost pregledavanja i modificiranja prethodno unesenih mrežnih modela za određene tipove brodova, specifične namjene i sl.

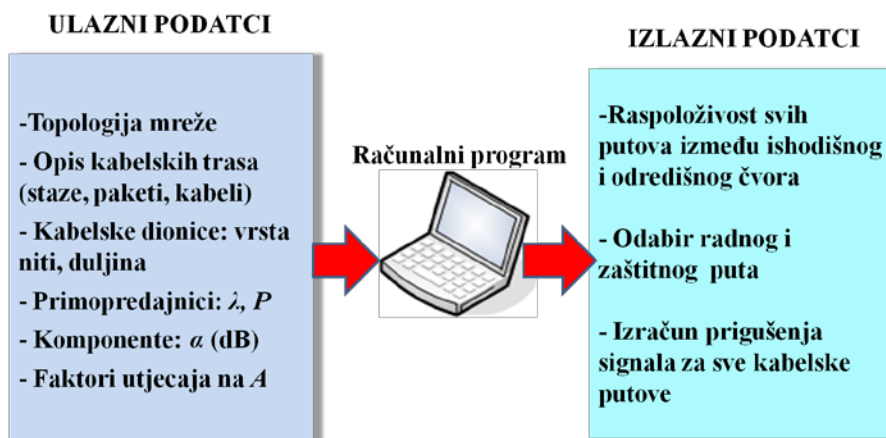
Nakon opisa načela rada algoritma dat je njegov ispis u pseudokodu.

Pri izradi ovog algoritma korišten je standardni prikaz modela raspoloživosti, gdje se mreža prikazuje kao graf sa skupom čvorova međusobno povezanih granama, odnosno linkovima. Čvorovi predstavljaju mjesta na kojima se nalaze prijenosni uređaji, u ovom slučaju optički linijski moduli, dok linkovi predstavljaju kablске dionice povezane u seriju.



Slika 80: Prikaz grafa komunikacijske mreže

Analiza raspoloživosti temelji se na podacima o raspoloživosti za svaki element u promatranoj mreži, a to su intenzitet kvarova i srednje vrijeme popravka. Evidentan je nedostatak tih podataka iz realnih sustava, tako da se većina modela i izračuna temelji na pretpostavkama i predviđanjima. U predstavljenom algoritmu koriste se ulazni podatci dobiveni analizom kvarova realnih brodskih mreža (tablica 6). Kabelske dionice opisane su pripadnom duljinom izraženom u metrima i vrstom svjetlovodne niti. Svjetlovodne komponente izražene su podacima o prigušenju koje unose u sustav, a optički predajnici i prijamnici iznosima ulaznih i izlaznih snaga signala i radnim valnim dužinama.



Slika 81: Prikaz načela rada algoritma za izračun raspoloživosti mreže

Algoritam se može primijeniti na bilo koju mrežnu topologiju te izračunati raspoloživost pojedinih putova u mreži i pronaći optimalne radne i zaštitne putove prema prethodno odabranim kriterijima. Kriteriji odabira radnog i zaštitnog puta mogu

biti: npr. maksimalna raspoloživost, minimalna duljina puta, najmanji broj kabljskih dionica, odabir puta s kabljskim dionicama s određenim faktorima utjecaja.

Preduvjet izračuna je stvaranje baze podataka o svim kabljskim dionicama, čvorovima i faktorima utjecaja za promatranu mrežu. Kabljske dionice opisuju se pripadnom duljinom izraženom u metrima, te kablom imenovanim na način "kabel X-Y-Z", gdje X, Y i Z predstavljaju brojčane oznake, X za broj kabljske staze, Y za broj kabljskog paketa, a Z za broj kabela. Na taj način definiraju se faktori utjecaja kabljske dionice. Čvorovi su upisuju jedinstvenom šifrom od 10 znakova, pa se tako prvi čvor može upisati kao „OLM 1“ a  $n$ -ti čvor kao „OLM  $n$ “.

Korisnik sam definira numeričke vrijednosti ulaznih parametara (intenzitete kvarova, srednje vrijeme popravka, faktora utjecaja) na temelju analize kvarova promatrane mreže. Time je omogućeno korištenje programa izračuna raspoloživosti za mreže različite strukture, veličine i načine izgradnje. Dostupnost podacima o vrstama i uzrocima kvarova na postojećim mrežama značajna je radi dobivanja realnih ulaznih podataka a time i točnijeg izračuna raspoloživosti.

Sistematičnim mijenjanjem tih podataka može se utvrditi i ovisnost raspoloživosti o intenzitetu kvarova i srednjem vremenu popravka pojedinih mrežnih komponenti kao i utjecaj načina izgradnje kabljskog dijela mreže i odabira trase radnih i zaštitnih putova kod mreže s primjenom zaštite puta.

Algoritam je podijeljen na sljedeće korake:

- 1) Definira se ishodišni (*eng. source*) i odredišni (*eng. destination node*) čvor.
- 2) Pronalaze se svi mogući putovi između ishodišnog i odredišnog čvora.
- 3) Računa se raspoloživost za sve pronađene putove sa standardnim podacima o raspoloživosti ( $\lambda$ , *MTTR*, duljina kabljske dionice) te uključujući i nove parametre nazvane faktori utjecaja. Ti rezultati se spremaju u bazu podataka.
- 4) Prema prethodno definiranom kriteriju određuju se radni i zaštitni put.
- 5) Računa se ukupna raspoloživost za konekciju s primijenjenom zaštitom puta.
- 6) Računa se ukupno prigušenje za sve kabljske putove u mreži.

Kao rezultat dobijemo pojedinačne vrijednosti raspoloživosti radnog i zaštitnog puta te svih ostalih putova u mreži, ukupnu raspoloživost mreže sa zaštitom puta uz ispis kablinskih dionica po kojima se ostvaruju svi putovi u mreži.

Osim izračuna prigušenja algoritam računa i prigušenja svih kablinskih putova u mreži. Za taj izračun važni su podaci o vrsti svjetlovodne niti i valnoj dužini koju emitira optički izvor OLM-a. Podatci koji se koriste u izračunu nalaze se u tablici 5, a prigušenje jedne kablinske dionice računa se prema izrazu (16), kako je navedeno u poglavlju 4.

## 6.1. Pseudokod algoritma za izračun raspoloživosti mreže

/\*osnovna funkcija za izračun raspoloživosti za eventualni zaštitni put.

Funkcija se poziva u petlji, za sve prethodno utvrđene putanje od početnih do krajnjih čvorova. Funkcija također izračunava prigušenje svjetlosnog signala za odabrani put.

Navedeni primjer je prikaz stvarne funkcije u pseudokodu.

Parametri: \$idPutanje – id putanje (npr. id sloga iz baze ili pokazivač na slog u polju)

\$idRadnePutanje – id putanje prethodno označene kao radne (npr. putanja s najvećom raspoloživosti)

Oznake za varijable označene su prefiksom '\$' i pisane u tzv. 'Camel' notaciji.

Pseudokod je pisan tiskanim slovima.

Napomena: sve valjani putovi od svih polaznih do svih krajnjih točaka izračunavaju se rekurzivnim prolaskom preko svih mogućih veza između linkova (uz zaštitu od cikličkih putanja)\*/

FUNKCIJA calculateAvailability(\$idPutanje, \$idRadnePutanje)

POČETAK

/\*dohvaćanje nedostupnosti OLM-ova\*/

\$brojOlmova = SUMA LINKOVA\_PUTANJE +1

\$nedostupnostOlmova = \$brojOlmova \* DOSTUPNOST\_OLMA \*

(OLM\_MTTR / 1000000000);

/\*izračun prigušenja u petlji\*/

PETLJA ZA SVE LINKOVE PUTANJE

\$duljina = DULJINA\_TEKUCEG\_LINKA

\$prigusenje660nm = PRIGUSENJE\_660NM\_TEKUCEG\_LINKA

\$prigusenje850nm = PRIGUSENJE\_850NM\_TEKUCEG\_LINKA

\$prigusenje1300nm = PRIGUSENJE\_1300NM\_TEKUCEG\_LINKA

\$prigusenjeSpoja = PRIGUSENJE\_KONEKTORA\_TEKUCEG\_LINKA

\$ukupnoPrigusenje660nm = \$ukupnoPrigusenje660nm + \$duljina \*

\$prigusenje660nm + \$prigusenjeSpoja

\$ukupnoPrigusenje850nm = \$ukupnoPrigusenje850nm + \$duljina \*

\$prigusenje850nm + \$prigusenjeSpoja



$\$sukupnoPrigusenje1300nm = \$sukupnoPrigusenje1300nm + \$duljina * \$prigusenje1300nm + \$prigusenjeSpoja$

KRAJ PETLJE

SPREMI PRIGUSENJA (\$idPutanje KAO KLJUC) U POLJE\_PRIGUSENJA

/\*izračun dostupnosti putanje\*/

\$nedostupnostLinkovaIstiKabel =

SUMA (DULJINA\_LINKA \* LAMBDA\_KABELA \*  
(MTTR\_KABELA/1000000000) \* FAKTOR\_1)

OD LINKOVA\_PUTANJE

GDJE ID\_LINKA\_PUTANJE = \$idPutanje

I LINKOVI\_PUTANJE SU U ISTOM KABELU KAO I (LINKOVI\_PUTANJE  
GDJE ID\_LINKA\_PUTANJE = \$idRadnePutanje)

\$nedostupnostLinkovaIstiPaket =

SUMA (DULJINA\_LINKA \* LAMBDA\_KABELA \*  
(MTTR\_KABELA/1000000000) \* FAKTOR\_2)

OD LINKOVA\_PUTANJE

GDJE ID\_LINKA\_PUTANJE = \$idPutanje

I LINKOVI\_PUTANJE SU U ISTOM PAKETU KAO I (LINKOVI\_PUTANJE  
GDJE ID\_LINKA\_PUTANJE = \$idRadnePutanje)

I LINKOVI\_PUTANJE NISU U ISTOM KABELU KAO I  
(LINKOVI\_PUTANJE GDJE ID\_LINKA\_PUTANJE = \$idRadnePutanje)

\$nedostupnostLinkovaIstaStaza =

SUMA (DULJINA\_LINKA \* LAMBDA\_KABELA \*  
(MTTR\_KABELA/1000000000) \* FAKTOR\_3)

OD LINKOVA\_PUTANJE

GDJE ID\_LINKA\_PUTANJE = \$idPutanje

I LINKOVI\_PUTANJE SU U ISTOJ STAZI KAO I (LINKOVI\_PUTANJE GDJE  
ID\_LINKA\_PUTANJE = \$idRadnePutanje)

I LINKOVI\_PUTANJE NISU U ISTOM PAKETU KAO I  
(LINKOVI\_PUTANJE GDJE ID\_LINKA\_PUTANJE = \$idRadnePutanje)

```

I LINKOVI_PUTANJE NISU U ISTOM KABELU KAO I
(LINKOVI_PUTANJE GDJE ID_LINKA_PUTANJE = $idRadnePutanje)
$nedostupnostLinkovaRazlicitaStaza =
SUMA (DULJINA_LINKA * LAMBDA_KABELA *
(MTTR_KABELA/1000000000) * FAKTOR_3)
OD LINKOVA_PUTANJE
GDJE ID_LINKA_PUTANJE = $idPutanje
I LINKOVI_PUTANJE NISU U ISTOJ STAZI KAO I (LINKOVI_PUTANJE GDJE
ID_LINKA_PUTANJE = $idRadnePutanje)
I LINKOVI_PUTANJE NISU U ISTOM PAKETU KAO I
(LINKOVI_PUTANJE GDJE ID_LINKA_PUTANJE = $idRadnePutanje)
I LINKOVI_PUTANJE NISU U ISTOM KABELU KAO I
(LINKOVI_PUTANJE GDJE ID_LINKA_PUTANJE = $idRadnePutanje)
/*ukupna dostupnost dobija se oduzimanjem sume nedostupnosti od broja 1
(100%)*
$dostupnost = 1 - $nedostupnostLinkovaIstiKabel -
$nedostupnostLinkovaIstiPaket - $nedostupnostLinkovaIstaStaza -
$nedostupnostLinkovaRazlicitaStaza
VRATI $dostupnost;
KRAJ FUNKCIJE
/*Funkcija koja prelazi sve utvrđene (izračunate) putove od početnih do krajnjih
čvorova. Funkcija utvrđuje najbolji zaštitni put i ukupnu raspoloživost radnog i
zaštitnog puta.
Oznake za varijable označene su prefiksom '$' i pisane u tzv. 'Camel' notaciji.
Pseudokod je pisan tiskanim slovima*/
FUNKCIJA calculateAvailabilities()
POČETAK
$idZastitnePutanje = 0
$dostupnostZastitnePutanje = 0
/*dohvaćanje utvrđene (izračunate) radne putanje*/
$idRadnePutanje = (DOHVATI ID_PUTANJE OD PUTANJA_PROJEKTA GDJE
JE PUTANJA_PROJEKTA

```

OZNACENA KAO RADNA)

*/\*ako zaštitna putanja nije definirana, prolazimo sve putanje i pronalazimo najbolju\*/*

AKO (DOHVATI ID\_PUTANJE U \$idZastitnePutanje GDJE JE  
PUTANJA\_PROJEKTA OZNACENA KAO ZASTITNA) NE POSTOJI ONDA  
PETLJA:

(DOHVATI ID\_PUTANJE U \$idPutanje GDJE PUTANJA\_PROJEKTA NIJE  
OZNACENA KAO RADNA)

\$privremenaDostupnost = (ZOVI calculateAvailability(\$idPutanje,  
\$idRadnePutanje))

SPREMI \$privremenaDostupnost (\$idPutanje KAO KLJUC) U  
POLJE\_DOSTUPNOSTI

*/\*spremanje u polje za npr. prikazivanje rezultata\*/*

AKO \$privremenaDostupnost VECA\_OD \$dostupnostZastitnePutanje ONDA

\$dostupnostZastitnePutanje = \$privremenaDostupnost

\$idZastitnePutanje = \$idPutanje

KRAJ AKO

KRAJ PETLJE

INACE

*/\*ako je zaštitna putanja određena, izračunaj njenu dostupnost\*/*

\$dostupnostZastitnePutanje = (ZOVI  
calculateAvailability(\$idZastitnePutanje, \$idRadnePutanje))

KRAJ AKO

*/\*Raspoloživost radnog puta utvrđuje se zamjenom parametara za funkciju  
calculateAvailability*

*Naposlijetku, izračunavamo ukupnu raspoloživost\*/*

\$dostupnostRadnaPutanja = (ZOVI calculateAvailability(\$idRadnePutanje,  
\$idZastitnePutanje))

\$dostupnostUkupno = (\$dostupnostRadnaPutanja + \$dostupnostZastitnePutanje) -  
(\$dostupnostRadnaPutanja \*

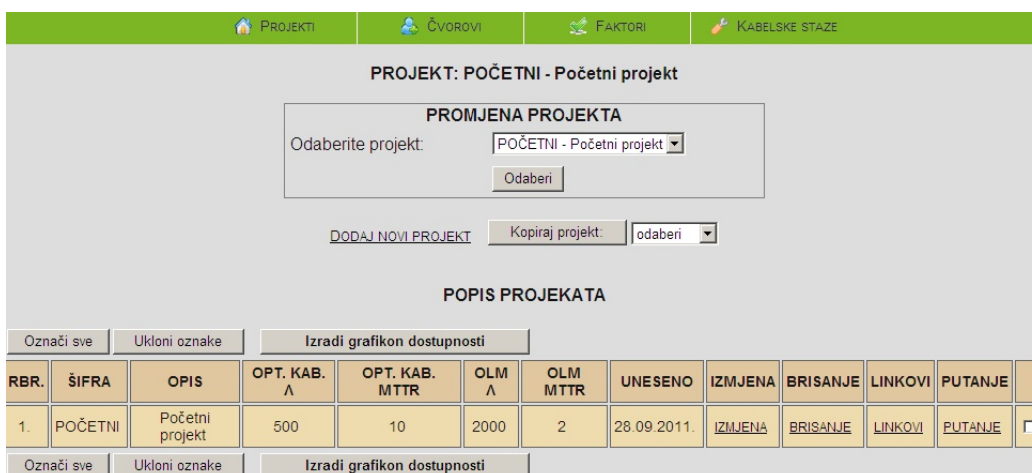
\$dostupnostZastitnePutanje)

KRAJ FUNKCIJE

## 6.2. Prikaz korisničkog sučelja programa za izračun raspoloživosti brodske komunikacijske mreže



Slika 82: Izgled početnog ekrana za unos modela mreže



Slika 83: Popis modela unesenih u program



Slika 84: Unos kabelskih staza

PROJEKT: POČETNI - Početni projekt

POPIS KABELSKIH PAKETA

Kabelska staza: **s1 - Staza 1**

[DODAJ NOVI KABELSKI PAKET](#)

STRANICA: 1

RBR.	ŠIFRA	OPIS	IZMJENA	BRISANJE	KABELI
1.	p1	Paket 1	<a href="#">IZMJENA</a>	<a href="#">BRISANJE</a>	<a href="#">PREGLED</a>

STRANICA: 1

Slika 85: Unos kabelskih paketa

PROJEKT: POČETNI - Početni projekt

POPIS KABELA

Kabelska staza: **s1 - Staza 1**  
Kabelski paket: **p1 - Paket 1**

[DODAJ NOVI KABEL](#)   [POVRATAK NA POPIS KABELSKIH PAKETA](#)

STRANICA: 1

RBR.	ŠIFRA	OPIS	VRSTA NITI	IZMJENA	BRISANJE
1.	c1	Kabel 1	MM5	<a href="#">IZMJENA</a>	<a href="#">BRISANJE</a>

STRANICA: 1

Slika 86: Unos kabela

PROJEKT: POČETNI - Početni projekt

POPIS ČVOROVA

[DODAJ NOVI ČVOR](#)

STRANICA: 1

RBR.	ŠIFRA	OPIS	POZICIJA	IZMJENA	BRISANJE
1.	Aolm1	Spoj s prvim olm-om	start	<a href="#">IZMJENA</a>	<a href="#">BRISANJE</a>
2.	Bolm1	Zaštitni spoj 1	start	<a href="#">IZMJENA</a>	<a href="#">BRISANJE</a>
3.	Aolm2	Spoj s drugim olm-om	end	<a href="#">IZMJENA</a>	<a href="#">BRISANJE</a>
4.	Bolm2	Zaštitni spoj 2	end	<a href="#">IZMJENA</a>	<a href="#">BRISANJE</a>

STRANICA: 1

Slika 87: Popis čvorova

PROJEKTI ČVOROVİ FAKTORI KABELSKE STAZE

**PROJEKT: POČETNI - Početni projekt**

**DODAVANJE / IZMJENA OPISA ČVORA**

Šifra:

Opis:

Pozicija:

Slika 88: Unos/izmjena čvorova

PROJEKTI ČVOROVİ FAKTORI KABELSKE STAZE

**PROJEKT: POČETNI - Početni projekt**

**POPIS LINKOVA**

[DODAJ NOVI LINK](#)

STRANICA: 1

RBR.	ŠIFRA.	ČVOR OD	ČVOR DO	DULJINA	KABEL	IZMJENA	BRISANJE
1.	I1	Aolm1	Aolm2	100.000 m	c1	<a href="#">IZMJENA</a>	<a href="#">BRISANJE</a>
2.	I2	BoIm1	BoIm2	100.000 m	c2	<a href="#">IZMJENA</a>	<a href="#">BRISANJE</a>

STRANICA: 1

Slika 89: Popis linkova

PROJEKTI ČVOROVİ FAKTORI KABELSKE STAZE

**PROJEKT: POČETNI - Početni projekt**

**DODAVANJE / IZMJENA LINKA**

Šifra:

Opis:

Duljina:  metara

Polazni čvor:

Dolazni čvor:

Kabel:

Konektori:

[POVRATAK NA POPIS LINKOVA](#)

Slika 90: Unos/izmjena linkova

PROJEKTI ČVOROVİ FAKTORI KABELSKE STAZE

**PROJEKT: POČETNI - Početni projekt**

**POPIS IMPACT FAKTORA**

[DODAJ NOVI IMPACT FAKTOR](#)

STRANICA: 1

RBR.	ŠIFRA	OPIS	VRIJEDNOST	IZMJENA	BRISANJE
1.	f1	niti u istom kabelu	7.200	<a href="#">IZMJENA</a>	<a href="#">BRISANJE</a>
2.	f2	kabeli u istom paketu	5.800	<a href="#">IZMJENA</a>	<a href="#">BRISANJE</a>
3.	f3	kabeli u istoj stazi	3.600	<a href="#">IZMJENA</a>	<a href="#">BRISANJE</a>
4.	f4	kabeli u razl. stazama	1.000	<a href="#">IZMJENA</a>	<a href="#">BRISANJE</a>

STRANICA: 1

Slika 91: Popis faktora utjecaja

PROJEKTI ČVOROVİ FAKTORI KABELSKE STAZE

**PROJEKT: POČETNI - Početni projekt**

**DODAVANJE / IZMJENA IMPACT FAKTORA**

Šifra:

Opis:

Vrijednost:

Slika 92: Unos/izmjena vrijednosti faktora utjecaja

PROJEKTI ČVOROVİ FAKTORI KABELSKE STAZE

**PROJEKT: POČETNI - Početni projekt**

Datum projekta: 28.09.2011

**LINKOVI:**

RBR.	OPIS (ČVOR OD->DO)	BR. PROLAZA
1.	I1 (Aolm1->Aolm2)	1
2.	I2 (Bolm1->Bolm2)	1

**PUTANJE:**

[poredaj po dostupnosti](#) [POREDAJ PO BROJU LINKOVA](#)

Ukupna dostupnost radne i zaštitne putanje: **0.9999999992775**

RBR.	PUTANJA	DOSTUPNOST	$\alpha$ 660nm	$\alpha$ 850nm	$\alpha$ 1300nm	RADNA PUTANJA	ZAŠTITNA PUTANJA
1.	Aolm1(I1)->Aolm2	0.9999915	0,7 dB	1 dB	0,8 dB	(radna putanja)	
2.	Bolm2(I2)->Bolm1	0.9999915	0,7 dB	1 dB	0,8 dB		(zaštitna putanja)

[POVRATAK NA POPIS PROJEKATA](#) [PONOVNI IZRAČUN PROJEKTA](#)

Slika 93: Izračun raspoloživosti za odabrani model

## 7. MODELI MREŽE

Svi modeli prikazani u ovom poglavlju temelje se na prethodno predstavljenoj analizi kvarova realnih komunikacijskih mreža, novoj metodi izračuna raspoloživosti uz uvođenje faktora utjecaja, a napravljeni su korištenjem opisanog računalnog programa.

Za izračun raspoloživosti korišteni su izrazi (17-38) i vrijednosti intenziteta kvarova i srednje vrijeme popravka optičkih linijskih modula i svjetlovodnih kabela iz tablice 6.

Kroz modele se prikazuje koliko primjena uvođenja zaštitne trase vrijednosti faktora utjecaja, te udvostručavanje optičkih linijskih modula i kabela utječe na ukupnu raspoloživost konekcije. U modelu 5 prikazana je specifična primjena komunikacijske mreže za upravljanje potiskivačem pramca, a kroz model 6 utjecaj različitih duljina kabelske mreže bez zaštite i uz primjenu zaštite puta na  $A$  odnosno  $MDT$ .

Svi modeli izrađeni su uz slijedeće pretpostavke: OLM-ovi, svjetlovodne niti i kabele te spojni materijal jednakih su konstrukcijskih i prijenosnih karakteristika; svaki element u blok shemi raspoloživosti ima dva stanja: stanje rada i stanje kvara. Vrijeme rada komponente bez pojave kvara i vrijeme popravka su statistički nezavisni; svaki element sustava radi dok nije u kvaru; kad se sustav pokvari pomoću popravaka se dovede u radno stanje te se ne razmatraju greške nastale dok je sustav u stanju kvara; popravljeni element se smatra „dobar kao novi“; raspoloživost ekipe i rezervnih dijelova potrebnih za popravak je neograničen.

### Model 1

U modelu 1 promatra se utjecaj duljine zaštitne kabelske trase na ukupnu raspoloživost i  $MDT$ . Model mreže sastoji se od radne i zaštitne kabelske trase. Radni put je fiksne duljine 300 metara, a duljinu zaštitnog puta mijenjamo od 0 do 300. Na radnom putu ugrađeno je 10 OLM-ova.

Slučaj kada je zaštitni put duljine 0 metara, odnosno ne postoji, predstavlja model raspoloživosti serijske strukture s 10 OLM-ova i 9 kabelskih sekcija, prikazan na slici 75. Slučaj kada su radni i zaštitni put jednake duljine od 300 m predstavlja paralelnu strukturu prikazanu na slici 76.

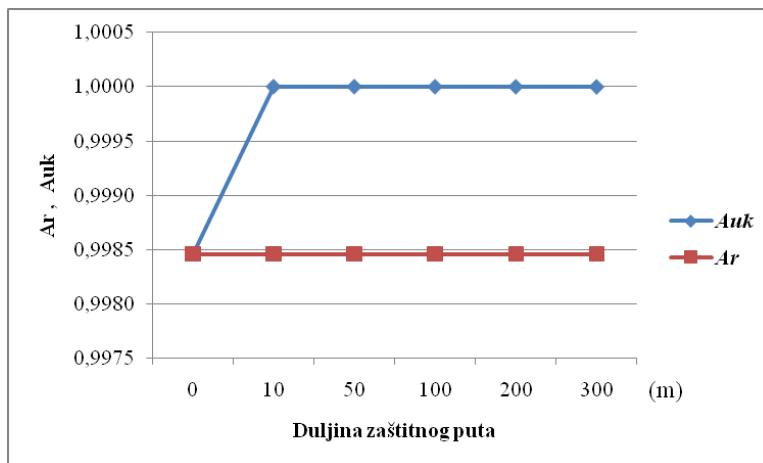
U tablici 12 prikazani su rezultati izračuna raspoloživosti za radni i zaštitni put ( $A_{\text{radni put}}$  i  $A_{\text{zaštitni put}}$ ) te ukupna raspoloživost  $A_{uk}$  i srednje vrijeme prekida  $MDT_{uk}$ . Na



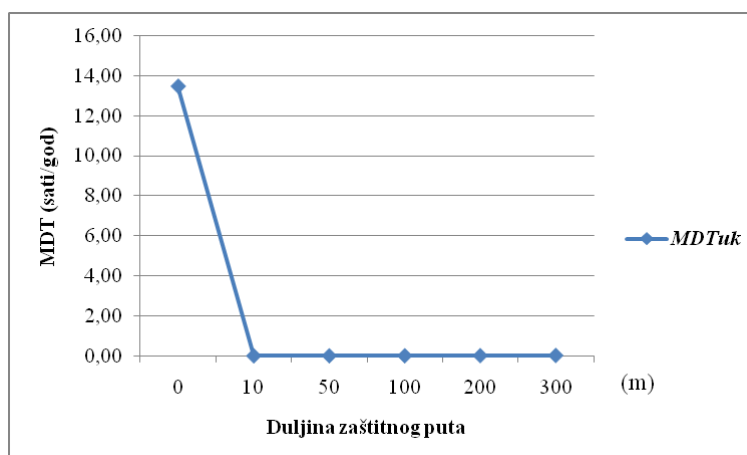
slici 94 prikazane su krivulje ovisnosti  $A_{radni\ put}$  i  $A_{uk}$  o promjeni duljine zaštitnog puta, a na slikama 95 i 96 ovisnost  $MDT_{uk}$ .

Tablica 12: Utjecaj duljine zaštitnog puta na  $A_{uk}$  i  $MDT_{uk}$  mreže

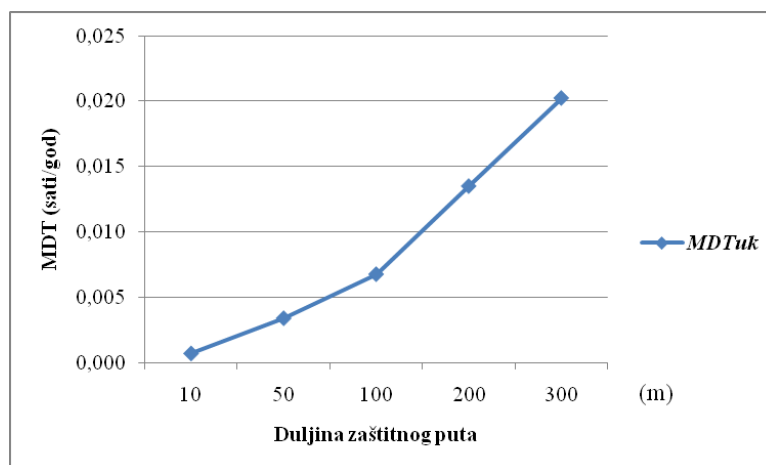
Duljina zaštitne trase (m)	$A_{radni\ put}$	$A_{zaštitni\ put}$	$A_{uk}$	$MDT_{uk}$ (sati/god.)
0	0,99846	0,00000	0,9984601	13,4899
10	0,99846	0,99995	0,9999999	0,0007
50	0,99846	0,99975	0,9999996	0,0034
100	0,99846	0,99950	0,9999992	0,0067
200	0,99846	0,99900	0,9999985	0,0135
300	0,99846	0,99850	0,9999977	0,0202



Slika 94: Utjecaj duljine zaštitnog puta na  $A_{uk}$  i  $A_{radni\ put}$



Slika 95: Utjecaj duljine zaštitnog puta na  $MDT_{uk}$  mreže



Slika 96: Utjecaj duljine zaštitnog puta na  $MDT_{uk}$  mreže

Rezultati izračuna  $MDT_{uk}$  pokazuju značajno smanjenje kada se primijeni strategija zaštite puta i to čak od 13,5 sati na godinu (slika 95). Razlika iznosa  $MDT_{uk}$  pri povećanju zaštitne trase od 10 do 300 metara je zanemariva, samo 1,2 minute na godinu (slika 96).

Ovakav rezultat opravdava potrebu planiranja i izgradnje zaštitnih putova, koji su potpuno fizički razdvojeni od radnih putova i čine mrežu s paralelnom strukturom.

## Model 2

U modelu 2 promatra se paralelna struktura mreže s radnim i zaštitnim putom jednakih duljina od 300 metara. Deset OLM-ova montirano je na radnom putu. Da bi se utvrdio utjecaj numeričkih vrijednosti faktora utjecaja  $f_1 - f_4$  na ukupnu raspoloživost i srednje vrijeme prekida, mijenja se vrijednosti  $FU_n$  s faktorom promjene od 0,1 do 10. Faktor promjene parametra označen s 1 na slici 97 predstavlja vrijednosti  $FU_n$  iz tablice 10. Rezultati izračuna  $A_{uk-I}$  i  $MDT-I$  za nominalne vrijednosti  $FU_n$  prikazane su u tablici 13; za vrijednosti  $FU_n$  umanjene za 10 puta u tablici 14 te za vrijednosti  $FU_n$  uvećane za 10 puta u tablici 15. Dijagram  $MDT$ -a za faktore utjecaja  $f_1 - f_4$  kao funkcije faktora promjene parametra vrijednosti  $FU_n$  prikazan je na slici 97.

Tablica 13:  $A_{uk}$  i  $MDT$  uz nominalne vrijednosti  $FU_n$

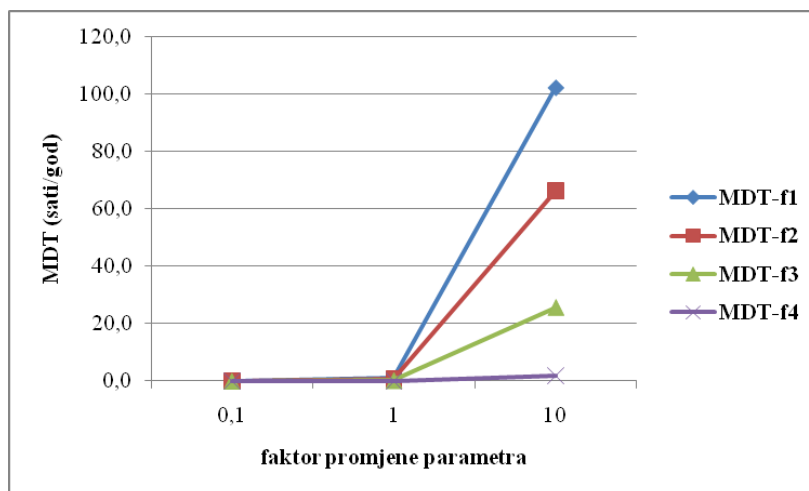
$FU_n$	Vrijednost $FU_n$	$A_{uk-1}$	$MDT-1$ (sati/god.)
$f_1$	7,2	0,999883	1,03
$f_2$	5,8	0,999924	0,67
$f_3$	3,6	0,999971	0,26
$f_4$	1	0,999998	0,02

Tablica 14:  $A_{uk}$  i  $MDT$  uz smanjene vrijednosti  $FU_n$

$FU_n$	Vrijednost $FU_n$	$A_{uk-0,1}$	$MDT-0,1$ (sati/god.)
$f_1$	0,72	0,99999879	0,0106
$f_2$	0,58	0,99999921	0,0069
$f_3$	0,36	0,99999969	0,0027
$f_4$	0,1	0,99999997	0,0002

Tablica 15:  $A_{uk}$  i  $MDT$  uz povećane vrijednosti  $FU_n$

$FU_n$	Vrijednost $FU_n$	$A_{uk-10}$	$MDT-10$ (sati/god.)
$f_1$	72	0,98833	102,21
$f_2$	58	0,99243	66,33
$f_3$	36	0,99708	25,56
$f_4$	10	0,99977	1,98



Slika 97:  $MDT$  kao funkcija faktora promjene parametra vrijednosti  $FU_n$

Iz dijagrama na slici 97 vidljivo je značajno povećanje *MDT*-a kada se vrijednosti faktora utjecaja  $f_1, f_2, f_3$  i  $f_4$  povećaju za 10 puta. U odnosu na vrijednosti  $FU_n$  dobivene analizom *MTTR*-a realne mreže, povećanja *MDT*-a iznose 100 puta. Suprotno tome, ukoliko se vrijednosti faktora utjecaja smanjuju za 10 puta u odnosu na nominalne vrijednosti, nastaju razlike od 1 sata do 1 minute na godinu.

Rezultati pokazuju i značajno manje vrijednosti *MDT*- $f_4$  u odnosu na *MDT* za ostala tri faktora utjecaja i to za sve iznose  $FU_n$  iz tablica 13, 14 i 15. Smanjenje iznosa  $f_4$  i povećanje za 10 puta mijenjaju *MDT*- $f_4$  za samo 2 sata na godinu. To znači da ukoliko se vrijeme potrebno za popravak poveća 10 puta, a ukoliko mreža ima zaštitni put, srednje vrijeme prekida neće se značajno povećati.

Ovakav rezultat upućuje nas na važnost smanjivanja vremena potrebnog za popravak kvarova kao i potrebu ugradnje zaštitnih putova.

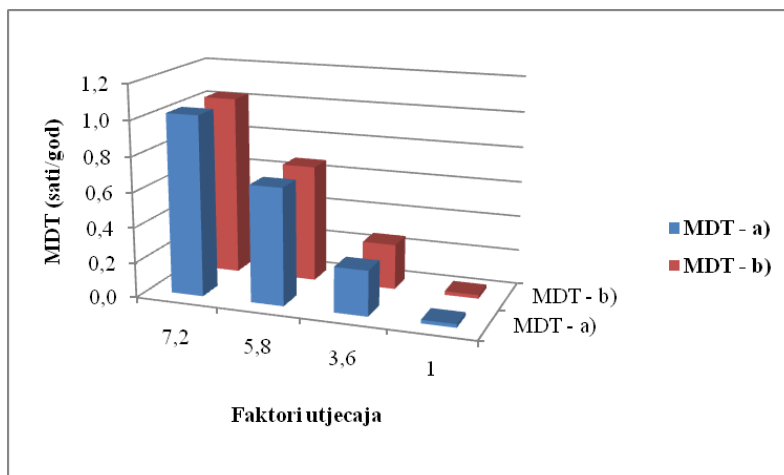
### **Model 3**

Uobičajene izvedbe brodskih komunikacijskih mreža izvedene su povezivanjem optičkih linijskih modula u serijsku strukturu prema slici 75. Rezultati iz prethodno opisanih modela opravdavaju ugradnju zaštitnih kabljskih putova.

U ovom modelu komparira se primjere s paralelnom strukturom dva puta te udvostručenim OLM-ovima. U primjeru **a**) deset OLM-ova spojeno je na 300 m dugoj radnoj kabljskoj vezi, a zaštitni put također ima duljinu 300 metara. U primjeru **b**) promatramo radnu i zaštitnu kabljsku trasu jednakih duljina od 300 m, a na svakoj trasi ugrađeno je 10 OLM-ova. U primjeru **a**) udvostručen je samo kabljski segment dok je u primjeru **b**) udvostručen kabljski i uređajni dio mreže. U tablici 16 prikazana je usporedba rezultata izračuna *MDT* za oba primjera, a na slici 98 dat je grafički prikaz rezultata.

Tablica 16: Usporedba izračuna *MDT* uz udvostručenje opreme

$FU_n$	Vrijednost $FU_n$	<i>MDT</i> -a) (sati/god.)	<i>MDT</i> - b) (sati/god.)
$f_1$	7,2	1,026	1,029
$f_2$	5,8	0,666	0,669
$f_3$	3,6	0,257	0,259
$f_4$	1	0,020	0,021



Slika 98: Usporedba izračuna *MDT* uz udvostručenje opreme

Rezultati izračuna pokazuju zanemarivo malu promjenu *MDT*-a uz udvostručenje optičkih linijskih uređaja. No, ujedno je vidljivo poboljšanje *MDT*-a uz faktor utjecaja  $f_4$ , koji predstavlja potpuno fizički razdvojene radne i zaštitne putove. Ovakav rezultat pokazuje dominantan utjecaj kabelskog segmenta na raspoloživost mreže te opravdava potrebu detaljnijeg sagledavanja njegove izgradnje i popravaka.

#### **Model 4**

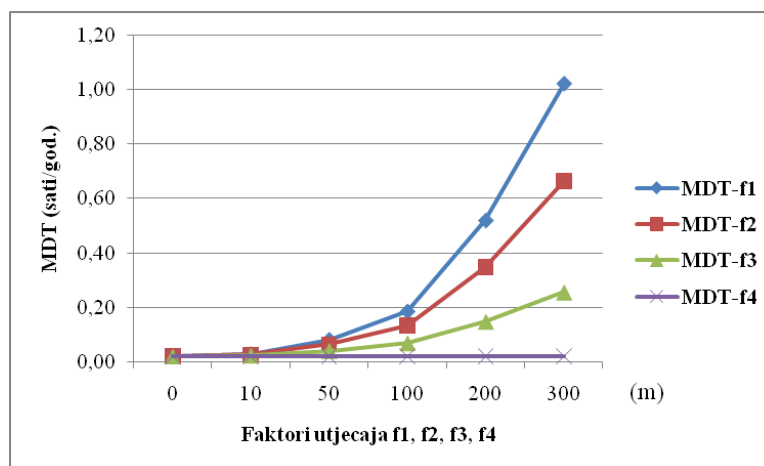
Nakon što je kroz modele 1 i 3 te analizu osjetljivosti *MDT*-a na promjene vrijednosti intenziteta kvarova kabela i OLM-ova iz poglavlja 5.3., ustanovljen vrlo mali utjecaj intenziteta kvarova odnosno raspoloživosti OLM-ova na ukupnu raspoloživost mreže, u ovom modelu prikazat ću samo utjecaj kabelskog segmenta na *MDT* mreže.

U ovom modelu mijenja se duljina utjecaja  $FU_n$  na radnom i zaštitnom putu istovremeno, na dionicama od 0 do 300 m. Pretpostavka je da na preostalom dijelu radnog i zaštitnog puta djeluje  $f_4$ , odnosno da su radni i zaštitni put potpuno fizički razdvojeni. Vrijednosti *MDT*-a uz naznačeni faktor utjecaja koji djeluje na dijelu radnog i zaštitnog puta iskazane su u tablici 17.

Promjena *MDT*-a uzrokovana utjecajem faktora  $f_1$ ,  $f_2$  i  $f_3$  na dionicama do 50 m gotovo je zanemariva. Značajna razlika opaža tek na dionicama od 200 i 300 m. Uspoređujući navedene rezultate s vrijednostima *MDT* za  $f_4$  odstupanja iznose od 0,5 minuta na godinu do 1 sata na godinu.

Tablica 17: Vrijednosti *MDT*-a za model 4

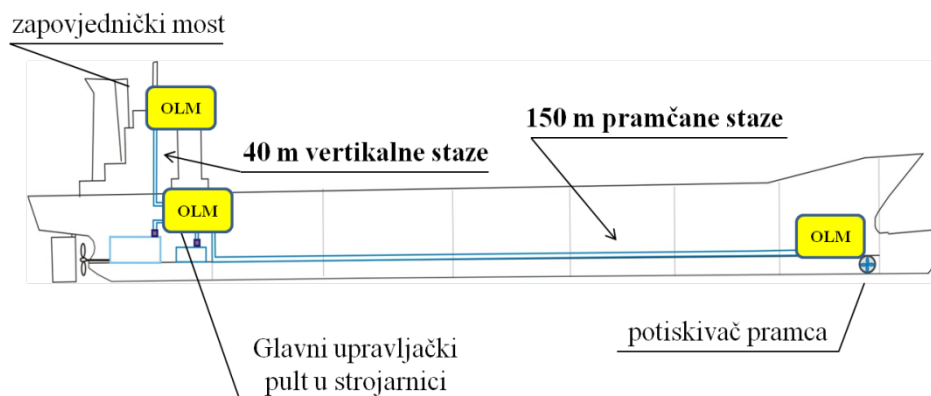
Duljina utjecaja $FU_n$ (m)	$MDT - f_1$ (sati/god.)	$MDT - f_2$ (sati/god.)	$MDT - f_3$ (sati/god.)	$MDT - f_4$ (sati/god.)
0	0,0197	0,0197	0,0197	0,0197
10	0,0287	0,0265	0,0233	0,0197
50	0,0814	0,0638	0,0405	0,0197
100	0,1851	0,1330	0,0686	0,0197
200	0,5189	0,3474	0,1471	0,0197
300	1,0218	0,6630	0,2554	0,0197



Slika 99: *MDT* kao funkcija duljine utjecaja  $FU_n$

## Model 5

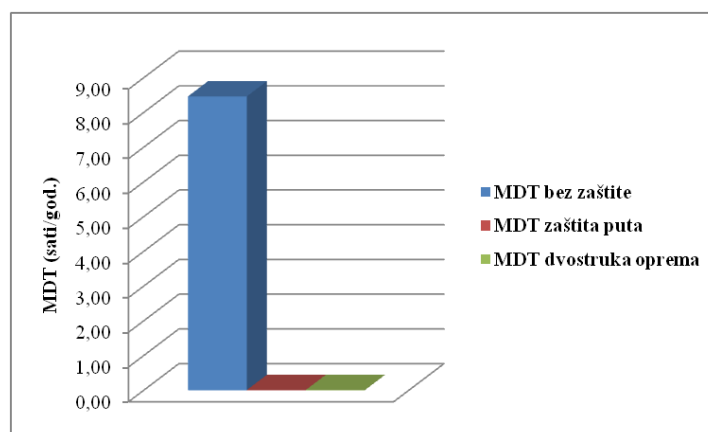
Model 5 opisuje specifičan primjer uporabe komunikacijske mreže za upravljanje potiskivačem pramca. OLM-ovi se nalaze na potiskivaču pramca, glavnom upravljačkom pultu u strojarnici i zapovjedničkom mostu (slika 100). Vertikalna staza je duljine 40 m, a pramčana 150 m. To su standardne veličine za trgovačke brodove koji se grade u Brodogradilištu „3. maj“ u Rijeci. U modelu se promatraju tri slučaja konfiguracije mreže: bez zaštite, sa zaštitom puta gdje je zaštitni put samo kabel u potpuno fizički razdvojenoj kabelskoj stazi, a OLM-ovi se nalaze na radnoj trasi, te zaštita puta uz montažu OLM-ova na radnu i zaštitnu trasu. U oba slučaja sa primjenom zaštite puta radni i zaštitni put su iste duljine od 190 m.



Slika 100: Prikaz komunikacijske mreže za upravljanje potiskivačem pramca

Tablica 18: Vrijednosti *MDT*-a za model 5

Vrsta konfiguracije mreže	A	<i>MDT</i> (sati/god.)
bez zaštite	0,99903402	8,46
zaštita puta	0,99999908	0,0080389
zaštita puta uz dvostruke OLM-ove	0,99999907	0,0081742



Slika 101: Usporedba izračuna *MDT*-a za mrežu bez zaštite i sa zaštitom puta

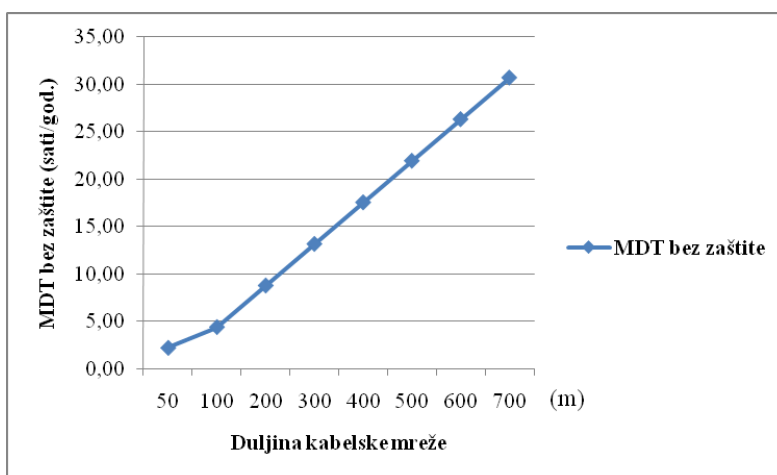
Rezultati izračuna *MDT*-a za model 5 pokazuju razliku *MDT* bez zaštite i oba slučaja *MDT* zaštita puta od 8 sati na godinu. Razlika između *MDT* zaštita puta i *MDT* dvostruka oprema je zanemariva, čime se potvrđuje neisplativost ugrađivanja dvostrukih optičkih linijskih modula.

## Model 6

U modelu 6 promatramo vrijednosti MDT-a za mreže bez zaštite i sa zaštitom puta uz promjenu duljina kablenskog segmenta. Duljina kablenske mreže mijenja se od 50 do 700 m. Vrijednosti  $MDT_{bez\ zaštite}$  kreću se od 2,19 do 30,66 sati/god., dok vrijednosti  $MDT_{zaštita\ puta}$  puno manje ovise o promjeni duljine kablenske mreže i iznose od 0,06 min/god. do 6,4 min/god. Iz dobivenih rezultata slijedi zaključak da uz primjenu zaštite puta srednje vrijeme prekida zanemarivo malo ovisi o promjenama duljine kablenske mreže na brodu.

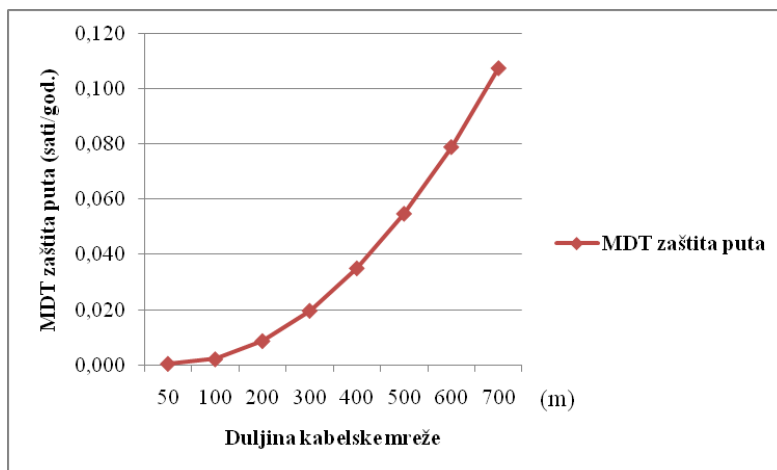
Tablica 19: Vrijednosti  $MDT_{bez\ zaštite}$  i  $MDT_{zaštita\ puta}$  za model 6

Duljina kablenske mreže (m)	$MDT_{bez\ zaštite}$ (sati/god.)	$MDT_{zaštita\ puta}$ (sati/god.)
50	2,19	0,001
100	4,38	0,002
200	8,76	0,009
300	13,14	0,020
400	17,52	0,035
500	21,90	0,055
600	26,28	0,079
700	30,66	0,107



Slika 102:  $MDT_{bez\ zaštite}$  kao funkcija duljine kablenske mreže





Slika 103:  $MDT_{zaštitna\ puta}$  kao funkcija duljine kablске mreže

## 8. ZAKLJUČAK

Prijenosne i konstrukcijske prednosti svjetlovodnih niti i kabela te optičkih prijenosnih uređaja, u odnosu na konvencionalne tehnologije prijenosa podataka, dolaze do izražaja i u zahtjevnim okolišima kao što su brodovi i ostale strukture vezane uz pomorstvo (platforme, dokovi, privezišta). U uvodnom dijelu rada dat je pregled primjene svjetlovodne tehnologije u pomorstvu te osnovnih načela rada svjetlovodnih sustava prijenosa.

Za učinkovito upravljanje brodom, koji je složena tehnička cjelina, od iznimne je važnosti da svi njegovi sustavi rade ispravno i pouzdano. Da bi se sustavima moglo upravljati i nadzirati potrebno je povezati sve komponente sustava komunikacijskom mrežom.

Osnovni cilj rada bio je izraditi matematički model svjetlovodne komunikacijske mreže u povezivanju brodskih sustava, te modelirati i analizirati raspoloživost mreže uz primjenjivanje zaštitne metode. Raspoloživost svjetlovodne komunikacijske mreže bitno utječe na raspoloživost brodskih sustava i broda u cjelini. Matematičko modeliranje raspoloživosti mreže značajna je pomoć pri razmatranju efikasnosti predložene mrežne arhitekture, određivanju raspoloživosti pojedinih komponenti i cijelog sustava. Osim što se modelima može prikazati planirano stanje od iznimne je važnosti i mogućnost prikazivanja realne situacije a time i mogućnost predviđanja kvarova i utvrđivanja eventualnih „slabih karika“ u mreži. Predloženi model je heuristički jer smo u praksi zadovoljni s „dovoljno dobrim“ rješenjima koja možemo pronaći brzo, bez skupih sofisticiranih alata i programskih rješenja. Model mreže baziran je na temeljnim postavkama teorije pouzdanosti.

Preduvjet za stvaranje realističnog modela raspoloživosti mreže je analiza ponašanja mreže pri pojavi kvarova, te detektiranje i vrednovanje faktora koji utječu na rizik od kvarova. To je učinjeno korištenjem podataka o kvarovima brodskih mreža dobivenih iz prakse odnosno od brodara i tvrtki koje ugrađuju i servisiraju brodske elektroničke uređaje a odnose se na brodove starosti do 5 godina. Time je ostvaren jedan od ciljeva rada a to je stvaranje realne baze podataka potrebne za daljnja akademska istraživanja, povezujući podatke iz prakse s dosadašnjim istraživanjima na području otpornosti svjetlovodnih mreža.

Uz sistematizirani prikaz strukture i komponenata mreže, analizirani su utjecaji kvarova pojedinih elemenata na ukupnu raspoloživost mreže. Za navedenu analizu koristili su se podatci o kvarovima iz realnih brodskih mreža. Uz standardne podatke potrebne za izračun raspoloživosti, ulazni podatci koji se temelje na stvarnim vrijednostima pridonose približavanju matematičkog modela realnoj mreži a time i boljem i točnijem izračunu raspoloživosti mreže.

Predstavljen je matematički model raspoloživosti uz primjenu zaštitnih metoda za povećanje otpornosti mreže. Uspoređivani su rezultati izračuna raspoloživosti za mreže bez zaštite ta sa zaštitom puta. Rezultati su pokazali da primjena zaštite puta znatno povećava ukupnu raspoloživost mreže.

Da bi se prikazao utjecaj intenziteta kvarova komponenata na ukupnu raspoloživost mreže koristi se analiza osjetljivosti. Analiza osjetljivosti koristi se da bi se utvrdilo koliko je neki model „osjetljiv“ na promjenu numeričkih vrijednosti ulaznih parametara. U ovom slučaju to su intenziteti kvarova osnovnih komponenata mreže, svjetlovodnih kabela i optičkih linijskih modula. Analizom osjetljivosti ustanovljeno je da intenzitet kvarova optičkih linijskih modula neznatno utječe na srednje vrijeme prekida, dok kabelski dio ima puno značajniji utjecaj na raspoloživost. Ta činjenica ponukala me je na dodatno analiziranje utjecaja konstrukcije kabelskog dijela mreže na raspoloživost.

Analizom prijavljenih kvarova na komunikacijskim mrežama izvedenim svjetlovodnom tehnologijom na brodovima utvrđeno je da srednje vrijeme popravka ovisi o načinu konfiguracije kabelske mreže. Na temelju toga razlučena su četiri osnovna načina konfiguracije kabela i raspodjele radnih i zaštitnih niti u kabelima, kabelskim paketima i kabelskim stazama te izračunata srednja vrijednost trajanja kvarova za svaki pojedini slučaj. Specifični uvjeti nastali pri izgradnji kabelskog dijela mreže, u kojima se nalaze radni i zaštitni putovi, odgovaraju opisu faktora utjecaja.

Kako bi se prikazao utjecaj konfiguracije kabelskih putova na ukupnu raspoloživost mreže u izračun raspoloživosti uvedeni su novi parametri nazvani „faktori utjecaja“. Rezultati izračuna raspoloživosti uz uključene faktore utjecaja pokazuju da način izgradnje kabelskih staza i polaganja kabela te odabir radnih i zaštitnih niti također utječu na ukupnu raspoloživost mreže. Na temelju dobivenih rezultata vidljivo

je da u cilju povećanja raspoloživosti mreže treba voditi računa o izgradnji kabelaških staza već u fazi projektiranja, a predložena metoda zaštite kabelaških putova redundantnim putovima i potpuno fizičko razdvajanje radnih i zaštitnih niti značajno bi pridonijela ukupnoj pouzdanosti brodskih mreža.

Za izračun raspoloživosti te pronalazjenje optimalnih putova u mreži izrađen je algoritam koji uz standardne izraze za izračun raspoloživosti koristi i novu metodu s uvođenjem faktora utjecaja. Osim raspoloživosti, dodatna funkcija programa je izračunavanje prigušenja signala za sve moguće putove u mreži. Algoritam se može primijeniti na bilo koju mrežnu topologiju te izračunati raspoloživost pojedinih putova u mreži i pronaći optimalne radne i zaštitne putove prema prethodno odabranim kriterijima. Algoritam za izračun raspoloživosti komunikacijske mreže prilagođen je za rad na osobnom računaru, no još je značajnija mogućnost korištenja preko web sučelja. Ukoliko se algoritam te svi podatci potrebni za izračun (baze podataka o kvarovima, kabelaškim trasama, iznosima prigušenja mrežnih komponenata) pohrane na jednom serveru, moguće je pristupiti i koristiti aplikaciju s bilo kojeg računala koje ima pristup internetu. Dodatno unaprjeđenje rada planera i projektanata kabelaških mreža je i mogućnost pregledavanja i modificiranja prethodno unesenih mrežnih modela za određene tipove brodova, specifične namjene i sl. Algoritam omogućuje mijenjanje numeričkih vrijednosti ulaznih parametara (intenziteta kvarova komponenata mreže, faktora utjecaja, duljina kabelaških dionica). Time je moguća njegova prilagodba za bilo koju mrežu odnosno unos ulaznih podataka temeljenih na analizi baze podataka o kvarovima predmetne mreže.

Uporabom algoritma analizirano je nekoliko mrežnih modela. Kroz modele je prikazan utjecaj primjene zaštitne trase, promjene vrijednosti faktora utjecaja, udvostručavanja optičkih linijskih modula i kabela te utjecaj različitih duljina kabelaške mreže na ukupnu raspoloživost konekcije. Rezultati pokazuju da implementacija zaštite kabelaških putova redundantnim putovima i potpuno fizičko razdvajanje radnih i zaštitnih niti značajno pridonosi raspoloživosti brodskih mreža.

Osim što se pomoću opisanog modela mogu analizirati utjecaji elemenata i načina gradnje mreže na njezinu ukupnu raspoloživost, značaj uporabe može se sagledavati i sa stajališta troškova potrebnih za planiranje, izgradnju, održavanje i

nadzor mreže. Uporaba predloženog modela raspoloživosti mreže i izračuna raspoloživosti može efikasno utjecati na smanjivanje troškova kapitalnih ulaganja, poglavito pri poboljšavanju planiranja i dizajniranja mreže. Nadalje, modeliranje i analiza izračuna raspoloživosti za realne mreže može voditi smanjenju operativnih troškova. To se naročito očituje pri evidentiranju kablskih trasa i elemenata mreže koji su najpodložniji kvarovima ili ih model istakne kao elemente koji se potencijalno najviše koriste, te se sukladno tome na njih mora obratiti posebna pažnja kod preventivnog i redovnog održavanja te otklanjanja kvarova. Također, ako pojam raspoloživosti komunikacijske mreže promatramo sa stajališta vlasnika broda, oni uz ovakav model i analizu mreže mogu birati željenu raspoloživost pri projektiranju broda i znati s kakvom infrastrukturom raspolažu na već izgrađenim brodovima.

Istraživanja provedena kroz predstavljeni doktorski rad potvrđuju očekivani znanstveni doprinos koji se sastoji u:

- postavljanju sistematiziranog prikaza primjene svjetlovodne tehnologije u pomorstvu uz naglasak na svjetlovodne komunikacijske mreže u povezivanju brodskih sustava,
- definiranju strukture i komponenata mreže, te analizi utjecaja kvarova na raspoloživost mreže,
- uz standardne parametre potrebne za izračun raspoloživosti definirani su i vrednovani dodatni faktori utjecaja na ukupnu raspoloživost temeljeni na načinu izgradnje mreže,
- predstavljen je model mreže i nova metoda izračuna raspoloživosti koja uključuje faktore utjecaja, te uz primjenu metoda za povećanje otpornosti mreže, analizirana raspoloživost različitih mrežnih topologija,
- uvođenjem faktora utjecaja doprinosi se približavanju matematičkog modela realnoj mreži a time i boljem i točnijem izračunu raspoloživosti mreže,
- heurističkim modelom komunikacijskih mreža u povezivanju brodskih sustava primjenom svjetlovodne tehnologije moguće je izračunati raspoloživost pojedinih komponenti i cijele mreže, utvrditi utjecaj raspoloživosti pojedinačnih komponenata na

raspoloživost sustava, odrediti optimalne načine povezivanja i zaštitne metode te time pridonijeti ukupnoj pouzdanosti brodskih sustava i broda u cjelini,

- korištenjem dobivenih rezultata istraživanja moguće je unaprijediti postojeću tehnologiju gradnje brodskih komunikacijskih mreža i njihovu raspoloživost na način da se predloženi model i novi način izračuna raspoloživosti koristi pri dizajniranju novih ili analizi postojećih mreža.

## 9. LITERATURA

- [1] I. Jurdana, Primjena svjetlovodne tehnologije na brodovima, *Pomorstvo*, god. 22, br. 2, 2008.
- [2] J.P. Dakin, R.G.W. Brown, *Handbook of Optoelectronics*, Vol I & II, Taylor and Francis Group, 2006.
- [3] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs and Applications*, Third Edition, Springer, 2004.
- [4] J.G. Webster, *Measurement Instrumentation Sensors*, CRC Press, 1999.
- [5] J.M. Lopez-Higuera, *The Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*, New York, John Wiley & Sons, 2002.
- [6] F.T.S. Yu, S. Yin (Eds.), *Fiber Optic Sensors*, Marcel Dekker Inc., New York, Basel, 2002.
- [7] R. Ivče, R. Mohović, I. Jurdana, Metode i analiza mjernih postupaka za određivanje razine tekućine u brodskim tankovima i stonovima, *Pomorstvo*, god. 23, br. 2, 2009.
- [8] R. Ivče, I. Jurdana, R. Mohović, Značaj nadzora rashladnih kontejnera tijekom pomorsko plovidbenog putovanja, *32. Međunarodni skup za informacijsku i komunikacijsku tehnologiju, elektroniku i mikroelektroniku MIPRO 2009.*, Opatija, Hrvatska, 2009.
- [9] R. Ivče, I. Jurdana, Z. Mrak, Longitudinal ships hull strength monitoring with optical fiber sensors, *51st International Symposium "Electronics in Marine" ELMAR 2009.*, Zadar, Hrvatska, 2009.
- [10] R. Ivče, I. Jurdana, Đ. Mohović, Parametric Roll Monitoring with an Integrated Ship's System, *52nd International Symposium "Electronics in Marine" ELMAR 2010.*, Zadar, Hrvatska, 2010.
- [11] R. Ivče, I. Jurdana, R. Mohović, Vibration Monitoring on Board Ship with a Fiber Optic Sensors, *53rd International Symposium "Electronics in Marine" ELMAR 2011.*, Zadar, Hrvatska, 2011.
- [12] I. Jurdana, M. Štrlek, R. Ivče, Primjena bežičnih optičkih komunikacijskih mreža u pomorstvu, *33. Međunarodni skup za informacijsku i komunikacijsku tehnologiju, elektroniku i mikroelektroniku MIPRO 2010.*, Opatija, Hrvatska, 2010.
- [13] I. Jurdana, R. Ivče, N. Barbalić, Primjena prijenosa radiosignala svjetlovodnim nitima u VHF komunikaciji brod-obala, *Pomorstvo*, god. 25, br. 1, 2011.
- [14] M. Ilyas, H. Mouftah, *The Handbook of Optical Communication Networks*, CRC Press, 2003.
- [15] J.D. Gibson, *The Communications Handbook*, Second edition, CRC Press, 2002.
- [16] K. Skala, *Optoelektronički sustavi*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2003.
- [17] Y. Koike et al., The Status of POF Technology, *European Conference on Optical Communication ECOC 2007.*, Berlin, Germany, September 2007.

- [18] H. Poisel et al., POF Sensors-applications in every day's life, *European Conference on Optical Communication ECOC 2007.*, Berlin, Germany, September 2007.
- [19] I. Jurdana, S. Zentner Pilinsky, B. Batagelj, PMD Measurements in Telecom Networks, *48th International Symposium "Electronics in Marine" ELMAR 2006.*, Zadar, Hrvatska, 2006.
- [20] S. Zentner Pilinsky, I. Jurdana, PMD simulations and interferometric measurements, *19th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications ICECom 2007.*, Dubrovnik, Hrvatska, 2007.
- [21] I. Šegulja, A. Bukša, V. Tomas, *Održavanje brodskih sustava*, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2009.
- [22] V. Tomas, I. Šegulja, M. Valčić, *Osnove automatizacije*, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2010.
- [23] P. Komadina, *Brodovi multimodalnog transportnog sustava*, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 1998.
- [24] P. Komadina, *Tankeri*, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 1994.
- [25] R. Antonić, *Brodsko automatsko upravljanje*, Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet u Splitu, Split, 2010.
- [26] Ž. Kurtela, *Osnove brodostrojarstva*, Sveučilište u Dubrovniku, Dubrovnik, 2000.
- [27] K. van Dokkum, *Ship Knowledge: A Modern Encyclopedia*, Dokmar, Netherland, 2003.
- [28] A. Bažant i ost., *Osnovne arhitekture mreža*, Element, Zagreb, 2004.
- [29] A. Bažant i ost., *Telekomunikacije – tehnologija i tržište*, Element, Zagreb, 2007.
- [30] B.A. Forouzan, *Data Communications and Networking*, Fourth Edition, McGraw-Hill, 2007.
- [31] D. Barnett, D. Groth, J. McBee, *Cabling: The Complete Guide to Network Wiring*, Third Edition, Sybex, USA, 2004.
- [32] B.S. Dhillon, *Design reliability: Fundamentals and Applications*, CRC Press, 1999.
- [33] D. Crowe, A. Feinberg, *Design for Reliability*, CRC Press 2001.
- [34] W.D. Grover, *Mesh-based Survivable Networks: Options and strategies for Optical, MPLS, SONET and ATM networking*, Prentice Hall PTR, 2004.
- [35] J.P. Vasseur, M. Pickavet, P. Demeester, *Network recovery: Protection and Restoration of Optical, SONET-SDH, IP, and MPLS*, Elsevier, 2004.
- [36] T.E. Stern, K. Bala, *Multiwavelength Optical Networks: A Layered Approach*, Addison-Wesley, 1999.
- [37] T.E. Stern, G. Ellinas, K. Bala, *Multiwavelength Optical Networks, Second Edition: Architectures, Design and Control*, Cambridge University Press, 2008.
- [38] B.S. Dhillon, *Design reliability: Fundamentals and Applications*, CRC Press, 1999.
- [39] I. Tomkos, M. Spyropoulou, K. Ennsner, M. Koehn, B. Mikac (Eds.), *Towards Digital Optical Networks*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2009.



- [40] I. Jurdana, B. Mikac, An availability analysis of optical cables, *Workshop on All-Optical Networks WAON 1998*, Zagreb, Hrvatska, 1998.
- [41] I. Jurdana, Modeliranje raspoloživosti i zaštite svjetlovodnog transmisijskog linka, *30. Međunarodni skup za informacijsku i komunikacijsku tehnologiju, elektroniku i mikroelektroniku MIPRO 2007.*, Opatija, Hrvatska, 2007.
- [42] I. Jurdana, Trendovi razvoja metoda za povećanje otpornosti svjetlovodne transmisijske mreže, *32. Međunarodni skup za informacijsku i komunikacijsku tehnologiju, elektroniku i mikroelektroniku MIPRO 2009.*, Opatija, Hrvatska, 2009.
- [43] M. Tudor, O pouzdanosti brodskih sustava, *Pomorstvo*, god. 17, br. 17, 2003.
- [44] M. Tudor, Samoodržavanje brodskih sustava, *Pomorstvo*, god. 21, br. 2, 2007.
- [45] A. Bukša, I. Šegulja, Pouzdanost brodskih sustava, *Pomorstvo*, god. 22, br. 2, 2008.
- [46] M.J. O'Mahony, C. Politi, D. Klonidis, R. Nejabati, D. Simeonidou, Future Optical Networks, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 24, No. 12, December 2006, pp 4684-4696
- [47] B. Mukherjee, Telecom Networks: The Road Ahead, *4th Euro NGI Conference 2008*, Krakow, Poland, April 2008.
- [48] R. Rejeb, M.S. Leeson, R.J. Green, Fault and attack management in all-optical networks, *IEEE Communications Magazine*, November 2006.
- [49] Development in fibre technologies and investment, *Organization for Economic Co-operation and Development, Directorate for science, technology and industry, Committee for information, computer and communication policy*, Netherland, 2008.
- [50] R.S. Dimova, Optical network survivability characterization, *13th International Czech - Slovak Scientific Conference Radioelektronika 2003*, Brno, Czech Republic, 2003.
- [51] S. Kim, X.J. Zhang, S.S. Lumetta, Minimizing vulnerability with end-to-end protection schemes for optical networks, *Military Communications Conference MILCOM 2007*, Orlando, Florida, USA, October 2007.
- [52] S. Kim, X.J. Zhang, S.S. Lumetta, Towards a deeper understanding of managing dynamic optical networks under link failures, *Optical Fiber Communication Conference OFC 2008*, San Diego, California, USA, February 2008.
- [53] D. Staessens, D. Colle, I. Lievens, M. Pickavet, P. Demeester, Path protection in transparent networks, *KEIO and Gent University G-COE Joint workshop for future network*, Ghent, Belgium, March 2008.
- [54] W.D. Grover, D. Tipper, Design and operation of survivable networks, *Journal of Network and Systems Management*, Vol. 13, No. 1, March 2005.
- [55] A. Mykkeltveit, B.E. Helvik, On provision of availability guarantees using shared protection, *12th International Conference on Optical Network Design and Modelling ONDM 2008*, Vilanova, Catalonia, Spain, March 2008.

- [56] J. Segovia, E. Calle, P. Vila, Availability analysis of GMPLS connections based on physical network topology, *12th International Conference on Optical Network Design and Modelling ONDM 2008*, Vilanova, Catalonia, Spain, March 2008.
- [57] Y.C. Chung, Optical performance monitoring techniques; current status and future challenges, *European Conference and Exhibition on Optical Communication ECOC 2008*, Brussels, Belgium, September 2008.
- [58] D. Xu, E. Anshelevich, M. Chiang, On survivable access network design: complexity and algorithms, *The 27th Conference on Computer Communications INFOCOM 2008*, Phoenix, Arizona, USA, April 2008.
- [59] D. Schupke, Options and opportunities for optical network resilience, *International Conference on Optical Network Design and Modelling, ONDM 2009*, Braunschweig, Germany, February 2009.
- [60] L. Wosinska, D. Colle, P. Demeester, K. Katrinis, M. Lacković, O. Lapcevic, I. Lievens, G. Markidis, B. Mikac, M. Pickavet, B. Puype, N. Skorin-Kapov, D. Staessens, A. Tzanakaki, Network Resilience in Future Optical Networks, *Towards Digital Optical Networks*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2009., pp 253-284.
- [61] O. Lapčević; M. Lacković, B. Mikac, Impact of Dependent Failures on Availability of Optical Network, *Proc. of the Sixth Int.Symp. Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*, Graz, Austria, 2008., pp 423-427
- [62] S. Verbrugge, D. Colle, P. Deemester, R. Huelsermann, M. Jaeger, General availability model for multilayer transport network, *5th IEEE International Workshop on Design of Reliable Communications Networks DRCN 2005*, Naples, Italy, 2005.
- [63] M Held, L. Wosinska, P.M. Nellen, C. Mauz, Consideration of connection availability optimization in optical networks, *4th International Workshop on Design of Reliable Communication Networks DRCN 2003*, Banff, Alberta, Canada, 2003.
- [64] I. Jurdana, B. Mikac, Impact of Physical Layer Configuration on Availability of Path Protected Optical Fibre Transmission Network, *The 11th International Conference on Telecommunications ConTEL 2011*, Graz, Austria, 2011.
- [65] I. Jurdana, B. Mikac, G. Kreso, Heuristic Approach to Availability Calculation of Path Protected Optical Network Based on the Analysis of Cable Failures, *The 13th International Conference on Transparent Optical Networks ICTON 2011*, Stockholm, Sweden, 2011.
- [66] I. Jurdana, B. Mikac, Novel Method of Availability Calculation Based on Realistic Path Protected Network Scenarios, *The 16th European Conference on Networks and Optical Communications NOC 2011*, Newcastle-upon-Tyne, UK, 2011.
- [67] I. Jurdana, V. Tomas, R. Ivče, Availability Model of Optical Communication Network for Ship's Engines Control, *3rd International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems ICUMT 2011*, Budapest, Hungary, 2011.

## **PRILOZI**

### **Prilog 1**

#### **POPIS STANDARDA I PREPORUKA ZA SVJETLOVODNE SUSTAVE PRIJENOSA**

1. ITU-T Recommendation G.911 (04/97): Parameters and calculation methodologies for reliability and availability of fibre optic systems
2. ITU-T Recommendation G.651.1 (07/07): Characteristics of a 50/125  $\mu\text{m}$  multimode graded index optical fibre cable for the optical access network
3. ITU-T Recommendation G.652 (11/09): Characteristics of a single-mode optical fibre and cable
4. ITU-T Recommendation G.653 (07/10): Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable
5. ITU-T Recommendation G.654 (07/10): Characteristics of a cut-off shifted, single-mode optical fibre and cable
6. ITU-T Recommendation G.655 (11/09): Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable
7. ITU-T Recommendation G.656 (07/10): Characteristics of a fibre and cable with non-zero dispersion for wideband optical transport
8. ITU-T Recommendation G.971 (07/10): General features of optical fibre submarine cable systems
9. ITU-T Recommendation G.972 (03/08): Definition of terms relevant to optical fibre submarine cable systems
10. ITU-T Recommendation G.973 (07/10): Characteristics of repeaterless optical fibre submarine cable systems
11. ITU-T Recommendation G.976 (07/10): Test methods applicable to optical fibre submarine cable systems
12. ITU-T Recommendation G.978 (07/10): Characteristics of optical fibre submarine cables
13. ETSI TR 101 971, V1.1.1, Access and Terminals (AT); IP Cable Services for Multimedia Broadband Cable Networks; Availability and Reliability, May 2003.

## Prilog 2

### POPIS TABLICA

Tablica 1: Komparacija optičkih izvora za komunikacijske linkove brod-obala .....	13
Tablica 2: Mjerenja na svjetlovodnim nitima.....	45
Tablica 3: Vrste svjetlovodnih niti i maksimalne udaljenosti između dva modula.....	67
Tablica 4: Karakteristike svjetlovodnih kabela za primjenu na brodovima .....	71
Tablica 5: Vrste svjetlovodnih niti i iznos prigušenja ( $\alpha$ ) niti .....	73
Tablica 6: Podatci o raspoloživosti elemenata brodske svjetlovodne mreže.....	94
Tablica 7: Komparacija $MDT$ -a uz promjenu vrijednosti $\lambda_{OLM}$ .....	98
Tablica 8: Komparacija $MDT$ -a uz promjenu vrijednosti $\lambda_K$ .....	98
Tablica 9: Konfiguracija kabela mreže .....	99
Tablica 10: Faktori utjecaja .....	102
Tablica 11: Usporedba izračuna $MDT$ uz promjenu faktora utjecaja.....	104
Tablica 12: Utjecaj duljine zaštitnog puta na $A_{uk}$ i $MDT_{uk}$ mreže .....	119
Tablica 13: $A_{uk}$ i $MDT$ uz nominalne vrijednosti $FU_n$ .....	121
Tablica 14: $A_{uk}$ i $MDT$ uz smanjene vrijednosti $FU_n$ .....	121
Tablica 15: $A_{uk}$ i $MDT$ uz povećane vrijednosti $FU_n$ .....	121
Tablica 16: Usporedba izračuna $MDT$ uz udvostručenje opreme.....	122
Tablica 17: Vrijednosti $MDT$ -a za model 4.....	124
Tablica 18: Vrijednosti $MDT$ -a za model 5 .....	125
Tablica 19: Vrijednosti $MDT_{bez\ zaštite}$ i $MDT_{zaštita\ puta}$ za model 6.....	126

### **Prilog 3**

#### **POPIS SLIKA**

Slika 1: Ekstrinzični optički senzor .....	14
Slika 2: Intrinzični optički senzor .....	14
Slika 3: Mjerenje nivoa tekućine optičkim senzorom .....	15
Slika 4: Primjena optičkih senzora za očitavanje razine tekućine u tankovima .....	15
Slika 5: Primjena optičkih senzora za očitavanje gaza broda .....	16
Slika 6: Primjena optičkih senzora za nadzor uzdužne čvrstoće broda .....	17
Slika 7: Primjena optičkih senzora za nadzor parametričnog valjanja broda .....	18
Slika 8: Primjena optičkih senzora za nadzor vibracija broda .....	18
Slika 9: Shematski prikaz prijenosa podataka pomoću bežičnog svjetlovodnog sustava .....	20
Slika 10: Doseg bežičnog svjetlovodnog signala .....	21
Slika 11: Bežično povezivanje prijenosnog peljarskog računala .....	22
Slika 12: Koncept sustava za prijenos radio-signala svjetlovodom .....	23
Slika 13: Blok shema osnovnog sustava za prijenos radio-signala svjetlovodom .....	23
Slika 14: Povezivanje VHF radio-signala na svjetlovodnu mrežu .....	25
Slika 15: Sagnac-ov efekt .....	26
Slika 16: Blok shema optičkog žiroskopa .....	27
Slika 17: Elektromagnetski spektar .....	28
Slika 18: Princip rada svjetlovodnog sustava prijenosa .....	30
Slika 19: Konstrukcija svjetlovodne niti .....	31
Slika 20: Numerička apertura – kut prihvata svjetla u svjetlovod .....	32
Slika 21: Refrakcija .....	33
Slika 22: Refleksija .....	33
Slika 23: Usporedba brzine svjetla u različitim medijima .....	34
Slika 24: Raspršenje svjetla u svjetlovodnoj niti .....	35
Slika 25: Prigušenje svjetlovodne niti kao funkcija valne dužine .....	35
Slika 26: Uzroci smanjenja snage signala u svjetlovodnoj niti .....	36
Slika 27: Vrste svjetlovodnih niti .....	38
Slika 28: Rasprostiranje svjetlosti kroz višemodnu nit sa stepenastim profilom indeksa loma .....	38

Slika 29: Rasprostiranje svjetlosti kroz višemodnu nit s gradijentnim profilom indeksa loma .....	39
Slika 30: Vrste optičkih sprežnika.....	43
Slika 31: Rayleigh-evo raspršenje i povratno raspršenje.....	49
Slika 32: Fresnel-ova refleksija .....	49
Slika 33: Blok dijagram OTDR-a.....	50
Slika 34: Prikaz prigušenja signala na zaslonu OTDR-a.....	51
Slika 35: Refleksija na konektorskom spoju .....	52
Slika 36: Refleksija na kraju niti .....	52
Slika 37: Nereflektirajući fuzijski spoj niti.....	53
Slika 38: Mjerenje prigušenja mjeračem snage .....	53
Slika 39: Trajekt „Hrvat“.....	56
Slika 40: Blok shema svjetlovodne komunikacijske mreže za upravljanje brodskim motorima.....	56
Slika 41: Blok shema spajanja OLM-a na procesor i motor .....	57
Slika 42: Induktivni senzor za mjerenje okretaja motora.....	58
Slika 43: Alarmna podstanica.....	58
Slika 44: Razvodna ploča za prikupljanje alarmnih vrijednosti .....	58
Slika 45: Pult upravljanja motorima.....	58
Slika 46: Putnički brod „Legend of the Seas“ .....	59
Slika 47: Električna shema satelitskog TV sustava.....	60
Slika 48: Parabolična satelitska antena sa zaštitnom kupolom.....	61
Slika 49: Optički predajnik.....	61
Slika 50: Optički prijamnik .....	61
Slika 51: Optička razdjelna kutija (FBK7 / FBK1).....	62
Slika 52: Kontrolni uređaj za kontrolu i pozicioniranje SAT antene .....	62
Slika 53: Struktura mreže .....	63
Slika 54: Jednosmjerni komunikacijski sustav.....	64
Slika 55: Podjela mreža prema topologiji .....	66
Slika 56: Optički linijski modul OLM / G12 proizvođača „Siemens“ .....	67
Slika 57: Struktura mreže s linijskom topologijom.....	68
Slika 58: Struktura mreže s topologijom prstena.....	68

Slika 59: Svjetlovodni kabeli za primjenu na brodovima i platformama .....	69
Slika 60: Presjek svjetlovodne višemodne niti promjera 62,5/900 $\mu\text{m}$ .....	70
Slika 61: Presjek svjetlovodnog LSZH kabela s 4 višemodne niti.....	70
Slika 62: Kabelske staze na brodu .....	71
Slika 63: Prikaz polaganja kabela na kabelsku stazu .....	72
Slika 64: Prikaz svjetlovodne kabelske dionice .....	73
Slika 65: Mjerenje snage svjetlosnog signala.....	76
Slika 66: „Ciklus kvarova“ sustava s mogućnošću popravaka.....	81
Slika 67: Serijska struktura sa $n$ elemenata .....	83
Slika 68: Paralelna struktura sa $n$ grana.....	84
Slika 69: Paralelna struktura s dvije grane .....	85
Slika 70: Paralelna struktura s dvije grane i jednim zajedničkim elementom.....	85
Slika 71: Namijenjena zaštitna metoda .....	87
Slika 72: Zajednički zaštitni putovi.....	88
Slika 73: Analiza mrežne topologije .....	90
Slika 74: Vrste konekcija obzirom na primijenjenu zaštitu.....	92
Slika 75: Model raspoloživosti serijske strukture sa $n$ OLM elemenata i $(n-1)$ kabelskih sekcija.....	94
Slika 76: Model raspoloživosti paralelne strukture s radnim i zaštitnim putom .....	95
Slika 77: $MDT_{bez\ zaštite}$ kao funkcija faktora promjene parametara $\lambda_K$ i $\lambda_{OLM}$ .....	97
Slika 78: $MDT_{sa\ zaštitom\ puta}$ kao funkcija faktora promjene parametara $\lambda_K$ i $\lambda_{OLM}$ .....	97
Slika 79: Osnovni načini raspodjele radnih i zaštitnih niti u kabelima, kabelskim paketima i kabelskim stazama .....	100
Slika 80: Prikaz grafa komunikacijske mreže .....	107
Slika 81: Prikaz načela rada algoritma za izračun raspoloživosti mreže.....	107
Slika 82: Izgled početnog ekrana za unos modela mreže.....	114
Slika 83: Popis modela unesenih u program .....	114
Slika 84: Unos kabelskih staza .....	114
Slika 85: Unos kabelskih paketa.....	115
Slika 86: Unos kabela.....	115
Slika 87: Popis čvorova .....	115
Slika 88: Unos/izmjena čvorova.....	116

Slika 89: Popis linkova.....	116
Slika 90: Unos/izmjena linkova.....	116
Slika 91: Popis faktora utjecaja .....	117
Slika 92: Unos/izmjena vrijednosti faktora utjecaja.....	117
Slika 93: Izračun raspoloživosti za odabrani model.....	117
Slika 94: Utjecaj duljine zaštitnog puta na $A_{uk}$ i $A_{radni\ put}$ .....	119
Slika 95: Utjecaj duljine zaštitnog puta na $MDT_{uk}$ mreže .....	119
Slika 96: Utjecaj duljine zaštitnog puta na $MDT_{uk}$ mreže .....	120
Slika 97: $MDT$ kao funkcija faktora promjene parametra vrijednosti $FU_n$ .....	121
Slika 98: Usporedba izračuna $MDT$ uz udvostručenje opreme .....	123
Slika 99: $MDT$ kao funkcija duljine utjecaja $FU_n$ .....	124
Slika 100: Prikaz komunikacijske mreže za upravljanje potiskivačem pramca.....	125
Slika 101: Usporedba izračuna $MDT$ -a za mrežu bez zaštite i sa zaštitom puta .....	125
Slika 102: $MDT_{bez\ zaštite}$ kao funkcija duljine kabela mreže.....	126
Slika 103: $MDT_{zaštita\ puta}$ kao funkcija duljine kabela mreže .....	127



## **Prilog 4**

### **KRATICE**

$A(t)$	Availability	Raspoloživost
AIS	Automatic Identification System	Automatski sustav praćenja brodova
APD	Avalanche photodiode	Lavinska fotodioda
Azipod	Azimuth Podded Drive	Sinkroni motor s dvostrukim kavezom
BW	Bandwidth	Pojasna širina
CD	Chromatic Dispersion	Kromatska disperzija
DFB Laser	Distributed Feedback Laser	Laser s raspodijeljenom povratnom vezom
DGPS	Differential Global Positioning System	Diferencijalni globalni pozicijski sustav
DWDM	Dense wavelength division multiplexing	Valno multipleksiranje velike gustoće
ETSI	European Telecommunications Standards Institute	Europski institut za telekomunikacijske standarde
FIT	Failure In Time	„kvarova u vremenu“
FOG	Fibre Optic Gyro	Optički žiroskop
FSO	Free Space Optics	Prijenos svjetlosnih signala bežičnim putem
GPS	Global Positioning System	Globalni pozicijski sustav
ICT	Information and communication technologies	Informacijske i komunikacijske tehnologije
ITU-T	International Telecommunications Union- Telecommunication Standardization Sector	Međunarodna telekomunikacijska zajednica-sektor za standardizaciju u telekomunikacijama
LAN	Local Area Network	Lokalna mreža
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation	Optički izvor koherentnog svjetla
LED	Light-emitting diode	Optički izvor svjetla- svjetleća dioda
LIDAR	Light Detection And Ranging	Uređaj za optičko mjerenje udaljenosti
LNG	Liquified Natural Gas	Ukapljeni prirodni plin
LSZH	Low Smoke Zero Halogen	Plast kabela sa smanjenim ispuštanjem dima i otrovnih plinova

MDT	Mean Down Time	pri zapaljenju Srednje vrijeme prekida
MM	Multimode	Višemodni
MRCC	Maritime Rescue Coordination Centre	Nacionalna središnjica za usklađivanje traganja i spašavanja na moru
MTBF	Mean Time Between Failure	Srednje vrijeme među kvarovima
MTTF	Mean Time To Failure	Srednje vrijeme do kvara
MTTR	Mean Time To Repair	Srednje vrijeme popravka
OLM	Optical Line Modul	Optički linijski modul
OTDR	Optical time-domain reflectometer	Optički reflektometar
PCF	Polymer Cladded Fiber	Svjetlovodna nit sa staklenom jezgrom i plastičnim omotačem
PCF	Photonic Crystal Fiber	Svjetlovodna nit sa šupljinama
PCM	Pulse Code Modulation	Pulsno-kodna modulacija
PMD	Polarization Mode Dispersion	Polarizacijska disperzija
POF	Polymer Optical Fiber	Plastična svjetlovodna nit
$R(t)$	Reliability	Pouzdanost
Rx	Receiver	Prijamnik
RLG	Ring Laser Gyro	Laserski žiroskop
RoF	Radio over Fiber	Prijenos radio-signalna svjetlovodom
SAR	Search and Rescue	Traganje i spašavanje
SM	Singlemode	jednomodni
Tx	Transmitter	Predajnik
$U(t)$	Unavailability	Neraspoloživost
VCSEL	Vertical Cavity Surface Emmiting Laser	Laser s okomitim isijavanjem svjetlosti
VHF	Very High Frequency	Vrlo visoka frekvencija
VHF DSC	VHF Digital Selective Call	VHF digitalni selektivni poziv

## **Prilog 5**

### **ŽIVOTOPIS**

Irena Jurdana rođena je 29.05.1966. u Rijeci. Osnovnu školu završila je u Kastvu a srednju školu u Rijeci. 1989. godine diplomirala je na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu na Zavodu za telekomunikacije i informatiku te stekla naziv diplomiranog inženjera elektrotehnike. Školovanje je nastavila na istom fakultetu i 2007. magistrirala s temom „Modeliranje i analiza raspoloživosti svjetlovodne transmisijske mreže“ te stekla akademski stupanj magistra znanosti iz znanstvenoga područja tehničkih znanosti, znanstvenog polja elektrotehnike na smjeru telekomunikacije i informatika.

Od 1990. radila je u HT-Hrvatskim telekomunikacijama, Telekomunikacijski centar Rijeka, na poslovima planiranja, projektiranja i vođenja investicija iz područja svjetlovodnih kablskih sustava prijenosa za područje Primorsko-goranske, Istarske i Ličko-Senjske županije, a od 2002. do 2006. radi u Središnjici HT-a u Zagrebu, na poslovima razvoja i planiranja svjetlovodne mreže Republike Hrvatske.

1994. položila je Stručni ispit iz elektrotehničke struke pri Ministarstvu graditeljstva i zaštite okoliša, te time stekla članstvo u Hrvatskoj komori arhitekata i inženjera u graditeljstvu (sada: Hrvatska komora inženjera elektrotehnike), uz strukovni naziv "Ovlašteni inženjer elektrotehnike".

2005. godine izabrana je za predavača za znanstveno područje tehničkih znanosti, polje tehnologije prometa i transporta, grane pomorski i riječni promet pri Zavodu za elektrotehniku, automatiku i informatiku. na Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci te kao vanjski suradnik sudjeluje u nastavi na održavanju predavanja i vježbi kolegija na smjerovima Elektroničke i informatičke tehnologije pomorstvu i Tehnologija i organizacija prometa. Iste godine izabrana je za asistenta na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci te kao vanjski suradnik sudjeluje u održavanju nastave na Stručnom studiju elektrotehnike.

Od 2007. zaposlena je kao predavač na Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci te kao vanjski suradnik u nastavnom zvanju predavač na Tehničkom fakultetu u Rijeci. 2010. godine izabrana je u nastavno zvanje viši predavač.

Kao autor i koautor objavila je četrnaest znanstvenih i stručnih radova na međunarodnim znanstvenim skupovima održanim inozemstvu i u Hrvatskoj te tri rada u časopisu „Pomorstvo“ Pomorskog fakulteta u Rijeci.

Uključena je kao istraživač na znanstvenom projektu Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa, pod naslovom *Informacijsko-komunikacijske tehnologije u inteligentnim pomorskim sustavima*.

2007. godine na Pomorskom fakultetu u Rijeci završila je tečaj GMDSS i stekla ovlaštenje *Radiooperater s općom ovlasti*, te od tad sudjeluje u nastavi na navedenom tečaju za osposobljavanje pomoraca.

Članica je Hrvatske komore inženjera elektrotehnike; Hrvatske udruge za informacijsku i komunikacijsku tehnologiju, elektroniku i mikroelektroniku – MIPRO, te od 2011. godine Izvršnog odbora Hrvatskog društva Elektronika u pomorstvu – ELMAR.