

# Mjerenje vibracija

---

**Vuković, Filip**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:164:944106>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-24**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository - Faculty of Maritime Studies - Split -  
Repository - Faculty of Maritime Studies Split for  
permanent storage and preservation of digital  
resources of the institution](#)



**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

**FILIP VUKOVIĆ**

**MJERENJE VIBRACIJA**

**ZAVRŠNI RAD**

**SPLIT, 2023.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

**STUDIJ: BRODOSTROJARSTVO**

**MJERENJE VIBRACIJA**

**ZAVRŠNI RAD**

**MENTOR:**

**izv. prof. dr. sc. Tina Perić**

**STUDENT:**

**Filip Vuković**  
**(MB:0171272354)**

**KOMENTOR:**

**dr. sc. Marko Katalinić**

**SPLIT, 2024.**

## SAŽETAK

Tema ovog rada je mjerenje vibracija koje je važno za sigurnost svih brodova, putnika i posade. Opisano je kako nastaju vibracije, na koji način se mjere, te su navedeni uređaji za mjerenje istih. Rad detaljno analizira osnove vibracija, uključujući definicije, vrste i uzroke. Nadalje, obrađuju se različite metode mjerenja vibracija, vrste senzora, analiza i obrada podataka. Cilj ovog rada je pobliže opisati i objasniti kada i zbog čega nastaju vibracije na brodovima, te analizirati karakteristike i parametre nastalih vibracija pomoću senzora. Na temelju prikupljenih informacija zaključeno je da vibracije imaju štetan utjecaj na brod i posadu.

**Ključne riječi:** *mjerenje vibracija, senzori, uzroci vibracija, parametri vibracija*

## ABSTRACT

The topic of this work is vibration measurement, which is important for the safety of all ships, passengers and crew. It is described how vibrations are created, how they are measured, and the devices for measuring them are listed. The paper analyzes the basics of vibrations in detail, including definitions, types and causes. Furthermore, different vibration measurement methods, sensor types, data analysis and processing are covered. The aim of this paper is to describe and explain in detail when and why vibrations occur on ships, and to analyze the characteristics and parameters of the resulting vibrations using sensors. Based on the collected information it was concluded that the vibrations have a harmful effect on the ship and the crew.

**Keywords:** *vibration measurement, sensors, causes of vibration, vibration parameters*

# SADRŽAJ

<b>SADRŽAJ</b> .....	<b>4</b>
<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. VIBRACIJE</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1. VIBRACIJE NA BRODOVIMA</b> .....	<b>2</b>
<b>2.2. VIBRACIJE STROJEVA</b> .....	<b>7</b>
2.2.1. Torzijske vibracije .....	7
2.2.2. Aksijalne ili uzdužne vibracije .....	8
2.2.3. Poprečne vibracije .....	10
<b>2.3. OSNOVNE VELIČINE VIBRACIJA</b> .....	<b>11</b>
<b>2.4. SLOBODNE VIBRACIJE</b> .....	<b>12</b>
2.4.1. Slobodne vibracije bez prigušenja .....	12
2.4.2. Slobodne vibracije s prigušenjem .....	13
<b>2.5. PRISILNE VIBRACIJE</b> .....	<b>14</b>
<b>2.6. PARAMETRI VIBRACIJA</b> .....	<b>15</b>
2.6.1. MASA .....	15
2.6.2. KRUTOST .....	16
2.6.3. PRIGUŠENJE .....	16
2.6.4. PERIODIČKA UZBUDNA SILA .....	17
<b>2.7. UZBUDE NA POGONSKIM SUSTAVIMA</b> .....	<b>18</b>
<b>2.8. AMPLITUDA VIBRACIJE</b> .....	<b>19</b>
<b>3. SENZORI ZA MJERENJE VIBRACIJA</b> .....	<b>21</b>
<b>3.1. ELEKTROMEHANIČKI SENZORI</b> .....	<b>21</b>
<b>3.2. SENZORI POMAKA NA BAZI VRTLOŽNIH STRUJA</b> .....	<b>22</b>
<b>3.3. TENZOMETRI</b> .....	<b>22</b>
<b>3.4. AKCELEROMETRI</b> .....	<b>24</b>
3.4.1. Piezoelektrični akcelerometri .....	24
3.4.2. Piezootporni akcelerometri .....	25
<b>3.5. SERVOAKCELEROMETRI</b> .....	<b>26</b>
<b>OSTALI SENZORI ZA MJERENJE VIBRACIJA</b> .....	<b>27</b>
<b>3.6.</b> 27	
<b>4. ANALIZA I OBRADA SIGNALA VIBRACIJA</b> .....	<b>30</b>

<b>4.1. KONTROLA VIBRACIJA .....</b>	<b>30</b>
<b>4.2. UREĐAJ ZA MJERENJE VIBRACIJA .....</b>	<b>32</b>
<b>4.3. UREĐAJ ZA BEŽIČNI PRIJENOS PODATAKA .....</b>	<b>33</b>
<b>5. POSLJEDICE VIBRACIJA .....</b>	<b>35</b>
<b>6. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>37</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>38</b>
<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>39</b>

# 1. UVOD

U ovom radu obrađen je problem vibracija na brodu, različiti izvori vibracija i načini na koje se uklanjaju, ili barem djelomično prigušuju. Razni su uzroci nastanka vibracija na brodovima, uključujući pogonske sustave, rad strojeva i vanjske čimbenike kao što su valovi i struje. Razvoj učinkovitih metoda mjerenja i kontrole vibracija zahtijeva detaljnu analizu parametara. Važno je za naglasiti da ublažavanje ili potencijalno uklanjanje vibracija nije bitno samo za strukturu i sigurnost plovila, već i za dobrobit posade i dulji vijek trajanja opreme na brodu.

U uvodnom dijelu rada govori se o samom pojmu vibracija, te o osnovnim podjelama prema sustavima, načinima vibracija itd.

Drugo i treće poglavlje opisuje vibracije na brodovima, nastoji se rasvijetliti različite čimbenike koji doprinose nastanku vibracija od pogonskih sustava, strojeva i uvjeta okoline do konstrukcijskih dijelova broda i operativne prakse. Govori se o parametrima vibracija, opisuju se četiri najvažnija parametra: masa, krutost, prigušenje i uzbudna sila. Nadalje, navode se neki od senzora za mjerenje vibracija, opisuje se njihova primjena u praksi, način rada, te se analiziraju pojedini senzori po područjima upotrebe.

U idućim poglavljima navedeni su načini analize i obrade signala vibracija koji su neophodni za proces kontrole i prigušenja samih vibracija. Također, spomenute su najvažnije vrste uređaja za prikupljanje i obradu podataka.

U završnom dijelu rada obrazložene su posljedice koje vibracije ostavljaju na cjelokupnom brodomskom sustavu.

## 2. VIBRACIJE

Vibracije predstavljaju oscilacijsko kretanje nastalo dovođenjem oscilacijske ili promjenjive sile na elastično tijelo. Riječ dolazi od latinskog *vibratio* što znači drhtanje ili treperenje. Glavna razlika između vibracija i titranja je relativno mali otklon od ravnotežnog položaja kod vibracija u odnosu na titranje [1].

Za razliku od vibracija, oscilacije su općenito periodično gibanje bilo koje amplitude. Proučavanje mehaničkih vibracija je od velike važnosti u svim područjima tehnike gdje se periodično gibanje tijela ili njihovih dijelova odvija s malim amplitudama [1].

Mehaničke vibracije odnose se na oscilacije mehaničkih sustava oko njihovih ravnotežnih položaja. Ovakve se vibracije mogu pojaviti u različitim strukturama i stanjima, u rasponu od jednostavnih sustava poput mase-opruge-prigušivača do složenih strojeva i zgrada. Razumijevanje i analiza mehaničkih vibracija ključni su u raznim područjima inženjerstva [2].

### 2.1. VIBRACIJE NA BRODOVIMA

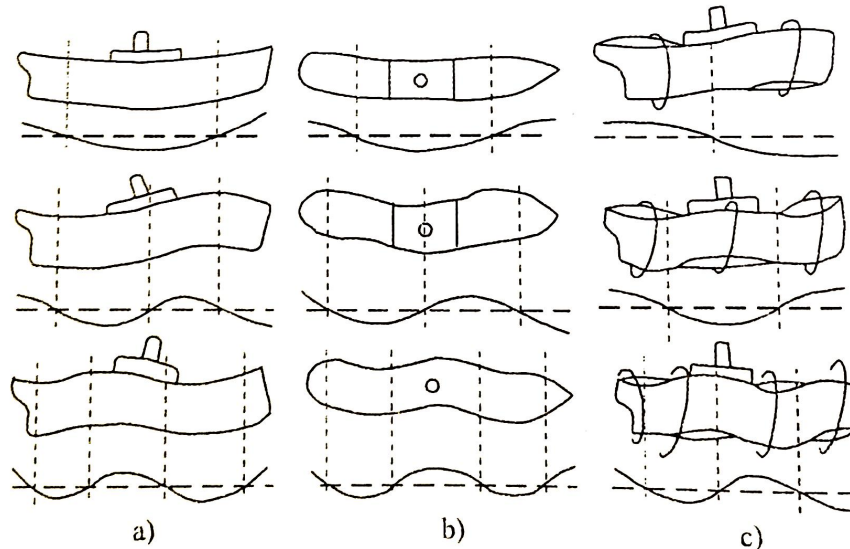
Sam brod predstavlja elastično tijelo koje može vibrirati ako se djelovanjem vanjske sile naruši njegova ravnoteža. U brodu kao složenom objektu upravljanja obavljaju različiti brodski procesi koji predstavljaju izvore raznih oblika vibracija. Kao nosač promjenjivog presjeka, brodski trup može vibrirati na mnogo načina [1].

Iako vibracije mogu u nekim slučajevima imati pozitivan efekt, najčešće se očituju kao nepoželjna pojava jer mogu biti neugodne za konstrukciju broda i za same putnike. Gledajući brod kao primjer, sve vibracije motora ili vibracije bilo kojeg od pomoćnih brodskih uređaja u radu nisu poželjne. Upravo na brodu, vibracije nastaju kao posljedica neuravnoteženih sila glavnog i pomoćnih motora, ali i vrtnjom brodskog vijka u nepravilnim uvjetima. Također, osovinski vod koji nije ispravno centriran može biti jedan od izvora brodskih vibracija. Brodske se vibracije, zbog velikog broja izvora, mogu podijeliti na globalne vibracije brodskog trupa (torzijske vibracije te fleksijske horizontalne



i vertikalne), vibracije strukturnih elemenata (panela, greda i sl.), te vibracije nadgrađa, paluba, glavnih motora osovinskog voda i slično [1].

Na slici ispod prikazani su neki od glavnih oblika vibracija broskog trupa:



**Slika 1. Glavni oblici vibriranja broskog trupa [1]**

**a) vertikalne vibracije b) horizontalne vibracije c) torzijske vibracije**

Mehaničke vibracije unutar broda podrazumijevaju oscilacijska kretanja krutih tijela u odnosu na njihov ravnotežni položaj. Uzročnik kretanja je prisilna sila koja po svojoj prirodi može biti predvidiva ili slučajna (nepredvidiva).

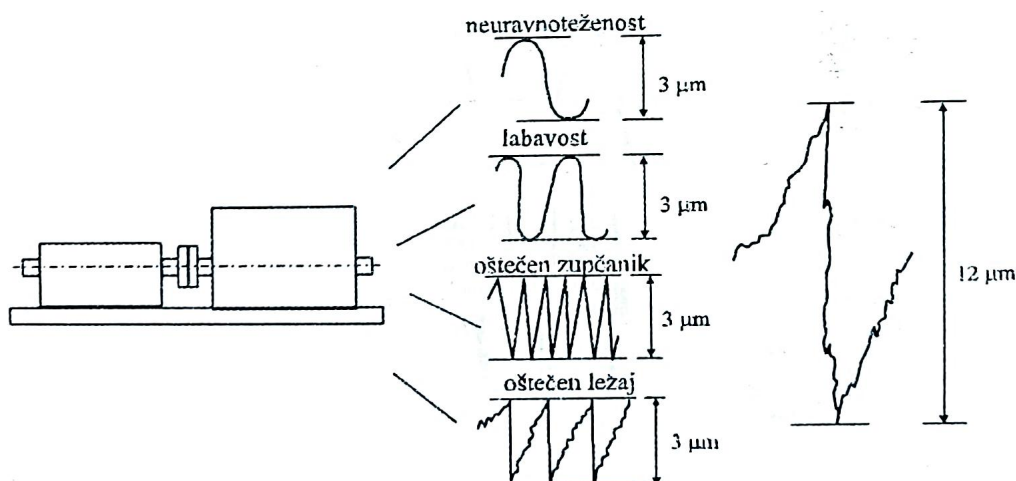
Uzročnici prekomjernih vibracija su mnogobrojni i različiti. Među najčešćim uzročnicima na motornim pogonima su: neuravnoteženost masa motora i strojeva, poremećaj centričnosti, ekscentričnost položaja, neispravan kotrljajući ležaj, pojava trenja, pojava rezonancije i dr. Vibracije na plovilima mogu utjecati i na strukturu broda i na udobnost putnika i posade. Ispravne reakcije i radnje potrebne za ublažavanje i sprečavanje vibracija ključne su za sigurnost i učinkovitost plovila [1].

Neki od uobičajenih izvora vibracija na brodovima su:

- vibracije motora i propelera
- kavitacija propelera
- uvjeti na moru
- ukrcaj/iskrcaj tereta

- pomoćni strojevi i uređaji.

Dijagnosticiranje uzročnika, odnosno dijagnosticiranje osnovnog uzročnika je obično složen problem jer se vibracije slažu jedna na drugu. Na slici 2. prikazan je primjer generiranja složene vibracije nastale na sustavu motor – reduktor. Radi pojednostavljenja prikazan je slučaj u kojem pojedinačne vibracije imaju jednake amplitude, a različite frekvencije [1].

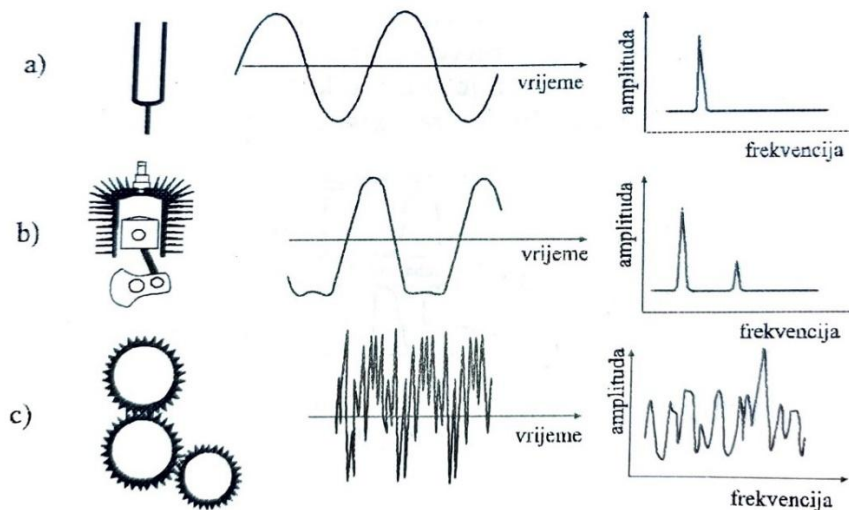


**Slika 2. Generiranje složenih vibracija [1]**

Za vibracije brodske konstrukcije zaslužni su unutarnji uzročnici kao što su brodski vijak, te glavni i pomoćni strojevi, kao i vanjski uzročnici koji uzrokuju prolazne vibracije. Unutarnji uzročnici izazivaju periodične uzbudne sile pa se za proračun vibracija provodi harmonijska analiza [1].

Vibracije u velikoj mjeri utječu na sigurnost ljudi i tereta na brodovima. One pospješuju zamor materijala brodske konstrukcije i opreme kao i pojavu korozije, smanjujući na taj način vijek trajanja broda. Istraživanja su pokazala da djelovanje vibracija na čovječji organizam zavisi kako od amplitude tako i od frekvencije. Tako vibracije sa amplitudom od 100 μm i frekvencijom 5 Hz djeluju neprijatno, da bi vibracije s istom amplitudom i frekvencijom 20 Hz izazvale mučninu [1].

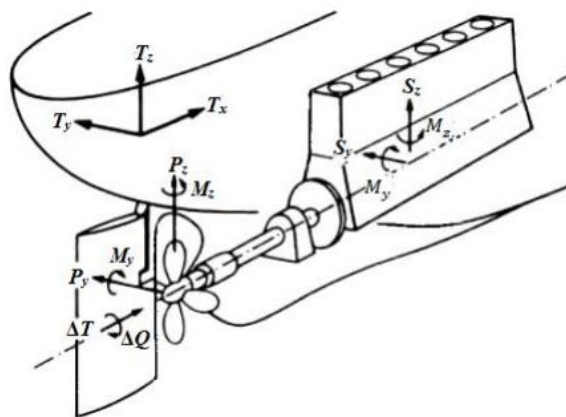
Na slici 3. prikazani su signali vibracija u odnosu vremena i frekvencije, vidljiva su tri slučaja gdje se pojavljuju signali.



**Slika 3. Prikaz signala vibracija u domeni vremena i frekvencije [1]**

**a) zvučna viljuška b) cilindar motora b) sustav zupčanika**

Na krilu brodskog vijka i na oplati trupa iznad brodskog vijka mogu nastati promjenjive sile uslijed rada brodskog vijka u nejednakom strujanju, kao što je prikazano na slici 4.



**Slika 4. Uzbudne sile stroja i brodskog vijka na vratilu i oplati trupa [4]**

U nejednakom strujanju kao što je prikazano na slici 4. gdje su označene sile stroja (momenti, sile vijka, te ostale sile i momenti) nastaju promjenjive sile, prilikom rada stroja dolazi do velikih okretaja gdje se ostvaruju poprilično velike sile koje pridonose pojavama vibracija.

Po cijeloj brodskoj konstrukciji širi se energija svih sila od svog izvora. Odziv konstrukcije može biti lokalnog ili globalnog karaktera, a to ovisi o položaju, frekvenciji i

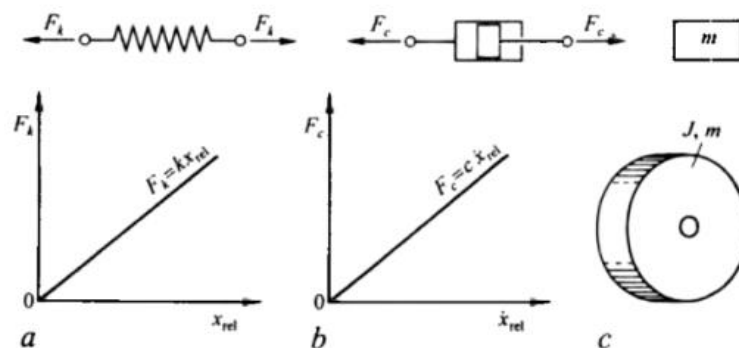
intenzitetu uzbude, te raspodjeli krutosti i masa broda. Zbog toga postoji podjela na lokalne vibracije okvirnih rebara ili panela ili sličnih elemenata, globalne vibracije broskog trupa i vibracije podkonstrukcija (npr. nadgrađe, dvodno, porivni stroj i sl.) [2].

Brodski trup je zbog svoje izrade, odnosno svojstva elastičnosti sklon pojavi vibracija. Kod proračuna slobodnih vibracija i prisilnih vibracija, trup broda se može opisati kao slobodni dio sa promjenjivim poprečnim presjekom i neravnomjerno raspoređenom masom po cijeloj duljini [2].

Kod brodskih vibracija razlikuju se slobodne i prisilne vibracije broskog trupa, koje mogu biti uzdužne, horizontalne, vertikalne ili torzijske. Budući da brodski trup ima veliku krutost na rastezanje, visoka frekvencija uzdužnih vibracija sprječava pojavu rezonancije. Navedene vibracije su u pravilu međusobno povezane, pa su tako primjerice uzdužne vibracije povezane s vertikalnim, a horizontalne vibracije s torzijskim.

Dok slobodne vibracije nastaju kad vibracijski sustav izađe iz ravnotežnog stanja, prisilne vibracije nastaju djelovanjem uzbudne sile  $F(t)$ , koja je funkcija vremena i trajno dovodi energiju u sustav. Tijekom slobodnog vibriranja mehaničkog sustava potencijalna energija će prijeći u kinetičku i obrnuto. Pri tome jedan dio energije nestaje i postupno se smanjuje amplituda sve dok se vibracije nakon nekog vremena skroz ne neutraliziraju. Svaki vibracijski sustav se sastoji od povratnih, prigušnih i tromih elemenata [2].

Na slici 5. prikazani su osnovni elementi vibracijskih modela: a) elastični, b) prigušni i c) inercijski model [2].



Slika 5. Osnovni elementi vibracijskih modela [2]

## 2.2. Vibracije strojeva

Vibracije brodskih strojeva su složena pojava zbog veličine samih strojeva te okoline u kojoj rade, mogu imati različite uzroke i posljedice. Svaki stroj čiji se dijelovi kreću određenom frekvencijom izazivaju vibracije, npr. glavni motori, pogonske osovine, mjenjači, propeleri, pumpe, dizel generatori [5].

Vibracije strojeva se mogu kategorizirati u tri vrste, ovisno o prirodi vibracija [5]:

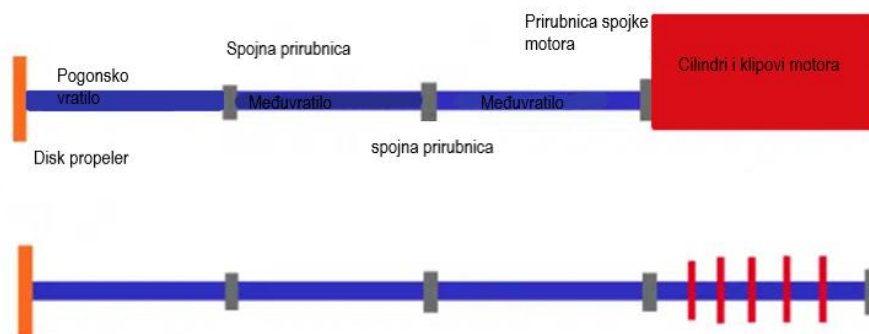
- torzijske vibracije
- aksijalne ili uzdužne vibracije
- poprečne vibracije.

### 2.2.1. Torzijske vibracije

Ove vibracije odnose se na vrtnju oko osi, što može biti uzrokovano neravnotežom ili nedostatkom stabilnosti u dijelovima poput vratila motora.

Glavni porivni sustav broda sastoji se od glavnog stroja koji je pomoću osovine (vratila) povezan s propelerom. Obično se brodsko vratilo sastoji od međuvratila i propelerskog vratila, koji su povezani prirubnicama [2].

Prisutnost spojeva, poput spojnih prirubnica, odzivnog ležaja, priključne prirubnice motora i sustava cilindar-klip u glavnom dizelskom motoru stvara torziju u sustavu rotirajuće osovine. Drugim riječima, rotacijsko gibanje dizel motora stvara pobudu. Dakle, cijeli pogonski sustav može se pojednostaviti, za analizu vibracija u serijsku kombinaciju osovina i diskova, kao što je prikazano na slici 6 [2].



Slika 6. Glavni pogonski sustav kao kombinacija osovina i diskova (prema [2])

Gornji sustav osovina i diskova koristi se za izračun prirodne torzijske frekvencije porivnog sustava. Vod vratila prilagođava se glavnom motoru, analizira se pojava rezonancije koja u većini slučajeva postoji pa se određeno područje proglašava „kritičnim brojem okretaja“. Drugim riječima, pristup se može razumno generalizirati navodeći da pobude treba minimizirati kako bi se spriječila rezonancija.

Prema rasponu brzina pri kojem dolazi do torzijske rezonancije postavlja se ograničeni raspon brzina, tako da se taj raspon brzina izbjegava tijekom plovidbe. Ako se to ne učini, to bi rezultiralo torzijskim kvarom osovine [2].

### **2.2.2. Aksijalne ili uzdužne vibracije**

Jedan od najzanimljivijih slučajeva vibracija strojeva, a možda i onaj koji najvjerojatnije uzrokuje prisilne vibracije, je aksijalna vibracija pogonskog sustava.

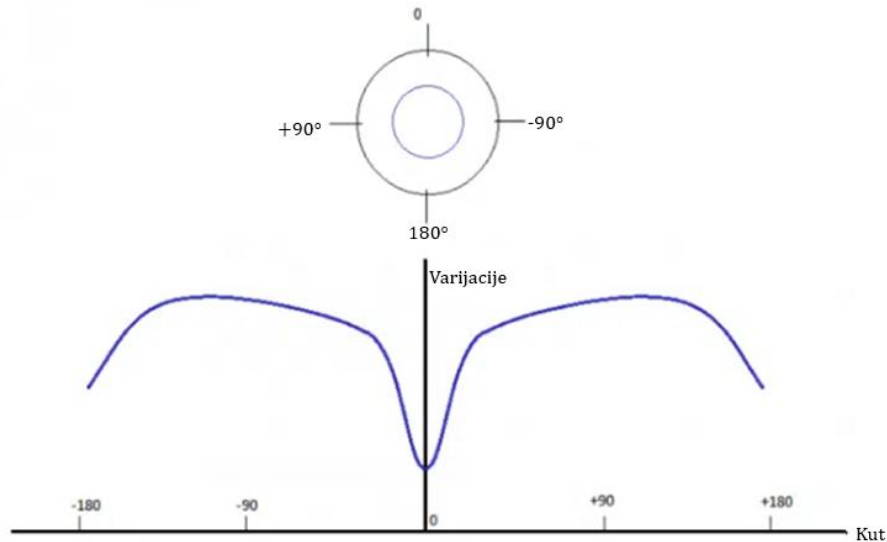
Aksijalne vibracije na brodu odnose se na oscilacije ili vibracije koje se događaju duž osi broda ili komponenti unutar brodskog sustava. Ove vibracije mogu imati različite uzroke i posljedice te se mogu javiti u različitim dijelovima broda ili sustavima na brodu [3].

U nastavku je navedeno nekoliko čimbenika koji mogu znatno utjecati na pojavu aksijalnih vibracija:

- nepravilnosti u vratilu motora ili propelera
- loše postavljeni ležajevi
- nepravilan rad motora
- nedostatak ravnoteže propelera
- hidrodinamički faktori.

Potisak koji generira propeler ovisi o brzini vode koja pada na krilo propelera naziva se polje sustrujanja. Zbog zakrivljenosti trupa na krmi, polje sustrujanja na propeleru nije ujednačen. To jest, polje sustrujanja na vrhu diska propelera razlikuje se od polja strujanja na dnu diska [3].

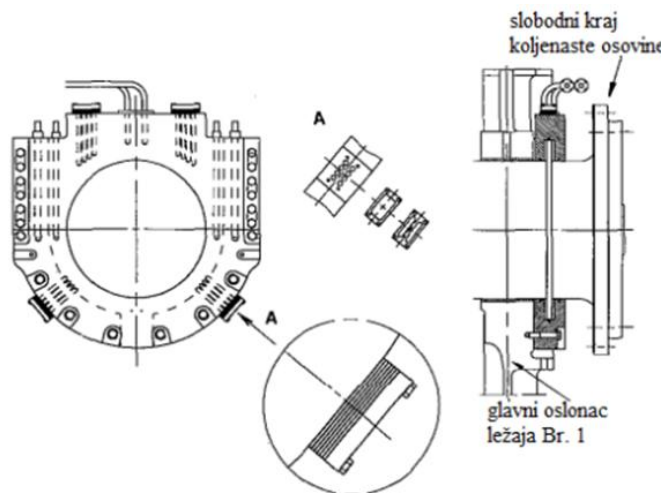
Slika 7. prikazuje varijaciju polja sustrujanja pod različitim kutovima oko diska propelera. Ovaj dijagram odnosi se samo na određenu udaljenost od središta diska propelera (prikazan plavom bojom). Stoga treba dobro razumjeti da će polje sustrujanja za svaku udaljenost od središta propelera imati različite karakteristike. [2]



**Slika 7. Varijanta traga na propeleru [2]**

Kako bi se izbjegla rezonancija, projektant mora osigurati da prvih nekoliko vlastitih frekvencija aksijalne vibracije glavnog pogonskog sustava budu najmanje 5 % udaljene od frekvencije pobude propelera.

Rješavanje problema s aksijalnim vibracijama obično uključuje pažljivo održavanje, redovito praćenje stanja opreme, uravnoteženje i kalibraciju te popravak ili zamjenu oštećenih dijelova. Ponekad je potrebno i hidrodinamičko prilagođavanje trupa ili propelera kako bi se smanjile vibracije. Slika 8. prikazuje shemu neutralizatora aksijalnih vibracija [3].

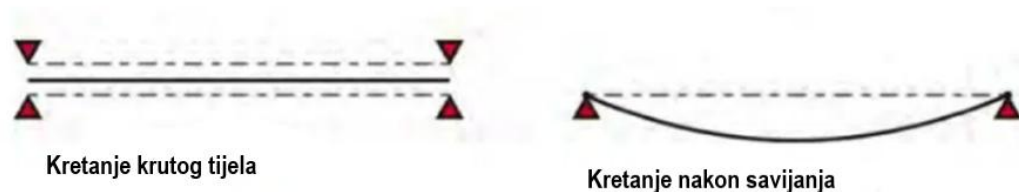


Slika 8. Neutralizator aksijalnih vibracija [3]

### 2.2.3. Poprečne vibracije

Poprečne vibracije na brodu odnose se na oscilacije ili vibracije koje se javljaju bočno ili poprečno u odnosu na os broda. Ove vibracije mogu proizaći iz različitih izvora i sustava unutar broda.

Zbog savijanja osovina, težište osovine se ne poklapa s idealnom središnjom crtom osovine, stoga kada se osovina okreće, centrifugalna sila na težištu bi uzrokovala da se pomakne dalje od idealne središnje linije, što rezultira vibracijskim gibanjem koje se naziva vrtloženje osovina. Broj ležajeva vratila i razmak između njih je odlučujući čimbenik u pojavi ovog načina vibracija, tijekom faze projektiranja. Na slici 9. prikazan je odnos između savijanja i kretanja osovine [2].



Slika 9. Učinak savijanja na kretanje osovine [2]

Projektant mora paziti da se vlastita frekvencija poprečnog načina vibriranja vratila ne poklapa s vlastitom frekvencijom motora. U takvom slučaju, rezonancija bi rezultirala u ekstremnom slučaju vrtloženja, što bi dovelo do pucanja osovine i uzrokovalo oštećenja ili nezgode.



Također, kada se motor broda pokrene i njegova brzina postupno raste, dolazi do trenutka kada se na nekoliko trenutaka osjećaju maksimalne vibracije na brodu. To je zato što, tijekom ubrzavanja, dolazi do točke u kojoj se broj okretaja motora poklapa s prirodnom vrtložnom frekvencijom osovine [2].

### 2.3. OSNOVNE VELIČINE VIBRACIJA

Prema definiciji, vibracija je promjenjivo kretanje koje se svake periode ponavlja, to su kompleksna kretanja koja se mogu rastaviti na skup osnovnih harmonijskih kretanja.

Osnovno harmonijsko kretanje se može predstaviti sinusnom funkcijom:

$$x = X_m \sin \omega t \quad (1)$$

gdje su:

$x$  – trenutna vrijednost pomaka,

$X_m$  – amplituda,

$t$  – vrijeme i

$\omega$  – kružna frekvencija.

Prvim diferenciranjem dobivamo brzinu:

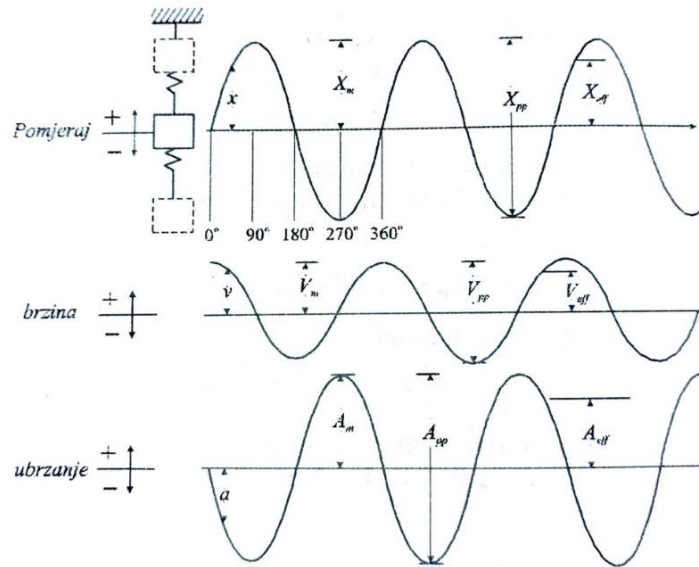
$$v = X_m \omega \cos \omega t = V_m \cos \omega t \quad (2)$$

a drugim diferenciranjem ubrzanje:

$$a = -X_m \omega^2 \sin \omega t = A \sin \omega t \quad (3)$$

Bitno je napomenuti da unaprijed navedenim relacijama nije istaknuta faza koja može biti izuzetno važna kod uspoređivanja dvije ili više kretnji i kod balansiranja. Iz relacija se vidi da i kod malih vrijednosti pomaka, ubrzanje na visokim frekvencijama može poprimiti velike vrijednosti, što ima za posljedicu pojavu velike inercijske sile koja u sustavima podmazivanja može uzrokovati prekid podmazivanja [1].

Veza između kinetičkih veličina kretanja je prikazana na slici 10. Sustav slobodno oscilira jer je bez prigušenja i prinudne sile.



Slika 10. Fazni odnos između pomaka, brzine i ubrzanja oscilacijskog kretanja [1]

## 2.4. SLOBODNE VIBRACIJE

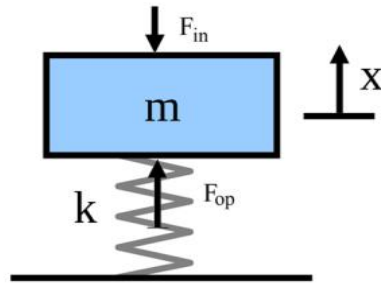
Slobodne vibracije nastaju prilikom deformiranja elastičnog tijela od strane vanjskih sila te nakon prestanka djelovanja elastične sile vraćaju tijelo u prvobitno stanje. Deformacije se javljaju kao posljedica ubrzanja mase tijela. Takav primjer vibracija se naziva slobodnim, jer se odvija samo pod djelovanjem vlastitih sila sustava, tj. elastičnih, inercijskih i prigušnih sila. Sile prigušenja postepeno smanjuju amplitudu vibriranja dok se sustav ne zaustavi u svom ravnotežnom položaju.

Prema tome, slobodne vibracije nastaju ako dođe do otklona mase  $m$  od njenog ravnotežnog položaja. U istom trenutku će ta masa početi slobodno vibrirati oko početnog položaja s konstantnom frekvencijom tj. prirodnom frekvencijom sustava vibracija  $f_n$ . Prirodna frekvencija  $f_n$  ovisi samo o karakteristikama sustava kao što su masa  $m$ , krutost  $k$  i prigušenje  $c$ . Prirodne frekvencije se obično izračunavaju tako da se prigušenje sustava  $c$  zanemari, zbog toga što je njegov utjecaj na te frekvencije uglavnom zanemariv [4].

### 2.4.1. Slobodne vibracije bez prigušenja

Na slici 11. prikazan je model vibriranja masa – opruga – prigušivač za slobodne vibracije bez prigušenja. Kao što je već navedeno, prigušenje je zanemarivo te u ovom slučaju na masu ne djeluje određena vanjska sila. Sila kojom masa djeluje na oprugu

proporcionalna je količini kojom je opruga rastegnuta (pod pretpostavkom da je opruga već pritisnuta zbog mase).



**Slika 11. Model slobodnih vibracija bez prigušenja [4]**

Krutost opruge predstavljena je koeficijentom krutosti  $k$  i ima jedinice sile/udaljenosti (npr. Lbf/in ili N/m). Negativni znak ukazuje da se sila uvijek suprotstavlja gibanju mase što je prikazano u formuli:

$$F = -kx \quad (4)$$

Na masu djeluje sila opruge  $F_{op}$  i inercijalna sila  $F_{in}$ :

$$F_{op} + F_{in} = 0 \quad (5)$$

#### 2.4.2. Slobodne vibracije s prigušenjem

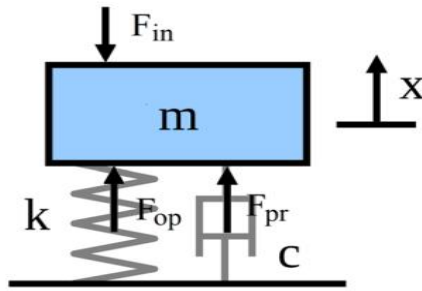
Na sljedećoj slici prikazan je model za analizu vibriranja masa – opruga – prigušivač slobodnih vibracija s prigušenjem. Kada se modelu slobodnih vibracija bez prigušenja doda prigušivač, tada model proizvodi silu koja je proporcionalna brzini mase. Konstanta proporcionalnosti  $c$  predstavlja koeficijent prigušivanja i ima jedinice sile nad brzinom (lbf · s/in ili N · s/m) [4].

Jednadžba dinamičke ravnoteže:

$$-F_{op} - F_{pr} = F_{in} \quad (6)$$

slijedi:

$$F_{op} + F_{in} + F_{pr} = 0 \quad (7)$$



Slika 12. Model za analizu slobodnih vibracija s prigušenjem [4]

## 2.5. PRISILNE VIBRACIJE

Prisilne vibracije pojavljuju se prilikom djelovanja uzbudne sile  $F(t)$ , koja je definirana kao funkcija vremena i koja omogućuje trajno dovođenje energije u sustav.

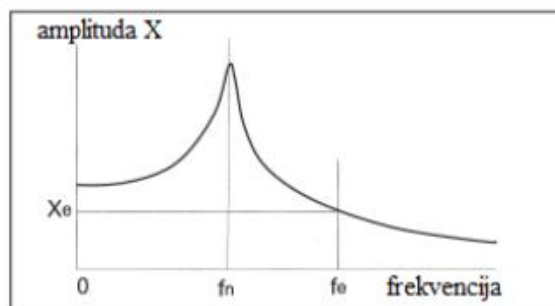
Periodička uzbudna sila  $T$  se može predočiti *Fourierovim* redom, gdje je  $T_v$  uzbudna sila reda  $v$ ,  $\omega$  je kružna frekvencija,  $t$  je oznaka za vrijeme i  $\Psi_v =$  fazni kut reda  $v$  pri uzbuđi:

$$T = \sum_v T_v \sin(v\omega t + \psi_v) \quad (8)$$

Odziv  $X(t)$  prigušenog sustava na periodičku uzbudnu silu  $T(t)$  je prikazan sljedećom formulom, gdje je  $X_v$  amplituda reda  $v$ , a  $\Psi_v =$  fazni kut reda  $v$ :

$$X(t) = \sum_v x_v \sin(v\omega t + \Psi_v) \quad (9)$$

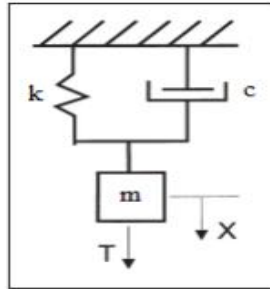
Na slici 13. prikazan je dijagram u odnosu amplitude i frekvencije koji objašnjava odziv  $X$  s obzirom na vibracijski sustav gdje  $f_n$  označava prirodnu frekvenciju, a  $f_e$  frekvenciju uzbuđe [4].



Slika 13. Odziv  $X$  s obzirom na vibracijski sustav koji je podređen periodičkoj uzbudnoj sili  $T$  [4]

## 2.6. PARAMETRI VIBRACIJA

Postoje četiri ključna parametra koji su povezani s vibracijama brodskih konstrukcija, a to su: masa  $m$ , krutost brodske konstrukcije  $k$ , prigušenje  $c$  i periodička uzbudna sila  $T$ , kako je prikazano na slici 14. [3].



Slika 14. Shema vibracijskog sustava [3]

### 2.6.1. MASA

Masa broda sastoji se od tereta i mase praznog broda ( engl. *light ship mass*) (mase struktura, uređaja i opreme, masa krutog balasta, te masa tekućina u brodskim sustavima). Oprema je pričvršćena za brodsku konstrukciju, a zalihe se obično nalaze uskladištene u manjim prostorima. Zbog toga se tijekom analize cjelokupnih vibracija broda može uzeti puni iznos za efektivnu vrijednost lake težine i prenijeti na model, dok je tijekom analize lokalnih vibracija efektivnu masu lake težine broda potrebno smanjiti. Teret je smješten u skladišnim prostorima broda ili se čak nalazi u specijalnim tankovima ovisno o vrsti i namjeni tereta. Efektivna masa tereta ovisi o vrsti tereta, odnosno o tome je li teret tekući, rasuti ili kruti. Bitno je spomenuti i pojam „dodane mase“ koji označava masu vode koja se giba s brodom dok oscilira (na valovima). Ona uzrokuje dodatnu inercijsku komponentu koja je proporcionalna s ubrzanjem. Dakle, laički rečeno dodana masa ima bitan utjecaj na odziv zbog svojih sila koje se kreću suprotno kretanjama broda.

Pri proračunu vibracija se umjesto stvarne mase gleda efektivna vrijednost mase jer se u proračunu koriste modeli brodske konstrukcije te se inercijske sile masa prenose iz stvarnog prostora na model, a pri tome se pokušava zadržati isti dinamički efekt [11].

### **2.6.2. KRUTOST**

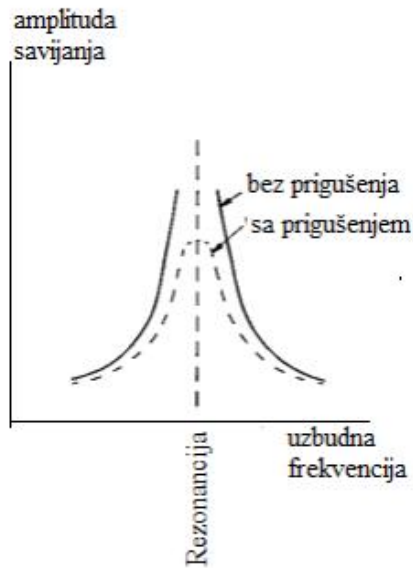
Krutost je mjera otpora materijala na deformaciju, odnosno sposobnost materijala da se vrati u svoj početni oblik nakon primjene sile. U kontekstu brodova, krutost se odnosi na krutost trupa, struktura i sustava na brodu. Kada se govori o vibracijama na brodu, krutost ima utjecaj na dinamiku sustava. Postoje različite vrste oscilacija koje bitno utječu na stabilitet broda, uključujući valjanje, ljuljanje, i pomicanje naprijed-natrag. Ovisno o parametrima krutosti, frekvenciji i amplitudi sustava, može doći do rezonancije ili drugih oblika neželjenih vibracija [11].

### **2.6.3. PRIGUŠENJE**

Jedan od četiri bitna parametra tijekom analize vibracija je prigušenje. Ono nastaje zbog gubitaka energije tijekom vibriranja konstrukcije. Mjerenjem prisilnih vibracija u rezonanciji ili slobodnih vibracija nakon prestanka djelovanja uzbuđene pokušava se definirati prigušenje.

Postoji nekoliko vrsta prigušenja, ako se uzme u obzir vrsta i čimbenici okoline. Apsolutno pomicanje broda u tekućini može prouzrokovati primjerice vanjsko prigušenje, a unutarnje prigušenje je uzrokovano gubitkom energije vibriranja unutar broda u trenutku deformacije brodske konstrukcije. Vanjsko prigušenje je određeno kao hidrodinamičko, a unutarnje se dijeli na strukturnu komponentu i komponentu tereta [11].

Na slici 15. prikazana je krivulja savijanja sa i bez prigušenja. Vidljivo je kako vrijednost savijanja ovisi o magnitudi prigušenja i uzbuđene kao i o uzbuđenoj frekvenciji koja je povezana s prirodnom frekvencijom [11].

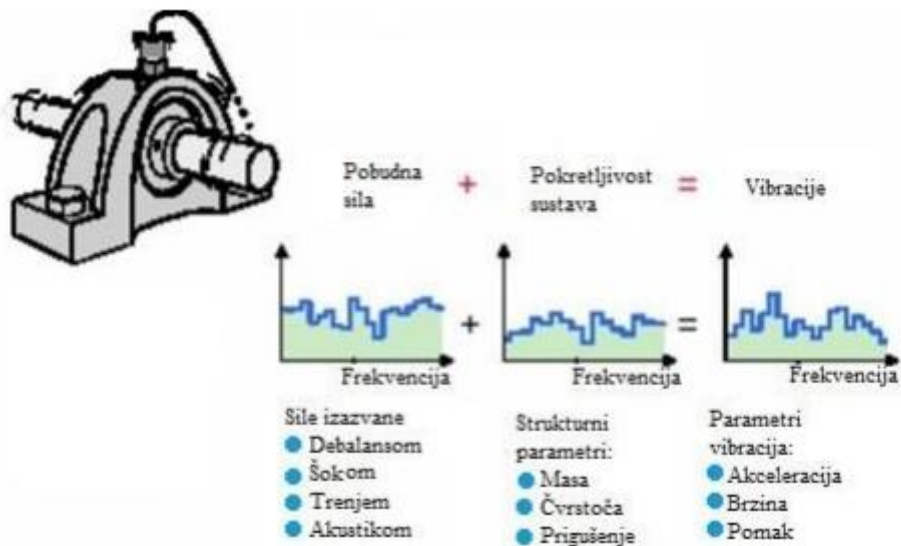


**Slika 15. Prikaz krivulje savijanja sa i bez prigušenja [11]**

#### **2.6.4. PERIODIČKA UZBUDNA SILA**

Kada se razmatra periodička uzbudna sila kao parametar vibracije, ključni elementi koji se uzimaju u obzir su frekvencija, amplituda i karakter periodičke sile. Periodičke sile na brodu mogu proizlaziti iz različitih izvora, kao što su valovi, oscilacije motora, rad propelera ili druge vanjske sile koje djeluju na plovilo.

Uzbudne sile strojeva nastaju tijekom periodičnog izgaranja plinova u cilindrima i zbog neuravnoteženih inercijskih sila gibajućih masa. Pri tome se uzbudna sila razlaže na horizontalnu i vertikalnu silu, te moment oko poprečne i vertikalne osi. Uzbudne sile su periodične i imaju posebno izražen prvi i drugi harmonik. Intenzitet tih sila ovisi o tipu stroja, broju cilindara i redoslijedu paljenja, a određuje ga proizvođač strojeva. Na sljedećoj slici 16. prikazana je veza vibracija sa uzbudnom silom i karakteristikama sustava [13].



**Slika 16. Veza vibracija sa pobudnom silom i karakteristikama sustava [13]**

## 2.7. UZBUDE NA POGONSKIM SUSTAVIMA

Uzbuda pogonskih sustava broda može imati značajan utjecaj na vibracije koje se prenose kroz brod. Vibracije se mogu pojaviti iz različitih izvora unutar broda, a uzbuda pogonskih sustava može biti jedan od tih ključnih izvora vibracija. Uslijed periodičnog izgaranja plinova u cilindrima i neuravnoteženih inercijskih sila gibajućih masa nastaju uzbudne sile. Uzbudne sile su periodičke s naročito izraženim prvim i drugim harmonikom [13].

Frekvencija uzbudnih sila glavnog stroja kreće se najčešće u području prve tri prirodne frekvencije trupa broda tako da se prisilne vibracije trupa sastoje od nekoliko prvih osnovnih oblika vibriranja.

Kako bi se smanjile vibracije uzrokovane uzбудom pogonskih sustava, mogu se poduzeti različite mjere. To može uključivati redovito održavanje i servisiranje motora i propelera, pravilno balansiranje rotirajućih dijelova, korištenje prigušivača vibracija, kao i projektiranje broda s fokusom na smanjenje rezonancije i apsorpciju vibracija. Također, kontinuirano praćenje stanja i performansi pogonskih sustava može pomoći u identifikaciji problema prije nego što dođe do ozbiljnijih vibracija koje bi mogle utjecati na sigurnost i udobnost plovidbe [13].



## 2.8. AMPLITUDA VIBRACIJE

Amplituda vibracija predstavlja maksimalni iznos pomaka ili oscilacija koje se javljaju tijekom vibracija. Na brodu, vibracije se mogu osjetiti u različitim dijelovima ovisno o tome gdje se generiraju i kako se prenose kroz strukturu. Amplituda može varirati od vrlo malih, gotovo neprimjetnih oscilacija do izraženijih i ometajućih vibracija koje mogu utjecati na udobnost posade ili putnika, a ponekad čak i na performanse broda [13].

Vrijednost amplitude od vrha do vrha (engl. *peak-to-peak*) prikazuje maksimalne amplitude signala koji opisuje vibraciju. Ovaj parametar je koristan u situacijama kada je vibracijsko pomicanje dijelova stroja značajno sa stajališta maksimalnih naprezanja ili zamora materijala u mehaničkom sustavu.

Vršna vrijednost amplitude (engl. *peak*), u oznaci  $A_z$ , je parametar koristan za izražavanje nivoa kratkotrajnih udarnih vibracija. Ovaj parametar iskazuje samo maksimalnu vrijednost amplitude, dok ne uzima u obzir vremensku povijest signala [13].

Srednja vrijednost,  $A_{sr}$ , je parametar koji uzima u obzir vremensku povijest signala. Upotreba ovog parametra je ograničene praktične vrijednosti, jer nema direktne korelacije sa nekom fizičkom veličinom [13].

Efektivna vrijednost signala (engl. *root mean square – RMS*), u oznaci  $A_{ef}$ , najvažnija je mjera amplitude vibracije zbog toga što uzima u obzir vremensku povijest signala. Na taj način ovaj parametar daje amplitudi signala vrijednost koja je direktno povezana sa energetske sadržajem signala, tj. destruktivnom sposobnosti date vibracije. Za harmonijski periodični signal vrijedi jednakost:

$$A_{ef} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 \dots + x_n^2}{n}} \quad (10)$$

Prikazane veličine koje opisuju vremenski signal ne odnose se samo na jednostavan sinusoidni signal, nego na sve uobičajene vibracijske signale koji se mogu dobiti na strojevima, koji su sastavljeni od mnogo sinusoidnih komponenata.

Važno je smanjiti amplitudu vibracija na brodu radi udobnosti posade, sigurnosti i očuvanja samog broda. To se može postići redovitim održavanjem i inspekcijama sustava, pravilnim balansiranjem rotirajućih dijelova, korištenjem prigušivača vibracija te projektiranjem broda s ciljem smanjenja rezonancije i apsorpcije vibracija [13].

### 3. SENZORI ZA MJERENJE VIBRACIJA

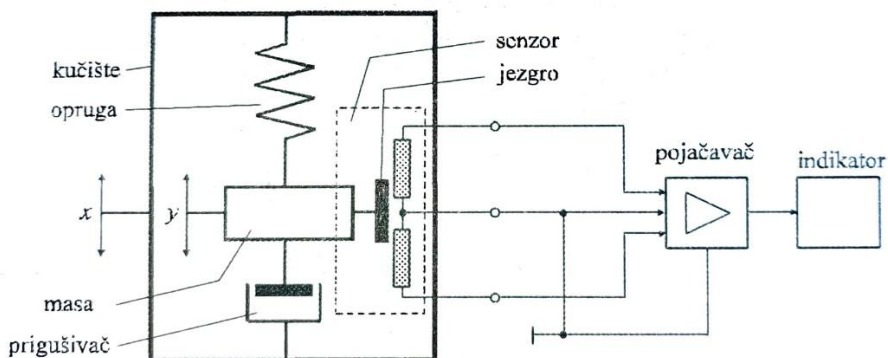
Postoje različiti senzori dizajnirani za mjerenje vibracija u različitim primjenama. Izbor senzora ovisi o čimbenicima kao što su frekvencija i amplituda.

Mjerenje amplitude vibracije, ovisno o mjestu primjene, vrši se pomoću raznih davača, među kojima su: elektromehanički, elektromagnetni, kapacitivni davači sa dvostrukom integracijom itd. Umjesto amplitude vibracija često se mjeri visina vibracija koja je jednaka dvostrukoj amplitudi.

Na brodu se koriste različiti senzori i uređaji za mjerenje vibracija kako bi se pratilo stanje brodskih sustava i smanjila potencijalna oštećenja ili nelagoda uzrokovana vibracijama. Senzori za mjerenje vibracija omogućuju kontinuirano praćenje i analizu oscilacija i pomaka unutar brodskih sustava [1].

#### 3.1. ELEKTROMEHANIČKI SENZORI

Elektromehanički davač pomaka funkcioniра slično kao LVDT (engl. *linear variable differential transformer*) davač pomaka. Ovi davači kod mjerenja amplitude vibracija ne koriste fiksnu točku u prostoru. Oni se sastoje od kućišta koje se stavlja na objekt koji vibrira. Unutar kućišta nalazi se masa obješena o oprugu, prigušivač i LVDT senzor. Kod osciliranja objekta kućište prati oscilacije objekta, dok se masa nalazi u stanju mirovanja. Mirovanje mase je osigurano odgovarajućim dimenzioniranjem mase, opruge i prigušivača. Slika 17. prikazuje shemu elektromehaničkog davača pomaka, označeni su dijelovi senzora [1].

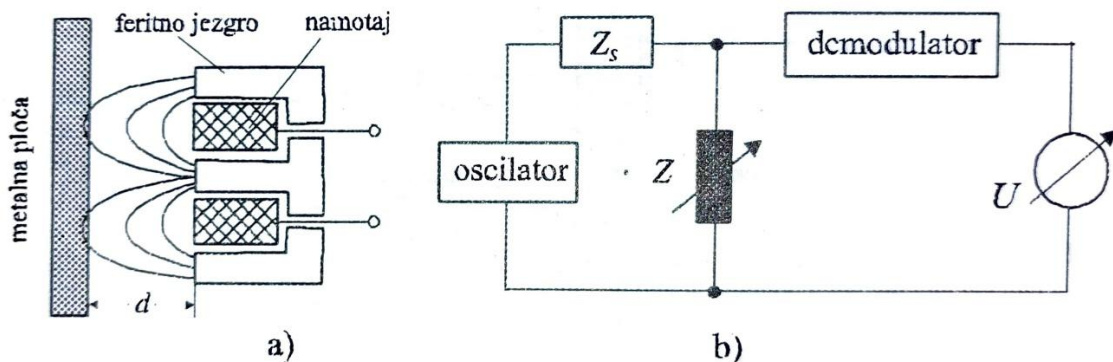


**Slika 17. Elektromehanički davač pomaka [1]**

### 3.2. SENZORI POMAKA NA BAZI VRTLOŽNIH STRUJA

Senzori pomaka na bazi vrtložnih odnosno *Fukoovih* struja baziraju svoje funkcioniranje po zakonu elektromagnetne indukcije (*Faraday-ev* zakon). Kada se provodna metalna ploča nalazi u promjenjivom magnetnom polju u njoj se pojavljuju vrtložne struje koje generiraju magnetno polje koje se suprotstavlja pobudnom polju.

Senzori na bazi vrtložnih struja najefikasnije rade na visokim frekvencijama koje su bliske rezonantnoj frekvenciji. Rezonantna frekvencija ovisi o broju navojaka namotaja i serijske impedancije. Na slici 18. prikazana je karakteristika senzora sa 200 navojaka i rezonantnom frekvencijom 903 kHz [1].



**Slika 18. Senzor pomaka na bazi vrtložnih struja [1]**

**a) konstrukcija b) strujna shema konvertora impedancija/napon**

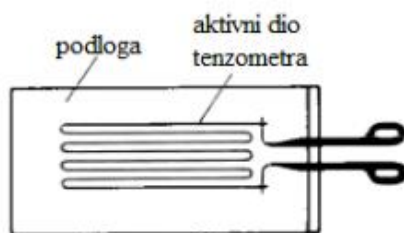
### 3.3. TENZOMETRI

Tenzometar se definira kao dio mjernog uređaja kojim se određuje deformacija na površini konstrukcije. Osnovna svojstva svakog tenzometra su aktivna duljina unutar koje se mjeri prosječna deformacija, osjetljivost, područje mjerenja te točnost [12].

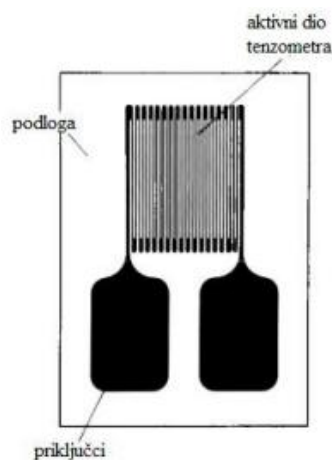
Proizvode se različiti tipovi tenzometara, što omogućuje njihovu raznoliku primjenu pri obavljanju mjernih zadataka. Glavna područja primjene tenzometara su:

- eksperimentalna analiza naprezanja, uključujući mjerne tehnike i biomehaniku
- proizvodnja pretvarača.

Dok je prilagodljivost tenzometara doprinijela njihovoj širokoj uporabi u području eksperimentalne analize naprezanja, visoki stupanj točnosti mjerenja koji se može dobiti pomoću tenzometara je doveo do potražnje tenzometara u proizvodnji pretvarača. Prema izvedbi razlikuju se dva tipa tenzometra koji su prikazani na slikama 19. i 20. , a to su tenzometar sa žicom i folijom [12].



**Slika 19. Shematski prikaz žičanog tenzometra [12]**



**Slika 20. Shematski prikaz tenzometra s metalnom folijom [12]**

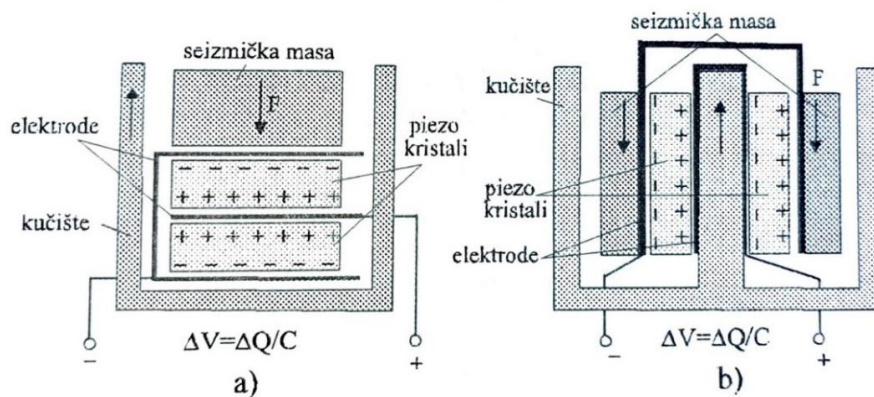
Osim metalnih tenzometara postoje i drugi tipovi elektrootporničkih tenzometara. U spomenutu skupinu spadaju poluvodički tenzometri i oni proširuju raspon primjene u tehnologiji tenzometara. Princip mjerenja se temelji na piezootporničkom efektu u germaniju. U razvoju su poluvodički tenzometri slični metalnim tenzometrima. Mjerni se element sastoji od trake širine od nekoliko desetaka milimetara i debljine od nekoliko stotina milimetara, pričvršćen je za izolacijsku foliju nosača i opremljen s priključnim vodovima. Djelovanje dioda su spriječeni korištenjem tanke zlatne žice kao veze između

poluvodičkog elementa i spojnih traka. Kapacitivni tenzometri mjere deformacije na bazi promjene kapaciteta kondenzatora te se obično smatraju alternativnim i konvencionalnim tenzometrima koji se koriste na visokim temperaturama [12].

### 3.4. AKCELEROMETRI

Ovi senzori mjere ubrzanje koje se javlja zbog vibracija, postavljeni su na različitim dijelovima broda kako bi detektirali i mjerili dinamiku vibracija u određenim točkama.

Osnovni princip rada akcelometra temelji se na promjeni električnih svojstava (npr. napon, otpor, kapacitet) u skladu s ubrzanjem koje senzor doživljava. Kada se akcelometar podvrgne ubrzanju ili vibracijama, unutarnji materijal ili mehanizam reagira na to ubrzanje, što rezultira promjenom nekog fizičkog svojstva senzora. Ta promjena se potom pretvara u električni signal koji se može mjeriti i analizirati. Najpoznatiji su piezoelektrični i piezootporni akcelometri. Slika 21. predstavlja blok shemu akcelometra sa označenim komponentama [1].



Slika 21. Blok shema akcelometra [1]

a) kompresijski akcelometar b) smicajni akcelometar

#### 3.4.1. Piezoelektrični akcelometri

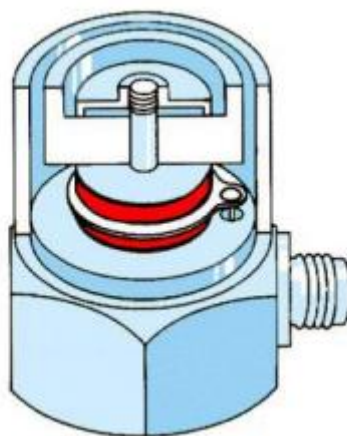
Piezoelektrični akcelometri se baziraju na piezoelektričnom efektu. Kod piezo materijala koji su podvrgnuti mehaničkom pritisku dolazi do polarizacije nosilaca elektriciteta, tako da se na površinama materijala pojavljuje naboj, pri čemu postoji

odgovarajuća proporcionalnost između pritiska i količine naboja. Ova pojava je poznata kao direktni piezoefekt [1].

Piezo (grč. *piezein*) znači pritisak, odnosno pritiskati, stezati i sl., analogno, piezoelektricitet označava elektricitet izazvan pritiskom [1].

Ovi senzori koriste kristale ili keramičke materijale koji generiraju električni naboj kada su podvrgnuti mehaničkom stresu ili deformaciji. Ta generirana električna struja proporcionalna je ubrzanju, omogućujući mjerenje.

Kontaktni senzor ubrzanja (piezoelektrični akcelerometar) radi na piezoelektričnom principu i ti senzori su najzastupljeniji u praksi. Koristi se piezoelektrični efekt kvarca, odnosno mehaničko gibanje se pretvara u istezanje ili sabijanje kvarca u kojem dolazi do polarizacije molekula i nastaje električni naboj. Izmjereno vibracijsko ubrzanje se u mjernom instrumentu pomoću električkog integratora jednostavno pretvara u vibracijsku brzinu ili vibracijski pomak. Na slici 22. nalazi se skica piezoelektričnog akcelerometra [1].



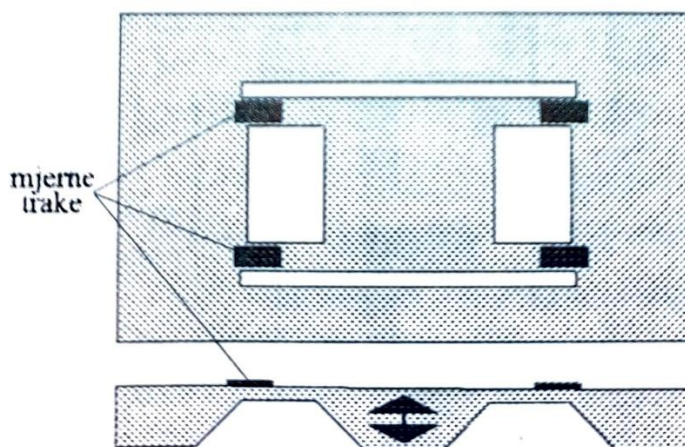
Slika 22. Piezoelektrični akcelerometar [1]

### 3.4.2. Piezootporni akcelerometri

Piezootporni senzori ubrzanja posjeduju silicijski deformacijski element koji pokazuje znatno veće promjene otpornosti od metalnih traka klasičnih senzora. Kod piezootpornih senzora piezootporni efekt je, analogno piezoelektričnim sensorima, ovisan o orijentaciji kristala.

Ovi se akcelerometri obično koriste za mjerenje dinamičkih ubrzanja u različitim primjenama, uključujući praćenje industrijskih strojeva, automobilska ispitivanja, zrakoplovstvo i praćenje stanja konstrukcija. Ovi senzori mijenjaju svoj otpor kao odgovor na mehanički stres. Prikladni su za mjerenje dinamičkog ubrzanja [1].

Osnovne prednosti ovih senzora su: visok dinamički opseg, širok opseg frekvencija, baziraju se na pasivnim komponentama itd. Glavni nedostaci su: osjetljivost na udarce (može doći do oštećenja), osjetljivost na temperaturu, potreban stabilan napon napajanja itd. Najčešće koristi Vitstonov most sa četiri aktivne trake [1]. Sljedeća slika 23. prikazuje shemu piezootpornog akcelerometra.



Slika 23. Piezootporni akcelerometar [1]

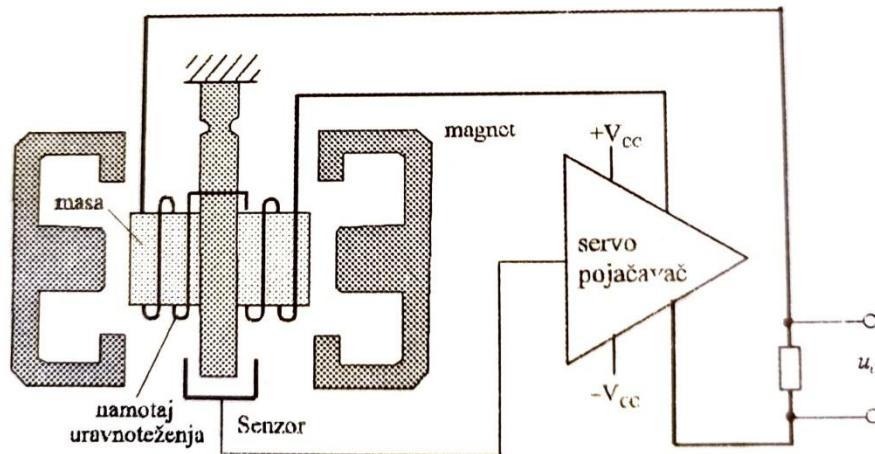
### 3.5. SERVOAKCELEROMETRI

Servoakcelerometri su, za razliku od opisanih akcelerometara, sistemi sa povratnom oprugom. Na Vitstonovom mostu se baziraju dvije mjerne metode, nulta i otklonska metoda. Prvo je razvijena nulta metoda sa ručnim uravnoteženjem, a onda nulta metoda sa automatskim uravnoteženjem. Sistem s automatskim uravnoteženjem predstavlja sistem automatske regulacije. Kasnije su razvijeni kvalitetni, tlačni, znatno jednostavniji i pouzdaniji analogni elektronički pojačivači koji su preuzeli funkciju sistema za automatsko uravnoteženje. Ovi senzori koriste servo sustav kako bi povećali osjetljivost i smanjili šum prilikom mjerenja.



Princip rada servoakcelerometra je sličan kao i kod običnog akcelerometra, no oni koriste servo mehanizme kako bi održali senzor u fiksiranom položaju unutar uređaja, čime se smanjuju neželjeni pokreti i vibracije koji bi inače mogli utjecati na preciznost mjerenja. Servo sustav prati položaj senzora i primjenjuje kontrolirane sile kako bi održao senzor stabilnim i osigurao da je usmjeren prema pravilnom smjeru mjerenja ubrzanja [1].

Na slici 24. prikazana je blok shema servoakcelerometra sa njihalom i seizmičkom masom koji se nalaze u polju stalnog magneta. Njihalo pod utjecajem ubrzanja formira moment proporcionalan proizvodu ispitne mase i ubrzanja izvođeći ga iz ravnoteže. Nastale vibracije detektira *pickup* senzor. Signal senzora se vodi na servopojačivač koji pojačava signal greške formirajući struju povratne veze koja preko momentnog motora formira suprotan moment iste amplitude [1].



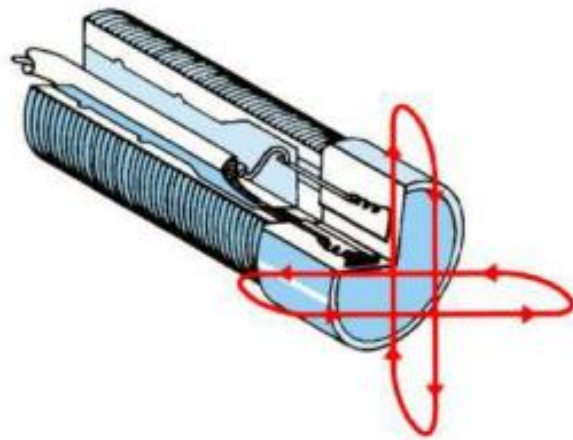
Slika 24. Blok shema servoakcelerometra [1]

### 3.6. OSTALI SENZORI ZA MJERENJE VIBRACIJA

Vibracijski senzori na ležajevima često se koriste za praćenje vibracija unutar ležajeva, što može ukazivati na potencijalna oštećenja ili probleme s rotirajućim dijelovima kao što su vratila ili propellerske osovine.

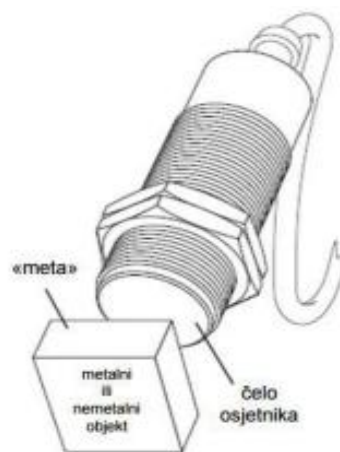
Induktivni senzor pomaka (slika 25.) radi na principu vrtložnih struja. Magnetno polje proizvedeno prolaskom izmjenične struje kroz zavojnicu inducira vrtložne struje u bilo kojem električki vodljivom dijelu u blizini zavojnice. Takve senzore je potrebno prije

upotrebe dobro kalibrirati, odnosno pred namjestiti na određeni napon, a pomak vodljivog materijala od osovine se manifestira u obliku rasta, odnosno pada napona [1].



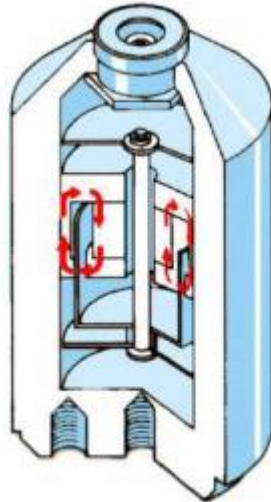
**Slika 25. Induktivni senzor pomaka [7]**

Kapacitivni senzor (slika 26.) pomaka radi na principu električnog polja. Oscilator stvara električno polje usmjereno u smjeru „mete“ odnosno mjesta na kojem je potrebno mjeriti pomak, te se u ovisnosti o udaljenosti i površini objekta mijenja kapacitet osjetnika [1].



**Slika 26. Kapacitivni senzor pomaka [7]**

Kontaktni senzor (slika 27.) vibracijske brzine radi na elektrodinamičkom principu. U svitku koji je namotan u polju permanentnog magneta preko dviju helikoidalnih membranskih opruga s kojima tvori sustav masa-opruga se inducira napon proporcionalan vibracijskoj brzini [7].



**Slika 27. Kontaktni senzor [7]**

Svi senzori obično su povezani sa sustavima za nadzor i upravljanje (engl. *supervisor control and data acquisition* - SCADA), koji omogućuju kontinuirano praćenje vibracija u stvarnom vremenu. Podaci koje prikupljaju senzori mogu se analizirati kako bi se identificirali problemi, održavao strojnički sustav i poduzeli preventivni koraci kako bi se smanjile vibracije i produžio radni vijek brodskih sustava [7].

## **4. ANALIZA I OBRADA SIGNALA VIBRACIJA**

Senzori prenose električne impulse do uređaja za ispitivanje vibracija koji ih zatim obrađuju. Obrada signala je glavni element u praćenju vibracija, uz njihovo čitanje. Krajnji cilj praćenja stanja stroja je izvući detaljne informacije iz signala koju su obično bučni i kompleksni te predvidjeti preostali životni vijek stroja. Dakle, metoda za obradu signala je vrlo važna za učinkovito identificiranje i dijagnosticiranje grešaka koje upućuju na moguće kvarove.

Pravovremena analiza i obrada signala vibracija na brodovima su ključni za osiguranje sigurnosti plovidbe, održavanje opreme i smanjenje potencijalnih rizika koji proizlaze iz neispravnosti ili kvarova brodskih sustava [11].

### **4.1. KONTROLA VIBRACIJA**

Vibracije brodske konstrukcije se ne mogu potpuno izbjeći ali treba nastojati da razina vibracija ne nadmaši dozvoljene granice zbog njihovog štetnog utjecaja. Visoke razine vibracija mogu ometati pravilan rad strojeva, uređaja i instrumenata, mogu dovesti do oštećenja propelera ili do loma strukturnih elemenata strojeva i broda. Svrha analize vibracije je predvidjeti odziv konstrukcije i razinu vibracija, a u ovom poglavlju je riječ o potrebnim mjerama koje se trebaju poduzeti da bi se vibracije smanjile.

Kontrola vibracija na brodovima vrlo je važna prvenstveno za ljude, a potom i za dulji vijek trajanja svih strojeva i uređaja koji su izloženi i koji prenose vibracije. Neki od načina na koji se može vršiti kontrola su [11]:

- balansiranje i održavanje motora
- upotreba antivibracijskih sustava
- korištenje vibroizolacijskih materijala
- optimizacija propelera i sl.

Postoje dva osnovna načina smanjenja vibracija u brodskoj konstrukciji, a to su modifikacija uzbude i modifikacija odziva.

Modifikacija uzbude se može ostvariti na četiri načina:

- smanjenjem intenziteta uzбудnih sila
- promjenom mjesta njihovog djelovanja
- promjenom frekvencije uzbude
- kompenziranjem energije uzbude.

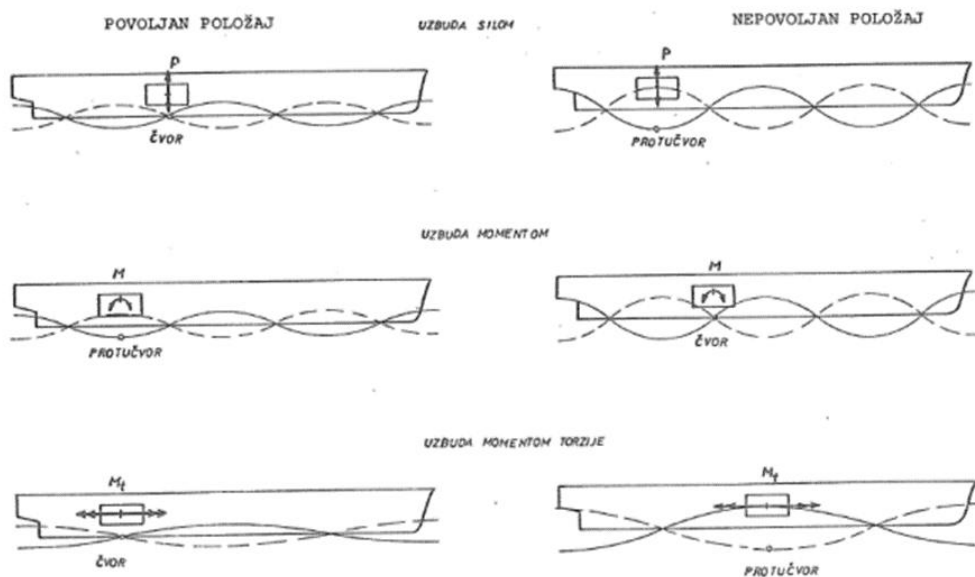
Modifikacija odziva se može ostvariti na tri načina:

- promjenom krutosti sistema
- povoljnim rasporedom masa
- promjenom prirodnih frekvencija u svrhu izbjegavanja rezonancije.

Način smanjenja vibracija određujemo prema tome da li se radi o projektu ili već izgrađenom brodu te o kojoj se vrsti vibracija radi. Pritom mislimo na tri vrste vibracija: globalne vibracije trupa koje su pobuđene glavnim strojem, vibracije podstruktura koje nastaju uslijed rada propelera i lokalne vibracije strukturnih elemenata i njihovih sklopova koje su posljedica viših harmonika uzbude strojevima i propelerom.

Nije moguće utjecati na uzbudne sile glavnih i pomoćnih strojeva. Međutim, kako je energija ovih sila, koja se prenosi na brodsku konstrukciju, jednaka umnošku sile i pregiba odnosno momenta i kuta zaokreta ona se ipak može smanjiti tako da se strojevi pravilno postavljaju po duljini broda.

Pri uzbudi momentom torzije, stroj bi se trebao nalaziti u području torzijskih vibracija. Prema slici 28. vidljivo je kakva je povoljnost položaja glavnog stroja uzduž broda [6].



Slika 28. Povoljnost položaja glavnog stroja uzduž broda sa gledišta vibracija [6]

#### 4.2. UREĐAJ ZA MJERENJE VIBRACIJA

Napretkom tehnologije 21. stoljeća došlo je do razvijanja velikog broja naprednih sustava i uređaja koji su konstruirani za određena mjerenja u raznim područjima primjene. Uređaji za mjerenje vibracija od velike su koristi pri suzbijanju pojave vibriranja [10].

U nastavku je opisan uređaj *Adre 408* (slika 29.) koji je vrlo pouzdan sustav u analizi i mjerenju vibracija.



Slika 29. Uređaj za mjerenje vibracija Adre 408 SXP [10]

*ADRE 408 SXP* je vrsta sustava za analizu vibracija proizvedena od strane tvrtke *Crystal Instruments*. *ADRE 408* je jedan od modela koji se koristi za prikupljanje podataka o vibracijama i analizu vibracijskih signala u različitim aplikacijama, kao što su održavanje strojeva, istraživanje i dijagnostika [10].

Ovaj sustav može obavljati različite funkcije kao što su snimanje podataka o vibracijama, analiza frekvencijskih spektara, identifikacija anomalija, nepravilnosti u strojevima te praćenje stanja opreme. Korištenjem *software-a ADRE SXP* omogućeno je obavljanje analize i za vrijeme rada strojeva [10].

*ADRE 408* omogućuje sakupljanje sljedećih fizikalnih veličina:

- vibracijskog pomaka
- vibracijske brzine
- vibracijskog ubrzanja
- temperature
- frekvencije
- brzine vrtnje
- napona
- pritiska.

#### 4.3. UREĐAJ ZA BEŽIČNI PRIJENOS PODATAKA

Postoji mnogo uređaja za bežični prijenos podataka koji rade na temelju različitih tehnologija, princip rada ovisi o vrsti bežične komunikacije koja se koristi. Svaki od uređaja ima svoje prednosti i specifične primjene, ali zajednički princip je bežični prijenos podataka putem elektromagnetskih signala ili radiofrekvencija. U nastavku je opisan način rada i primjene jednog od uređaja korištenih za bežični prijenos podataka.

*V-Link-LXRS* uređaj za bežični prijenos podataka (engl. *V-Link-LXRS wireless sensor model*) koji je prikazan na slici 30. ima sedam analognih ulaznih kanala dizajniranih tako da se na njih može spojiti više vrsta Vitstonovih mostova i analognih senzora. Uključujući senzore za mjerenje opterećenja, deformacije, momenta, ubrzanja, tlaka, vibracija, pomaka i magnetskog polja. Postoje tri kanala koja služe za nesimetrično mjerenje sensorima s jednim izlazom, četiri kanala za diferencijalno mjerenje sensorima te unutarnji senzor za temperaturu u vozilu. Ulazi na V-Linku imaju rezoluciju od 16 bitova s preciznošću mjerenja od  $\pm 0.1$  %. Uređaj može bilježiti podatke u unutarnju memoriju i prenositi sinkronizirane podatke u stvarnom vremenu [8].



**Slika 30. V-Link-LXRS bežični senzorski uređaj [8]**

Uređaji mogu imati tri operativna načina rada: mirovanje, prazan hod i aktivni. Uređaj je u aktivnom načinu rada u trenutku kada prikuplja podatke, a da bi se prikupljanje zaustavilo, potrebno je uređaj staviti u stanje mirovanja. Prijelaz uređaja u stanje mirovanja se neće odvititi dok traje prikupljanje podataka, već se odvija automatski nakon određenog vremena neaktivnosti koju je postavio sam korisnik. Dok traje stanje mirovanja, potrošnja energije je izuzetno mala [8].



## 5. POSLJEDICE VIBRACIJA

Vibracije na brodovima mogu imati nekoliko značajnih posljedica koje utječu na različite pomorske operacije. Kontinuirane vibracije mogu uzrokovati oštećenja strukture broda, a ponavljajuće vibracije zamor materijala, pukotine ili deformacije na dijelovima broda, što može dovesti do smanjenja integriteta konstrukcije.

Vibracije mogu ubrzati istrošenost dijelova broda što znatno povećava troškove održavanja. Poznato je koliko su skupi brodski dijelovi i uređaji, te je zbog toga vrlo bitno redovito održavanje i pregled kako bi se smanjili troškovi. Nepravilnosti u strojevima ili sustavima zbog vibracija zahtijevaju češće održavanje i popravke [9].

Također, pojava vibracija može negativno utjecati na performanse broda. Vibracije mogu smanjiti učinkovitost pogonskih sustava, povećati otpor pri kretanju kroz vodu te tako povećati potrošnju goriva. Uz povećanu potrošnju goriva dolazi i do drugih problema vezanih uz pogonski sustav kao što su povećana potrošnja ulja, rashladnog fluida i dr., što smanjuje učinkovitost pogonskog sustava.

Prilikom pojave vibracija, brodska konstrukcija se izlaže velikim naprezanjima, odnosno opterećenjima koja ostavljaju znatne posljedice na samo plovilo te njegovu konstrukciju. Opterećenja mogu biti na savijanje, vlačnost, tlačnost, te torziju, ili izvijanje. Nakon dužeg izlaganja navedenim opterećenjima dolazi do zamora, a u konačnici i do loma pojedinog elementa, komponente, te dijela sustava u slučaju da prelaze dopuštene granice [9].

Dugotrajnim izlaganjem vibracijama dolazi do trošenja materijala što dovodi do zamora strukturnih komponenti, uzrokujući pukotine, deformacije ili slabljenje materijala, a to ugrožava strukturu plovila. Na slici 31. prikazana je shema opterećenja na savijanje [9].



**Slika 31. Shema opterećenja na savijanje [9]**

Opterećenje na savijanje broda je sila koja djeluje na brod uzdužne osovine, često uzrokovana vanjskim silama ili momentima savijanja. Ova vrsta opterećenja može utjecati na strukturu broda, posebno na trup [9].

Također vrlo česta pojava nastala zbog prevelikih vibracija je korozija prikazana na slici 32. Prekomjerne vibracije su zbog stvaranja velikih sila i naprezanja pri čemu dolazi do pojave trenja, pogodne za širenje korozije u određenim područjima broda, posebno na spojevima i zavarima. Zbog povećanog naprezanja i kretanja dolazi do zamora te potencijalnog puknuća dijela elementa zahvaćenog korozijom. [9]



**Slika 32. Korozija na dijelu strojnog uređaja [9]**

U konačnici, vibracije mogu pridonijeti pojavi ozbiljnih posljedica za brod kao što su puknuće trupa ili nekog drugog elementa i tako ugroziti ono najbitnije, sigurnost čovjeka.

## **6. ZAKLJUČAK**

Svaki veći pa i manji sustav podliježe pojavi i nastanku vibracija pa tako i brodski sustav. Vibracije nisu željena pojava te se zbog toga nastoje pronaći odgovarajuća rješenja za njihovo prigušivanje i ublažavanje u brodskim sustavima. Postupci kojima se dolazi do potpunog uklanjanja vibracija nisu uvijek mogući, te se zbog toga koriste suvremeni uređaji i senzori kako bi se djelomično uklonile vibracije.

Ovaj rad usredotočen je na mjerenje vibracija, metode mjerenja, senzore, izvore i vrste vibracija na plovilima. Analizirani su parametri vezani uz brodske konstrukcije koji su bitni za proračun vibracija.

Opisane su vrste vibracija, odnosno prisilne i slobodne vibracije koje nastaju na brodovima. Navedeni su i opisani neki bitniji senzori i uređaji koji su potrebni za prikupljanje, obradu i analizu podataka prilikom pojave vibracija na brodovima. Nadalje, naglasak je stavljen i na pogonske strojeve i uređaje koji su najizloženiji vibracijama zbog velikih okretnih momenata i sila. Kroz cijeli brodski pogonski sustav nastaju vibracije pa je tako sklon velikom trošenju i zamoru materijala, no dobrim poznavanjem i odgovarajućim radnjama održavanja posljedice vibracija svedene su na minimum. Današnja tehnologija bitno je napredovala u svim segmentima, pa tako i na području brodskih sustava, što znatno olakšava problematiku vibracija.

## LITERATURA

- [1] Barjamović, N.: *Brodsko mjerenja*, Fakultet za pomorstvo Kotor, Kotor, 2006.
- [2] Chakraborty, S.: *Types of Vibrations On Ships – Machinery Vibrations*, Marine insight, 2021., URL: <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/types-of-vibrations-on-ships-machinery-vibrations/> (pristupljeno: 13.11.2023.)
- [3] MAN B&W: *An Introduction to Vibration Aspects of Two-Stroke Diesel Engines in Ships*, MAN B&W Diesel A/S, P., 1992., URL: [https://www.lme.ntua.gr/academic-info-1/prospheromena-mathemata/egkatakastaseis-prooses/files/vib\\_esp.pdf](https://www.lme.ntua.gr/academic-info-1/prospheromena-mathemata/egkatakastaseis-prooses/files/vib_esp.pdf) (pristupljeno: 13.11.2023.)
- [4] *Vibracije*, Hrvatska tehnička enciklopedija Leksikografskog zavoda Miroslav Krleža, URL: <https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/vibracije.pdf> (pristupljeno: 15.11.2023.)
- [5] Ozretić, V.: *Brodski pomoćni strojevi i uređaji*, Split Ship Management, Split, 2004.
- [6] Radica, G.: *Skripta za studente brodostrojarstva*, Pomorski fakultet Split, Split, 2010.
- [7] Senjanović, I.: *Vibracije broda II*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1976.
- [8] V-Link-LXRS, URL: <http://files.microstrain.com/V-Link-LXRS-Quick-Start-Guide.pdf> (pristupljeno: 27.11.2023.)
- [9] Radica, G.: *Dijagnostika kvarova*, prezentacija, 2005.
- [10] Adre, URL: <https://www.bakerhughes.com/bently-nevada/monitoring-systems/portable-vibration-testers-diagnostic-systems/adre> (pristupljeno: 26.11.2023.)
- [11] Senjanović, I.: *Vibracije broda III*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1981.
- [12] *Tenzometrija*, Hrvatska tehnička enciklopedija Leksikografskog zavoda Miroslav Krleža, URL: <https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/tenzometrija.pdf> (pristupljeno: 26.11.2023.)
- [13] Golubović-Bugarski, V.: *Buka i vibracije*, Mašinski fakultet, Banja Luka, 2010. URL: <http://mf.unibl.org/upload/documents/Dokumenti/Predmeti/Buka%20i%20vibracije/Buka%20i%20vibracije%20-%20skripta.pdf> (pristupljeno: 27.11.2023.)

## POPIS SLIKA

Slika 1. Glavni oblici vibriranja broskog trupa [1] .....	3
Slika 2. Generiranje složenih vibracija [1] .....	4
Slika 3. Prikaz signala vibracija u domeni vremena i frekvencije [1] .....	5
Slika 4. Uzbudne sile stroja i broskog vijka na vratilu i oplati trupa [2] .....	5
Slika 5. Osnovni elementi vibracijskih modela [2] .....	6
Slika 6. Glavni pogonski sustav kao kombinacija osovina i diskova (prema [2]) .....	7
Slika 7. Varijanta traga na propeleru [6] .....	9
Slika 8. Neutralizator aksijalnih vibracija [3] .....	10
Slika 9. Učinak savijanja na kretanje osovine [9] .....	10
Slika 10. Fazni odnos između pomaka, brzine i ubrzanja oscilacijskog kretanja [1] .....	12
Slika 11. Model slobodnih vibracija bez prigušenja [3] .....	13
Slika 12. Model za analizu slobodnih vibracija s prigušenjem [3] .....	14
Slika 13. Odziv $X$ s obzirom na vibracijski sustav koji je podređen periodičkoj uzbudnoj sili $T$ [3] .....	14
Slika 14. Shema vibracijskog sustava [3] .....	15
Slika 15. Prikaz krivulje savijanja sa i bez prigušenja [3] .....	17
Slika 16. Veza vibracija sa pobudnom silom i karakteristikama sustava [5] .....	18
Slika 17. Elektromehanički davač pomaka [1] .....	22
Slika 18. Senzor pomaka na bazi vrtložnih struja [1] .....	22
Slika 19. Shematski prikaz žičanog tenzometra [7] .....	23
Slika 20. Shematski prikaz tenzometra s metalnom folijom [7] .....	23
Slika 21. Blok shema akcelerometra [1] .....	24

Slika 22. Piezoelektrični akcelerometar [2].....	25
Slika 23. Piezootporni akcelerometar [1].....	26
Slika 24. Blok shema servoakcelerometra [1].....	27
Slika 25. Induktivni senzor pomaka [8].....	28
Slika 26. Kapacitivni senzor pomaka [8].....	28
Slika 27. Kontaktni senzor [8].....	29
Slika 28. Povoljnost položaja glavnog stroja uzduž broda sa gledišta vibracija [6].....	32
Slika 29. Uređaj za mjerenje vibracija Adre 408 SXP [9].....	32
Slika 30. V-Link-LXRS bežični senzorski uređaj [9].....	34
Slika 31. Shema opterećenja na savijanje [8].....	36
Slika 32. Korozija na dijelu strojnog uređaja [9].....	36