

Šum broskog vijka

Vukelić, Domagoj

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:089959>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-28**



Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



uniri DIGITALNA
KNJIŽNICA



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET U RIJECI

DOMAGOJ VUKELIĆ

ŠUM BRODSKOG VIJKA

ZAVRŠNI RAD

Rijeka, 2022.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET U RIJECI

ŠUM BRODSKOG VIJKA
MARINE PROPELLER NOISE

ZAVRŠNI RAD

Kolegij: Mehanizmi i vibracije

Mentor: Izv. prof. dr.sc. Goran Vukelić

Student: Domagoj Vukelić

Studijski smjer: Brodostrojarstvo

JMBAG: 0112068621

Rijeka, siječanj 2022.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET
51000 Rijeka, Studentska 2

Student/studentica: DOMAGOJ VUKELIĆ

Studijski program: BRODOSTROJARSTVO

JMBAG: 0112068621

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom

SUM BRODSKOG UJKA
(naslov završnog rada)

izradio/la samostalno pod mentorstvom

Izv. prof. dr. sc. Goran Vukelić
(prof. dr. sc. / izv. prof. dr. sc. / doc dr. sc Ime i Prezime)

te komentorstvom _____

stručnjaka/stručnjakinje iz tvrtke _____
(naziv tvrtke).

U radu sam primijenio/la metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio/la literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo/la u završnom radu na uobičajen, standardan način citirao/la sam i povezo/la s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Suglasan/na sam s trajnom pohranom završnog rada u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci te Nacionalnom repozitoriju Nacionalne i sveučilišne knjižnice.

Za navedeni rad dozvoljavam sljedeće pravo i razinu pristupa mrežnog objavljivanja:
(zaokružiti jedan ponuđeni odgovor)

- a) rad u otvorenom pristupu
- b) pristup svim korisnicima sustava znanosti i visokog obrazovanja RH
- c) pristup korisnicima matične ustanove
- d) rad nije dostupan

Student/studentica

Dubekof
(potpis)

Ime i prezime studenta/studentice,
DOMAGOJ VUKELIĆ

SAŽETAK

Tema ovog završnog rada je brodski vijak, odnosno nuspojave kavitacije propelera, vibracija, tlaka na njegovim krilima te šum, odnosno buka nastala njegovom vrtnjom. Te pojave dobivaju sve više na važnosti prilikom izrade komercijalnih brodova iz različitih razloga. Vrijednost tlaka na krilima broskog vijka kao i intenzitet vibracija značajno utječu na udobnost putnika i posade pa je njihovo svođenje na minimum posebice važno na brodovima za prijevoz putnika. Što se tiče podvodne buke, u zadnjih desetak godina, zbog zabrinutosti radi povećane buke, odnosno šuma u oceanima počelo se raditi na smanjenju istog na gotovo svim komercijalnim brodovima, dok je prije to bila praksa isključivo na ratnim brodovima. Brodski vijci u radu predstavljaju jedan od glavnih proizvođača podvodnog šuma koji se emitira s brodova. Zbog složenosti samog nastanka šuma treba istražiti svaki faktor zasebno, kako bi se utvrdili uzroci njegova nastanka i bolje razumio problem.

Ključne riječi:

brodski vijak, vibracije, tlak, kavitacija, šum

SUMMARY

The topic of this final paper is marine propeller, i.e. side effects of propeller cavitation, vibrations, pressure pulses and radiated noise caused by its spinning. These effects are gaining more importance for commercial ships for various reasons. Vibrations and pressure pulses significantly affect comfort on board, thus their reduction is of most importance for all ships carrying passengers. As regards the underwater radiated noise, interest has shifted from navy applications to commercial ships in the last decade, due to the concern for the rising background noise in the oceans. Ship propellers in operation represent one of the main manufacturers of underwater noise emitted with the ship. Due to the complexity of the noise formation itself, each factor should be investigated separately, in order to determine the causes of its occurrence and better understand the problem.

Keywords:

Marine propeller, cavitation, noise, vibrations, pressure pulses

SADRŽAJ

SAŽETAK	I
SUMMARY	II
SADRŽAJ	III
1. UVOD	1
2. PROPULZIJA	2
2.1. BRODSKI VIJAK	2
2.1.1. Definicija broskog vijka.....	2
2.1.2. Vrste I izvedbe broskog vijka	4
2.1.3. Geometrija i princip rada broskog vijka	7
2.1.4. Korak i skliz broskog vijka.....	9
3. NASTAJANJE ŠUMA BRODSKOG VIJKA I UTJECAJ NA PODvodNI EKO-SUSTAV	10
3.1. ŠUM BRODSKOG VIJKA	10
3.1.1. Brzina zvuka pod vodom	10
3.1.2. Vibracije.....	11
3.1.2.1. Slobodne vibracije bez prigušenja	13
3.1.2.2. Slobodne vibracije s prigušenjem	14
3.1.2.3. Prisilne vibracije bez prigušenja	15
3.1.2.4. Prisilne vibracije s prigušenjem	16
3.1.3. Kavitacija broskog vijka	17
3.1.4. Nastanak šuma broskog vijka	19
3.2. UTJECAJ ŠUMA BRODSKOG VIJKA NA PODvodNI EKO-SUSTAV	23
3.2.1. Morski sisavci	23
4. EKSPERIMENTALNO MJERENJE RASPODJELE TLAKA NA KRILA VIJKA I ŠUMA VIJKA	26
4.1. ISPITIVANJA U LABORATORIJSKIM UVJETIMA	26
4.2. ISPITIVANJA NA MORU	28
4.3. REZULTATI	29

4.4. PREPORUKE ZA SMANJENJE ŠUMA BRODSKOG VIJKA	35
5. ZAKLJUČAK.....	36
LITERATURA	37

1. UVOD

Dizajn brodskih vijaka s vremenom se znatno razvio zahvaljujući uvođenju novih zahtjeva te paralelnom razvoju novih, točnijih postupaka projektiranja i analize. Zahtjevi za dizajnom nisu više ograničeni na "klasičnu" potragu za visokom učinkovitošću i izbjegavanjem erozivne kavitacije, već uključuju, barem za neke brodove (putnički brodovi, mega jahte itd.) zahtjeve u pogledu impulsa tlaka i nastale buke. Problem impulsa tlaka od velike je važnosti kada se traži visoka razina udobnosti na brodu. To je veoma strog zahtjev za putničke brodove i jahte, za koje su dopuštene vrlo niske razine ubrzanja, što dovodi do potrebe za impulsima vrlo niskog tlaka. Predviđanje impulsa tlaka već je dugo uobičajena praksa u kontekstu dizajna brodskih propelera, eksperimentalno i numerički. Različiti su se postupci i metode godinama predlagali za pristup ovom problemu. Problem buke nastale radom broskog vijka postoji dugi niz godina, ali samo kad su u pitanju ratni brodovi. Tek se nedavno povećala zabrinutost zbog učinaka podvodnih emisija buke na morsku faunu, a posebno na morske sisavce. Morski sisavci u velikoj mjeri ovise o zvuku za komunikaciju, orijentaciju i pronalaženje hrane i partnera. Podvodna buka može imati različite učinke na kitove, od nastanka trajnih ili privremenih ozljeda do promjena u ponašanju i nemogućnosti komunikacije. S formalnog gledišta, ovu temu treba pokrivati MARPOL, jer su emisije energije uključene u različite oblike mogućih štetnih emisija. Ovaj aspekt još nije reguliran, ali je na njega skrenuo pažnju Odbor za zagađenje morskog okoliša (MEPC) IMO-a i drugih regulatornih tijela, poput Nacionalne uprave za oceane i atmosferu (NOAA) i Komisije Europske unije. EU je posebno financirala u posljednjem desetljeću različite istraživačke projekte usmjerene na ovaj problem (SILENV, SONIC i AQUO). Osobito je projekt AQUO imao za cilj pružiti alat za procjenu i upravljanje utjecajem na okoliš zbog prisutnosti određenog broja brodova na određenom morskom području, posebno uzimajući u obzir kavitacijsku buku propelera. Stoga je u projektu posvećena pažnja različitim metodama za predviđanje buke propelera; paralelne aktivnosti su osim toga posvećene predviđanju impulsa tlaka. U ovom su radu predstavljene numeričke i eksperimentalne aktivnosti koje je UNIGE provodio u okviru projekta AQUO za oba cilja.

2. PROPULZIJA

Da bi brod plovio, odnosno doveo se u stanje gibanja potrebno je svladati silu otpora, tj. proizvesti silu koja će ju savladati. Upravo ta sila proizvodi se propulzorima. Najraniji propulzori su jedra i vesla, dok je mehanička propulzija puno mlađa te se počinje primjenjivati ugradnjom parnog stroja kao glavnog porivnika na brodovima. Početkom 19. stoljeća nastalo je mnoštvo različitih propulzora koji su prvotno imali oblik Arhimedovog puža, a kasnije dolaze i vijci oblika dugačke spirale.

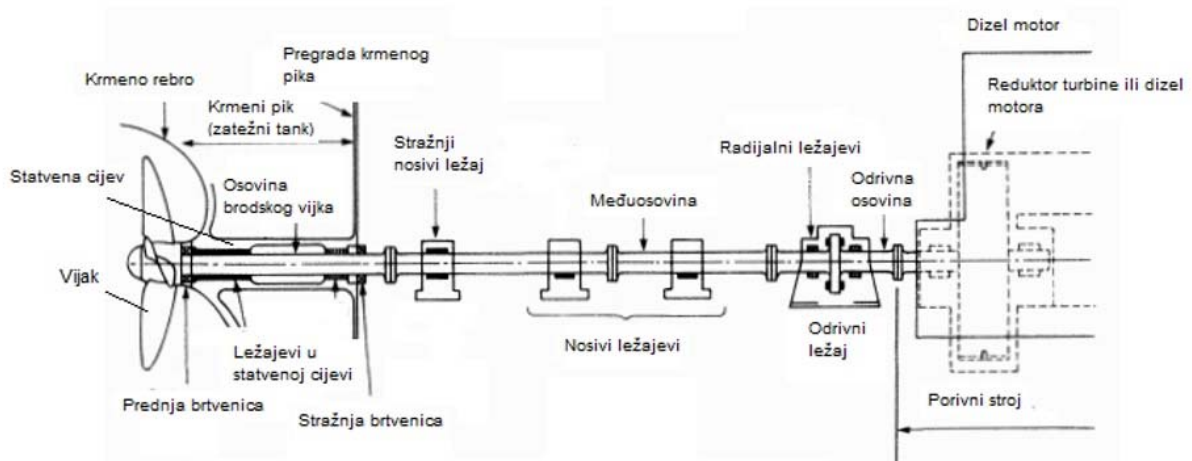
Kao prekretnica u proizvodnji i nastanku modernih brodskih vijaka kao što su danas najčešće se spominje Smithov vijak. Tijekom ispitivanja vijka oblika dugačke spirale došlo je do male nesreće u kojoj se otkida dio spirale nako čega brod plovi brže te Smith izrađuje drugu verziju vijka. Uzimajući u obzir sve što je nakon testiranja i testnih plovidbi bilo poznato, već 1845. godine brodski vijak ima oblik vrlo blizu današnjem.

Nakon što je brod Great Britain 1854. godine prešao Atlantik s brodskim vijkom, počinje doba prevlasti brodskog vijka kao najučinkovitijeg te najčešćeg brodskog propulzora.[1]

2.1. BRODSKI VIJAK

2.1.1. Definicija brodskog vijka

Brodski vijak je najčešći brodski propulzor kojim se pogonska snaga porivnog stroja rotacijskim gibanjem pretvara u porivnu silu koja djeluje na brod i gura ga naprijed. Potisak propelera prenosi se kroz prijenosni sustav koji se sastoji od rotacijskog gibanja generiranog radilicom glavnog motora, međuvratilom i njegovim ležajevima, vratilom krmene cijevi i ležajem i na kraju samim vijkom. Detaljnije se prijenos snage može razumijeti na slici 1. koja prikazuje dijelove osovinskog voda.[1]



Slika 1: Dijelovi osovinskog voda. [11]

Brodski vijak smješten je iza ili ispod krme, u podvodnom dijelu trupa. Trgovački brodovi najčešće imaju 1 ili 2 vijaka, a rijeđe mogu imati i 3 ili 4. Neki brodovi mogu imati i vijak na pramcu, kao npr. ledolomci za spriječavanje gomilanja drobljenog leda na pramcu ili trajekti za plovidbu unatrag.

Zbog izravnog rada u morskoj vodi brodski su vijci izrađeni od materijala otpornih na koroziju. Najčešći materijali koji se koriste za izradu vijka su legura aluminija i nehrđajući čelik, a još se koriste i legure nikla, aluminija i bronce koji su 10-15% lakši od ostalih materijala te imaju veću čvrstoću. Proces same izrade elise uključuje pričvršćivanje određenog broja krila na glavčinu zavarivanjem ili kovanjem u jednom komadu s glavčinom. [2]

Postoji mnoštvo raznih podjela i vrsta brodskih vijaka, ali one najčešće su podjela prema broju krila vijka, podjela prema vrsti izvedbe vijka te podjelja prema smjeru vrtnje broskog vijka.

2.1.2. Vrste i izvedbe brodskog vijka

2.1.2.1. Podjela prema broju krila

Brodski vijci mogu se razlikovati po broju krila. Mogu imati 2 do 7 krila, dok se ipak najčešće koriste vijci s 3 ili 4.

Učinkovitost brodskog vijka bit će najveća kod vijaka s minimalnim brojem krila, tj. propelera s dva krila. Ali, da bi se postigao faktor čvrstoće i uzimajući u obzir velika opterećenja broda, u pomorstvu se brodski vijci s dva krila ne koriste se za trgovačke brodove.

Propeler s tri krila najčešće je napravljen od legure aluminija, jeftiniji je od propelera s više krila te je pogodan za korištenje pri većim brzinama. Dodavanjem većeg broja krila prelazi se s aluminijskih na legure nehrđajućeg čelika. Izvedba je skuplja kako raste i broj krila, ali se dobiva na čvrstoći i trajnosti propelera, manevarskim sposobnostima na manjim brzinama, izdržljivosti i upravljivosti u teškom moru, ali i na smanjenju utjecaja vibracija te manjim induciranim poljem tlaka nad propelerom. [1]

2.1.2.2. Podjela prema tehničkoj izvedbi

Prema tehničkoj izvedbi razlikujemo brodske vijke s fiksnim krilima koji su s glavčinom kovani u jednom komadu te vijke s prekretnim krilima kojima se nagib krila može mijenjati.

Vijci s fiksnim krilima ili Fixed Pitch Propellers (FPP) izrađeni su u jednom komadu. Najčešći su na brodovima upravo zbog toga što su najjeftiniji, najmanje su podložni kvarovima te imaju najveću iskoristivost. Brzina vrtnje brodskog vijka vrlo se jednostavno može regulirati regulacijom broja okretaja glavnog porivnog stroja.[2]



Slika 2: Brodski vijak s fiksnim krilima (FPP) [14]

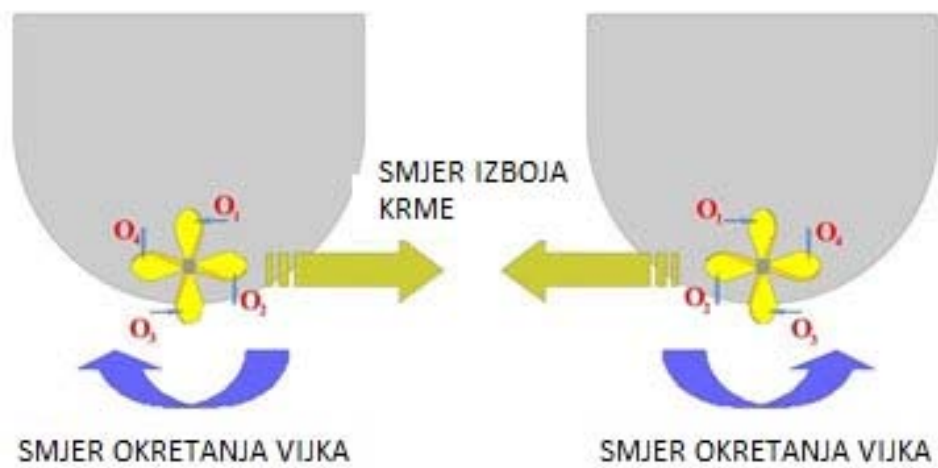
Vijci s prekretnim krilima ili Controllable Pitch propellers (CPP) druga su izvedba brodskog vijka. Imaju mogućnost promjene nagiba krila te time doprinose jednostavnijim upravljanjem porivnim strojem kojim se može upravljati izravno sa zapovjedničkog mosta. Nije im potreban sustav za preketanje porivnog stroja iz vožnje naprijed u vožnju krmom jer se osovina uvijek okreće u istom smjeru. Ukoliko se želi preći u vožnju krmom prekrenu se krila pomoću hidrauličkog uređaja smještenog u osovini i glavčini vijka. CPP vijci skuplji su od FPP vijaka, ali to im nije i jedini nedostatak. Naime, CPP vijci koriste krila manje površine zbog lakšeg prekreta i imaju veći broj okretaja. Upravo zbog toga, kada se nađu na valovitom moru, brodovi s ugrađenim CPP vijkom puno više gube na brzini.[2]



Slika 3: Brodski vijak s prekretnim krilima (CPP) [14]

2.1.2.3. Podjela prema smjeru vrtnje

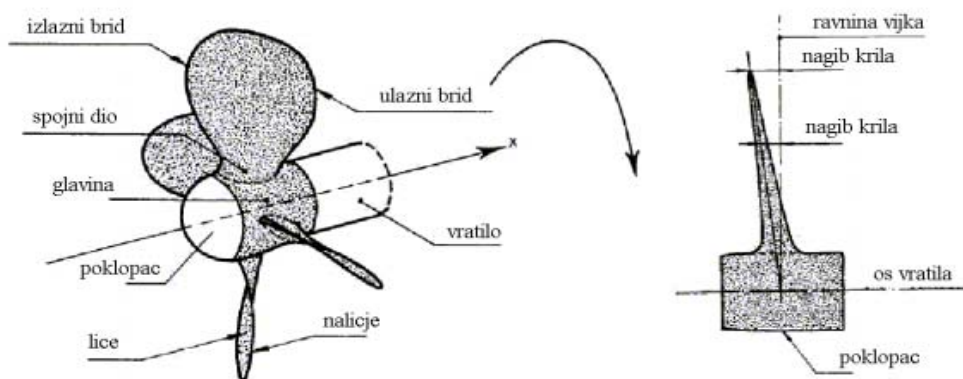
Kada se govori o vrstama brodskog vijka, nerijetko se misli na smjer njegove vrtnje pa tako razlikujemo desnokretne i lijevokretne brodske vijke. Desnokretni se, gledajući iz smjera krme prema pramcu, okreće u smjeru kazaljke na satu, dok se, sukladno tome, lijevokretni vrti u smjeru suprotnom smjeru kazaljke na satu.[3]



Slika 4: Ljevokretni i desnokretni vijak [5]

2.1.3. Geometrija i princip rada broskog vijka

Na slici 5. prikazan je desnokretni broski vijak s 4 krila na čijem se primjeru može lako opisati geometriju vijka.



Slika 5: Dijelovi vijka [1]

Krila vijka (eng. blades) se za glavinu, koja je pričvršćena na samom završetku vratila vijka (eng. propeller shaft), drže svojim korijenom (eng. hub). Os X, koja prolazi središtem vratila vijka na slici te joj je pozitivan smjer od krme prema pramcu, predstavlja os oko koje se cijeli vijak okreće. Kao što je ranije spomenuto prilikom definiranja lijevokretnog i desnokretnog vijka, smjer vrtnje vijka određuje se promatrajući ga s krme, odnosno u pozitivnom smjeru X osi. Potisak broda prema naprijed postiže se ostvarivanjem poriva u smjeru prema krmi.

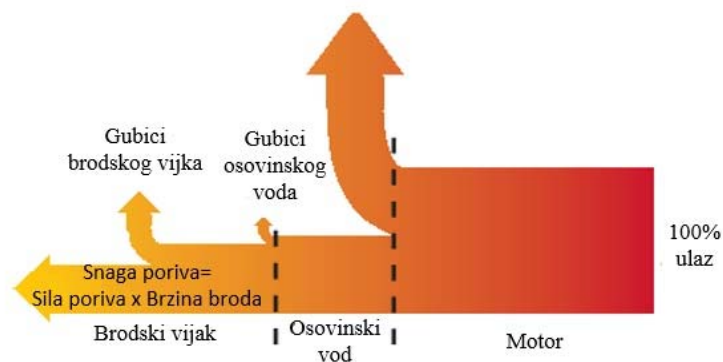
Na točkama u kojima se krila spajaju s glavinom vijka mora se izvesti spoj s postupnim zadebljanjem kako bi se baš na zadebljani dio (eng. fillet area) opterećenje korijena krila (eng. blade root), odnosno krila vijka što bolje raspodjelilo.

Glavinu vijka zatvara poklopac (eng. cap) koji treba biti jako dobro prilagođen strujanju. Nerijetki su slučajevi u kojima proizvođači ugrađuju brodske vijke s oblikom torpeda kako bi postigli bolje strujanje vode iza vijka te poništili negativne vrtloge iza istog. Također postoji i varijanta ugradnje dodatnih krilaca na poklopce kako bi se povećao moment zakreta vijka koristeći dio energije rotacije iz struje iza broskog vijka.

Brid kojim krilo vijka siječe vodu naziva se ulazni brid (eng. leading edge or nose), a brid na stražnjoj strani izlazni (eng. trailing edge or tail). Bridovi se sastaju na vrhu krila (eng. blade tip). Naličje (eng. back) je površina krila koja gleda prema pramcu, a strana vidljiva s krme naziva se lice (eng. face).

Uzevši to u obzir, kada brod plovi naprijed voda mu dostrujava na naličje. U tom slučaju, srednji tlak na naličju je niži, dok je srednji tlak na licu krila viši. Upravo zbog te razlike u tlakovima nastaje poriv. Lice se zbog toga još naziva i tlačnom stranom (eng. pressure side) a naličje usisnom (eng. suction side).[1]

Jedina korisna sila koju vijak stvara svojom vrtnjom naziva se sila poriva. Najjača je po snazi te predstavlja više od 95% energije koju vijak proizvede. Djeluje u smjeru uzdužnice broda te ostvaruje brodsku vožnju. Usisna strana vijka ostvaruje veći dio poriva zbog toga što, dok se vijak vrti, na prednjoj plohi krila dolazi do velikog pada tlaka koji je veći od povećanja tlaka na stražnjoj, tlačnoj strani. Osim sile poriva, koja je najjača, okretanjem vijka na brod djeluju i druge sile čije je djelovanje potrebno poznavati da bi se brodom moglo uspješno manevrirati. Na brodski trup i njegove ostale dijelove djeluje još mnoštvo sila, međutim kada je brodski vijak u pitanju, relativno su male u odnosu na glavnu silu poriva.[3]



Slika 6: Utjecaj sile poriva na snagu propulzije [11]

2.1.4. Korak i skliz brodskog vijka

Jedna od krucijalnih karakteristika brodskog vijka jest njegov korak. On predstavlja linearni pomak koji vijak prođe u jednom punom okretu, tj. okretu za 360°. Korak najviše ovisi o usponu krila te je za veći korak potreban i veći uspon, međutim, brodski vijak nikada nema učinak punog koraka. On bi bio potpun kada bi voda bila čvrst medij, odnosno mogli bi reći da je put jednak koraku pomnoženom brojem okretaja vijka. No kako je voda tekućina, imamo gubitak u koraku.

Upravo taj gubitak naziva se skliz ili slip koji minimalno iznosi 10%. Slip je najveći kada porivni stroj zaveze, a brod još uvijek stoji te tada iznosi 100%. Međutim, kako se postepeno povećava brzina tako se i skliz smanjuje do najmanje vrijednosti koja se postiže pri optimalnoj brzini te pri mirnom moru. Skliz ponajviše ovisi o brzini, broju okretaja vijka, otporu broda, usponu vijka te je manji kod manjeg broja okretaja vijka.

Stvarni koeficijent skliza izračunava se sljedećom jednadžbom :

$$s = \frac{p \times n - V_{\varepsilon}}{p \times n} = 1 - \frac{V_{\varepsilon}}{p \times n} \quad (1)$$

Kao što se vidi iz jednadžbe (1), za izračunavanje stvarnog koeficijenta skliza treba poznavati i koeficijent sustrujanja. U praksi, zbog nepoznavanja istog, često se računa prividni koeficijent skliza:

$$s_A = \frac{\Delta v}{p \times n} = \frac{p \times n \times v}{p \times n} = 1 - \frac{v}{p \times n} \quad (2)$$

gdje je:

Δv – prividna razlika brzina (skliz)

p – korak vijka

n – broj okretaja vijka

v – brzina broda

V_{ε} – stvarna brzina napredovanja brodskog vijka

3. NASTAJANJE ŠUMA BRODSKOG VIJKA I UTJECAJ NA PODVODNI EKO-SUSTAV

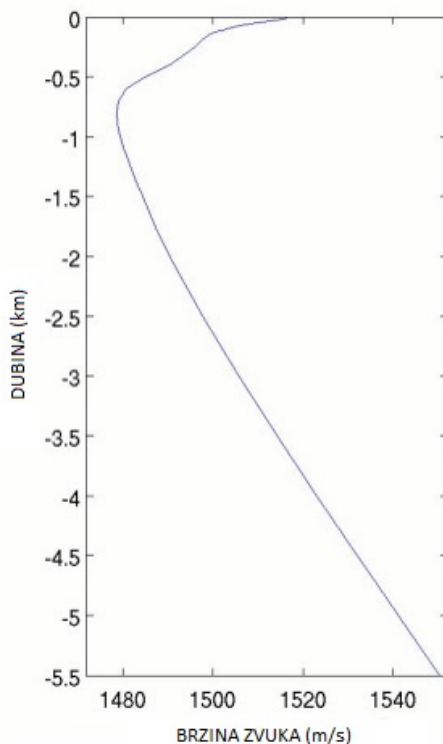
3.1. ŠUM BRODSKOG VIJKA

3.1.1. Brzina zvuka pod vodom

Brzina zvuka u vodi je zapravo longitudinalni val u fluidu, odnosno periodična promjena tlaka koja nastaje zgušnjavanjem i razrjeđivanjem fluida. Brzina širenja vala ovisi o temperaturi, slanosti i dubini mora.

Već je Newton na temelju teorijskih razmatranja matematički izveo izraz za brzinu širenja zvuka u vodi kroz idealnu tekućinu. Time je jakost zvuka određena srednjom snagom koju zvučni val prenosi po jedinici površine okomite na smjer širenja vala.

Uzevši u obzir rečeno, brzina zvuka u vodi na dubini do 100 m čija je temperatura između 7 i 8 °C je oko 1500 m/s ili preko 5000 km/h.[12]



Slika 7: Brzina zvuka u vodi u ovisnosti od dubine [12]

3.1.2. Vibracije

Vibracije se mogu definirati kao gibanje mehaničkih sustava (periodično ili ciklično) oko ravnotežnog položaja koje je uzrokovala vanjska periodična sila ili otklon iz položaja ravnoteže. Riječ dolazi od kasnolatinskog „vibratio“ što znači drhtanje ili treperenje. Kao glavna razlika između vibracija i titranja izdvaja se relativno mali otklon od ravnotežnog položaja kod vibracija u odnosu na titranje.

Iako vibracije mogu, u nekim slučajevima imati pozitivan efekt, najčešće se očituju kao nepoželjna pojava jer mogu biti neugodne i stvaraju buku. Gledajući brod kao primjer, sve vibracije motora ili vibracije bilo kojeg od mehaničkih uređaja u radu su nepoželjne. Upravo na brodu, vibracije najčešće nastaju kao posljedica neuravnoteženih sila glavnog i pomoćnih motora, ali i vrtnjom broskog vijka u nejednolikom polju sustrujanja. Također, osovinski vod koji nije savršeno centriran može biti jedan od izvora brodskih vibracija. Brodske se vibracije, upravo zbog velikog broja izvora, mogu podijeliti na globalne vibracije broskog trupa (torzijske vibracije te fleksijske horizontalne i vertikalne), vibracije strukturnih elemenata (panela, greda i sl.) te vibracije podstruktura, odnosno nadgrađa, paluba, gl. motora osovinskog voda i slično.

Kada je riječ o brodovima za prijevoz putnika, svaka vibracija je nepoželjna jer znatno utječe na udobnost putnika i posade za koju se očekuje da je uvijek na najvišem nivou. Kako bi se vibracije na brodovima svele na minimum, obavlja se mjerenje vibracija najčešće tijekom pokusne plovidbe i to na zahtjev brodo vlasnika. Ukoliko je brod već u službi, mjerenje vibracija se najčešće obavlja zbog utvrđivanja uzroka oštećenja ili čak loma konstrukcije. Kako bi se smanjila razina vibracija, u brodogradnji se nastoji izbjeći rasonanciju uzbudnih sila s prirodnim vibracijama konstrukcije te smanjenjem uzbudnih sila i kompenzatorima vibracija.

Za temu ovog rada, najznačajnije su vibracije uzrokovane radom broskog vijka, odnosno djelovanjem njegovih uzbudnih sila. Kako bi se smanjio intenzitet vibracija broskog vijka, nerijetko se mijenja broj krila vijka te povećava razmak između krila i krmenog dijela broskog trupa.

Također, da bi se smanjile uzbudne sile, vijak treba biti pažljivo uravnotežen, a uspon njegovih krila što izjednačeniji. Kako bi se broskom vijku omogućio slobodan dotok vode i homogenija

raspodjela strujanja, potrebno je već prilikom projektiranja trupa broda na pravi način oblikovati krmeni dio trupa. Također, kako se impulsi vijka ne bi prenosili na samu oplatu, treba dovoljno udaljiti vijak od oplata poštujući propisane minimalne razmake vrha krila vijka i okvira krmene statve. Još jedan od problema vijaka, kada su u pitanju vibracije, je nastajanje pulsirajućih vibracija koje mogu nastati kod brodova s većim brojem vijaka čije brzine nisu potpuno iste. U takvim slučajevima koriste se posebni uređaji za sinkronizaciju brzine vijaka.

Kako bi imali bolje razumijevanje vibracija potrebno ih je raščlaniti na glavnu podjelu. Vibracije tako mogu biti slobodne i prisilne, te svaka od njih može biti sa ili bez prigušenja. Ukoliko se mehanički sustav pokrene nekom početnom silom i pusti da slobodno vibrira bez smetnji govorimo o slobodnim vibracijama.

Do prisilnih vibracija pak dolazi ukoliko se na mehanički sustav primijene vremenski različiti poremećaji (pomak, brzina i sl.).

3.1.2.1. Slobodne vibracije bez prigušenja

Na slici 8 prikazan je model za analizu vibriranja masa – opruga – prigušivač za slobodne vibracije bez prigušenja. Početna pretpostavka je da je prigušenje zanemarivo i da na masu ne djeluje nikakva vanjska sila. Sila kojom masa djeluje na oprugu proporcionalna je količini kojom je opruga rastegnuta "x" (pod pretpostavkom da je opruga već sažeta zbog mase). 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 koja je priložena [9]:

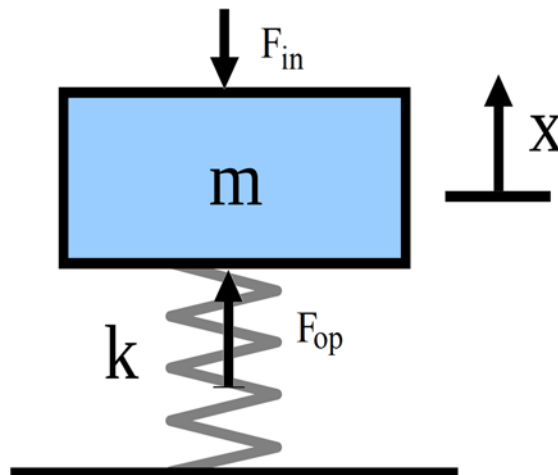
$$F = -kx \quad (3)$$

na masu djeluju sila opruge F_{op} i inercijalna sila F_{in} :

$$F_{op} + F_{in} = 0 \quad (4)$$

diferencijalna jednačba:

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (5)$$



Slika 8: Model za analizu slobodnih vibracija bez prigušenja [9]

3.1.2.2. Slobodne vibracije s prigušenjem

Na slici 9 prikazan je model za analizu vibriranja masa – opruga – prigušivač slobodnih vibracija s prigušenjem. Kada se modelu slobodnih vibracija bez prigušenja doda prigušivač, on 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). Jednadžba dinamičke ravnoteže [9]:

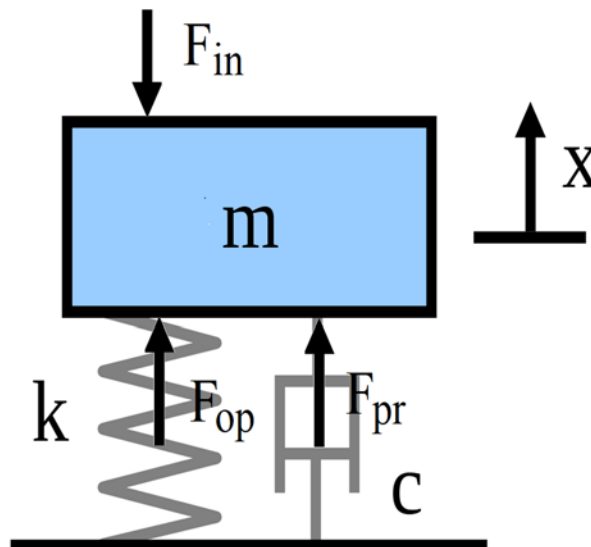
$$-F_{op} - F_{pr} = F_{in} \quad (6)$$

slijedi:

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

diferencijalna jednadžba: [4]

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (8)$$



Slika 9: Model za analizu slobodnih vibracija s prigušenjem [9]

3.1.2.3. Prisilne vibracije bez prigušenja

Na slici 10 prikazan je model za analizu vibriranja masa – opruga – prigušivač prisilnih vibracija bez prigušenja. Djelovanjem sile intenziteta F_o i vlastite frekvencije ω_o na masu koja oscilira nastaju prisilne vibracije. Jednadžba dinamičke ravnoteže [9]:

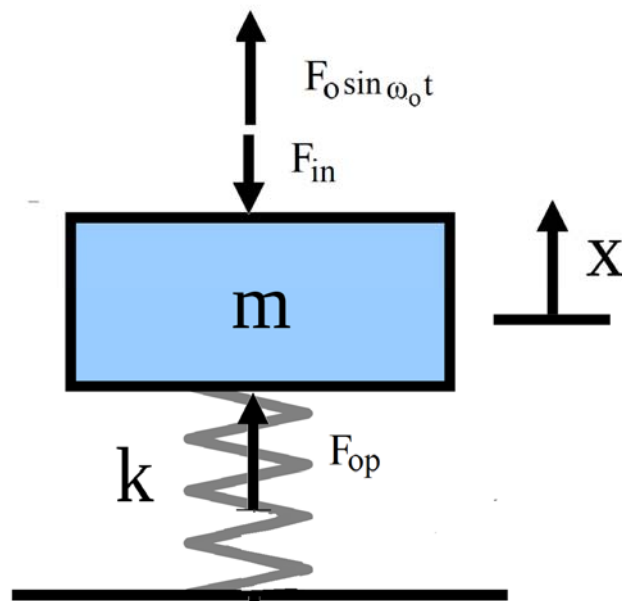
$$F_o \sin \omega_o t - F_{op} = F_{in} \quad (9)$$

slijedi:

$$F_{op} + F_{in} = F_o \sin \omega_o t \quad (10)$$

diferencijalna jednadžba:

$$m\ddot{x} + kx = F_o \sin \omega_o t \quad (11)$$



Slika 10: Model za analizu prisilnih vibracija bez prigušenja [9]

3.1.2.4. Prisilne vibracije s prigušenjem

Ipak, u stvarnosti najčešće nailazimo na prisilne vibracije s prigušenjem. Na slici 11 prikazan je model za analizu vibriranja masa – opruga – prigušivač takvih vibracija. Jednadžba dinamičke ravnoteže [9]:

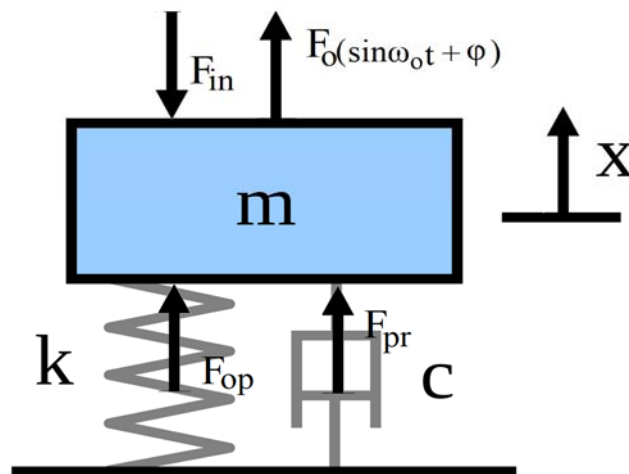
$$F_o (\sin \omega_o t + \varphi) - F_{op} - F_{pr} = F_{in} \quad (12)$$

slijedi:

$$F_{op} + F_{pr} + F_{in} = F_o (\sin \omega_o t + \varphi) \quad (13)$$

diferencijalna jednadžba:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_o (\sin \omega_o t + \varphi) \quad (14)$$



Slika 11: Model za analizu prisilnih vibracija s prigušenjem [9]

3.1.3. Kavitacija broskog vijka

Proces razgrađivanja sloja tekućine u blizini plohe krutog tijela naziva se kavitacija. Pojava nastaje kad u nekim područjima nehomogenog polja brzina tlak padne na vrijednost na kojoj započinje isparavanje tekućine. Prostor razgrađene tekućine ispunjen je plinovima i parama tekućine (vode) koji su otopljeni u tekućini. Mjehurić, nastao na takav način, giba se kroz nejednoliko polje brzina tj. tlakova uzduž vijčane plohe te naglo nestaje, tj. implodira dolaskom u područje višeg tlaka. Pojava implozije uvijek dolazi uz veliko ubrzanje čestica vode koje udaraju u plohu tijela.

Kavitacija počinje kada je lokani tlak na vijku jednak tlaku isparavanja. Lokani tlak izražava se sljedećim bezdimenzionalnim koeficijentom[1]:

$$\sigma = \frac{p-p_v}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (15)$$

gdje je:

σ - kavitacijski broj, ili bezdimenzionalni koeficijent kavitacije

p - tlak na mjestu osovine vijka

p_v - tlak isparavanja (ovisi o temperaturi vode)

ρ - gustoća vode

V - brzina strujanja vode

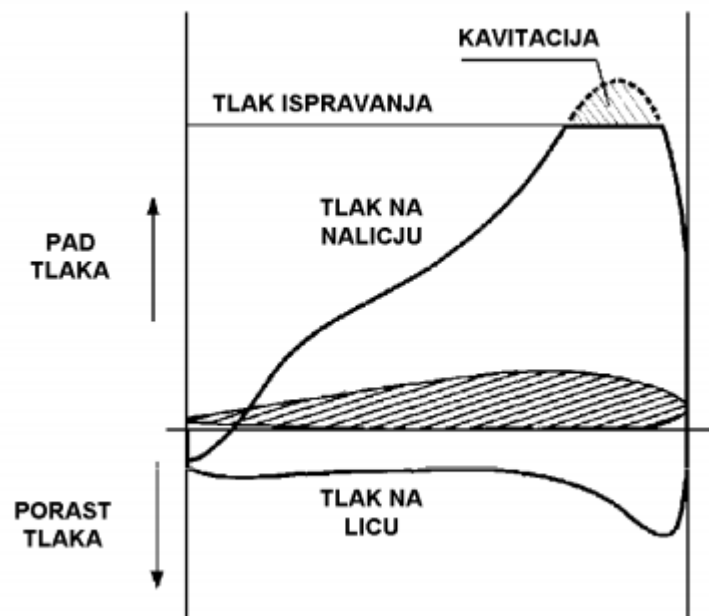
Kavitacijski broj je bezdimenzionalan kako bi se rezultate lakše primjenjivalo na stvarni brod. Ovim brojem određuje se vrijednost tlaka u kavitacijskom tunelu, koji će kasnije biti detaljnije opisan.

Kod visoko opterećenih vijaka, tj. vijaka koji daju jako veliki poriv, najveći je rizik od nastanka kavitacije. On je načelno manji ako se na krmu broda ugrade dva ili više vijaka, umjesto jedno. Kavitacija nastaje iznad određenog broja okretaja kada nastupa gubitak poriva uslijed razgrađivanja tekućine. Kao krajnja posljedica kavitacije, može doći do nemogućnosti postizanja određene brzine broda. Ali, kavitacija se prethodno dijagnosticira kroz vibraciju, šum, buku i eroziju vijčanih krila.

Nekad su se problemi kavitacije odnosili samo na brodove velike brzine, ali kako su s vremenom brzine i snage rasle tako su i kavitacijski efekti postali sve izražajni. To se pogotovo

manifestira kod jednovijčanih brodova s velikom snagom propulzije. Kod takvih je brodova izražena značajna promjenjivost polja brzina unutar vijčane plohe koja pogoduje kavitaciji pa je stoga potrebno posebno pripaziti na udaljenosti površine vijka od trupa i na efekte preopterećenja vijka u plovidbi po uzburkanom moru. Danas se, bez obzira o vrsti i namjeni broda, problem kavitacije mora sagledati za sve brodske vijke. [5]

Na slici 12. prikazana je raspodjela tlakova na jednom dijelu presjeka kavitirajućeg krila. Na slici se vidi da je tlak na naličju krila u blizini ulaznog brida pao ispod tlaka isparavanja vode, što ima za posljedicu kavitaciju na tom mjestu. Posljedica kavitacije je erozija, dakle istrošenje krila na tom mjestu.



Slika 112: Profil krila s lokalnom kavitacijom [1]

Smanjenjem uspona vijka povisiti će se apsolutni tlak na naličju, a da bi se postigao isti poriv morati će se povećati ukupna površina krila. Budući da otpor trenja raste s oplakanom površinom, veća površina krila biti će uzrok smanjenju iskoristivosti vijka. Međutim, u ovom slučaju to je nužan kompromis kako bi se izbjegla kavitacija.

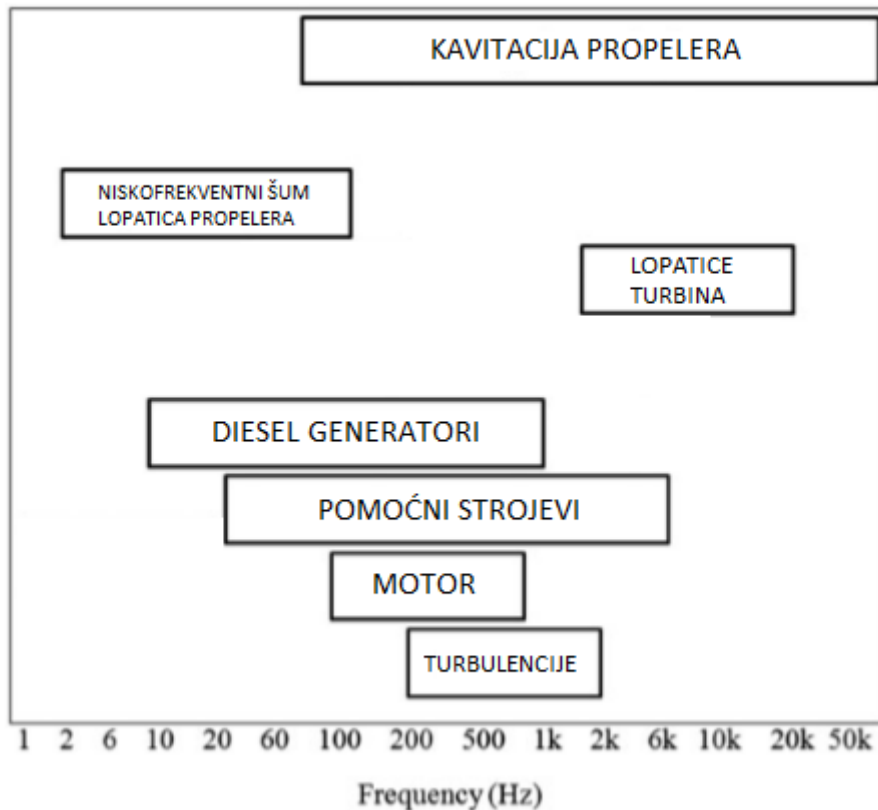
3.1.4. Nastanak šuma brodskog vijka

Na brodovima općenito postoje dva glavna izvora buke: jedan je zbog mehaničkih elemenata poput motora, a drugi je hidrodinamički, tj. brodski vijak. Buka koju vijci generiraju u smislu intenziteta i spektra, strateško je pitanje ratnih brodova i vojnih dizajnera tijekom godina pošto se stvoreni zvuk može se čuti stotinama metara ispod površine, a može ga otkriti i sonar. U procesu projektiranja brodskog propelera, koliko je to moguće, razina buke trebala bi biti minimalna.

Buka propelera obično uključuje niz periodičkih tonova nastalih brzinom vrtnje krila propelera te na njemu nastalim pojavama te promjenama. Te periodične sile i promjene stvaraju tonski šum na frekvenciji prolaska oštrice, zajedno sa širokopoljnim spektrom buke uzrokovane interakcijom turbulencije s osipanjem oštrice i vrtloga na zadnjem rubu i vrhovima te zbog djelovanja kavitacije.

Kada brod plovi naprijed, trenje trupa stvorit će granični sloj vode oko trupa. To rezultira time da brodski vijak iza trupa radi u neujednačenom protoku vode koji se naziva „wake“. Vrtanja brodskog vijka u takvom režimu pospješuje nastanak kavitacije na rubovima i vrhovima krila vijka[7].

U buci brodskog vijka postoji širok raspon frekvencija (niskih i visokih). Frekvencijsko područje prikazuje raspon frekvencija podvodne buke na slici 13 te se buka brodskog vijka može se klasificirati u tri kategorije: harmonični šum, širokopoljasi šum i nasumični šum.



Slika 123: Raspon frekvencija podvodne buke [7]

Harmonični šum je periodična komponenta koja se može predstaviti impulsom koji se ponavlja konstantnom brzinom. Širokopoljasni šum je slučajne prirode i sadrži komponente na svim frekvencijama dok je nasumični slučajni šum gotovo periodičan. Međutim, ispitivanje harmonika otkriva da energija nije koncentrirana na izoliranim frekvencijama, već je raširena.

Mehanizmi koji dovode do stvaranja gore spomenutih spektralnih karakteristika opisani su u četiri kategorije: stalni izvori, nestalni izvori, slučajni izvori i nelinearni učinci.

Stalni izvori promatraču izgledaju konstantno u vremenu na rotirajućoj oštrici i proizvode periodični šum zbog svoje rotacije te uključuju tri komponente: linearna debljina, linearno opterećenje i (nelinearni) kvadrupol.

Šum debljine proizlazi iz poprečnog periodičnog pomicanja vode za volumen elementa krila koji prolazi. Amplituda ove komponente šuma proporcionalna je volumenu krila, a frekvencijske karakteristike ovise o obliku presjeka krila i brzini rotacije. Šum debljine može se predstaviti raspodjelom izvora na monopole i postaje važan pri velikim brzinama. Za kontrolu te buke koriste se tanki dijelovi krila i unaprijed planiran način pomaka.

Šum pri opterećenju kombinacija je dijelova potiska i momenta (ili podizanja i povlačenja) koji proizlaze iz tlačnog polja koje okružuje svaku oštricu kao posljedica njenog kretanja. Taj poremećaj tlaka koji se kreće u mediju širi se kao buka ili šum. Za umjerenu brzinu vrtnje, gledajući presjek krila, debljina i izvori opterećenja su linearni i djeluju na površine krila. Za brodski vijak velike brzine nelinearni efekti mogu postati značajni. U hidroakustičkoj teoriji ti se izvori mogu modelirati s izvorima kvadrupola raspoređenim u volumenu koji okružuje krila. U principu, kvadrupol bi se mogao koristiti za obračun svih viskoznih i širećih učinaka koji nisu pokriveni izvorima debljine i opterećenja. Pri velikim brzinama presjeka krila, kvadrupol povećava linearnu debljinu i izvore opterećenja i uzrokuje povećanje buke za brodske vijke.

Nestalni izvori ovise o vremenu u referentnom okviru rotirajuće krila i uključuju povremene i slučajne promjene opterećenja na krilima. Na primjer, za brodski vijak iza krmenog „wake“-a, bez obzira na broj krila na vijku, opterećenje krila varira tijekom okreta. Nestalni slučajni izvori stvaraju širokopojasnu buku.

Za brodske vijke postoje dva izvora širokopojasne buke koja mogu biti važna, ovisno o izvedbi vijka i uvjetima rada. Prvi izvor širokopojasne buke je interakcija ulazne turbulencije s prednjim rubovima krila. Budući da je dotok turbulentan, rezultirajući šum je slučajan. Važnost ovog izvora buke ovisi o veličini ulazne turbulencije, ali može biti prilično značajna u uvjetima velike turbulencije pri malim brzinama.

Drugi način stvaranja širokopojasne buke događa se kada se šum stvara u blizini zadnjeg ruba krila. Tipični vijak razvija turbulentni granični sloj preko površina krila, što može rezultirati promjenom opterećenja krila na zadnjem rubu. Buku karakteriziraju svojstva graničnog sloja iako je utvrđeno da su za brodske vijke izvori širokopojasne buke relativno nevažni i da značajno ne doprinose ukupnoj šumnosti.[7]

Najveći udio u emitiranju buke zauzima kavitacijska buka broskog vijka nastala zbog neuglađenih i neravnomjernih površina krila kao i zbog oštećenja rubova koji su posljedica konstantnih udara dijelova krila s mjehurićima zraka nastalih kavitacijom. Upravo je šum koji proizvodi brodski vijak u kavitacijskom režimu rada najneugodniji za okoliš te je često opisan kao zvuk bacanja pijeska pod oplatu broda. Također taj šum je najnepogodniji za podvodni ekosustav jer visokofrekventni šumovi ometaju međusobnu komunikaciju podvodnog svijeta.[4]



Slika 134: Posljedice kavitacije na brodskom vijku [13]

U relativno rijetkim slučajevima javlja se i takozvano „pjevanje“ brodskog vijka, odnosno pojava koju uzrokuje ispuštanje vrtloga s vrha propelera i vanjskog zadnjeg ruba, što tada može pobuditi visokofrekventne rezonancije krila. Pjevanje propelera, međutim, brodskoj posadi toliko je iritantno da se na sljedećem pristajanju na suhom, ili pak na posebnom pristajanju ako je buka prenametljiva, naprave male preinake na zadnjim rubovima krila propelera kako bi se uklonio izvor buke koja se često čuje kao pjevušenje ili zvonjenje vinske čaše.

3.2. UTJECAJ ŠUMA BRODSKOG VIJKA NA PODVODNI EKO-SUSTAV

Na 58. zasjedanju Odbora za zaštitu morskog okoliša Međunarodne pomorske organizacije, Sjedinjene Američke Države podnijele su prijedlog programa rada. Program je bio usmjeren na promicanje djelovanja kako bi se smanjilo slučajno unošenje buke iz komercijalnih brodarskih poslova u morski okoliš kako bi se smanjili potencijalni štetni utjecaji na morski život.

Spomenuto je da se značajan udio antropogene buke koja ulazi u oceane može pripisati sve većem broju i veličini komercijalnih brodova koji djeluju na širokim geografskim područjima svijeta. Štoviše, tvrdio je da buka koju generiraju ti izvori može poremetiti ponašanje i ključne životne funkcije morskih sisavaca i ostalih morskih životinja. U dubokom oceanskom okruženju postoje dokazi koji ukazuju na to da se razina buke povećala posljednjih godina.

Signali buke koje emitiraju brodovi su promjenjivi. Oni se, između ostalih čimbenika, razlikuju prema vrsti i starosti broda, brzini broda i vrsti pogona. Stvarni potpis broda, međutim, znatno varira ovisno o snazi potrebnoj za pokretanje broda i tipu broskog vijka. To zauzvrat utječe na protok i razvoj kavitacije krila propelera. U slučaju, primjerice, krstarenja, ukupna razina zvuka broda može se povećati između 6 i 12% kada brod poveća brzinu sa 10 na 20 čvorova. U literaturi se upravo buka propelera često navodi kao glavni izvor emisije buke s brodova. [4]

3.2.1. Morski sisavci

Morski sisavci evoluirali su od kopnenih životinja, čineći prijelaz iz kopna u vodu prije otprilike 55 milijuna godina i prilagodili se iskorištavanju dubokih oceana tijekom razdoblja od 15 milijuna godina. Evolucijski proces donio je prilagodbe njihovim dišnim i slušnim sustavima, strukturu udova i dodatne specijalitete za druge dijelove tijela.

Pojam fonacija koristi se za opisivanje zvukova koje proizvode morski sisavci, jer se neki zvukovi morskih sisavaca ne proizvode u grkljanu, na način na koji ljudi proizvode govor. Za većinu morskih sisavaca sluh i zvuk važni su iz više razloga:

- Komunikacija i socijalno ponašanje
- Eholokacija
- Traženje hrane
- Navigacija
- Ukupna svijest o svom okruženju
- Roditeljska skrb
- Reprodukција
- Izbjegavanje grabežljivaca.

Morski sisavci u osnovi imaju istu strukturu uha kao i kopneni sisavci, iako je to prilagođeno vodenom okolišu. Uz to, smatra se da mozak morskih sisavaca obrađuje zvuk na isti način kao i čovjek. Uši nisu jedina potencijalno osjetljiva struktura morskih sisavaca na koju bi zvuk mogao utjecati. U osnovi, svaki zračni prostor u tijelu može biti podložan pritiscima i zvučnim efektima. Iako je uho očiti kandidat, treba uzeti u obzir i druge zračne prostore poput pluća, dišnih putova i sinusa. Na primjer, zvučno inducirana rezonancija u plućima ljudskih ronilaca može biti potencijalno štetna, a to je dokazano na frekvencijama od oko 70 Hz. Uz to, pretpostavlja se da kod kitova postoji više od jednog puta do unutarnjeg uha. Postoje značajni dokazi koji upućuju na to da se zvukovi visoke frekvencije kanaliziraju kroz provodna tkiva koja se nalaze u donjoj čeljusti kitova, posebno za eholokaciju. Kostí donje čeljusti obično sadrže mandibularne masti, koje su dobri vodiči zvuka i impedancije prilagođene životu pod vodom. Međutim, zvukovi niže frekvencije vjerojatno slijede uobičajeniji put prijenosa u srednje i unutarnje uho.

Relativno je lako pomoću hidrofona izmjeriti prividni opseg komunikacije između morskih sisavaca iste vrste. Ono što je neizvjesno jest stvarna širina sluha svake od vrsta i može li unutar tog šireg raspona nevolju uzrokovati podvrgavanje određenim frekvencijama i amplitudama buke. Poznato je da se u određenim okolnostima neki morski sisavci nerado približavaju određenim velikim brodovima, ali je li to zbog uzrokovane buke ili prirodne nesklonosti da se previše približe nekom drugom neprepoznom velikom pomičnom pomorskom objektu, opet nije jasno. Suprotno tome, čini se da drugi manji morski sisavci (obično dupini, pliskavice i kitovi ubojice) uživaju u prisutnosti broda jer ih se često može vidjeti u društvu brodova na relativno malim udaljenostima. Kao takvi, u ovim kasnijim slučajevima čini se da im emisije buke s brodova nisu previše uznemirujuće.

Iako se malo zna o slušnim pragovima i audiogramima za veće sisavce, za manje morske sisavce dostupna je informacija jer se njima može lakše rukovati i podvrgnuti eksperimentiranju. Za morske sisavce audiogram je tipično u obliku slova U podrazumijevajući da je na gornjim i donjim frekvencijskim krajevima područja sluha sluh manje osjetljiv nego u sredini frekvencijskog područja. Takva slušna osjetljivost slična je onoj kod ljudi te takav nalaz ne iznenađuje zbog sličnosti građe uha kod ljudi morskih sisavaca.

U slučaju do danas proučavanih morskih sisavaca čini se da ovaj općeniti obrazac vrijedi, iako se rasponi učestalosti i osjetljivosti razlikuju između različitih frekvencija morskih sisavaca. Također se mora primijetiti da su mehanizmi za emitiranje i primanje različitih vrsta signala vjerojatno različiti i, štoviše, vjerojatno postoji interval unutar spektra između te dvije vrste signala. Iako se unutar raspona povezanih s različitim vrstama, iz dostupnih audiograma mogu napraviti neke procjene za područja posebne osjetljivosti, takav široki raspon jasno obuhvaća frekvencijski raspon koji emitiraju brodovi. Kao što je zabilježeno u dosadašnjim istraživanjima, stvarni opseg spektra buke broskog vijka prilišno je velik i proteže se do 100 kHz i šire, iako uz smanjenu razinu buke. Uz to, pogonski agregati emitiraju buku niske frekvencije do prve frekvencije brzine krila i niže. Iako su ove frekvencije obično ispod praga ljudskog sluha, mogu graničiti s donjim krajem frekvencijskog raspona koji koriste kitovi.

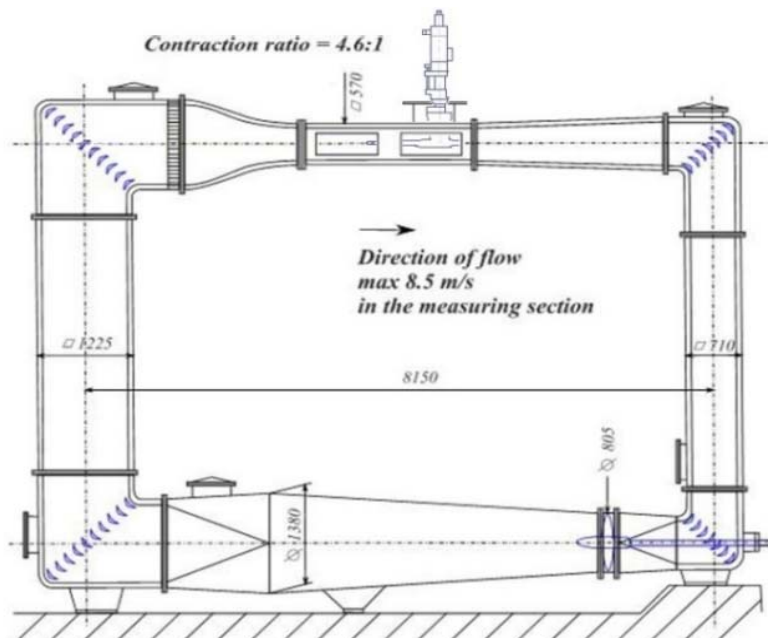
Što se tiče doprinosa kavitacije tim spektrima emisije buke, posljednjih je godina poduzet značajan rad, kako u pomorskim tako i u trgovačkim brodskim zajednicama. Potreban je značajan daljnji rad u punom opsegu na promatranju kavitacijskih struktura na brodskim vijcima, jer se zbog učinaka razmjera te strukture uglavnom razlikuju od predviđanja na mjerilima modela. Jedan takav projekt izveden je upravo s ciljem utvrđivanja raspodjele tlaka na krila vijka i šuma nastalog njegovom vrtnjom te smanjenjem buke s brodova kako bi se zaštitio podvodni eko-sustav.[8]

4. EKSPERIMENTALNO MJERENJE RASPODJELE TLAKA NA KRILA VIJKA I ŠUMA VIJKA

AQUO (Achieve QUIeter Oceans) je istraživački projekt podržan od strane Europske komisije koji je za cilj imao procijeniti i ublažiti utjecaj buke pomorskog prometa na morski okoliš. Upravo su se unutar eksperimentalnog mjerenja neke od točaka ispitivanja odnosile na raspodjelu tlaka na krila brodskog vijka te predviđanje i smanjenje buke s brodova izazvane radom samog vijka.

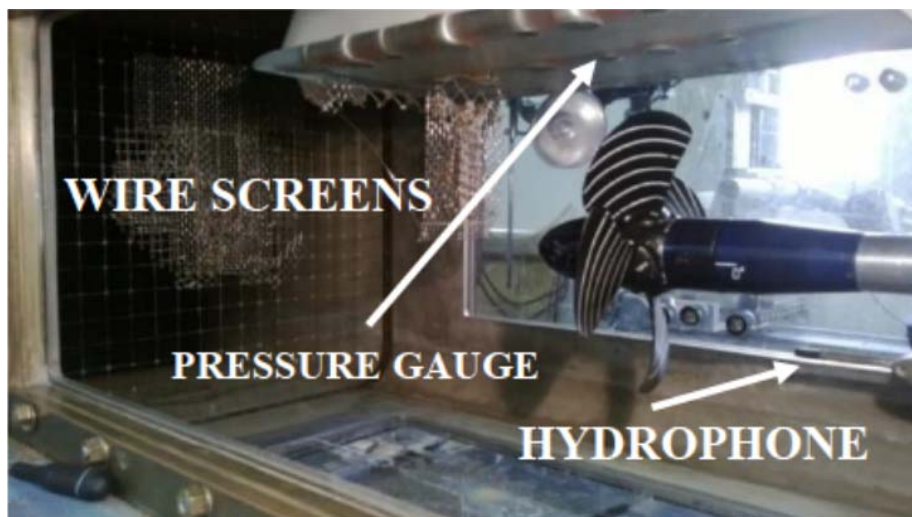
4.1. ISPITIVANJA U LABORATORIJSKIM UVJETIMA

Eksperiment se odvio u kavitacijskom tunelu smještenom na Sveučilištu u Genovi. Kavitacijski tunel bio je Kempf & Remmers s kvadratnim presjekom 0.57m x 0.57m, ukupne duljine 2m. Tunel, prikazan shematski na slici 15 bio je opremljen Kempf & Remmers dinamometrom koji je mjerio potisak propelera, okretni moment te okretaje u minuti.



Slika 145: Kavitacijski tunel na Sveučilištu u Genovi [4]

Testovi su izvedeni održavajući sadržaj kisika na oko 40% vrijednosti zasićenja pri atmosferskom tlaku. Prethodna numerička istraživanja pomogla su znanstvenicima da u kavitacijskom tunelu postignu uvjete što sličnije pravim uvjetima plovidbe kako bi svi rezultati, a pogotovo oni o kavitaciji vijka, bili što točniji. Pošto je eksperiment ograničen dimenzijama kavitacijskog tunela, nije bilo moguće usvojiti model trupa, pa je nepravilan protok vijka bio simuliran pomoću žičanih mreža postavljenih uzvodno od vijka te određenim nagibom vijka u kavitacijskom tunelu. Kavitacijski testovi, kao i obično, uključivali su mjerenje početne vrijednosti za sve tipove kavitacije koje se javljaju na brodskom vijku. Promatranje kavitacije provedeno je i vizualno pomoću tri Allied Vision Tech Marlin F145B2 Firewire kamera, rezolucije 1392x1040 piksela. Eksperimentalne postavke još su uključivale i uređaje za mjerenje tlaka na krilima vijka te nastale buke. Konkretno, iznad vijka postavljena je ravna ploča s finim rubovima opremljena senzorom diferencijalnog tlaka koja je trebala simulirati prisutnost krmenog dijela broda iznad vijka kako bi se dobili rezultati vezani uz tlak na brodskom vijku. Također, postavljena su i dva hidrofona za mjerenje nastale buke – Reson TC4013 i Bruel and Kjaer 8103 zajedno sa Bruel and Kjaer pojačalima. Hidrofoni su postavljeni na dva prilično različita položaja; jedan unutar, a drugi izvan kavitacijskog tunela, točno ispod vijka. [4]



Slika 156: Ekran kavitacijskog tunela UNIGE [4]

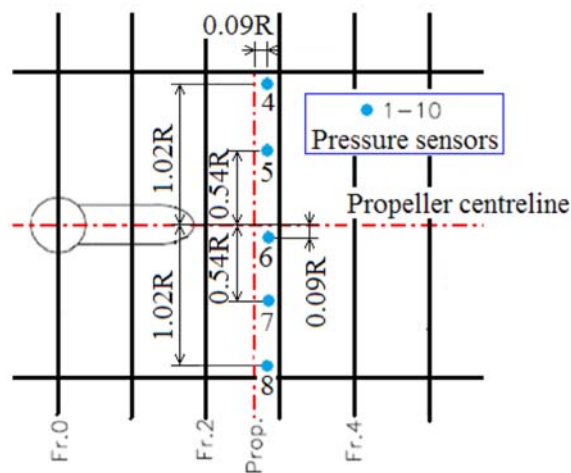
4.2. ISPITIVANJA NA MORU

Projekt AQUO uključivao je i ispitivanja na moru usmjerena na predviđanje i kontrolu buke i šuma s brodova. Ispitivanja su izvedena na obali Baltičkog mora kod poljskog Dziwnowa koristeći brod RV Navigator XXI dužine 60.3m. Brod je opremljen jednim CPP vijkom s četiri krila i promjerom 2.26m. Brodski vijak pokreće 4-taktni dizel motor sa sedam cilindara.



Slika 167: CPP propeler s broda RV Navigator XXI [4]

Prilikom eksperimenta, glavni parametri, okretaji u minuti i nagib vijka mjereni su zajedno s brzinom broda te njegovim položajem i smjerom. Mjerenja su uključivala vibracije trupa i strojeva, impulse tlaka inducirane vrtnjom vijka te nastali šum, odnosno buku. Tlak je mjereno na pet mjesta, vidljivih na slici 18.



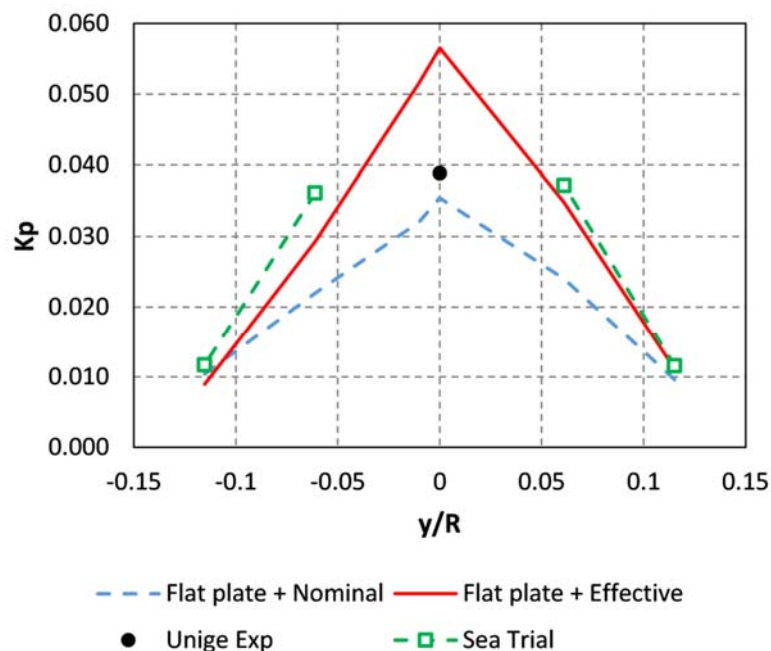
Slika 178: Senzori tlaka označeni brojevima 4-8 [4]

Nažalost, rezultati nisu dobiveni sa senzora 6, zbog kvara istog. Za mjerenje šuma brodskog vijka korištena su tri hidrofona postavljena na dubinu od 5, 10 i 15m dubine. Razlog postavljanja više hidrofona na različite dubine je pokušaj ublažavanja, tj. pronalaska srednje vrijednosti signala zvuka zbog moguće vertikalne usmjerenosti izvora te Lloydovog zrcalnog učinka. Snimljeni signali kasnije su obrađeni za dobivanje spektrograma.[4]

4.3. REZULTATI

Rezultati mjerenja prikazani u ovom odjeljku prikazuju rezultate dobivene mjerenjima u kavitacijskom tunelu Sveučilišta u Genovi te ispitivanja na moru pri brzini broda od 12 čvorova i brodskim vijkom na određenom nagibu.

Što se tiče rezultata mjerenja raspodjele tlaka na brodskom vijku, treba napomenuti da su mjerenja na moru provedena na nešto drugačijem uzdužnom položaju u odnosu na onaj koji se mjerio u kavitacijskom tunelu. Usporedba mjerenja u različitim uvjetima vidljiva je na slici 19.

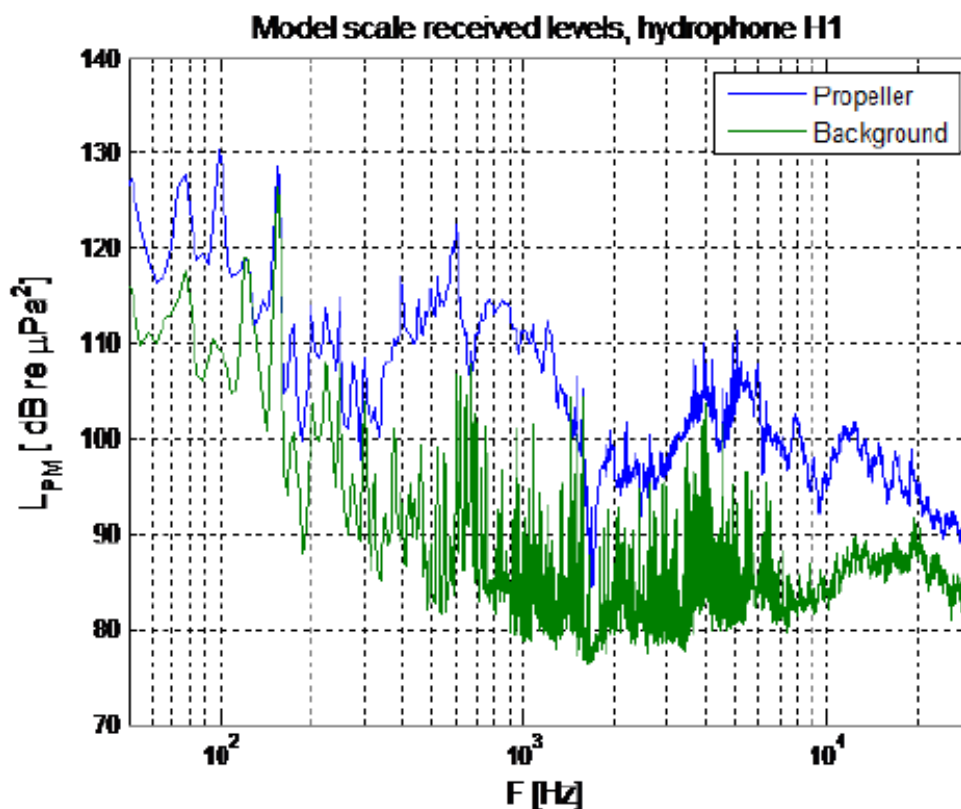


Slika 189: Usporedba predviđenog i izmjerenog tlaka (prvi harmonik) u kavitacijskom stanju na poprečnom presjeku u odnosu na disk vijka [4]

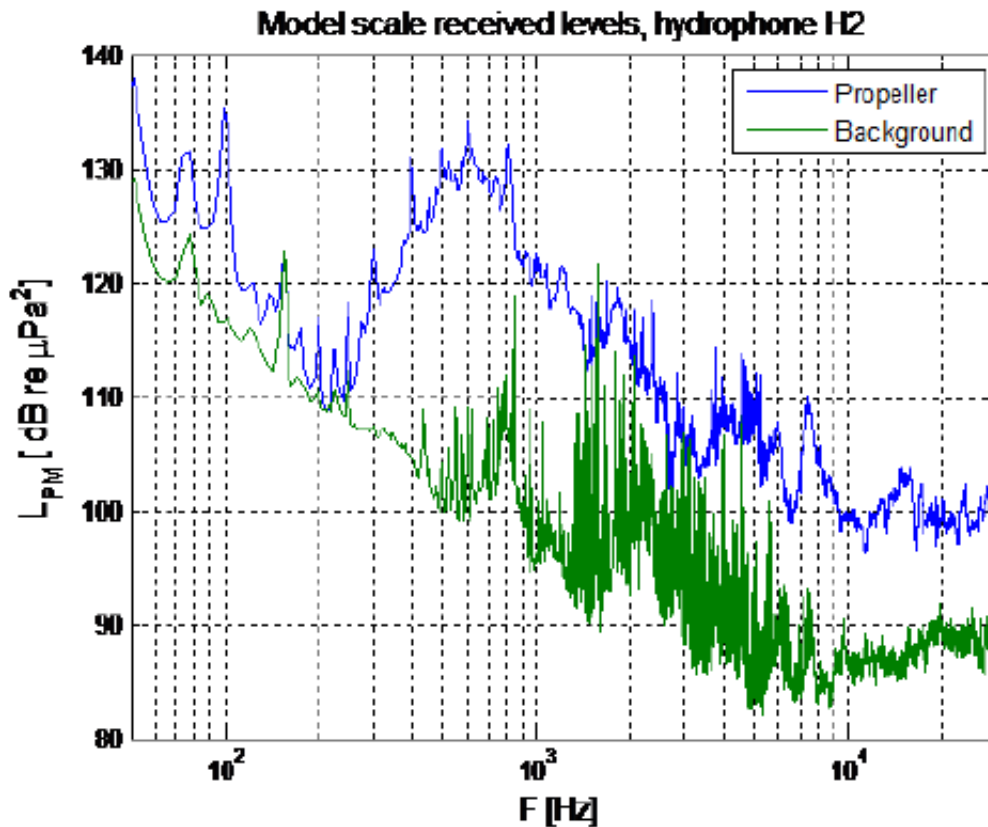
Nažalost, kako je već napomenuto, nedostaje potpuni rezultat ispitivanja na moru zbog spomenutog kvara senzora, iako je vidljivo da se mjerenja na moru u velikoj mjeri slažu s predviđenim rezultatima pri određenim uvjetima. Slična situacija je i sa harmonicima višeg reda.

Ono što je važnije za temu ovoga rada jesu rezultati mjerenja šuma i buke nastali vrtnjom broskog vijka.

Jedan od glavnih problema pri ispitivanju buke u kavitacijskim tunelima je omjer signala i šuma. Međutim, u sklopu mjerenja u kavitacijskom tunelu na Sveučilištu u Genovi iz slika 20 i 21 je vidljivo da je taj omjer prilično dobar za oba hidrofonta za frekvencije iznad 200Hz, pogotovo ako pozornost usmjerimo na kontinuirani dio spektra.

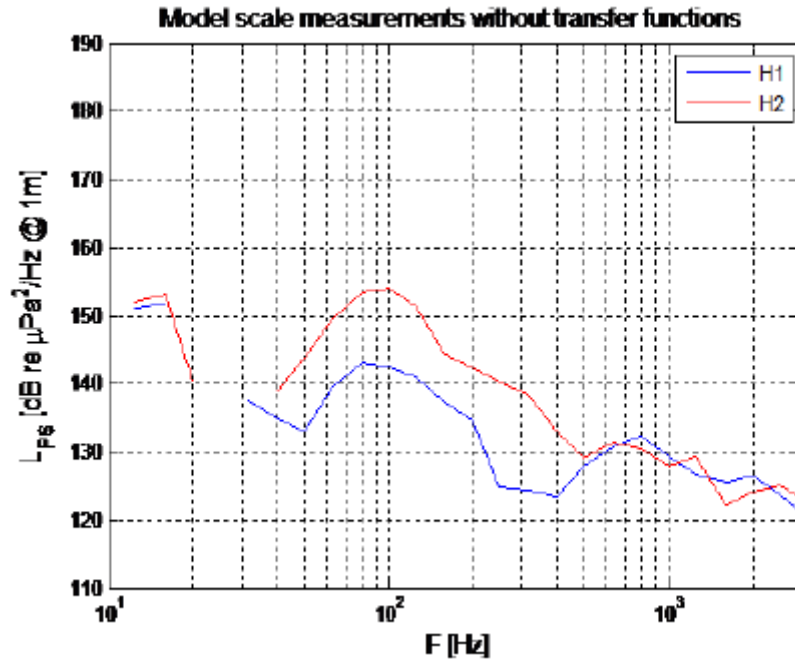


Slika 20: Rezultati mjerenja u kavitacijskom tunelu, hidrofon 1 [4]

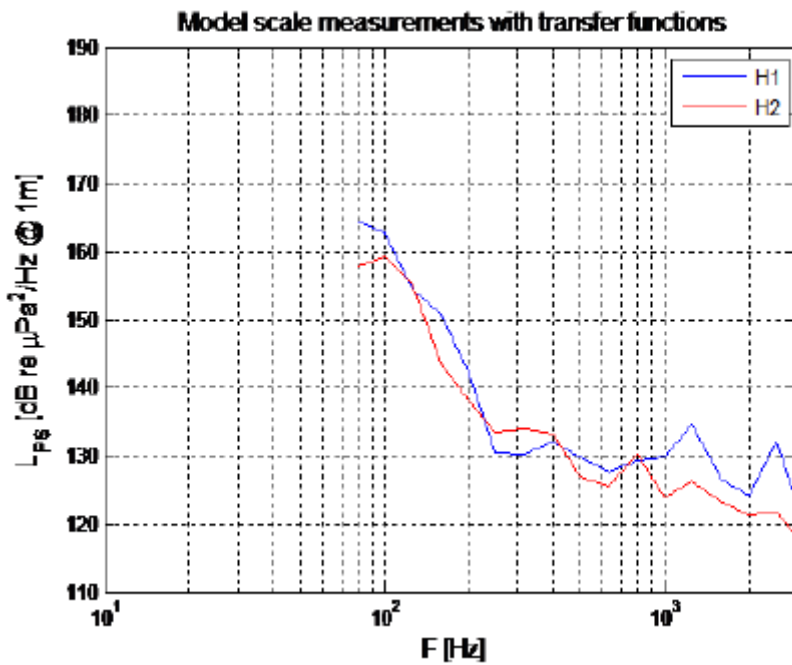


Slika 191: Rezultati mjerenja u kavitacijskom tunelu, hidrofon 2 [4]

Iako, pomno gledajući, spektri dva hidrofona prilično su različiti, uglavnom zbog razlika u širenju šuma. Zbog svog položaja, spektri buke mjereni hidrofonom 1 (smještenim u vanjskom spremniku, izvan kavitacijskog tunela) značajno se razlikuju u odnosu na one izmjerene u hidrofonom 2 (smještenom izravno u tunelu) na koje, međutim, još uvijek utječu efekti zatvorenog okruženja. Prilikom mjerenja buke dobivene vrtnjom brodskog vijka, ta pojava je vrlo poznati problem. Konkretno, problem predstavlja prisutnost stijenci tunela zbog kojih dolazi do odbijanja zvuka te radi toga dobivamo rezultate koji se mogu uvelike razlikovati od realnih. Upravo zbog toga prijenosnim funkcijama se ispravljaju mjerenja prije prikazivanja rezultata. Na slikama 22 i 23 vidljiva je razlika prije i poslije korištenja prijenosnih funkcija.



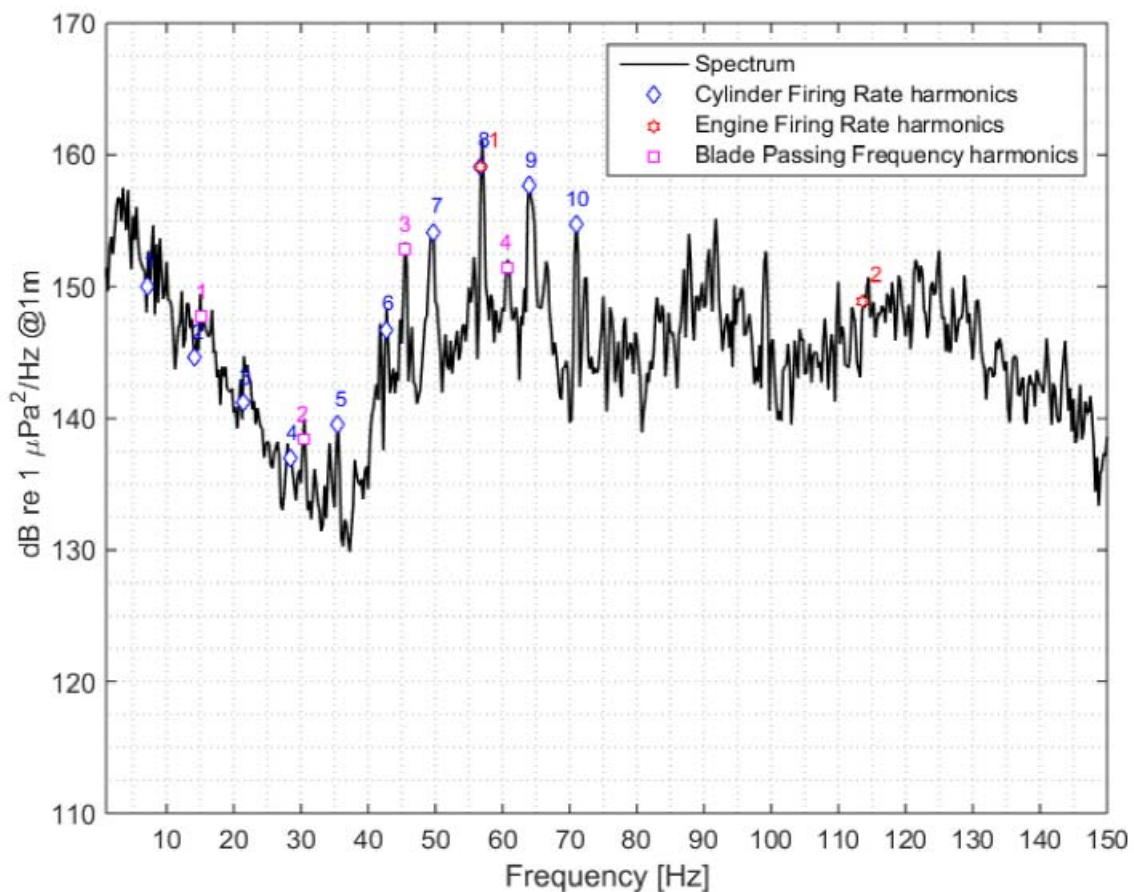
Slika 22: Rezultati mjerenja prije korištenja prijenosnih funkcija [4]



Slika 203: Rezultati mjerenja nakon korištenja prijenosnih funkcija [4]

Na slikama vidimo i da korekcija prijenosnim funkcijama gotovo eliminira razlike između mjerenja dva hidrofona različitih konfiguracija, unatoč velikim razlikama u početku. Zahvaljujući tome konačni rezultat može se dobiti računanjem prosjeka spektara dva hidrofona.

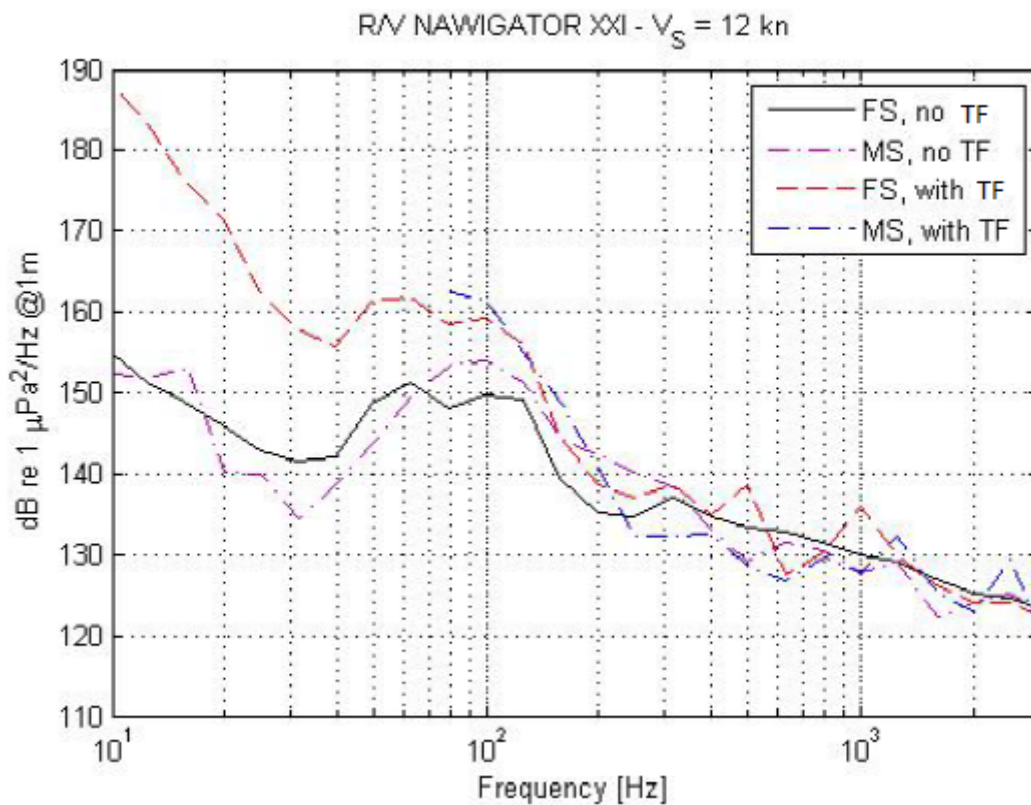
Kada spomenemo rezultate mjerenja buke mjerene na moru, treba napomenuti da je ukupna emisija buke rezultat preklapanja mnogih različitih izvora kao što su brodski vijak, strojevi te strujanja oko trupa. Buka protoka važna je za velike brzine, stoga u ovom slučaju ima vrlo slab utjecaj jer je brod plovio pri 12 čvorova. Kavitacijska buka broskog vijka predstavlja glavni doprinos ukupnoj buci s broda i odgovorna je za širokopoljasnu buku na cijelom frekvencijskom području, što i vidimo na slici 24.



Slika 214: Rezultati mjerenja u području 1-140Hz sa označenim tonskim komponentama motora i broskog vijka [4]

Buka koju stvara brodski vijak predstavlja dvije glavne komponente – tonske komponente povezane s prolaznom frekvencijom krila i širokopojasnu buku sa karakteristikama koje ovise o vrsti kavitacije koja se javlja na vijku.

Na kraju, prateći sliku 25 možemo usporediti rezultate dobivene mjerenjima u kavitacijskom tunelu s rezultatima dobivenim na moru.



Slika 225: Usporedba rezultata mjerenja u kavitacijskom tunelu i na moru [4]

Sa slike možemo primjetiti da je utjecaj korekcija prilično očit, pogotovo na niskim frekvencijama. Nadalje, dvije modificirane krivulje izgledaju vrlo slično, smanjujući početne razlike i povećavajući u oba slučaja maksimalne razine buke. Treba napomenuti i da se vrlo dobro podudaranje ove dvije krivulje ne može smatrati standardom već se obično mogu očekivati odstupanja od oko 5-10dB.[4]

4.4. PREPORUKE ZA SMANJENJE ŠUMA BRODSKOG VIJKA

Kao što je već utvrđeno, kavitacijska buka broskog vijka glavni je izvor podvodne buke. IMO preporučuje da broski vijci budu projektirani na način da smanje kavitaciju odgovarajućim odabirom promjera vijka, broja krila i nagiba.

Također, oblik trupa broda i rezultirajuća brazda utječu na performanse broskog vijka i rezultirajuću proizvodnju buke. IMO preporučuje da se zajedno razmotre dizajn trupa i vijka kako bi se postiglo smanjenje buke. Na primjer, trupovi se mogu projektirati i mogu se dodati konstrukcije kako bi se dobila jednolika brazda.

Možemo reći i kako je jedna od preporuka i smanjenje brzine plovidbe broda. Naime, kako bi pomogli u donošenju odluka o buci plovila I NP Glacier Bay na Aljasci, znanstvenici su došli do zaključka da je efektivnije ograničiti brzinu kruzera u zaljevu nego ograničiti broj kruzera. Redovito čišćenje vijka kojim se uklanja morska prljavština i smanjuje hrapavost površine što u konačnici rezultira smanjenjem kavitacije broskog vijka također je jedna od opcija.[10]

5. ZAKLJUČAK

U radu su, osim osnovnih karakteristika brodskog vijka prikazane nuspojave nastale njegovom vrtnjom, koje u velikoj mjeri negativno utječu kako na brod i posadu(i putnike), tako i na podvodni svijet oko sebe. Razni projekti i istraživanja provedeni su s ciljem da više saznaju o prirodi nastanka buke koja je u podvodni svijet emitirana s brodova, a pogotovo radom brodskog vijka. Raznim mjerenjima i eksperimentalnim metodama, znanstvenici su dobili bliži uvid u pojavu nastanka buke s brodova te su zahvaljujući tome donijeli neke ideje, odnosno preporuke za smanjenje emitirane buke s brodova.

Nažalost, do današnjeg dana zbog nedostatka znanja i manjka tehnologije još uvijek ne postoji konačno rješenje kojim bi se buka brodskih sustava, a poglavito brodskog vijka smanjila na sami minimum.

Znanstvenici, kao i svi koji se bave ovom problematikom, smatraju da će se još većim brojem istraživanja i ispitivanja sve više otkrivati te da će se naglim porastom broja nove tehnologije dobiti još bolji uvid u problem, pa samim time i rješenja za isti.

Stvar koja raduje je da se svi zajedno slažu da je problem buke u morima i oceanima veliki problem i da trenutno u pomorstvu predstavlja jedan od problema na kojima se naporno i svakodnevno radi s ciljem da se uvjeti na brodu, kao i oni u podvodnom eko-sustavu poboljšaju na najbolji mogući način.

LITERATURA

- [1] Radan D. 2004, Uvod u hidrodinamiku broda, Sveučilište u Dubrovniku, Dubrovnik.
- [2] vijak, brodski. *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=64591>
- [3] https://hr.wikipedia.org/wiki/Brodski_vijak
- [4] Ship propeller side effects: pressure pulses and radiated noise, open access. DeGruyter Open, Noise Mapp, 2016.
- [5] Brodski otpor, Brodarski institut, Zagreb, Samboleke Branko, 2014.
- [6] Manevarske sposobnosti vijka, poglavlje 10., Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet, prvo izdanje; Marijan Banić
- [7] Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control 2018, Vol. 37(1) 60–73, Calculation of sound pressure level of marine propeller in low frequency
- [8] Generation and propagation of underwater noise from marine propellers, Kostas Belibassakis, Euronoise of Crete, 2018.
- [9] <https://en.wikipedia.org/wiki/Vibration>
- [10] <https://dosits.org/animals/effects-of-sound/moderate-or-eliminate-the-effects-of-human-activities/ship-quieting-technologies/>
- [11] https://www.pfri.uniri.hr/web/dokumenti/uploads_nastava/20190506_085211_martinovic_Osov._vod.propulzija.pdf
- [12] https://en.wikipedia.org/wiki/Speed_of_sound
- [13] https://www.google.com/search?q=ship+propeller+cavitation&client=firefox-b-d&sxsrf=AOaemvI2rjc-InfvQscYNT6does0R-RcGA:1642509617261&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwj4ZqSqbv1AhXOiv0HHbFrAnEQ_AUoAXoECAEQAw&biw=1920&bih=995&dpr=1
- [14] https://www.google.com/search?q=fpp+and+cpp+propellers&tbn=isch&ved=2ahUKEwjOmu2Sqbv1AhXFgqQKHYmsDGwQ2-cCegQIABAA&oq=fpp+and+cpp+propellers&gs_lcp=CgNpbWcQAzoHCCMQ7wMQJzoICAAQsQMqgwE6BQgAEIAEOgQIABADoggIABCABBCxAzoECAAAQzoECAAQHjoECAAQEzoICAAQCBAeEBNqWQIYyChgsCloAHAAeACAAXyIAdIQkgEEMTkuNJgBAKABAaoBC2d3cy13aXotaW1nwAEB&sclient=img&ei=MrXmYc65JMWFkgWJ2bLgBg&bih=995&biw=1920&client=firefox-b-d