

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I  
BRODOGRADNJE**

**POSLIJEDIPLOMSKI DOKTORSKI STUDIJ  
ELEKTROTEHNIKE**

**I INFORMACIJSKE TEHNOLOGIJE**

**KVALIFIKACIJSKI ISPIT**

**Razvoj monitoring sustava i primjena  
svjetlovodnih senzora u hidroelektranama**

**Nino Rozić**

**Split, kolovoz 2025.**

## SADRŽAJ:

|       |                                                         |    |
|-------|---------------------------------------------------------|----|
| 1     | UVOD .....                                              | 2  |
| 2     | VIBRACIJE U HIDROELEKTRANAMA .....                      | 4  |
| 2.1   | Uvod .....                                              | 4  |
| 2.2   | Vibracije na rotirajućoj opremi.....                    | 5  |
| 2.2.1 | Vibracije na turbini.....                               | 5  |
| 2.2.2 | Vibracije na rotoru .....                               | 5  |
| 2.2.3 | Vibracije na motorima.....                              | 6  |
| 2.3   | Vibracije na nerotirajućoj opremi.....                  | 7  |
| 2.3.1 | Vibracije transformatora .....                          | 7  |
| 2.3.2 | Vibracije kod tlačnog cjevovoda.....                    | 7  |
| 2.3.3 | Vibracije difuzora.....                                 | 7  |
| 2.3.4 | Vibracije na generatoru .....                           | 8  |
| 3     | MONITORING SUSTAVI U HIDROELEKTRANAMA .....             | 9  |
| 3.1   | Uvod .....                                              | 9  |
| 3.2   | Razvoj monitoring sustava .....                         | 9  |
| 4     | VRSTE SENZORA ZA MJERENJE VIBRACIJA.....                | 12 |
| 5     | OPTIČKI I SVJETLOVODNI INTERFEROMETRI .....             | 16 |
| 5.1   | Uvod .....                                              | 16 |
| 5.2   | Mach-Zehnderov interferometar.....                      | 17 |
| 5.3   | Michelson interferometer .....                          | 17 |
| 5.4   | Sagnac interferometar.....                              | 17 |
| 5.5   | Fabry-Perot interferometar .....                        | 18 |
| 6     | RAZVOJ SVJETLOVODNOG SENZORA ZA MJERENJE VIBRACIJA..... | 19 |
| 7     | ZAKLJUČAK .....                                         | 23 |
|       | LITERATURA.....                                         | 24 |
|       | SAŽETAK.....                                            | 28 |

# 1 UVOD

Vibracije opreme predstavljaju ozbiljan problem u hidroelektranama od samog početka proizvodnje električne energije [1]. Mjerenje vibracija je vrlo važno jer pruža ranu indikaciju predstojećeg kvara, a time se pravilnim održavanjem može spriječiti kvar i uništavanje opreme. Analiza vibracija nepomičnih dijelova hidrauličkog sustava omogućuje otkrivanje do 76 % nedostataka [2]. Da bi se osigurao pravilan rad opreme i omogućila rana detekcija skrivenih nedostataka nadzor stanja vibracija je ključan [3].

Vibracijski signal je višekomponentni [2]. Kod hidrogeneratora, vibracije se mogu razdvojiti u dvije kategorije: (i) niskofrekventne vibracije koje potječu iz osnovnih i viših harmonika frekvencije rotacije vratila hidrauličkog sustava i (ii) visokofrekventne vibracije koje potječu iz komponenta magnetskog toka od 100 Hz u čeličnim konstrukcijama generatora [2]. Odabir i analiza informativne komponente signala kod dijagnoze vibracija je prvi i ključan korak. Procjena vibracija čeličnih konstrukcija statora provodi se odvojeno za visoke i niske frekvencije. Stanje opreme može se dijagnosticirati pomoću nekoliko analitičkih metoda [3]. Kod konstantnih komponenta signala, tj. stacionarnih vibracija, najučinkovitije su metode spektralne dijagnostike koje točno određuju sadržaj frekvencije signala bez lokalizacije u vremenskoj domeni [2]. S druge strane, kada se čini da je signal lokaliziran u frekvencijskoj i vremenskoj domeni, tj. ne stacionarnih vibracija, za obradu signala preporučuje se upotreba takozvane wavelet transformacije [3].

Sustav trajnog mjerenja i praćenja (sustav monitoringa) hidroelektrane je jedna od značajnih funkcija na elektrani, koja može bitno popraviti preventivno održavanje i produžiti vijek primarne opreme.

U svrhu mogućnosti kontinuiranog praćenja, dijagnostike kvarova, pravovremene identifikacije i sprječavanje ispada i havarijskih scenarija, sve više se u elektroenergetska postrojenja, a time i u hidroelektrane potencira ugradnja monitoring sustava [4].

Praćenjem bitnih parametara kao što su parcijalna izbijanja namota statora, vibracije, magnetska slika, dijagnostika ulja, utjecaj kavitacije, dobivamo mogućnost pravovremenog otkrivanja mogućih problema i preventivno djelovanje da ne dođe do većih električkih ili mehaničkih oštećenja.

Sustav monitoringa hidroelektrane podrazumijeva kontinuirano praćenje rada i stanja opreme na svim bitnim dijelovima postrojenja kao što su turbina, generator, transformator, spojni vodovi i visokonaponski kabele i oprema rasklopnog postrojenja. Kroz praćenje dobivenih izlaznih podataka iz sustava monitoringa mogu se uočiti trendovi starenja i trošenja pojedinih dijelova ili sklopova, odnosno predvidjeti razvoj mogućeg kvara. Pohranjeni podaci vezani uz rad opreme i pogonske uvjete u kojima je ta oprema radila, u svakom trenutku nam omogućuju analizu i ocjenu stanja opreme. Na taj se način smanjuju troškovi održavanja u postrojenju, a povećava raspoloživost opreme [4].

U sustavu monitoringa agregata koriste se razni senzori ovisno o vrsti vibracije koju želimo pratiti i obrađivati. Imamo senzore za relativne, apsolutne vibracije, kao i senzore za vibracije paketa namota.

U znanstvenom svijetu se sve više istražuje primjena optičkih i svjetlovodnih senzora za analizu i monitoring vibracija generatora.

Optička interferometrija se temelji na valnoj prirodi svjetlosti i interferenciji svjetlosnih snopova (dva ili više snopova), lansiranih iz istog izvora svjetlosti, (laserskog izvora ili drugog monokromatskog izvora), koji se širi kroz prostor ili dielektrične medije kao što su svjetlovodi s različitim optičkim putevima te istovremeno stižu do točke u prostoru ili na površinu objekta [5]. To je poznata pojava interferencije svjetlosti koja rezultira periodičnim promjenama intenziteta svjetlosti zbog razlike u optičkom putu između zraka. Mjerenjem promjene intenziteta interferencijskog svjetla može se izgraditi svjetlovodni interferometar za precizna mjerenja pomaka na temelju male promjene razlike optičkog puta na skali valnih duljina samog svjetlovoda [5].

Vrlo mala promjena u razlici optičkih puteva na razini valne duljine svjetlosnog izvora uzrokuje promjenu u međudjelovanju svjetlosnih valova, a to uzrokuje jasnu i mjerljivu promjenu u intenzitetu svjetlosne interferencije [5].

Posebna podskupina optičkih interferometara su interferometri izvedeni pomoću svjetlovoda i zovu se svjetlovodni interferometri.

Optički i svjetlovodni interferometri se sve češće koriste za industrijska mjerenja i izradu senzora [6, 7, 8, 9]. Prema svojoj arhitekturi, optički interferometri mogu biti klasificirani u četiri dominantna tipa. To su Mach-Zehnder, Michelson, Sagnac i Fabry-Perot interferometri [5].

Za mjerenje vibracija i otkrivanje nepravilnih radnih stanja u radu je predstavljen prijenosni sustav koji se sastoji od laserskog izvora, cjenovno pristupačnog telekomunikacijskog svjetlovoda, svjetlovodnog razdjelnika, uređaja za kondicioniranje i obradu signala te prijenosnog računala za pohranu i analizu podataka. Svjetlovodni senzor, zasnovan na principu interferometra, koristi se kao pasivni detektor vibracija vrlo niskih amplituda umjesto sveprisutnih piezoelektričnih, mikroelektromehaničkih sustava (MEMS) ili beskontaktnih kapacitivnih senzora. Razvijeni prijenosni mjerni sustav eksperimentalno je provjeren na laboratorijskoj maketi u FESB-u, a dobiveni rezultati uspoređeni su s onima dobivenim tradicionalnim senzorima.

Poglavlje 2 ovog rada obrađuje vibracije koje se javljaju na pojedinim dijelovima u hidroelektranama, kako bi se dao uvid u problematiku koje vibracije predstavljaju u hidroelektranama, poglavlje 3 odnosi se na razvoj monitoring sustava u hidroelektranama, poglavlje 4 opisuje klasične vrste senzora koji se primjenjuju u sustavu monitoringa na hidroelektranama, kako bi se prikazale prednosti i mane pojedinih senzora, poglavlje 5 sadrži opis optičke i svjetlovodne interferometrije, gdje se detaljno opisuje optička interferometrija i glavni tipovi optičkih interferometara, poglavlje 6 prikazuje razvoj svjetlovodnog senzora na bazi svjetlovodne interferometrije za mjerenje vibracija na hidrogeneratoru koji se odvija kroz poslijediplomski doktorski studij.

## 2 VIBRACIJE U HIDROELEKTRANAMA

### 2.1 Uvod

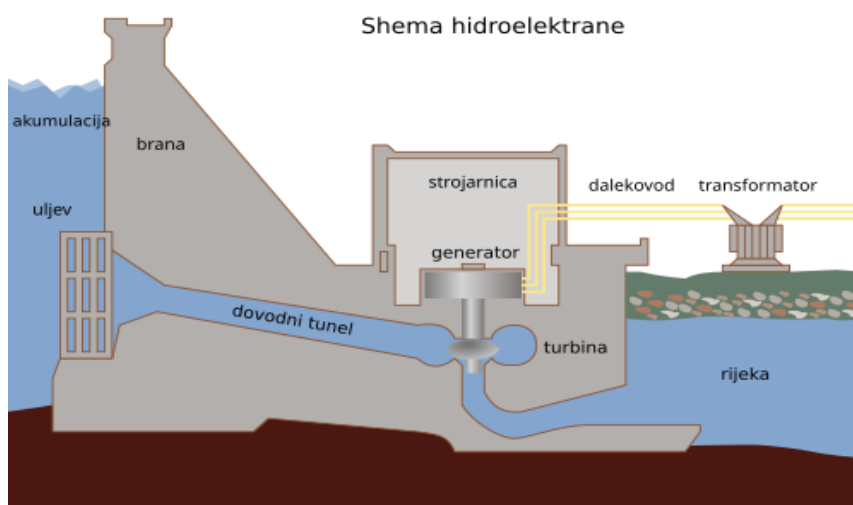
Vibracija se može definirati kao mehaničko osciliranje oko ravnotežnog položaja stroja ili komponente [10]. Vibracije mogu biti povremene ili slučajne, a mogu se pojaviti kao slobodne ili prisilne. Slobodne vibracije javljaju se kao odgovor sustava na udar ili pomicanje praćen prirodnim oscilacijama. Kada se na objekt ili strukturu primijeni promjenjiva sila, javljaju se prisilne vibracije. [3].

Podatci o stanju stroja sadržani su u vibracijskom signalu samog stroja, koji se može mjeriti na površini opreme [1]. Instrumenti za analizu vibracijskog signala koriste brzu Fourierovu transformaciju (FFT), koja prikaz domene vibracijskog signala pretvara u njegovu frekvencijsku domenu. To je poznato pod nazivom frekvencijski spektar. Frekvencijski spektri vibracija imat će određeni oblik kod stroja tijekom rada bez smetnji, koji će se promijeniti ako se pojave smetnje koje uzrokuju povećanje vibracija. Zbog toga je za analizu spektra potrebna specijalizirana obrada signala [11]. Vremenski oblik vala je prikaz amplitude u odnosu na vrijeme, a kod Fourierove transformacije prikazana je amplituda i faza u odnosu na frekvenciju. Oba su pristupa potrebna za utvrđivanje i analizu kvara nakon kojeg je zakazano održavanje [1].

Stanje rotacijskih strojeva poput kompresora, pumpi ili turbina može se pratiti pomoću mjerenja vibracija. Praćenjem različitih uzoraka vibracija s vremenom se može prepoznati utjecaj različitih dijelova stroja na povećanje vibracija. Na temelju prikupljenih podataka o vibracijama stručnjak može zakazati održavanje radi veće sigurnosti i smanjenih troškova, tj. predvidjeti kada su određeni dijelovi stroja dosegili potrebu za zamjenom.

Vibracije se javljaju na rotirajućoj i nerotirajućoj opremi. Glavni izvori vibracija mogu biti električni, mehanički i hidraulički [12]. Rotirajući elementi u hidroelektranama (turbina, generator) generiraju određene vibracijske frekvencije. Amplituda vibracija određuje kvalitetu i rad stroja ili opreme. Povećanje amplitude vibracija dovodi do ozbiljnih problema [13].

Na slici br. 2.1 prikazani su različiti dijelovi hidroelektrane. U hidroelektranama pod veoma skupom i najvažnijom elektromehaničkom opremom se smatraju turbina, generator i transformator snage [14].



Slika 2.1 Različiti dijelovi hidroelektrane.

## 2.2 Vibracije na rotirajućoj opremi

Vibracije na rotirajućoj opremi kao što su turbina, rotor, generator i motor javljaju se iz više razloga. Elektromagnetski problemi se javljaju radi disbalansa elektromagnetskih sila na rotoru i statoru, što će se u nastavku objasniti [1].

### 2.2.1 Vibracije na turbini

Vibracije na turbinama mogu biti dosta štetne za samu turbinu kao i za cijeli pogon hidroelektrane. Radi vibracija na turbinama može doći do oštećenja, napuknuća pa i do loma lopatica što može uzrokovati havariju. Na slici br. 2.2 prikazano je oštećenje turbine uslijed kavitacije [1].

Vibracije na turbinama se javljaju radi [1]:

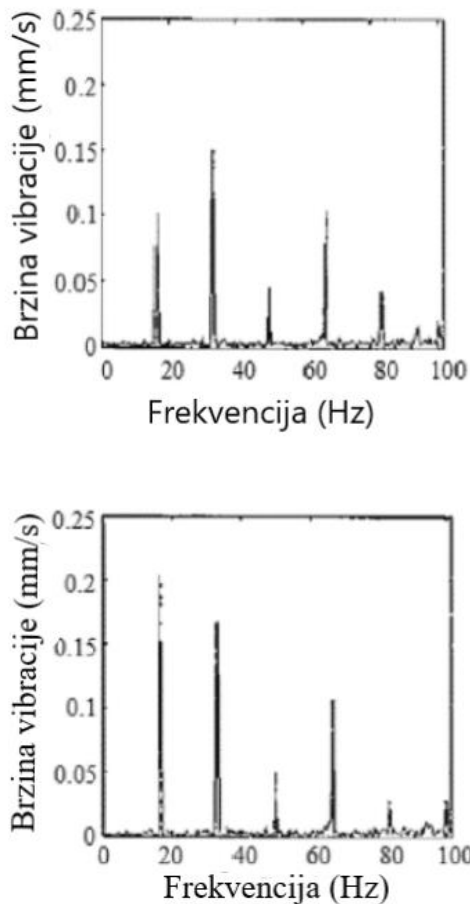
- neispravnih ležajeva,
- kavitacije,
- nepravilnog podmazivanja,
- disbalansa,
- ekscentričnosti,
- krivog podudaranja dijelova,
- rada u nemirnoj zoni,
- abrazivne erozije, itd.



*Slika 2.2 Oštećenja uslijed kavitacije [1]*

### 2.2.2 Vibracije na rotoru

Pogrešno namatanje rotora hidrogenatora dovodi do lokalnog pregrijavanja i neuravnoteženog povlačenja. Nejednaka struja u namotima stvara neujednačeno magnetsko polje i na taj način se vibracije povećavaju. Izobličenje zračnog razmaka uzrokuje neuravnoteženo magnetsko povlačenje na rotoru, što rezultira vibriranjem statora. Slika br. 2.3 prikazuje frekvenciju vibracija karakterističnu za rotor tijekom normalnog rada generatora (a) i sa 10% greške u namotu rotora (b) [1].



Slika 2.3 Spektar frekvencije vibracije karakterističan za rotor (a) prije i (b) nakon kvara [1]

### 2.2.3 Vibracije na motorima

Vibracije na motorima se javljaju radi mehaničkih, aerodinamičnih i elektromagnetskih utjecaja. Mehanički problemi se javljaju zbog [1]:

- disbalansa,
- krivog podudaranja dijelova,
- oštećenja namota zbog mehaničkog udara,
- neispravnih ležajeva,
- labavost, itd.

Aerodinamični problemi se javljaju zbog [1]:

- ventilacijske opreme,
- turbulencije, itd.

Vibracije povezane s električnim i elektromagnetskim kvarovima nastaju zbog neuravnoteženosti elektromagnetske sile na rotor i stator. Ova neravnoteža se javlja zbog ekscentričnosti zračnog rasporeda, slomljenih štapova na rotoru, greške u namotima, kratkih spojeva na statorskom i rotorskom namotu, nejednakosti u fazama struja, itd. [15].

## 2.3 Vibracije na nerotirajućoj opremi

Vibracije na nerotirajućoj opremi se javljaju kod transformatora, tlačnih cjevovoda, difuzora, generatora, itd.

### 2.3.1 Vibracije transformatora

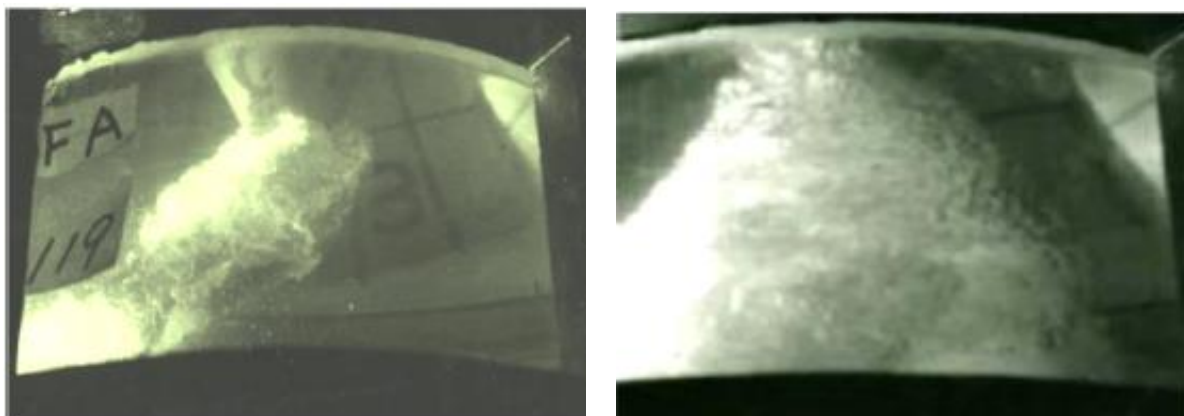
Jezgra i namoti transformatora pod utjecajem su vibracija uzrokovanih magnetskim silama. Te vibracije su povezane sa šumom koji ima frekvenciju dvostruko veću od mrežne. Što su te vibracije veće, učinkovitost transformatora opada. Pravilnim učvršćivanjem unutarnjih dijelova transformatora i postavljanjem vibracijskih jastučića vibracije se mogu u određenoj mjeri smanjiti [1].

### 2.3.2 Vibracije kod tlačnog cjevovoda

Vodeni udar ili vodeni čekić koji nastaje iznenadnom promjenom protoka vode je kritičan problem za tlačni cjevovod [14]. Zbog vodenog čekića može doći do kvara sustava ili puknuća cjevovoda [13]. Tlak vodenog čekića uzrokuje oscilacije u hidroelektrani. U podnožju tlačnog cjevovoda vibracije su uzrokovane kavitacijom ili erozijom [16]. Ove vibracije uzrokuju zamor materijala što može dovesti do problema u tlačnom cjevovodu. Pomoću sustava za praćenje stanja vibracija te se vibracije mogu detektirati kako bi se na vrijeme reagiralo i otklonio problem.

### 2.3.3 Vibracije difuzora

Vibracija difuzora najzanimljiviji je fenomen koji uzrokuje velike prepreke u radu Francisove turbine. To je zbog nestabilnosti protoka povezanim s preopterećenjem ili djelomičnim opterećenjem turbine. Na slici br.2.4 prikazani su vrtlozi u turbinama [1].



*Slika 2.4 Vrtlozi vode pri djelomičnom (lijevo) i potpunim opterećenjem (desno) [1]*

U difuzoru se javljaju vrtlozi vode, što uzrokuje vibracije, buku i oscilaciju proizvodnje. Kavitacija može utjecati na učinkovitost, a također može prouzrokovati eroziju metala, oštećenje turbine ili prisilno isključivanje stroja. Kavitacija se može otkriti mjerenjem vibracija turbine i difuzora uz pomoć filtriranja signala [1]. U turbini je širina opsega zvuka kavitacije od 3 kHz do 15 kHz [17–19].

#### 2.3.4 Vibracije na generatoru

Zbog labavosti namota ili proboja u namotima dolazi do povećanja vibracija na motorima i generatorima [20]. Neravnoteže magnetskih sila u električnim strojevima javljaju se kad izolacija u namotima izgubi dielektričnu čvrstoću. Do neravnoteža magnetskih sila [12] može doći zbog:

- labavosti namota,
- kvara izolacije,
- nejednakog zračnog raspona između statora i rotora,
- visokih parcijalnih izbijanja i
- nejednakog opterećenja generatora.

Stanje mehaničkih vibracija u generatoru je teško dijagnosticirati [14]. U generatorskim poljima vibracije nastaju zbog mehaničkih neravnoteža i promjenjivih polja. Povećane vibracije okvira statora i jezgre statora mogu oštetiti izolaciju namota. Do povećanih vibracija okvira statora i jezgre statora dolazi kada zračni raspon nije ujednačen što uzrokuje poremećaje u silama unutar zračnog raspona, porast temperature, itd. [21], [22]. Obavljanjem niskofrekventnih vibracijskih mjerenja na jezgri i okviru statora takve se greške mogu predvidjeti prije nego što uzrokuju ozbiljniju štetu [23]. Pojava vibracija blizu 50Hz, 100Hz, i 200Hz kod stroja koji radi na 50 Hz najčešće su indikator ekscentričnosti [24]. Ekscentričnost u okviru statora uzrokuje proizvodnju harmonika višeg reda. Pogreške u namotima motora i hidrogenatora su prikazane na slici br. 2.5 (a) i (b). Greška u namotima rotora uzrokuje magnetsku neravnotežu, toplinsku neravnotežu i vibracije pri frekvencijama koje odgovaraju mehaničkoj rotaciji. Vibracije rotora mijenjaju magnetsku vodljivost zračnog raspona sa mehaničkom frekvencijom rotiranja rotora. Vibracija statora povećava se s ovom mehaničkom frekvencijom rotacije rotora i dostiže vrijednost dvostruke vrijednosti one rotiranja rotora. Međutim, karakteristika vibracije rotora razlikuje se od vibracije statora [25]. Vibracije okvira statora i jezgre statora uzrokuju visoku buku. Vibracija rotora se preko magnetskog polja zračnog raspona prenose na stator i ležajeve. Prilikom analize vibracija na rotoru treba uzeti u obzir i utjecaj na ležajeve [1].



Slika 2.5 Pogreške u namotima (a) motora i (b) hidrogenatora

## 3 MONITORING SUSTAVI U HIDROELEKTRANAMA

### 3.1 Uvod

Prikupljanje i obrada signala omogućuje nam praćenje vibracija u hidrogeneratorskoj opremi koja obično varira ovisno o prirodi kvara [26]. Vibracije opreme predstavljaju ozbiljan problem u hidroelektranama od samog početka proizvodnje električne energije [1]. Mjerenje vibracija je vrlo važno jer pruža ranu indikaciju predstojećeg kvara, a time se pravilnim održavanjem može spriječiti kvar i uništavanje opreme. Analiza vibracija nepomičnih dijelova hidrauličkog sustava omogućuje otkrivanje do 76 % nedostataka [2]. Kada se prirodna frekvencija osovine stroja podudara s frekvencijskim fluktuacijama dolazi do pojave povećanih vibracija [22]. Kod razina vibracija iznad dopuštenih granica, potrebno je utvrditi izvore vibracija i poduzeti odgovarajuće mjere kako bi se ona postavila u sigurne granice [12]. Praćenje stanja i dijagnostika kvarova sastoji se od sljedećih koraka :

- prikupljanje, analiza i skladištenje signala,
- prijenos podataka i skladištenje,
- odabir podataka.

Znanstveni razvoj tokom posljednjih godina omogućio je brzo i učinkovito mjerenje i online praćenje vibracija.

### 3.2 Razvoj monitoring sustava

Može se reći da se pojavom prvih hidroelektrana sustav monitoringa hidroenergetskih postrojenja postepeno počeo razvijati.

U prvim elektranama pogonsko osoblje je nadzor obavljalo pomoću iskustva i vlastitih osjetila (opipa, sluha, vida, mirisa) i tako procjenjivalo stanje agregata. To stanje predstavlja nultu fazu u razvoju monitoringa [27].

Prvu fazu karakterizira uvođenje sustava trajnog nadzora odabranih parametara u svrhu alarma i zaštite, konvencionalni monitoring [27].

Konvencionalni monitoring daje pogonskom osoblju rano upozorenje mogućim nadolazećim problemima, ali ne daje dovoljno informacija na temelju kojih bi se moglo intervenirati u smislu korekcije režima eksploatacije agregata, radi produljenja njegove životne dobi kada je to ekonomski opravdano [27].

Konvencionalni monitoring u pravilu ne omogućava predviđanje vremena kada bi se mogao dogoditi kvar pojedine komponente postrojenja. Zbog toga se u velikoj mjeri i danas održavanja planiraju na principu remonata temeljenih na vremenskom planiranju. Pritom se planiraju remontu u doba godine kada su niski protoci ili su smanjeni zahtjevi za potrošnjom električne energije [27].

Remonti temeljeni na vremenskom planiranju imaju jednu veliku negativnost, a to je nemogućnost određivanja stvarnog stanja opreme za koju se planira remont, iz čega proizlaze dva negativna moguća scenarija: (1) nepotreban trošak ako je interval između dva uzastopna remonta mnogo kraći nego je to objektivno potrebno i (2) smanjenje sigurnosti i životne dobi opreme ako je interval između dva remonta duži nego što je to potrebno [27].

Druga faza je povezana s razvojem tehnologije u području mjerenja, obrade, akvizicije i analize signala, pri čemu posebnu ulogu ima brzi razvoj računalne tehnologije koja nam omogućava razvoj i uvođenje dijagnostičkog nadzora (moderno koncipiran dijagnostički monitoring hidroagregata) [27].

Moderno koncipiran dijagnostički monitoring hidroagregata ima zadatak prikupljanja svih potrebnih podataka i njihovo stalno analiziranje radi dobivanja upotrebljivih informacija o stanju agregata, koje nam koriste za planiranje remonata na temelju stanja agregata i napuštanja principa vremenskog planiranja remonta [27].

Početna faza razvoja dijagnostičkog monitoringa temeljila se na specijaliziranoj mjernoj opremi za pojedine veličine (električne, mehaničke, hidrauličke...) uključujući i funkcije analize i dijagnostičke obrade signala [27].

Slijedeća faza razvoja dijagnostičkog monitoringa, zagovara monitoring otvorenog tipa koji u osnovi sadrži mjerne senzore za detekciju nadziranih veličina, elektroničku jedinicu za analognu obradu mjernih signala, jedinicu za akviziciju signala i računalo s odgovarajućom programskom podrškom za prikazivanje i dijagnostičku analizu podataka. U takvom sustavu broj i karakter nadziranih veličina može biti različit, ovisno o veličini agregata i njegovoj ulozi u elektroenergetskom sustavu. Jasno je da samo ovaj drugi pristup omogućava razvoj dijagnostičkih ekspertnih sustava koji su osnova za primjenu ideje održavanja temeljenog na stanju agregata.

Danas ne postoji konačna lista veličina koje ulaze u sustav dijagnostičkog monitoringa hidroagregata. Spomenimo samo neke koje se mogu smatrati standardnim: vibracije, parcijalna izbijanja, zračni raspor, magnetska indukcija u zračnom rasporu, itd. Procesne veličine kao što su naponi i struje armaturnog i uzbuđenog namota, radna i jalova snaga, temperature, itd., također ulaze u sustav dijagnostičkog monitoringa jer bez njih nije moguća cjelovita analiza u svrhu utvrđivanja stanja agregata [27].

Krajnji je cilj uvođenje održavanja temeljenog na stanju agregata i izbjegavanje svih remonata koji nisu nužni. Na taj način mogu se smanjiti troškovi eksploatacije uz istovremeno produženje životne dobi agregata (smanjenje troškova održavanja od 50 - 80% i povećanje životne dobi agregata za 20 - 40%) [27].

Prednosti korištenja online praćenja (trajnog monitoring sustava) su [1]:

- sprječavanje velikih havarija,
- smanjenje troškova održavanja,
- smanjenje rizika za osoblje,
- stroj može biti u pogonu dok su vibracije unutar dopuštenih granica,
- povećavanje efikasnost i dugotrajnost opreme.

Pouzdanost se poboljšava pravilnom dijagnozom, a troškovne prednosti on-line praćenja su [14]:

- troškovi održavanja se smanjuju za 50-80%,
- kvarovi na opremi se smanjuju za 50-80%,
- prekid rada stroja se smanjuje za 50-80%,
- životni vijek stroja se povećava za 20-40%,
- profit se povećava za 25-30%.

Kod offline praćenja vibracija obavljaju se mjerenja prije i nakon remonta radi usporedbe parametara. Offline praćenje je povezano uz održavanje opreme koje se planiraju periodično ovisno o vremenu, a ne o parametrima i indikatorima strojeva koji nam govore o stanju opreme. Nedostaci ovakvog praćenja su:

- ogromni proizvodni gubici zbog neplaniranog prekida rada i obustave,
- provođenje održavanja i remonata iako oprema to ne zahtjeva,
- povećanje troškova preventivnog održavanja.

## 4 VRSTE SENZORA ZA MJERENJE VIBRACIJA

Za mjerenje vibracija strojeva koriste se davači ili senzori vibracija. Ti uređaji rade na principu da pretvaraju promjene mehaničkih veličina u promjene drugih fizičkih veličina, obično u električni signal koji je proporcionalan parametru doživljenog pomaka. Za mjerenje vibracija najčešće se koriste tri osnovna tipa: senzori pomaka, senzori brzine i akcelerometri [28]. Svaki od navedenih tipova ima svoje prednosti kao i nedostatke koji najviše ovise o vrsti primjene [29]. Koji će se tip senzora koristiti u kojim okolnostima najčešće je određeno frekvencijskim rasponom samog senzora, njegovom osjetljivošću i operativnim ograničenjima [29].

Senzori pomaka koriste kapacitivne, optičke ili ultrazvučne principe za mjerenje pomaka vibracija. Oni su prikladni za mjerenje frekvencija vibracija ispod 10 Hz [30].

Senzori (vibracijske) brzine su elektromehanički senzori izrađeni za izravno mjerenje pomaka izazvanih vibracijom. Osnovne komponente senzora brzine su [29]:

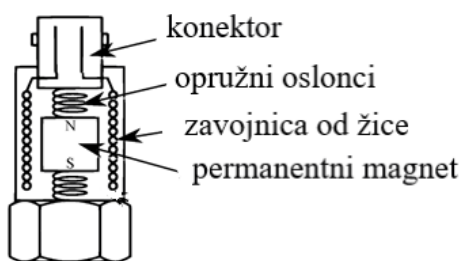
- permanentni magnet,
- zavojnica od žice,
- opružni oslonci.

Na slici br. 4.1 prikazana je shema senzora brzine. Ova vrsta senzora radi na principu elektromagnetske indukcije.

Stvaranje induciranog napona na krajevima žica zavojnice uzrokovano je gibanjem zavojnice unutar magnetskog polja.

Ovaj napon nastaje prijenosom energije iz magnetskog polja magneta na žičanu zavojnicu. Dolazi do relativnog gibanja u odnosu na magnet kada je zavojnica izložena vibracijama, što dovodi do induciranja naponskog signala. Taj naponski signal je direktno proporcionalan brzini vibracije kojoj je senzor izložen. Frekvencijski raspon ovih senzora je od 10-1000Hz [29].

Osjetljivost se smanjuje pri niskim frekvencijama vibracija, što uzrokuje netočna očitavanja pri frekvencijama vibracija ispod 10 Hz [28,30].



*Slika 4.1 Shema senzora brzine sa svojim glavnim komponentama [29].*

Akcelerometari su senzori koji mjere ubrzanje i pronalaze široku primjenu u elektroničkim uređajima i automobilskim sustavima [31]. Drugi Newtonov zakon, koji kaže da je sila koja djeluje na tijelo jednaka umnošku mase tijela i njegovog ubrzanja je temelj njihovog rada [31]. Akcelerometri funkcioniraju na principu inercije, analizirajući silu koja djeluje na masu tijekom ubrzanja [31]. Unutarnja masa se opire promjenama gibanja, a nastala sila proporcionalna je primijenjenom ubrzanju [31].

Postoji mnogo različitih tipova akcelerometara:

- piezoelektrični uniaksijalni akcelerometri,
- piezoelektrični triaksijalni akcelerometri,
- MEMS akcelerometri, itd.

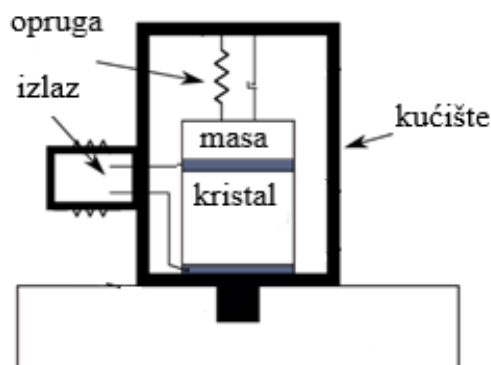
Akcelerometri mogu biti raznih konstrukcijskih izvedbi od uniaksijalnih do triaksijalnih (koji mjere ubrzanje duž jedne ili tri osi), žičanih i bežičnih, što im omogućava široki spektar primjenjivosti [31].

Ta raznolikost u konstrukciji omogućuje istraživačima i inženjerima da odaberu akcelerometar koji najbolje odgovara specifičnim potrebama njihovih eksperimentalnih postavki ili stvarnih aplikacija [31].

Postoji mnogo različitih tipova akcelerometara, no za primjenu na rotirajućim strojevima najčešće se koriste piezoelektrični i mikroelektromehanički sustavi (MEMS) akcelerometri. Ovi senzori mogu biti uniaksijalni, koji detektiraju ubrzanje samo u jednoj osi ili triaksijalni, detektiraju ubrzanje u tri osi. Triaksijalni akcelerometar u usporedbi s uniaksijalnim akcelerometrom, zahtijeva veću memoriju, što rezultira višim troškovima [32].

Princip rada piezoelektričnog akcelerometra je da na izlazu proizvodi električni signal proporcionalan nastalom ubrzanju [29]. Mehanizam rada piezoelektričnih akcelerometara temeljen je na piezoelektričnom efektu, koji pretvara mehaničko gibanje u napon [29]. Deformiranjem piezoelektričnog kristala senzora uslijed djelovanja vanjske sile (ubrzanja), dolazi do određene razlike potencijala između njegovih priključaka, koja je proporcionalna sili kojoj je kristal izložen [33,34].

Na slici br. 4.2 prikazan je piezoelektrični akcelerometar sa svojim komponentama [29]. Ova vrsta akcelerometra jedna je od najčešće korištenih za mjerenje vibracija, jer u usporedbi s ostalim senzorima ima najbolje opće karakteristike. Ima širok frekvencijski raspon i dinamički raspon s dobrom linearnošću, robustan je i stabilan, pa njegove karakteristike ostaju postojane tijekom dugog vremenskog razdoblja. U usporedbi s drugim vrstama senzora, piezoelektrični akcelerometri imaju veću pouzdanost te dobar frekvencijski raspon. [28,35].



*Slika 4.2 Piezoelektrični akcelerometar sa svojim komponentama*

Akcelerometri se najčešće koriste zbog svoje točnosti, raspona mjerenja, jednostavnosti montaže i cijene. Štoviše, relativno je jednostavno integrirati akceleracijski signal i dobiti brzinu i pomak [36].

Mane piezoelektričnih akcelerometara su što nečistoća na konektorima kao i šum u kabeu utječu na rezultate i smanjuju razlučivost. Uz to, karakter visoke impedancije signala čini ga osjetljivijim na šum, pa je za akcelerometre potrebna upotreba oklopljenih kabela [3].

Brzi razvoj tehnike mikroproizvodnje poluvodiča omogućio je stvaranje uređaja koji se sastoje od mehaničkih dijelova s dimenzijama od nekoliko mikrometara [37]. To je dovelo do razvoja MEMS (mikroelektromehaničkih sustava) akcelerometara. U usporedbi s piezoelektričnim akcelerometrima ovi uređaji karakteriziraju se malim dimenzijama [38]. Radi malih dimenzija praćenje vibracija u rotirajućim strukturama čini MEMS akcelerometre osobito atraktivnima [39].

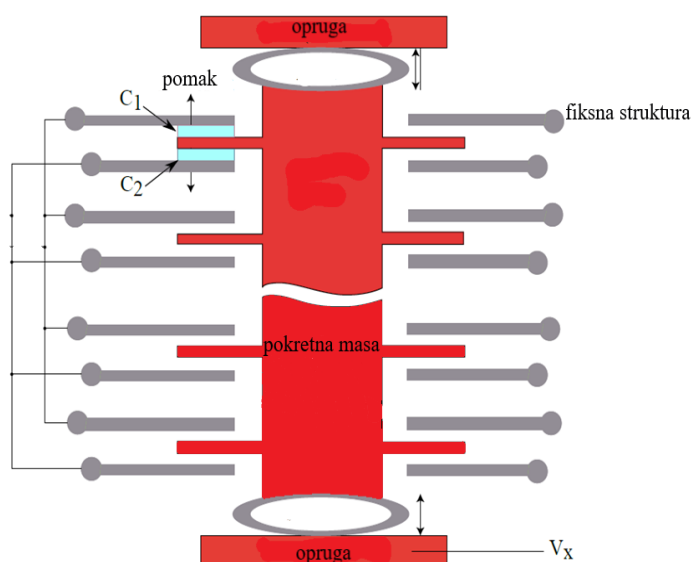
MEMS akcelerometri mogu se implementirati na temelju piezoresistivnih ili kapacitivnih principa. Kapacitivni MEMS akcelerometri manje su osjetljivi na toplinsku pobudu, što im omogućava rad na širem temperaturnom rasponu [38]. Ovi akcelerometri imaju tri temeljne komponente za svoje funkcioniranje:

- pokretnu testnu masu,
- područje opruge i
- fiksne strukture ili kapacitivne prste.

Dijelovi kapacitivnog MEMS akcelerometra prikazani su na slici br. 4.3. Dizajn akcelerometra omogućava bočno kretanje testne mase. Prilikom mirovanja, kapacitivnost je jednaka s obje strane testne mase, ali kada se uređaj pod utjecajem ubrzanja giba u određenom smjeru, masa se pomiče u suprotnom smjeru, tako da su kapacitivnosti između prstiju i fiksne strukture s obje strane različite. Očitavanjem promjena u diferencijalnoj kapacitivnosti omogućava nam mjerenje ubrzanja [40].

Osim sposobnosti istovremenog mjerenja ubrzanja u tri osi, MEMS akcelerometri imaju sposobnost da jednostavno prikupe analogne ili digitalne signale. Mogućnosti jednostavnog prikupljanja analognih i digitalnih signala MEMS akcelerometara smatra se najvećom prednošću u odnosu na tradicionalne akcelerometre [39].

Neke od prednosti MEMS senzora su dobra osjetljivost i pouzdanost te veliki raspon mogućnosti ugradnje radi malih dimenzija senzora. Glavni nedostatak je skup i vrlo složen postupak dizajniranja [3].



Slika 4.3 Dijelovi kapacitivnog MEMS akcelerometra

## 5 OPTIČKI I SVJETLOVODNI INTERFEROMETRI

### 5.1 Uvod

Za obavljanje mjerenja visoke točnosti raznih fizikalnih veličina u laboratorijima kao i u raznim područjima industrije sve više se koristi optička interferometrija koja se široko koristi u svjetlovodnim sustavima [5].

Optička interferometrija se temelji na valnoj prirodi svjetlosti i interferenciji svjetlosnih snopova (dva ili više snopova), lansiranih iz istog izvora svjetlosti, (laserskog izvora ili drugog monokromatskog izvora), koji se širi kroz prostor ili dielektrične medije kao što su svjetlovodi s različitim optičkim putevima te istovremeno stižu do točke u prostoru ili na površinu objekta [5].

Radi toga nastaje optička fazna razlika između svjetlosnih snopova, odnosno intenzitet svjetlosti periodično će varirati s razlikom optičkog puta [41].

Velika prednost kod svjetlovodnih senzora koji koriste interferometriju je da su izrađeni od potpuno dielektričnih materijala koji su potpuno otporni na elektromagnetske smetnje i također mogu izdržati visoke temperature [42, 43, 44], što ih čini povoljnim za korištenje u teškim okruženjima [45, 46], kao što su elektroenergetska postrojenja i sustavi kojima jake elektromagnetske smetnje primjenu konvencionalnih elektroničkih senzora čine nemogućima.

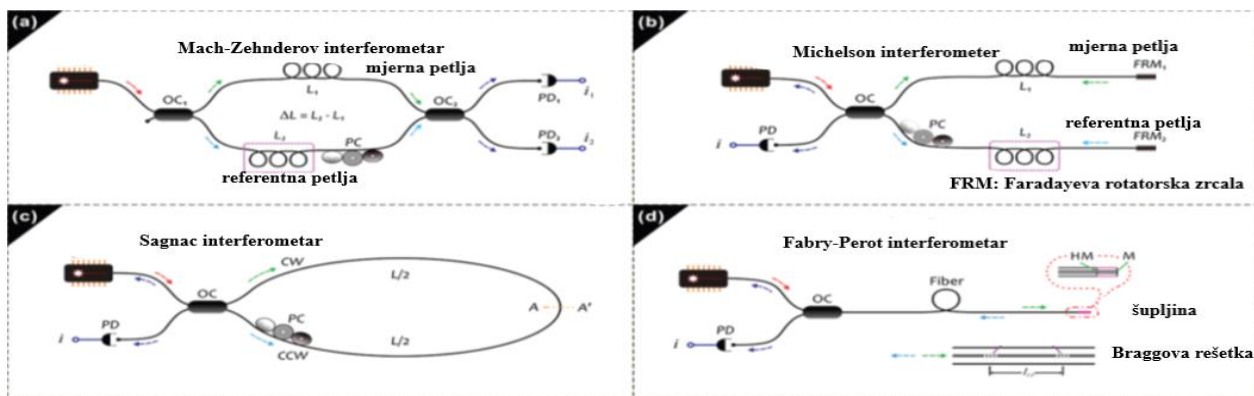
Promjena u međudjelovanju svjetlosnih valova uzrokuje jasnu i mjerljivu promjenu u intenzitetu svjetlosne interferencije [5].

Fazu svjetlosnog vala u optičkom mediju mogu promijeniti razne fizikalne veličine kao npr. temperatura, vlak, tlak, itd., mjerenjem promjena intenziteta svjetlosne interferencije, kao posljedice promjena optičkih putanja u svjetlovodnom mjernom sustavu, te se iste fizikalne veličine na taj način mogu posredno izmjeriti.

Posebna podskupina optičkih interferometara su interferometri izvedeni pomoću svjetlovoda (svjetlovodni interferometri), koji se sve češće koriste za industrijska mjerenja i izradu senzora [6, 7, 8, 9].

Optičke interferometre možemo podijeliti u četiri dominantna tipa [5]:

- Mach-Zehnder ,
- Michelson,
- Sagnac,
- Fabry-Perot interferometri.



Slika 5.1 Različiti tipovi svjetlovodnih interferometara [5]

## 5.2 Mach-Zehnderov interferometar

Mach-Zehnderov interferometar je uobičajeni optički interferometar s dva svjetlosna snopa. Slika br. 5.1 (a) prikazuje Mach-Zehnderov svjetlovodni interferometar koji se sastoji od dvije svjetlovodne petlje, od kojih je jedna mjerna duljine  $l_0$ , a druga referentna duljine  $l_r$ . Svjetlovodni sprežnik OC1 dijeli izvor svjetlosti na dva snopa koji se šire mjernom i referentnom petljom. Mjerna petlja je izložena vanjskim utjecajima okoline kako bi detektirala smetnje, dok referentna petlja ostaje u kontroliranim uvjetima, pa faza svjetlosti koja kroz nju prolazi ostaje relativno konstantna. Kako je mjerna petlja izložena vanjskim utjecajima svjetlosni snop koji prolazi kroz nju se mijenja, dok svjetlosni snop u referentnoj petlji ostaje nepromijenjen. Radi te pojave dolazi do faznog pomaka svjetlosnih snopova tih dviju grana, koje prolazeći kroz drugi sprežnik OC2 daju interferencijski signal koji ovisi o relativnoj faznoj razlici između dviju petlji. Fazni pomak je osjetljiv na vanjske promjene koje utječu na signalnu petlju [5].

## 5.3 Michelson interferometer

Na slici br. 5.1 (b) prikazan je Michelsonov svjetlovodni interferometar. Michelsonov interferometar također je interferometar s dva svjetlosna snopa. Ovaj interferometar je vrlo sličan Mach-Zehnderovom interferometru [42]. Mjerna i referentna petlja završavaju s dva zrcala ili Faradayeva rotatorska zrcala, tako da se mjerni i referentni svjetlosni snop reflektiraju odgovarajućim zrcalima natrag do sprežnika OC gdje se generira interferencijski signal. Osjetljivost Michelsonov interferometar dvostruko je veća od one Mach-Zehnderovom interferometra radi toga što je fazna razlika u Michelsonovom interferometru dvostruka od fazne razlike u Mach-Zehnderovom interferometru [5].

## 5.4 Sagnac interferometar

Sagnac interferometar je važan interferometar s dva svjetlosna snopa, koji koristi zajednički optički put [41, 42]. Dva snopa iz razdjelnika OC prolaze kroz istu svjetlovodnu petlju u suprotnim smjerovima, najčešće zvanim smjer kazaljke na satu (CW) i smjer suprotan od smjera kazaljke na satu (CCW). Interferencija se generira kada se CW i CCW snopovi, nakon što prijeđu cijelu svjetlovodnu petlju, ponovno spoje na OC. Na slici br. 5.1 (c) prikazan je Sagnac svjetlovodni interferometar. U statičkom stanju kada nema vanjskih utjecaja, budući da su optički putovi koje prolaze dva snopa skoro jednaki, na prvi pogled bi optička fazna razlika između dva snopa uvijek bila nula. Međutim, kada vanjski mjerni parametar, poput akustičkog vala, poremeti svjetlovod blizu jednog kraja petlje, dolazi do trenutnog pomaka u fazi. To čini Sagnac interferometar posebno prikladnim za mjerenje brzo promjenjivih vanjskih smetnji. U početku je Sagnac interferometar razvijen prvenstveno za mjerenje kutne brzine [53], kao optički žiroskop [42, 54]. U industriji električne energije za mjerenje raznih fizičkih parametara poput struja, napona, električnih i magnetskih polja, vibracija, kao i akustične emisije koje nastaju uslijed parcijalnih izbivanja unutar visokonaponske opreme, svjetlovodni senzori na bazi Sagnac interferometara postali su vrlo važni i široko primjenjivi [55–57].

## 5.5 Fabry-Perot interferometar

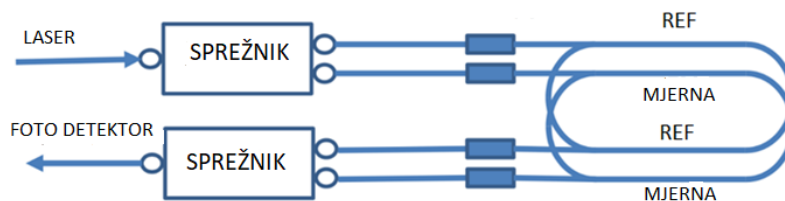
Fabry-Perot interferometar je interferometar s više snopova i sastoji se od interferometrijske šupljine koju čine dva paralelna reflektora (polu-zrcala) s refleksijom  $R$  s obje strane optički prozirnog medija duljine  $L$  [41, 42]. Na slici br. 5.1 (d) prikazan je Fabry-Perot svjetlovodni interferometar. Izvedba šupljine može biti vanjske ili unutarnje/ugrađene vrste [47, 48–52]. Kod vanjske izvedbe šupljine, dva reflektora su odvojena zračnim razmakom, nekim čvrstim ili tekućim materijalom osim svjetlovoda, tako da mjerni parametar utječe samo na optičku duljinu šupljine, a ne na svjetlovod. U ovoj izvedbi svjetlovod ima ulogu svjetlosnog kanala za prijenos snopova svjetlosti od i do interferometra. Kod ugrađene (unutarnje) verzije, šupljina se obično gradi unutar svjetlovoda kao integrirani dio kontinuiranog svjetlovoda s dva unutarnja reflektora formirana ravno rezanim krajevima svjetlovoda ili Braggovim rešetkama [8, 50]. Fabry-Perot interferometar je u usporedbi s Mach-Zehnder i Michelson interferometrima prilično kompaktan i stoga dostupan kao točkasti senzor za neke aplikacije, [51, 52].

## 6 RAZVOJ SVJETLOVODNOG SENZORA ZA MJERENJE VIBRACIJA

Pojavom svjetlovoda i razvojem svjetlovodnih senzora uvele su se nove mogućnosti u industriji [58]. Svjetlovodni senzor razvijan kroz poslijediplomski doktorski studij je na bazi svjetlovodne interferometrije

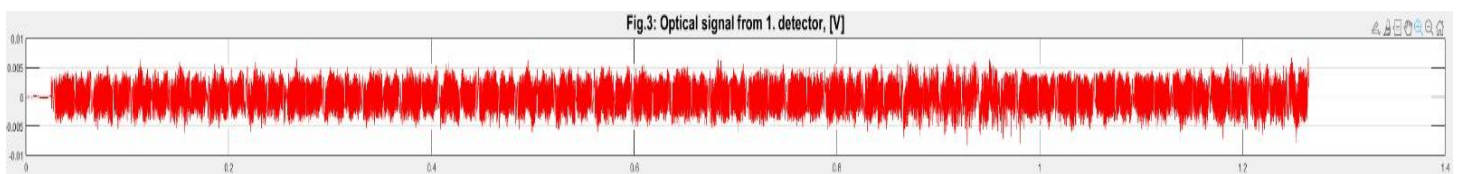
Prva faza razvoja svjetlovodnog senzora vibracija [3] je izvedena na principu Mach-Zehnder svjetlovodnog interferometra. Pasivni senzor ima nekoliko inovativnih točaka i prednosti. U odnosu na klasične senzore, novo razvijeni svjetlovodni senzor ima visoku osjetljivost (nm) , predstavlja pasivnu mjernu metodu (senzoru nije potrebno električno napajanje, samo svjetlost), postojanost na povišenim temperaturama, veći frekvencijski raspon i ne zahtijeva elektromagnetsku zaštitu, kako je svjetlovod dielektrični prijenosni medij [58].

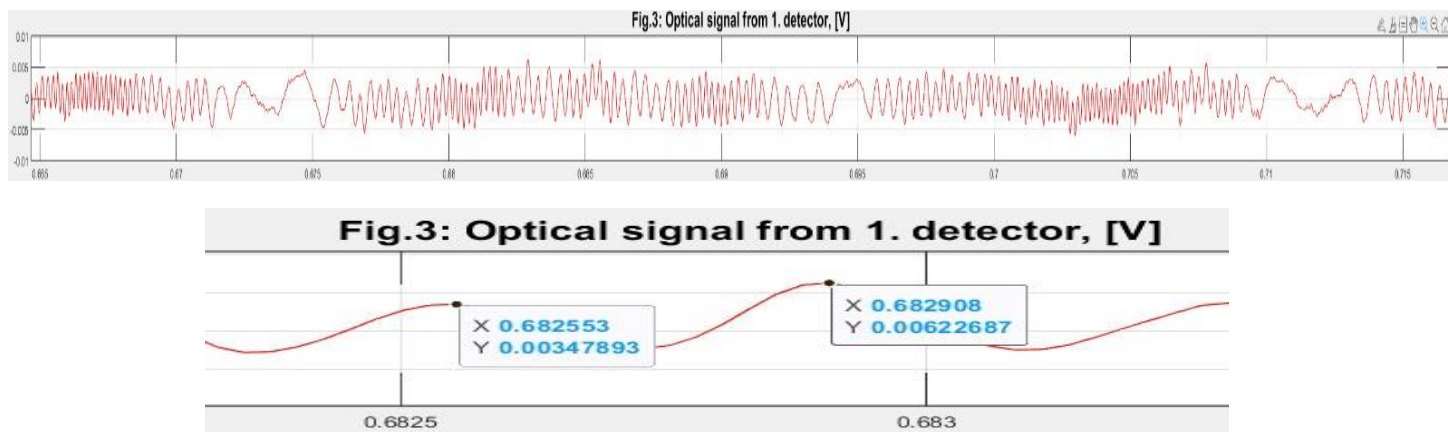
Kao što se može vidjeti na slici br. 6.1, prva faza senzora bila je izvedena od dvije svjetlovodne petlje gotovo jednakih dužina koje dijele isti izvor svijetla. Jedna petlja je referentna (REF) i koristi se kao referenca za mjerenje vremena potrebnog za putovanje svjetlosti od laserskog izvora do foto detektora. Druga petlja je mjerna i postavljena je lagano zategnuta između mjerne točke i postolja (prikazano na slici br. 6.3). Budući da su svjetlovodne petlje neovisne, svaki utjecaj vibracija na mjernu petlju prenositi će se kao fazni pomak svjetlosti na foto detektor u odnosu na slobodnostojeću referentnu petlju.



Slika 6.1 Princip rada svjetlovodnog senzora

Nakon pretvorbe svjetlovodnog signala u električni (O/E) i kondicioniranja (A/D), dobiva se potrební naponski signal  $U(t)$ . Valna duljina je definirana tehničkim karakteristikama lasera, u našem slučaju 1550 nm (telekomunikacijski laser) i ona služi za određivanje vremenske periode naponskog signala  $U(t)$  interferometra. Iz x-osi naponskog signala  $U(t)$  čitamo period  $T$ . Dijeljenjem interferometrijske periode sa vremenom daje nam brzinu mjernog objekta točno u tom interferometrijskom periodu. Primjenom izračuna na cijeli signal, dobivamo krivulju brzine mjernog objekta u ovisnosti o vremenu za ukupni signal. Kontrola procesa i obrada signala je rađena pomoću posebno kreiranog koda izrađenog u Matlab-u. Na slici br. 6.2, prikazan je interferometrijski naponski signal  $U(t)$  izvorni (a), zumirani signal gdje se vidu interferometrijske periode signala (b) i primjer iščitavanja vremena za jednu periodu (c). Navedene slike su prikaz učitanih sirovih signala u Matlab kodu.





Slika 6.2 Interferometrijski naponski signal  $U(t)$  izvorni (a), zumirani signal gdje se vide interferometrijske periode signala (b) i primjer iščitavanja vremena za jednu periodu (c).

Na prikazanim slikama interferometrijskog naponskog signala vidljivo je da amplituda nije stalna, što je u obradi signala zanemarivo jer je kod interferometrijskog signala cijela informacija sadržana u trenutnoj frekvenciji, tj. fazi.

Radi potvrde predloženog postupaka mjerenja na temelju Mach-Zehnderovog interferometra u laboratoriju na Fakultetu Elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje (FESB) u Splitu, provedena su opsežna ispitivanja. Primjer postavljanja svjetlovodnog senzora vibracija prikazan je na slici br. 6.3 iz dva različita kuta gledanja.



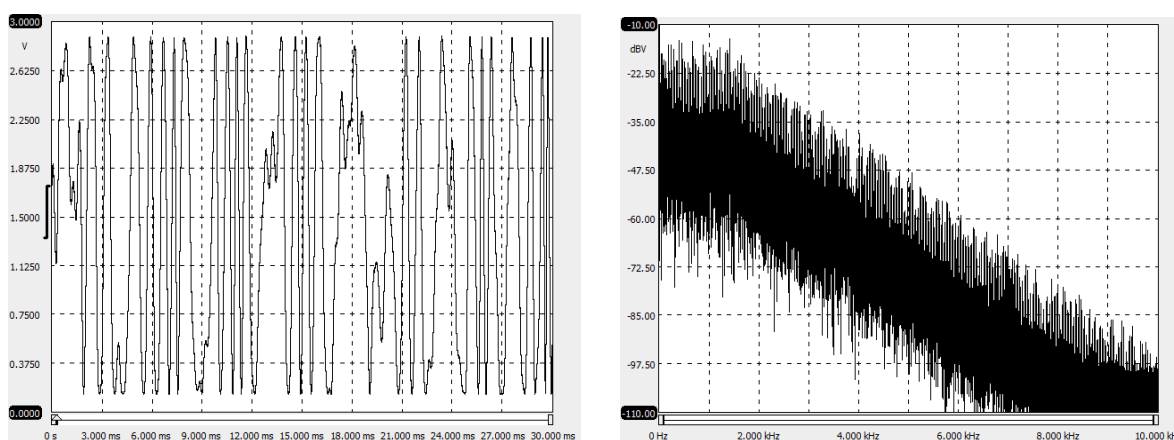
Slika 6.3 Prikaz položaja mjerne i referentne petlje pri mjerenju u laboratoriju na FESB-u

Oprema koja se koristila za svjetlovodni senzor sastojala se od:

- 1550 nm referentnog laserskog izvora postavljenog na 0,1 mW,
- InGaAs foto dioda 900-1700 nm (širina pojasa 17 MHz) proizvođača Thorlabs,
- AC/DC pojačala (širina pojasa 200 mHz),
- generičkog jednomodnog svjetlovoda i
- svjetlovodnog spreznika.

Industrijski MEMS akcelerator tipa Analog Devices ADXL335 je korišten za usporedbu mjernih rezultata. Za podešavanje brzine vrtnje od 0 do 1590 okr/min povezane istosmjerne i izmjenične grupe strojeva, pod različitim uvjetima opterećenja, koristili su se odgovarajući pretvarači napona (i frekvencije) kojima upravlja zasebno računalo.

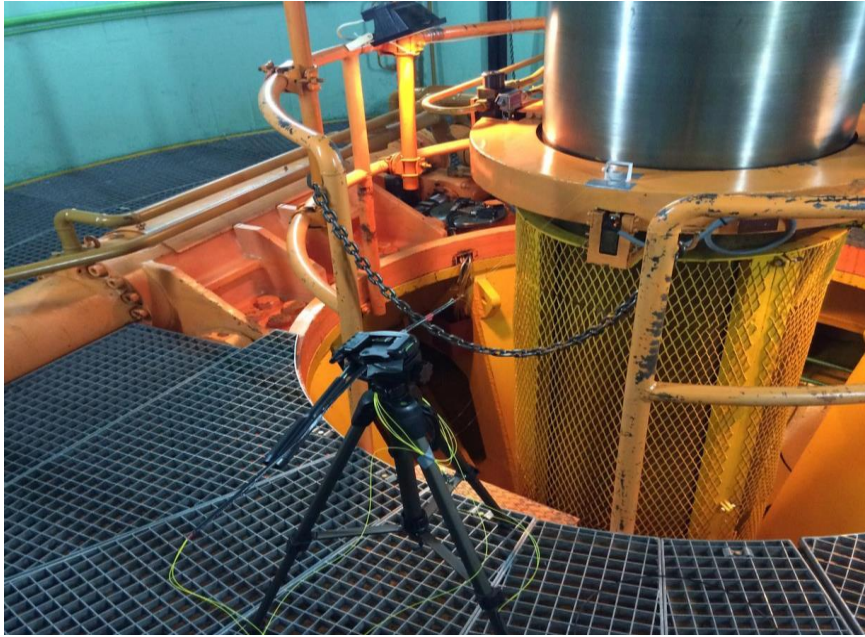
Valni oblik i spektar izvornog signala svjetlovodnog senzora vibracija prve faze razvoja prikazani su na slici br. 6.4. Navedene slike također su dobivene u Matlab programu.



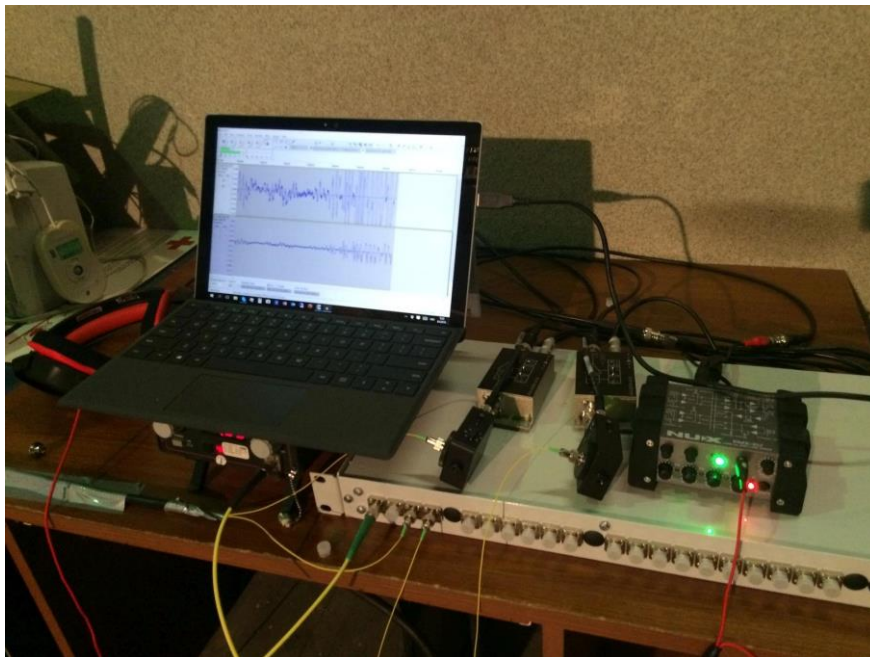
*Slika 6.4 Valni oblik (lijevo) i spektar (desno) izvornog signala dobivenog pri 1590 min<sup>-1</sup>*

Ista konfiguracija senzora je ispitana i na hidroelektrani (HE) Đale. Mjerena su odrađena na agregatu br. 2, koji je mijenjao snagu od minimuma do maksimuma. Senzorom su se snimile promjene koje nastaju prilikom promjene snage.

Na slikama br.6.5 i 6.6 prikazan je senzor koji se koristio za mjerenje na HE Đale i mjerna oprema koja se koristila.



*Slika 6.5 Postavljanje senzora kod mjerenja na HE Dale*



*Slika 6.6 Oprema korištena za mjerenja na HE Dale*

Predloženi senzor ima niz prednosti u odnosu na klasične senzore opisane u poglavlju 4 ovog rada. U daljnjim fazama razvoja namjera je senzor usavršiti u hardverskoj domeni i konfigurirati ga na principu Michelson interferometara. Kao što je opisano u poglavlju 5.3 ovoga rada, osjetljivost Michelson interferometra dvostruko je veća od one Mach-Zehnderovog interferometra radi toga što je fazna razlika u Michelson interferometru dvostruka od fazne razlike u Mach-Zehnderovom interferometru [5]. Osim dvostruke osjetljivosti ova izvedba senzora bi omogućila i beskontaktno mjerenje.

Nakon toga cilj je usavršiti obradu, filtriranje signala i program u Matlab-u.

## 7 ZAKLJUČAK

Pojava i problematika vibracija na rotirajućim kao i nerotirajućim elementima u hidroelektranama predstavlja veliki problem od samih početaka razvoja hidroelektrana. Vibracije ako se ne prate, mogu uzrokovati velika oštećenja primarne opreme i zaustavljanje proizvodnje što u konačnici uzrokuje velike financijske gubitke. Stoga su praćenje i analiza stanja opreme od velike važnosti za sve dijelove u hidroelektranama.

Kod offline monitoring sustava vibracije se analiziraju periodično ili prije i nakon određenih zahvata na samoj opremi u hidroelektranama (remonti, zamjene određenih elemenata, itd.) Kod online monitoring sustava se vibracije prate u stvarnom vremenu i analiza istih nam omogućuje da u svakom trenu imamo prikaz stanja opreme čije se vibracije prate. Online monitoring sustavi nam omogućuju da remonte, zamjene opreme kao i preglede koji zaustavljaju proizvodnju i uzrokuju velike troškove radi nemogućnosti proizvodnje, organiziramo prema potrebi, a ne periodično prema vremenu. Krajnji je cilj uvođenje održavanja temeljenog na stanju agregata i izbjegavanje svih remonata koji nisu nužni. Na taj način mogu se smanjiti troškovi eksploatacije uz istovremeno produženje životne dobi agregata (smanjenje troškova održavanja od 50 - 80% i povećanje životne dobi agregata za 20 - 40%).

U monitoring sustavima imamo senzore za relativne, apsolutne vibracije, kao i senzore za vibracije paketa namota. Klasični senzori koji se koriste u sustavima monitoringa su senzori pomaka, senzori brzine i akcelerometri.

Svjetlovodna interferometrija i svjetlovodni senzori se sve više primjenjuju u industriji i kroz znanost se razvijaju. Prednost senzora koji koristi svjetlovodnu interferometriju je da je izrađen od dielektričnih materijala koji su potpuno otporni na elektromagnetske smetnje i također može izdržati visoke temperature, što ga čini povoljnim za korištenje u teškim okruženjima, kao što su elektroenergetska postrojenja i sustavi kojima jake elektromagnetske smetnje primjenu konvencionalnih elektroničkih senzora čine nemogućima.

Iako je svjetlovodna interferometrija relativno nova problematika, očito je da u znanosti i industriji ima prostora i potrebe za daljnjim razvojem senzora na bazi svjetlovodne interferometrije. Kroz integraciju i primjenu novo razvijenog svjetlovodnog senzora koji omogućuje pasivni način mjerenja u sustave monitoringa omogućilo bi se mjerenje vibracija sa većom točnošću (točnost je definirana valnom duljinom koja je u nanometrima), beskontaktno mjerenje, veću temperaturnu otpornost, potpunu otpornost na elektromagnetske smetnje kao i pokrivenost šireg frekvencijskog spektra (do GHz).

## LITERATURA

- [1] Mohanta, R. K.; Chelliah, T. R.; Allamsetty, S.; Akula, A.; Ghosh R.: “Sources of vibration and their treatment in hydro power stations-A review,” *International Journal on Engineering Science and Technology*, vol. 20, pp. 637–648, 2017.
- [2] Kishor, N.; Fraile-Ardanuy (Eds.), J.: “Modeling and Dynamic Behaviour of Hydropower Plants,” *The Institution of Engineering and Technology (IET)*, London, UK, 2017.
- [3] Rozić, N.; Despalatović, M.; Bašić, P.; Sutlović, E.; Marušić, M.: “Electric Machine Vibration Measurements Based on Fiber Optic Sensor Technology – Preliminary Results,” *Smagrimet 2019*, DOI: 10.23919/SMAGRIMET.2019.8720356
- [4] Dujmović, M.: “Utjecaj sustava trajnog mjerenja i praćenja na troškove održavanja hidroelektrane”, *Magistarski rad*, Fesb, Split 2012.
- [5] Wang, L.; Fang, N.: “Applications of Fiber-Optic Interferometry Technology in Sensor Fields,” Feb. 2017, DOI: 10.5772/66276.
- [6] Berthold, III, J.W.: “Industrial applications of fiber optic sensors. In *Fiber optic sensors: An introduction for engineers and scientists*; Udd”, E.; New Jersey USA: John Wiley & Sons, Inc.; 1991, 2006; pp. 409–437.
- [7] Udd, E.: “Fiber-optic acoustic sensor based on the Sagnac interferometer in Single Mode Optical Fibers 90”, *Proc. of SPIE* 1983; 0425: 90–95.
- [8] He, X.; Taylor, H.F.: “Intrinsic fiber Fabry-Perot temperature sensor with fiber Bragg grating mirrors”, *Optics Letters*. 2002; 27(16): 1388–1390.
- [9] Posada, J.E.; Rubio-Serrano, J.; Garcia-Souto, J. A.: “All-fiber interferometric sensor of 150 kHz acoustic emission for the detection of partial discharges within power transformers”, In *21st International Conference on Optical Fiber Sensors*, *Proc. of SPIE* 2011; 7753: 77531S:1–77531S:4.
- [10] “Measuring Vibration with Accelerometers,” s interneta, <http://www.ni.com/white-paper/3807/en/>, 14. prosinca 2017.
- [11] Singh, S.K.: “Acoustics Based Condition Monitoring”, s interneta, <https://www.iitg.ac.in/engfac/rtiwari/resume/sksingh.pdf/>, srpanj 2025.
- [12] Aggarwal, R.K.: “Metal fatigue due to excess vibration and dynamic stresses on an hydro power station”, s interneta <https://www.scribd.com/document/141411086/DynamicStressesHydroPowerPlantRKAggarwal/>, rujan, 2014.
- [13] “Industrial Vibration Analysis for Predictive Maintenance and Improved Machine Reliability”, s interneta, [www.ctconline.com](http://www.ctconline.com), 10th September 2014.
- [14] Ahmad, I.; Rashid, A.: “On-line monitoring of hydro power plants in Pakistan”, *Inf. Technol. J.* (2007) 919–923
- [15] Wang, K.: “Vibration monitoring on electrical machine using vold-kalman filter order tracking”, *J. Vib. Control* (2008) 1–122.
- [16] Mcstraw, B.: “Inspection of steel penstocks and pressure conduits”, *Facil. Instr. Stand. Tech.* 2 (1996) 1–43.

- [17] Liu, S.; Wang, S.: “Cavitations monitoring and diagnosis of hydro power turbine online based on vibration and ultrasound acoustic”, *Mach. Learn. Cybern.* (2007) 19–22.
- [18] Bajic, B.: “Intelligent cavitations diagnostics and monitoring”, *Int. J. Hydro Power Dams* 54 (2001) 37–41.
- [19] Bajic, B.: “Cavitations diagnostics and monitoring”, *Int. J. Hydro Power Dams* 56(2003) 32–35 2004) 135–171.
- [20] Shreve, D.H.: “Integrated Condition Monitoring Technologies”, IRD Balancing LLC, Chester, UK, 2003, pp. 1–63.
- [21] Pejovic, S.; Zhang, Q.F.; Karney, B.; Gajic, A.: “Analysis of pump-turbine’s instability and reverse waterhammer incidents in hydro power systems”, in: 4th International Meeting on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems, 2011, pp. 1–16.
- [22] Sridharan, P.; Kuppuswamy, N.: “Vibration and cavitation prediction and control of turbine alternator in hydro electric power Plants”, *Aust. J. Basic Appl. Sci.* 7 (2013) 19–28.
- [23] Mesa Associates, INC. and Oak Ridge National Laboratory.: “Hydro power Advancement Project”, 2012, pp. 1–331.
- [24] Rai, R.B.: “Airgap eccentricity in induction motors”, ERA Report (1974) 1174–1188.
- [25] Shuting, W.; Zhaofeng, X.; Yonggang, L.; Zili, H.; Heming, L.: “Analysis of generator vibration characteristic on rotor winding inter-turn short circuit fault, electrical machines and systems”, *IEEE* (2003) 882–885.
- [26] Basak, D.; Tiwari, A., Das, S.P.: “Fault diagnosis and condition monitoring of electrical machines – a review”, in: *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT 2006)*, Mumbai, 2006, pp. 3061–3066.
- [27] Jadrić, M.; Rajković, B.; Terzić, B.; Firinger, V.; Despalatović, M.; Gladina, Ž.; Orešković, G.; Meško, B.; Macan, J.: “Monitoring hidroagregata stanje i razvoj u Hrvatskoj elektroprivredi proizvodno područje he jug”, FESB, Split 2004.
- [28] Scheffer, C.; Girdhar, P.: “Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance; Elsevier: Amsterdam”, The Netherlands, 2004.
- [29] Romanssini, M.; de Aguirre, P. César C.; Compassi-Severo, L.; Girardi, A. G.: “A Review on Vibration Monitoring Techniques for Predictive Maintenance of Rotating Machinery”, 26 June 2023, *Journal Eng Volume 4 Issue 3* 10.3390/eng4030102.
- [30] Goyal, D.; Pabla, B.: “The vibration monitoring methods and signal processing techniques for structural health monitoring: A review”, *Arch. Comput. Methods Eng.* 2016, 23, 585–594.
- [31] Hassan, Ul. I.; Panduru K.; Walsh J.: “An In-Depth Study of Vibration Sensors for Condition Monitoring”, *Sensors* 2024, 24(3), 740; <https://doi.org/10.3390/s24030740>.
- [32] Mohd Ghazali, M.H.; Rahiman, W.: “Vibration analysis for machine monitoring and diagnosis: A systematic review”, *Shock Vib.* 2021, 2021, 9469318.
- [33] Correa, J.C.A.J.; Guzman, A.A.L.: “Mechanical Vibrations and Condition Monitoring”, Academic Press: Cambridge”, MA, USA, 2020.
- [34] Dzhudzhev, B.; Ivancheva, V.; Kachulkova, S.; Gospodinova, E.: “Vibration measurement with piezoelectric transducer”, In *Proceedings of the XLVIII International*

Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies ICEST 2013, Ohrid, North Macedonia, 26–29 June 2013.

- [35] Pedotti, L.A.D.S.; Zago, R.M.; Fruett, F.: “Fault diagnostics in rotary machines through spectral vibration analysis using low-cost MEMS devices”, *IEEE Instrum. Meas. Mag.* 2017, 20, 39–44.
- [36] Accelerometers, s interneta, <http://www.djbinstruments.com/information/technical-information-hu b/accelerometer-pros-and-cons/>, 2019
- [37] Manikandan, G.; Pannirselvam K.; Kenned, J.J; Suresh Kumar, C.: “Investigations on suitability of MEMS based accelerometer for vibration measurements. Mater”, *Today Proc.* 2021, 45, 6183–6192.
- [38] Varanis, M.; Silva, A.: “Mereles, A.; Pederiva, R. MEMS accelerometers for mechanical vibrations analysis: A comprehensive review with applications”, *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 2018, 40, 527
- [39] Rossi, A.; Bocchetta, G.; Botta, F.; Scorza, A.: “Accuracy Characterization of a MEMS Accelerometer for Vibration Monitoring in a Rotating Framework”, *Appl. Sci.* 2023, 13, 5070.
- [40] Tez, S.; Akin, T.: “Fabrication of a sandwich type three axis capacitive MEMS accelerometer”, In *Proceedings of the SENSORS 2013 IEEE*, Baltimore, MD, USA, 3–6 November 2013; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2013; pp. 1–4.
- [41] Hariharan, P., editor: “Basics of interferometry”, 2nd ed. Boston: Academic Press; 2007. 213 p
- [42] Udd, E., editor: “Fiber optic sensors: An introduction for engineers and scientists”, Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc.; 2006. 467 p
- [43] Berthold III, J.W.: “Industrial applications of fiber optic sensors. In *Fiber optic sensors: An introduction for engineers and scientists*”, Udd, E.; New Jersey USA: John Wiley & Sons, Inc.; 1991, 2006; pp. 409–437
- [44] Lopez-Higuera, J.M., editor: “Handbook of optical fiber sensing technology”, Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd.; 2002. 789 p.
- [45] Mihailov, S.J.: “Fiber Bragg grating sensors for harsh environments”, *Sensors*, 2012; 12: 1898–1918. DOI: 10.3390/s120201898
- [46] Blackburn, T.R.; Phung, B.T.; James, R.E.: “Optical fibre sensor for partial discharge detection and location in high-voltage power transformer”, In *Sixth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications* 1992; 33–36.
- [47] Kersey, A.D.; Davis, A.M.; Patrick, J.H.; LeBlanc, M.; Koo, K.P.; Askins, C.G.; et al.: “Fiber grating sensors”, *Journal of Lightwave Technology*. 1997; 15(8): 1442–1463.
- [48] Chin, K.K.; Sun, Y.; Feng, G.; Georgiou, G.E.; Guo, K.; Niver, E. et al.: “Fabry Perot diaphragm fiber-optic sensor”, *Applied Optics*. 2007; 46: 7614–7619.
- [49] Cibula, E.; Donlagic, D.: “Miniature fiber-optic pressure sensor with a polymer diaphragm”, *Applied Optics*. 2005; 44(10): 2736–2744.
- [50] Satoshi, A.; Tanaka, S.; Takahashi, N.: “High-sensitivity vibration sensing using in-fiber Fabry-Perot interferometer with fiber-Bragg-grating reflectors”, In *20th International Conference on Optical Fibre Sensors*, *Proc. of SPIE* 2009; 7503: 75033L:1–75033L:4.

- [51] Xie, Z.: “Two applications of the Fabry-Perot interferometric sensor”, Ph.D. Thesis, Texas A&M University: College Station, TX, USA, August 2006.
- [52] Dong, B.; Han, M.; Wang, A.: “Two-wavelength quadrature multipoint detection of partial discharge in power transformers using fiber Fabry-Perot acoustic sensors”, In *Fiber Optic Sensors and Applications IX*, Proc. of SPIE 2012; 8370: 83700K:1–83700K:11.
- [53] Harvey, D.; McBride, R.; Barton, J.S.; Jones, J.D.C.: “A velocimeter based on the fiber optic Sagnac interferometer”, *Measurement Science and Technology*. 1992; 3: 1077–1083.
- [54] Burns, W.K.; Chen, C.L; Moeller, R.P.: “Fiber-optic gyroscopes with broad-band sources”, *Journal of Lightwave Technology*. 1983; LT-1: 98–105.
- [55] Carolan, T.A.; Reuben, R.L.; Barton, J.S.; Jones, J.D.C.: “Fiber-optic Sagnac interferometer for noncontact structural monitoring in power plant applications”, *Applied Optics*. 1997; 36: 1504–385.
- [56] Wang, L.T.; Fang, N.; Huang, Z.M.: “A novel Sagnac-based fiber-optic acoustic sensor using two laser diodes with external optical injections”, In: Kennis Chen, editor. *Testing and Measurement: Techniques and Applications*; 16–17 Jan. 2015; Phuket Island, Thailand. London: CRC Press/Balkema; 2015. pp. 145–150.
- [57] Wang, L.T.; Fang, N.; Wu, C.; Qin, H.; Huang, Z. A.: “Fiber optic PD sensor using a balanced Sagnac interferometer and an EDFA-based DOP tunable fiber ring laser”, *Sensors*. 2014; 14(5): 8398–8422. DOI: 10.3390/s140508398
- [58] Bašić, P.: “Fiber-optic sensor cable for simultaneous distributed measurement of multiple physical quantities”, *Doktorski rad*, Zagreb, University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing, 2019.

## SAŽETAK

Mjerenje i praćenje vibracija na hidroelektranama je vrlo važno jer pruža ranu indikaciju predstojećeg kvara, a time se pravilnim održavanjem može spriječiti kvar i uništavanje. Monitoring sustavi su se tokom godina postojanja usavršavali. Imamo dva osnovna pristupa monitoringu vibracija na hidroelektranama, a to su online i offline monitoring vibracija. Krajnji je cilj uvođenje održavanja temeljenog na stanju agregata i izbjegavanje svih remonata koji nisu nužni.

Optička interferometrija se temelji na valnoj prirodi svjetlosti i interferenciji svjetlosnih snopova (dva ili više snopova), lansiranih iz istog izvora svjetlosti, (laserskog izvora ili drugog monokromatskog izvora), koji se širi kroz prostor ili dielektrične medije kao što su svjetlovodi s različitim optičkim putevima te istovremeno stižu do točke u prostoru ili na površinu objekta.

Poglavlje 2 ovog rada obrađuje vibracije koje se javljaju na pojedinim dijelovima u hidroelektranama. Dat je uvid u problematiku koje vibracije predstavljaju u hidroelektranama. Opisane su pojave vibracija na rotirajućoj i nerotirajućoj opremi.

Poglavlje 3 odnosi se na razvoj monitoring sustava u hidroelektranama. Opisane su razvojne faze monitoring sustava. Predstavljena su dva osnovna pristupa monitoringu vibracija na hidroelektranama, online i offline monitoring vibracija

Poglavlje 4 opisuje klasične vrste senzora koji se primjenjuju u sustavu monitoringa na hidroelektranama. Prikazane su prednosti i mane pojedinih senzora.

Poglavlje 5 sadrži opis optičke i svjetlovodne interferometrije, gdje se detaljno opisuje optička interferometrija i glavni tipovi optičkih interferometara, dostupni iz literature. Detaljno su opisana četiri dominantna tipa optičkih interferometara, koji se razlikuju prema svojoj arhitekturi. To su Mach-Zehnder, Michelson, Sagnac i Fabry-Perot interferometri.

Poglavlje 6 prikazuje razvoj svjetlovodnog senzora na bazi svjetlovodne interferometrije za mjerenje vibracija na hidrogeneratoru koji se odvija kroz poslijediplomski doktorski studij. Prikazana je prva faza razvoja svjetlovodnog senzora koji je napravljen na principu Mach-Zehnder svjetlovodnog interferometra. Radi potvrde predloženog senzora u laboratoriju na Fakultetu Elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje (FESB) u Splitu, provedena su opsežna ispitivanja, kao i na HE Đale.