

Mr. sc. Irena Jurdana
Pomorski fakultet u Rijeci
Studentska 2
5100 Rijeka

Pregledni članak
UDK: 621.391
681.7.068
Primljeno: 4. rujna 2008.
Prihvaćeno: 14. studenoga 2008.

PRIMJENA SVJETLOVODNE TEHNOLOGIJE NA BRODOVIMA

Svjetlovodna tehnologija je zbog svojih prednosti u prijenosu podataka i jednostavnosti izvedbe nad klasičnim tehnologijama prijenosa informacija 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 sustavima kao što su brodovi. U ovom radu opisano je nekoliko primjena svjetlovodnih komunikacijskih mreža u brodskim sustavima za nadzor i upravljanje brodskim pogonom te različite mogućnosti ugradnje i korištenja optičkih senzora.

Ključne riječi: *svjetlovodni komunikacijski sustav, svjetlovodna nit, optički senzor*

UVOD

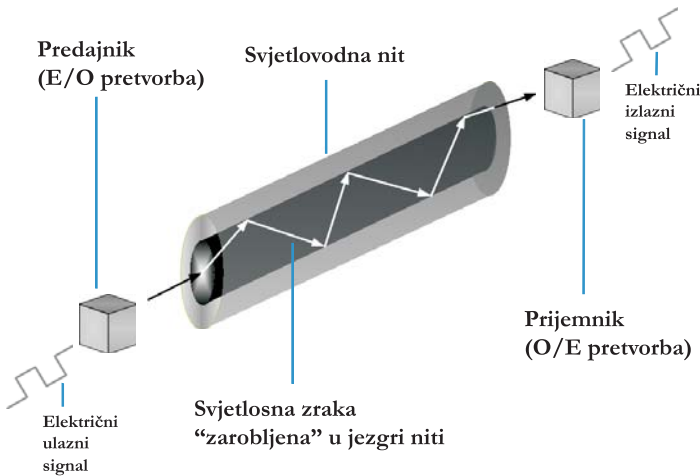
Svjetlovodna tehnologija temelji se na emitiranju, prijenosu i prijemu svjetla, odnosno na generiranju svjetlosnog signala električnom pobudom. Ona se je u zadnjih 20-tak godina zbog svojih prednosti u prijenosu informacija i velikih prijenosnih kapaciteta počela primjenjivati u gotovo svim granama tehnologije.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

U ovom radu opisat će se primjena svjetlovodne tehnologije u brodskim sustavima za prijenos informacija, te primjena svjetlovoda kao senzora za mjerenje raznih neelektričkih i električkih veličina na brodovima koji su u eksploataciji kao i na brodovima u gradnji.

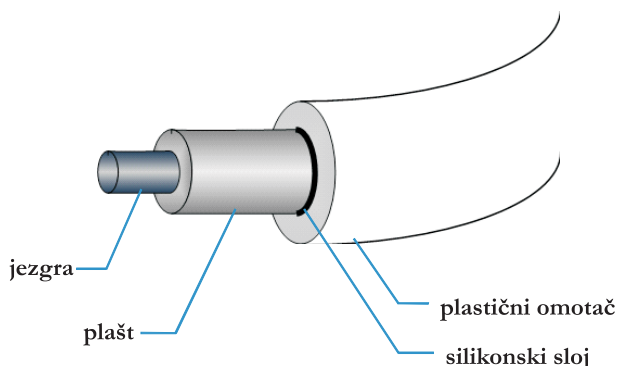
2. O SVJETLOVDNIM SUSTAVIMA PRIJENOSA

Svjetlovodni sustavi prijenosa sastoje se od izvora signala, prijenosnog medija te detektora. Izvori signala su svjetleće diode (*LED-Light Emitting Diode*) ili poluvodički laseri (*LASER-Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), a služe za pretvorbu električnog u optički signal. Za komunikacije se najčešće koriste uski pojasevi valnih duljina oko 850, 1300 i 1550 nm.

Prijenosni medij je svjetlovodna nit najčešće izrađena od silicijevog dioksida 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 obliku *Holey fiber*). Kao detektori svjetlosnog signala koriste se lavinske fotodiode (*APD - Avalanche Photo Diode*) i PIN fotodiode. Apsorpcija fotona u fotiodiodi s pogodnim energetskim procjepom uzrokuje prijelaz elektrona iz valentnog u vodljivi pojas, te tako generirani elektroni čine izlaznu struju fotiodiode.



Slika 1.: Princip rada svjetlovodnog sustava prijenosa
Fig. 1. Basic principle of fiber optic transmission system



Slika 2.: Konstrukcija svjetlovodne niti s primarnom zaštitom
Fig. 2: Primary coated optical fiber

Svjetlovodna nit konstruirana je kao cijev od kompaktnog materijala s jezgrom i plaštem, koji su napravljeni od materijala s različitim indeksom loma (n). Indeks loma u nekom materijalu je omjer brzine svjetla u vakuumu ($c = 299.792.458$ m/s) i brzine svjetla u tom materijalu (v_m)

$$n = \frac{c}{v_m}$$

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 (za jezgrou staklene niti $n = 1,487$).

Svjetlost se rasprostire unutar jezgre, odbijajući se od granice jezgre i plašta zbog razlike u indeksima loma, te ukoliko je ostvaren uvjet potpune refleksije najveći dio svjetla zadržava se u jezgri dok se vrlo mali dio gubi u okolni prostor¹.

Vrlo male, mikronske dimenzije niti, mala težina, lako polaganje i spajanje te neosjetljivost na vanjska elektromagnetska polja važna su prednost pri njihovom odabiru za ugradnju u zahtjevnim sustavima. Presjek jezgre jednododne niti² samo je 1/6 presjeka ljudske kose.

¹ 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 se lomi tako da upadna zraka, okomica na granicu sredstava i lomljena zraka leže u istoj ravnini te kut loma i kut upada zadovoljavaju izraz $n_1 \sin(\Phi_1) = n_2 \sin(\Phi_2)$, pri čemu su n_1 i n_2 indeksi loma u pojedinom sredstvu, a Φ_1 i Φ_2 kutovi prema okomici.

² Po jednoj svjetlovodnoj niti istodobno se može rasprostirati samo određeni diskretan snop elektromagnetskih valova, od kojih svaki predstavlja jedan mod (M). Jednododne niti podržavaju rasprostiranje samo jednog moda (M = 1) dok kod višedodnih niti može postojati i više tisuća modova.

Prema transmisijskim karakteristikama razlikujemo dvije vrste niti: višemodne niti (*MM-Multi Mode*) i jednomodne niti (*SM-Single Mode*). Višemodne niti koriste se za prijenos signala manjih prijenosnih brzina na kraćim udaljenostima (do 3 km), dok se jednomodne niti koriste za velike prijenosne kapacitete na udaljenostima i do 150 km bez upotrebe pojačala.

Tablica 1: Karakteristike svjetlovodnih niti
Tab. 1: Optical fibers characteristics

Tip niti (materijal)	Dimenzije jezgra/plašt (μm)	Prigušenje na 850 nm (dB/km)	Prigušenje na 1300 nm (dB/km)	Optički izvor
MM (POF)	980/1000	8	-	LED
MM (SiO_2)	50/125	3	1	LED
SM (SiO_2)	9/125	-	0,3	laser

Svjetlovodne niti štite se plastičnim omotačem te se upredaju u kabele različitih kapaciteta, konstrukcija, vrsta zaštite i primjena. Prema namjeni i načinima polaganja razlikujemo: podzemne kabele (za uvlačenje u polietilenske cijevi ili za polaganje neposredno u zemlju), instalacijske kabele (za polaganje unutar objekata), podmorske kabele, samonosive kabele, kabele za instalaciju po visokonaponskim dalekovodima te za specijalne namjene kao što su brodovi, zrakoplovi, elektrane i sl.

Standardne dužine u kojima se proizvode kabele 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 gušenje u sustav (prosječno 0,05 dB), dok konektori imaju prosječno gušenje od 0,3 dB, a mehanički spojevi 0,2 dB.

Svjetlovodni sustavi imaju dvojaku primjenu. Najpoznatija i najrasprostranjenija je njihova upotreba u telekomunikacijskim mrežama te lokalnim računalnim i podatkovnim mrežama, gdje služe za prijenos informacija. Kao ilustraciju prijenosnog kapaciteta svjetlovodne niti navedimo primjer sustava s valnim multipleksiranjem 32 valne duljine gdje jedna valna duljina prenosi informacije brzinom od 10 Gbit/s. U tom slučaju po jednoj niti dobijemo mogućnost prenošenja 3,9 milijuna govornih kanala istovremeno. Sadašnji komercijalni sustavi rade na brzinama i od 40 Gbit/s.

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 ovom radu navest ćemo samo neke od primjena svjetlovoda na brodovima, koje će se zbog niza svojih prednosti nad konvencionalnim tehnologijama sve više primjenjivati.

3. PRIMJENA SVJETLOVODNIH SUSTAVA PRIJENOSA NA BRODOVIMA

Najvažnije prednosti svjetlovoda, koje opravdavaju njihovu upotrebu na brodovima i drugim zahtjevnim objektima kao što su zrakoplovi, naftne bušotine, elektrane, su:

- malo prigušenje i veliki kapacitet prijenosa podataka,
- male dimenzije i težina,
- mali trošak materijala te lakše i jeftinije polaganje kabela po brodu,
- smanjenje zapremine i težine kabela,
- nemetalne izvedbe tako da nisu podložni utjecajima vanjskih elektromagnetskih polja,
- nemogućnost pojave prenapona, iskrenja, kratkog spoja i požara na niti,
- proširivanje na veće prijenosne brzine samo zamjenom prijenosnih uređaja,
- mjesto i vrstu oštećenja i kvarova moguće je utvrditi mjerenjem reflektometrom pristupom samo s jednog kraja,
- mogućnost integracije brodskih sustava i podsustava u jedinstvenu lokalnu brodsku mrežu,
- vijek trajanja svjetlovodne mreže podudara se s vijekom trajanja broda,
- dobra pouzdanost svjetlovoda smanjuje i troškove odražavanja.

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

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

Udaljenosti prijenosa signala na brodu su do nekoliko stotina metara što ne zahtijeva upotrebu 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 s LED-om kao izvorom signala.

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

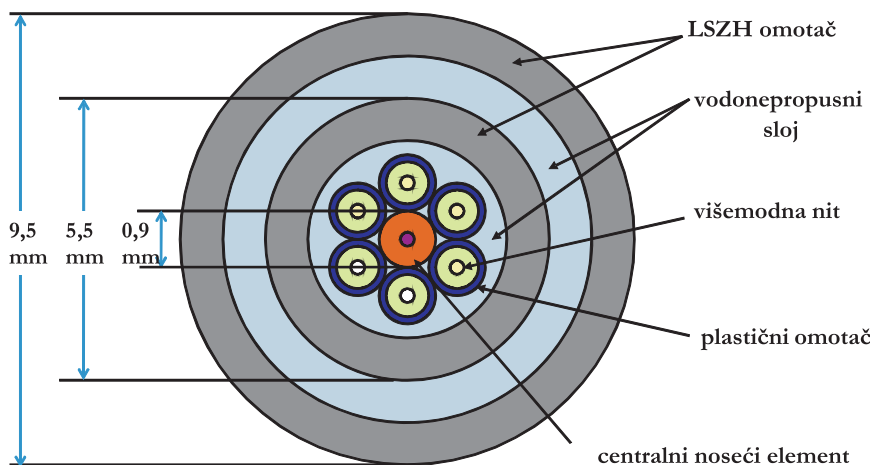
Preko svjetlovoda prenose se informacije iz procesora glavnih i pomoćnih motora u glavni procesor, koji se nalazi na zapovjedničkom mostu. Procesor nadzire, sakuplja, kontrolira i obrađuje mjerne podatke motora. Na primjer, broj okretaja osovine očitava se zupčanikom smještenim na osovini. Prilikom svakog prolaska zupca kraj induktivnog pretvornika odašilje se električni signal prema procesoru. Procesor broji i obrađuje impulse dobivene iz induktivnog osjetnika. Procesor je električnim vodom vezan na optički linijski modul, koji električni signal iz procesora pretvara u optički. Optički signal se svjetlovodnim kabelom prenosi do glavnog procesora. Glavni procesor, na taj način, prikuplja podatke sa svih ostalih procesora - pregledava, uspoređuje, a u slučaju prekoračenja određenih vrijednosti uključuje pojedine alarme. Sve te informacije i alarmi prikazuju se na pultu zapovjedničkog mosta. Svi optički moduli povezani su u konfiguraciju prstena kako bi se osigurao prijenosni put u slučaju prekida kabela.

Temperatura je još jedna neelektrična veličina koju nadzire procesor glavnog motora. Temperatura motora pretvara se u procesoru u električni napon. Za određenu temperaturu motora procesor će primiti odgovarajući iznos napona na digitalnom ulazu. Taj podatak procesor obrađuje i predaje optičkom linijskom modulu, gdje se pretvara u optički signal i prenosi do glavnog procesora.

Svjetlovod, koji se upotrebljava za navedene primjene, većinom ima višedodne niti, a kao izvor signala koristi se LED. Dodatni zahtjevi koji se postavljaju na kabele za instalaciju na brodovima su i vodonepropusnost, kemijska stabilnost i stabilnost na vibracije, velika prekidna čvrstoća, ne smije podržavati gorenje te pri zapaljenju ne smije ispuštati otrovne plinove i dim.

*Tablica 2: Karakteristike svjetlovoda za instalaciju na brodove
Tab. 2: Fiber optic shipboard and deck cable characteristic*

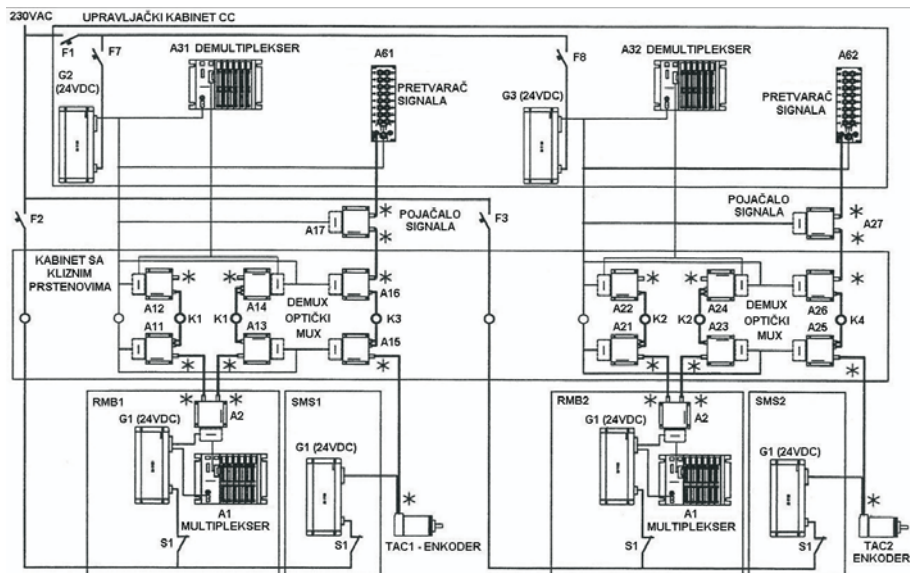
Broj / tip niti	2, 4, 6 / MM i SM
Težina kabela	98 kg/km
Radna temperatura	-40 °C do +85 °C
Prigušenje MM niti na 850 nm	3,5 dB/km
Prigušenje MM niti na 1300 nm	1,5 dB/km
Prigušenje SM niti na 1300 nm	0,5 dB/km



Slika 3.: Presjek svjetlovodnog kabela za instalaciju na brodovima
Fig. 3: Fiber optic shipboard and deck cable

Navedene karakteristike i presjek odnose se na kabel tipa LSZH (*Low-Smoke Zero Halogen*) za ugradnju na brodove i platforme proizveden u Optical Cable Corporation iz SAD-a.

Najvažniji uvjeti koji sustavi upravljanja i kontrole broskog 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 Azi-pod (*Azimuth Podded Drive*) kao pogonskim strojem na putničkim brodovima. Neki od najvažnijih podataka, koji se prikupljaju i svjetloodom 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.



Slika 4.: Shema redundantnog sustava prijena podataka Azipod motora
 Fig. 4: Schematic of the redundant Azipod data transmission system

Svjetlovodni sustavi prijena koriste se i za ostvarivanje komunikacijskih veza brodova s obalnim terminalima, npr. za komunikaciju LNG broda i LNG obalnog terminala. Preko kablanske veze omogućen je nadzor ukrcaja, priključak interne i vanjske telefonske linije, telefon za slučaj opasnosti te priključak na internet mrežu. Ovisno o tipu optičkih izvora moguće je povezivanje na udaljenostima i do desetak kilometara.

Tablica 3: Komparacija optičkih izvora za komunikacijske linkove brod-obala
 Tab. 3: Comparison between each light source of the ship-to-shore communication links

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

4. PRIMJENA OPTIČKIH SENZORA NA BRODU

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.

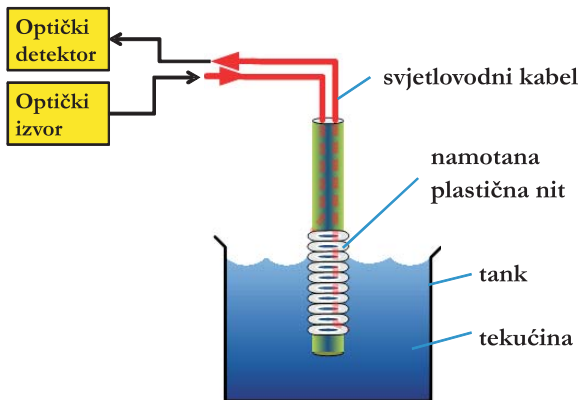
Optički senzori rade na principu moduliranja svjetlosti unutar niti kao odgovor na vanjsku električnu ili neelektričnu pobudu. Razlikujemo dvije vrste senzora: ekstrinzične i intrinzične.

Kod ekstrinzičnih senzora svjetlovodna nit služi za prijenos signala do osjetilnog elementa gdje se signal modulira pod nekim vanjskim utjecajem kojeg želimo mjeriti. 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 nekim 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.

Kod intrinzičnih senzora za mjerenje vanjskog utjecaja koriste se fizikalna svojstva same svjetlovodne niti. 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.

Primjer upotrebe distribuiranog senzora je mjerenje nivoa tekućine pomoću plastične svjetlovodne niti omotane oko cilindrične cijevi i vertikalno uronjene u tank s tekućinom. 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 se sastoji od svjetlovodnog kabela priključenog između optičkog izvora i detektora signala, a u najčešćoj konfiguraciji i predajnik i prijemnik nalaze se na istoj strani. Na prijemnik se priključuje mjerni instrument (optički reflektometar, interferometar, mjerlač snage ili optički spektralni analizator), te se na njemu očitava mjerenja veličina.

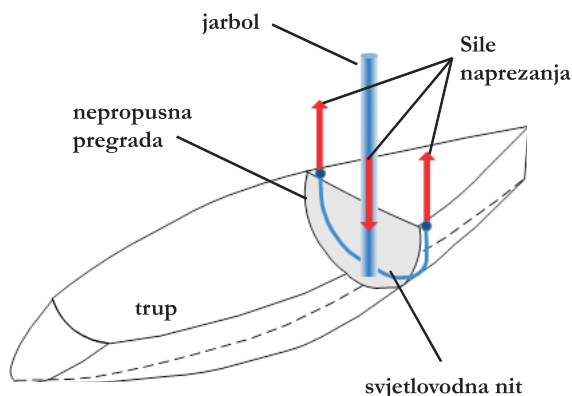


Slika 5: Mjerenje nivoa tekućine optičkim senzorom
Fig. 5: Schematic of the liquid level optical sensor

Osim za mjerenja navedenih veličina u brodskim pogonima korisna je primjena optičkih senzora pri izradi i ispitivanju konstrukcijskih karakteristika novih plovila.

Distribuirani optički senzori primjenjuju se za mjerenje naprezanja i otkrivanje oštećenja na takmičarskim jedrilicama. Opisana metoda primijenila se je na jedrilici dužine 24 m i širine 4 m. Svjetlovodna nit ugrađena je poprečno u trupu jedrilice i prolazi uz spoj nepropusne pregrade i trupa. Mjeri se naprezanje sastavljeno od dvije komponente: vučne sile od približno 15 t od svakog snasta i sile pritiska jarbola od 30 t. Naprezanja uzrokuju frekvencijski pomak Brillouinovog raspršenja³ svjetlosnog signala u ugrađenoj niti. Raspodjela naprezanja na trupu broda može se detektirati očitavanjem promjena u Brillouinovom spektru. Te promjene ovisne su o profilu raspodjele naprezanja i iznosu naprezanja. Za ovu primjenu koristi se specijalni reflektometar BOTDR (*Brillouin Optical Time Domain Reflectometer*).

³ Brillouinovo raspršenje je oblik raspršenja svjetlosti nastao interakcijom fotona i fonona (kvanti vibracijske energije kristalne rešetke) u svjetlovodnoj niti. To je jedan od nelinearnih optičkih efekata. Akustički valovi (fononi) stvaraju periodičke modulacije indeksa loma, što uzrokuje lom i refleksiju svjetlosti. Povratna reflektirana svjetlost ima frekvencijski pomaknutu komponentu, čiji je pomak ovisan o temperaturi i naprezanju.



Slika 6.: Mjerenje naprezanja trupa jedrilice optičkim senzorom
Fig. 6. Distributed strain sensing of the yacht

Uz brodove vezani su 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 moguće je nadzor uzdužnih i poprečnih deformacija u kratkom i dugom vremenskom periodu.

5. ZAKLJUČAK

Svjetlovodna tehnologija je zbog svojih izrazitih transmisivskih 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 sustav, kao što je brod, uz praktički neograničen kapacitet prijenosa informacija, te sve jeftinije komponente, dovest će do sve veće ugradnje takve tehnologije na novim brodovima kao i zamjenu konvencionalnih „bakrenih“ mreža na postojećim brodovima.

LITERATURA

- [1] Dakin, J. P., R. Brown, Handbook of optoelectronics Vol. I., II., London, Taylor & Francis Group, 2006.
- [2] Gibson, J. D., The Communications handbook, London, CRC Press, 2002.
- [3] Ilyas, M., H. T.Mouftah, The Handbook of optical communication networks, London, CRC Press, 2003.
- [4] Koike Y. et al., The Status of POF technology, Berlin, ECOC, September, 2007.
- [5] Lopez-Higuera, J. M., The Handbook of optical fibre sensing technology, New York, John Wiley & Sons, 2002.
- [6] Murayama, H. et al., Distributed strain sensing from damaged composite materials based on shape variation of the Brillouin spectrum, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 15(2004), January.
- [7] Poisel, H. et al., POF sensors-applications in every day's life, Berlin, ECOC, September, 2007.

Summary

APPLICATION OF OPTICAL FIBER TECHNOLOGY ON BOARD SHIPS

The optical fiber technology, because of its advantages in the data transmission and its simple installation as compared to the traditional information transmission technologies of the past two decades, has completely prevailed in the telecommunications and computer networks. In addition to their use in the communications system, optical fibers have been applied as sensors in measuring different nonelectrical and electrical values. In both the cases, their very small dimensions, easy installation, insensitivity to external electromagnetic influences, enormous data transmission capacity and high reliability, justify the installation of the optical communications networks and sensors in the very demanding ship environment. This paper aims at describing several applications of the optical communications networks in the ship propulsion and control system as well as different options for the installation and use of optical sensors.

Key words: *optical communications system, optical fiber, optical sensor*

M. Sc. Irena Jurdana

Faculty of Maritime Studies Rijeka

Studentska 2

5100 Rijeka

Croatia