

# Proračun centracije voda vratila programom SKF Shaft Designer

---

**Bošnjak, David**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2019**

*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:164:962699>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-19**

*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**

**DAVID BOŠNJAK**

**PRORAČUN CENTRACIJE VODA  
VRATILA PROGRAMOM SKF SHAFT  
DESIGNER**

**DIPLOMSKI RAD**

**SPLIT, 2019**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

**STUDIJ: BRODOSTROJARSTVO**

**PRORAČUN CENTRACIJE VODA  
VRATILA PROGRAMOM SKF SHAFT  
DESIGNER**

**DIPLOMSKI RAD**

**MENTOR:**

**Prof. dr. sc. Nenad Vulić**

**STUDENT:**

**David Bošnjak  
(MB:0171264639)**

**SPLIT, 2019.**

## SAŽETAK

Centracija vratilnog voda je najvažniji, najzahtjevniji i najsloženiji postupak, koji se, na osnovi projektiranih veličina provodi tijekom sklapanja (montaže) suvremenoga brodskog porivnog sustava. Taj je sustav izložen različitim pogonskim opterećenjima tijekom cijeloga životnog vijeka broda, te ga se mora postaviti i postrojiti na način da udovoljava svima mogućim slučajevima opterećenja. U cilju produljenja životnog vijeka i nesmetanog rada vrlo je bitno brodski porivni sustav pravilno dimenzionirati. Osnovni uvjet za pravilan rad i obavljanje svoje funkcije u različitim pogonskim uvjetima je pravilna izrada, montaža, te ispitivanje na brodu. Veliku važnost u provođenju montaže ima postupak i proračun centracije vratilnog voda. Razvojem računalnih programa i provođenjem računalnih simulacija, brodograditelji mogu precizno projektirati brodske porivne sustave s gledišta deformacija i naprezanja. U ovome radu za računalnu simulaciju proračuna centracije korišten je računalni program SKF ShaftDesigner, a sam rad prikazuje neke od njegovih prednosti.

**Ključne riječi:** *brodski porivni sustav, statička elastična linija, računalna simulacija,*

## ABSTRACT

Shafting alignment is the most important, demanding and complex process, that is performed, on the basis of design values, during the assembly of a modern marine propulsion system. This system is exposed to various workloads throughout the entire service life of the ship, so it has to be mounted and aligned in the way that it meets all the possible service loading cases. In order to prolong the life span and smooth operation, it is essential that the propulsion system of the ship is properly dimensioned. The basic requirement for proper operation and performance of its function in different operating conditions is the proper construction, installation and testing on board. The procedure and the calculation of shafting alignment are of great importance in the installation process. By developing computer programs and conducting computer simulations, shipbuilders are able to accurately design ship propulsion systems from the point of view of deformation and stress. In this paper, the SKF ShaftDesigner computer program will be used for computer simulation of shaft alignment, where the paper itself presents some of its advantages.

**Keywords:** *marine propulsion system, static elastic line, computer simulation*

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. CENTRACIJA VODA VRATILA .....</b>	<b>2</b>
<b>2.1. PRORAČUN CENTRACIJE VRATILNOG VODA .....</b>	<b>3</b>
2.1.1. Proračunski model vratilnog voda .....	6
2.1.2. Proračunski model ležajeva .....	8
2.1.3. Proračunski model koljenastog vratila i ležajeva motora .....	8
<b>2.2. POSTUPAK MONTAŽE VRATILNOG VODA.....</b>	<b>10</b>
2.2.1. Utvrđivanje referentne linije .....	12
2.2.2. Koso bušenje ležajeva statvene cijevi .....	14
2.2.3. Nagib ležaja statvene cijevi.....	15
<b>2.3. VALIDACIJA PRORAČUNA I MONTAŽE VRATILNOG VODA .....</b>	<b>16</b>
2.3.1. Mjerenje otvaranja i spuštanja na otvorenim prirubnicama .....	16
2.3.2. Mjerenje ležajnih reakcija s pomoću hidrauličke dizalice .....	18
2.3.3. Mjerenje s pomoću tenzometarskih traka.....	20
<b>3. DJELOVANJE DEFORMACIJA TRUPA NA PRORAČUN CENTRACIJE VRATILNOG VODA .....</b>	<b>22</b>
<b>3.1. DEFORMACIJE TRUPA UZROKOVANE PROMJENOM STANJA     BRODA.....</b>	<b>22</b>
<b>3.2. LOKALNE DEFORMACIJE TRUPA IZAZVANE TEMPERATURNIM     ŠIRENJEM TEMELJNE PLOČE MOTORA.....</b>	<b>24</b>
<b>4. RAČUNALNI PROGRAM SKF SHAFTDESIGNER.....</b>	<b>26</b>
<b>4.1. NAČELA UPORABE RAČUNALNOG PROGRAMA SKF     SHAFTDESIGNER.....</b>	<b>26</b>
<b>4.2. MODELIRANJE BRODSKOGA PORIVNOG SUSTAVA .....</b>	<b>28</b>
4.2.1. Modeliranje broskog vijka.....	30
4.2.2. Modeliranje statvene cijevi i ležajeva statvene cijevi.....	31
4.2.3. Modeliranje ležaja međuvratila.....	32
4.2.4. Modeliranje koljenastog vratila motora.....	33

<b>5. RAČUNALNA SIMULACIJA PRORAČUNA CENTRACIJE VRATILNOG VODA U RAČUNALNOM PROGRAMU SKF SHAFTDESIGNER.....</b>	<b>34</b>
<b>5.1. TEHNIČKI PODACI BRODSKOG PORIVNOG SUSTAVA .....</b>	<b>34</b>
<b>5.1.1. Model broskog porivnog sustava .....</b>	<b>35</b>
<b>5.2. REZULTATI PRORAČUNA CENTRACIJE VRATILNOG VODA U PROGRAMU SHAFTDESIGNER.....</b>	<b>38</b>
<b>5.2.1. Rezultati proračuna uslijed nultih pomaka ležaja.....</b>	<b>38</b>
<b>5.2.2. Rezultati proračuna uz idealne pomake ležajeva.....</b>	<b>40</b>
<b>5.2.3. Rezultati proračuna uz projektirane pomake ležajeva.....</b>	<b>41</b>
<b>5.3. REZULTATI PRORAČUNA CENTRACIJE VRATILNOG VODA PREMA HRB PRORAČUNU .....</b>	<b>44</b>
<b>5.3.1. Rezultati proračuna uslijed nultih pomaka ležajeva .....</b>	<b>44</b>
<b>5.3.2. Rezultati proračuna uslijed projektiranih pomaka ležajeva.....</b>	<b>45</b>
<b>5.4. USPOREDBA I RASPRAVA REZULTATA PRORAČUNA CENTRACIJE VRATILNOG VODA .....</b>	<b>45</b>
<b>6. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>48</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>50</b>
<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>51</b>
<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>53</b>

## 1. UVOD

Brodski porivni sustav je namijenjen prijenosu okretnoga momenta porivnog stroja na brodski vijak, kako i prijenosu porivne sile s broskog vijka na odrivni ležaj, a time posljedično i na brodski trup, što izaziva njegovo gibanje. Tijekom svog životnog vijeka, brodski porivni sustav izložen je raznim radnim opterećenjima. Pri tome, projektanti i klasifikacijska društva moraju pažljivo razmotriti dinamička i statička opterećenja koja se javljaju tijekom njegova životnog vijeka.

Brodski porivni sustav sastoji se od sljedećih dijelova:

- brodski vijak
- statvena cijev
- vratilo broskog vijka
- međuvratila
- nosivi ležajevi
- reduktor (u sustavima sa reduktorom)
- koljenasto vratilo motora.

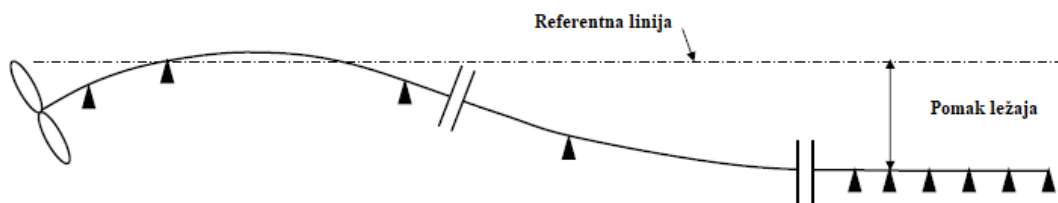
Najvažniji postupak pri sklapanju broskog porivnog sustava je centracija (postrojavanje) voda vratila, koja se sastoji od proračuna, montaže i validacije. U skladu s pravilima klasifikacijskog društva potrebno je odrediti elastičnu liniju voda vratila za različite uvjete opterećenja. Proračunom se moraju odrediti položaji statvenih i nosivih ležajeva, zupčaničkog prijenosnika i porivnog stroja u poprečnom smjeru u odnosu na referentnu liniju porivnog sustava nakon čega će se dobiti povoljna elastična linija, razdioba ležajnih reakcija i unutarnjih poprečnih sila.

Nakon proračuna i montaže na brodu, provjerom centracije voda raznim mjerenjima utvrđuju se odstupanja stvarnog stanja u odnosu na proračun i unaprijed utvrđene kriterije koje daje proizvođač pojedinih uređaja.

Cilj ovoga rada je prikazati provedbu proračuna centracije voda vratila programom SKF ShaftDesigner. Kako bi se potvrdili rezultati dobiveni u računalnom programu koristit će se rezultati dobiveni u programu „S04MarShAI“. Podaci potrebni za računalnu simulaciju dobiveni su od Brodosplita, novogradnje 470 (m/b „Solín“).

## 2. CENTRACIJA VODA VRATILA

Proces centracije vratilnog voda sastoji se od proračuna, montaže, validacije te ponovnog podešavanja ako je potrebno kako bi se osiguralo da svi ležajevi budu propisano opterećeni bez prekomjernog savijanja u bilo kojem presjeku. Prilikom proračuna centracije, vratilo se modelira kao kontinuirana greda promjenjivog presjeka oslonjena na više oslonaca kao što je prikazano na slici 1. [2]



Slika 1. Elastična linija vratilnog voda [2]

Kako bi centracija broskog porivnog sustava bila pravilno definirana te na kraju i potvrđena kao prihvatljiva, moraju se odrediti sljedeći parametri:

- vertikalni pomaci ležajeva
- reakcije u ležajevima
- dopuštena naprezanja vratila i ležajeva
- nagib osi zupčanika,
- čvrstoća vijaka spojke, kao i
- kutovi nagiba rukavca u ležajevima.

Centracija se smatra zadovoljavajućom ako je moguće podešavati gore navedene parametre, te kad ih se može održavati na propisanim granicama u svim pogonskim uvjetima broda. Pod tim uvjetima podrazumijevaju se razne promjene stanja broda tokom plovidbe kao što su:

- velike razlike u temperaturama koje utječu na broski porivni sustav
- promjene količine tereta ili, balasta na brodu, koji utječu na deformacije broskog trupa.

Tijekom eksploatacije broda, te ukrcaja i iskrcaja tereta, trup broda će se deformirati na način koji može utjecati na vertikalne pomake ležajeva koji nose vratilni



vod. Progib ili pregib trupa može istovremeno utjecati na sve ležajeve u sustavu. Postizanje zadovoljavajućeg stanja centracije voda vratila pod svim radnim uvjetima i opterećenjima zahtijevat će nekoliko analiza, koje će se provesti kako bi centracija voda vratila bila u skladu sa kriterijima prihvatljivosti.

Porast ili pad temperature također će utjecati na pomak ležajeva. Međutim, za razliku od deformacije trupa, promjena temperature može biti lokalna pojava vidljiva samo na određenom ležaju, ili na skupu od više ležajeva.

Cilj centracije voda vratila brodskog porivnog sustava je da sva opterećenja u statičkom stanju budu prihvatljiva za nesmetan rad pogonskog stroja. Prednosti ispravne montaže vratilnog voda biti će:

- smanjenje oštećenja na ležajevima i brtvenicama statvene cijevi, ležajevima porivnog motora, vijcima spojke, te na zubima zupčanika
- smanjenje onečišćenja okoliša

Osnovni kriteriji prihvatljivosti, zahtjevi i ograničenja obično se definiraju od strane klasifikacijskog društva, brodograditelja, projektanta te proizvođača pojedinog uređaja. [5]

## **2.1. PRORAČUN CENTRACIJE VRATILNOG VODA**

Proračun centracije vratilnog voda provodi se posebno za svaki pojedini vratilni vod. Kao što je već ranije definirano, vod vratila se za proračun centracije modelira linijskim sustavom ravnih punih nosača po dijelovima različitog poprečnog presjeka, koji je oslonjen na više oslonaca.

Proračunom se određuju položaji statvenih i nosivih ležajeva, reduktora i pogonskog stroja u poprečnom smjeru u odnosu na referentnu liniju vratilnog voda, koji osigurava da elastična linija, razdioba ležajnih reakcija i unutarnjih sila zadovoljavaju izvjesne uvjete za različite uvjete opterećenja i režime pogona.

Dokumentacija koja se koristi za proračun centracije vratilnog voda polazi od podataka definiranih u sljedećim nacrtima:

- opći plan voda vratila
- nacrt brodskog vijka
- nacrt vratila brodskog vijka, međuvratila i odrivnog vratila
- nacrt spojki vratila

- nacrt nosivih i samostalnih odzivnih ležajeva
- nacrt izlaznog vratila reduktora
- nacrt koljenastog vratila pogonskog stroja

Proračun centracije vratilnog voda može se provesti ručno ili s pomoću prikladnog programa za računalnu simulaciju, koji se u današnje vrijeme sve više koriste. Najprikladniji proračunski postupci, na kojima se osnivaju programi za računalo su:

- metoda početnih parametara
- metoda konačnih elemenata

Prilikom proračuna centracije vratilnog voda broskog porivnog sustava treba analizirati i razlikovati sljedeća stanja i slučajeve:

- a) Porivni stroj s koljenastim vratilom, ili bez njega, može biti neposredno spojen s vodom vratila, ili se spoj izvodi posredstvom zupčaničkog prijenosnika
- b) S obzirom na temperaturu pogonskog stroja, u proračunu valja razlikovati toplo i hladno stanje
- c) Vod vratila se mora proračunati posebno u rastavljenom i u spojenom stanju
- d) Vod vratila miruje, ili je u pogonu različitim brzinama vrtnje,
- e) Ležajevi se mogu modelirati krutim osloncima, linearno elastičnim osloncima, te nelinearnim modelom radijalnih ležajeva.

Proračun centracije vratilnog voda zasniva se na sljedećim pretpostavkama:

- a) Brodski vijak je polovično ili potpuno uronjen u more,
- b) Obujamske sile su jednoliko raspoređene uzduž elemenata,
- c) Svi se ležajevi mogu modelirati apsolutno krutim osloncima, ili linearno elastičnim osloncima
- d) Utjecaji poprečnih sila, kutnih deformacija, kao i tangencijalna naprezanja uslijed smicanja uzimaju se u obzir

- e) Položaj svake ležajne reakcije u uzdužnom smjeru je na polovini duljine ležajne blazinice.

U svrhu pružanja provjerljivih podataka, proračunom centracije vratilnog voda nastoje se osigurati zadovoljavajuću uvjeti za sve radne uvjete i opterećenja tokom eksploatacije broda. Prema tome, dobiveni rezultati proračunom provode se i provjeravaju za:

- brod u moru sa potpuno uronjenim, ili polovično uronjenim brodskim vijkom
- toplo i hladno stanje porivnog stroja i reduktora

Proces montaže vratilnog voda prema proračunu započinje na navozu ili suhom doku. Proračun mora osigurati dovoljno informacija za postupke montaže vratilnog voda dok je brod još na navozu ili u doku. Postupci montaže i centracije vratilnog voda dok je brod u suhom doku mogu biti korisni prije samog porinuća broda, jer se time mogu potvrditi uvjeti centracije za stanje broda u suhom doku. Dok je brod u suhom doku ili na navozu, teško je predvidjeti deformacije trupa koje će se dogoditi nakon njegova porinuća. Iz toga razloga, završna montaža odrađuje se dok je brod u moru.

Proračunom centracije vratilnog voda utvrđuju se dopuštene tolerancije koje moraju pokazati da su:

- opterećenja ležajeva u svim radnim uvjetima u dopuštenim granicama, a njih određuje proizvođač ležaja,
- reakcije u ležajevima uvijek usmjerene prema gore (oslonac vratilnom vodu),
- smične sile i momenti savijanja na vratilu unutar prihvatljivih granica zajedno sa ostalim naprezanjima u vratilu,
- sile i momenti na pogonskim strojevima u granicama prihvatljivosti koje određuju proizvođači uređaja.

Rezultati proračuna centracije vratilnog voda određuju:

- reakcije oslonaca za nulte pomake ležajeva,
- izabrane poprečne pomake oslonaca i pripadajuće reakcije,

- pomake (progibe i nagibe tangente na elastičnu liniju),
- unutarnje sile (momente savijanja i poprečne sile),
- kriterije prihvatljivosti izračunatih veličina odziva, koje treba provjeriti.

### 2.1.1. Proračunski model vratilnog voda

Vod vratila se za proračun centracije modelira linijskim sustavom ravnih punih nosača po dijelovima različitog poprečnog presjeka, koji je oslonjen na više oslonaca. Proračun centracije vratilnog voda provodi se posebno za svaki pojedini vratilni vod te polazi od elastičnog sustava koji se sastoji od sljedećih dijelova:

- vratilo broskog vijka
- međuvratilo
- izlazno vratilo reduktora u sustavu sa reduktorom
- odzivno vratilo (ako je odvojeno od koljenastog vratila), te
- koljenasto vratilo pogonskog stroja u sustavu bez reduktora. [7]

Ovaj elastični sustav modelira se kao statički neodređeni sustav oslonjen u ležajevima gore navedenih dijelova. U većini slučajeva, elementi modela koničnog su oblika. Poseban slučaj koničnog elementa je element cilindričnog oblika. Središnji provrt elementa je cilindrični u slučaju broskog vijka s promjenljivim usponom. Elementi su izrađeni od homogenog materijala određenog gustoćom, modulom elastičnosti i modulom smicanja. [7]

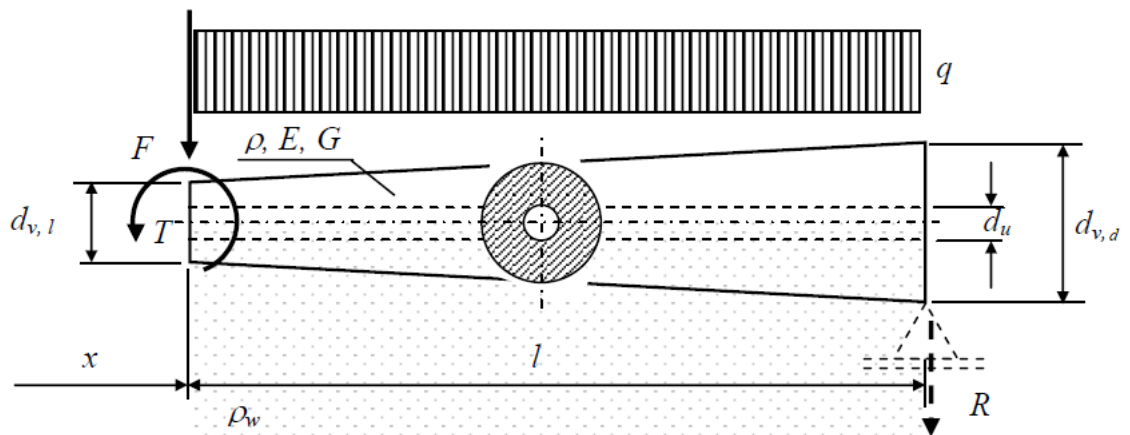
Vanjska opterećenja koja se uzimaju u obzir prilikom modeliranja vratilnog voda su:

- kontinuirana opterećenja (vlastita težina pojedinih elemenata, kao i neposredno spojenih dijelova, umanjena za uzgon dijelova uronjenih u more ili u mazivo u statvenoj cijevi)
- koncentrirano opterećenje (težina broskog vijka umanjena za uzgon, težina dijelova motora koji neposredno opterećuju koljenasto vratilo, težina zupčanika za okretanje koljenastog vratila, ili težina velikog zupčanika na izlaznom vratilu reduktora).

Proračunom se pretpostavlja da je brod uronjen u more. Nakon spajanja svih dijelova elemenata vratilnog voda, opterećenja koja će djelovati su:

- vlastita težina elementa,
- uzgon u morskoj vodi ili u ulju (u statvenoj cijevi),
- vanjska koncentrirana sila u središtu poprečnog presjeka lijevog kraja elementa,
- vanjski koncentrirani moment u središtu poprečnog presjeka lijevog kraja elementa,
- kontinuirano opterećenje, koje djeluje duž cijelog elementa uslijed ostalih sila, a koje se eventualno dodaju vlastitoj težini ili uzgonu.

Element vratila za proračun centracije vratilnog voda sa osloncem na desnom kraju prikazan je na slici 2.



Slika 2. Proračunski model vratila [7]

gdje je:

- $l$  – duljina elementa, mm
- $E$  – modul elastičnosti,  $\text{N/mm}^2$
- $G$  – modul smicanja,  $\text{N/mm}^2$
- $P$  – gustoća morske vode ili ulja,  $\text{kg/m}^3$
- $Q$  – ukupno jednoliko opterećenje uzduž elementa,  $\text{N/mm}$
- $d_{v,d}$  – vanjski promjer elementa na desnom kraju, mm
- $d_{v,l}$  – vanjski promjer elementa na lijevom kraju, mm
- $d_u$  – unutarnji promjer elementa, mm
- $F$  – koncentrirana sila na lijevom kraju elementa, N
- $T$  – koncentrirani moment na lijevom kraju elementa, Nmm
- $R$  – reakcija u osloncu na desnom kraju elementa, N

### 2.1.2. Proračunski model ležajeva

Ležajevi broskog porivnog sustava modeliraju se sa nepomičnim ili pomičnim osloncima ili uklještenjima statičkog sustava, u kojima se pojavljuju reakcije u obliku koncentriranih vanjskih pasivnih sila. [7]

U suvremenim se proračunima koriste sljedeći modeli ležajeva:

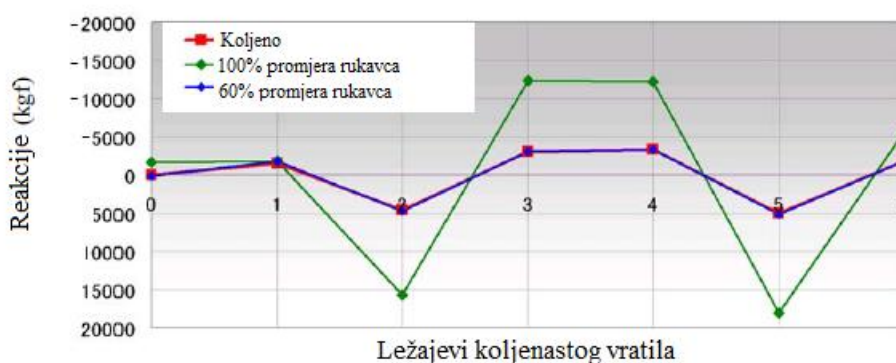
- apsolutno kruti oslonci,
- linearno elastični oslonci poznate krutosti,
- nelinearni model radijalnog kliznog ležaja.

Najbitnija svojstvo bilo kojega od navedenih pristupa je da svaki od modela ležajeva može unaprijed zadati pomak u poprečnom smjeru u odnosu na referentnu liniju broskog porivnog sustava. [7]

### 2.1.3. Proračunski model koljenastog vratila i ležajeva motora

U slučajevima kada se od proizvođača motora ne može pribaviti nacrt koljenastog vratila potreban za proračun centracije, koljenasto vratilo potrebno je zamijeniti ravnom gredom okruglog profila u proračunu centracije vratilnog voda. Još uvijek nije utvrđena standardna prikladna metoda za određivanje ekvivalentnog profila ravne grede, koja će zamijeniti koljenasto vratilo u proračunu, te se najčešće njen oblik određuje prema rukavcu koljenastog vratila s jednakim promjerom. [2]

Svrha određivanja ekvivalentnog promjera koljenastog vratila je da se osigura pravilan izračun reakcija ležajeva u ovisnosti o promjeni pomaka određenog ležaja. Sljedeća slika prikazuje usporedbu koljenastog vratila sa promjerom jednakim rukavcu sa ekvivalentnim promjerom ravne grede gdje je promjer 60% od promjera rukavca koljenastog vratila te njihove utjecaje na reakcije u ležajevima motora. [2]



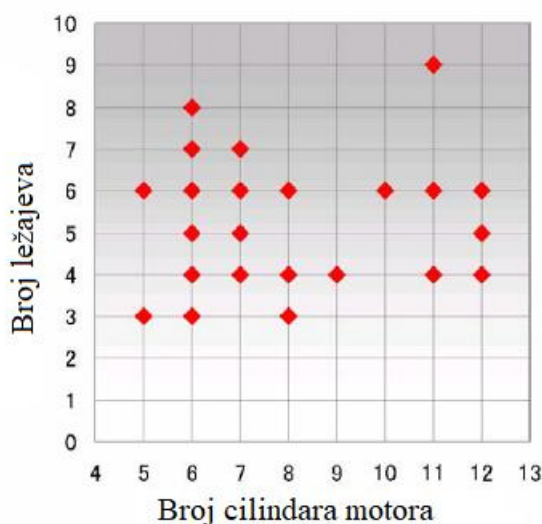
### Slika 3. Usporedba reakcija u ležajevima za različite promjere rukavca koljenastog vratila [2]

Postupak određivanje ekvivalentnog promjera grede kružnog presjeka koja će zamijeniti koljenasto vratilo u proračunu, imati će veliki značaj u ispravnom određivanju ležajnih reakcija motora. Uvijek se preporučava koristiti preporučene vrijednosti od strane proizvođača motora, ako su one dostupne. [2]

Ako se pretpostavi da je promjer osnaca letećeg ležaja jednak promjeru rukavca koljenastog vratila, ekvivalentni promjer rukavca koljenastog vratila može se odrediti pomoću približnog analitičkog izraza. [2]

$$d_{eq} = \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{1}{1 + A_w} + \frac{1}{1 + B_w + B_p} \right) \right]^{\frac{1}{4}} d_j \quad (1)$$

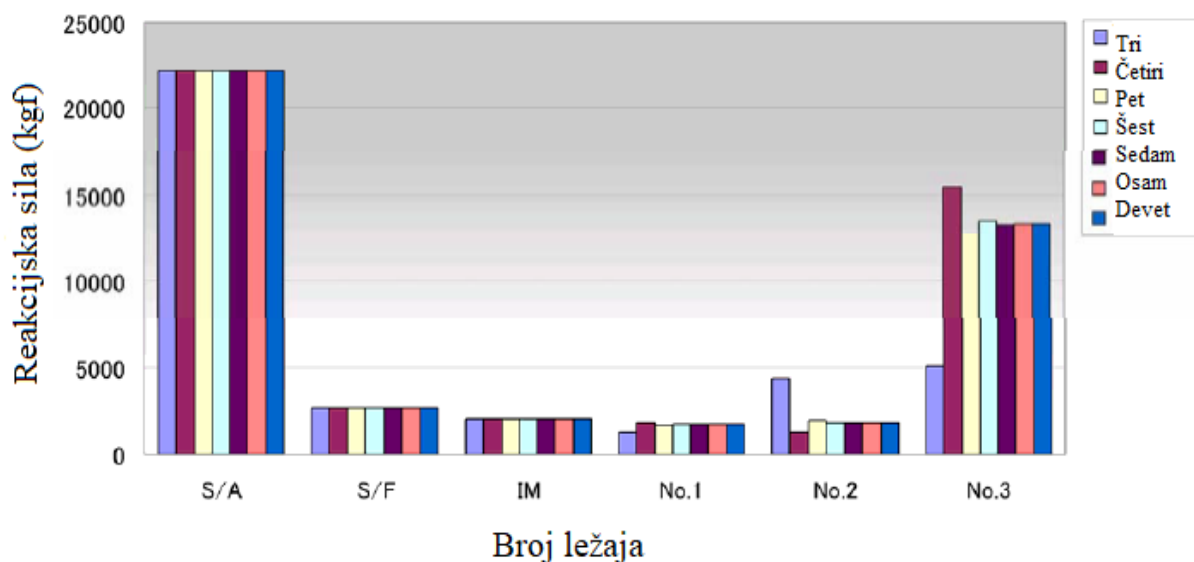
Broj ležajeva motora koji će se uzeti u obzir u proračunu centracije također može imati ulogu u ispravnom određivanju ležajnih reakcija motora. Slika 4. prikazuje broj ležajeva motora s obzirom na broj cilindara motora koji će se uzeti u obzir prilikom proračuna centracije u stvarnoj praksi raznih brodogradilišta.



Slika 4. Broj ležajeva koji se uzima u obzir prilikom proračuna centracije od strane brodogradilišta [2]

Iz prikazanog se može vidjeti da se u nekim slučajevima koriste samo zadnja tri ležaja motora u modelu proračuna, iako to ovisi o brodogradilištu i praksi koja se koristi.

Istraživanja su pokazala da će broj ležajeva motora proračunskog modela koji se uzimaju u obzir imati znatne učinke na izračunate ležajne reakcije zadnja tri ležaja motora. Slika 5. prikazuje promjene ležajnih reakcija u ovisnosti o različitim brojevima ležajeva motora, koji ulaze u proračunski model za motor s sedam cilindara. [2]



**Slika 5. Utjecaj odabira broja ležajeva motora na ležajne reakcije [2]**

## 2.2. POSTUPAK MONTAŽE VRATILNOG VODA

Postupak montaže vratilnog voda je proces u kojem se centracija provodi prema dobivenom proračunu ili u skladu sa pravilima određenog proizvođača. Postupak većinom ovisi o praksi i iskustvima brodogradilišta, te nije jednako definiran i primijenjen u različitim brodogradilištima.

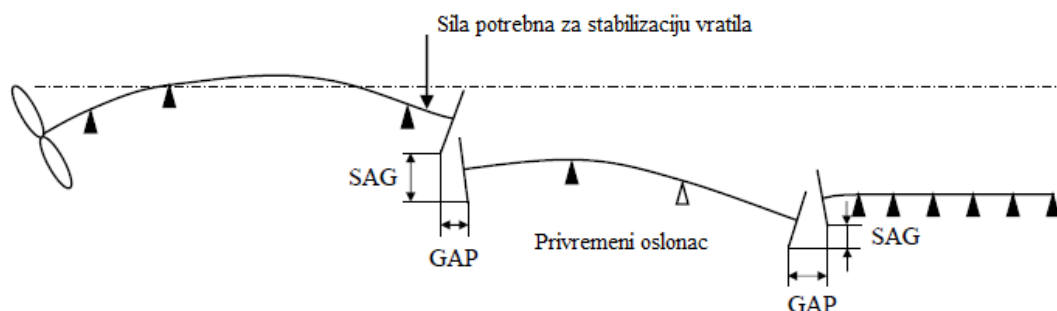
Izbjegava se postupak montaže vratilnog voda započeti prije nego što su svi krmeni limovi zavareni. Nakon postavljanja svih krmernih konstrukcija utvrđuje se referentna linija na temelju koje će se centrirati vratilni vod, ležajevi, glavni motor i reduktor.

Postupkom montaže vratilnog voda treba se odrediti:

- redosljed spajanja pojedinih vratila,
- položaj potrebnih privremenih oslonaca pojedinih vratila,
- položaj i veličinu potrebnih sila za opterećivanje vratila tijekom montaže, te
- spuštanje i otvaranje, tj. „pad“ („SAG“) i „izlom“ („GAP“) na razdvojenim prirubnicama u svakoj fazi montaže.



Tijekom montaže vratilnog voda, uključujući vratilo brodskog vijka, prirubnice su međusobno odvojene te postavljene na oslonce kao što je prikazano na slici 6. Nakon toga, određuje se visina svakog oslonca zajedno sa privremenim osloncima kako bi se osiguralo da izračunati GAP i SAG između prirubnica budu u skladu sa proračunom.

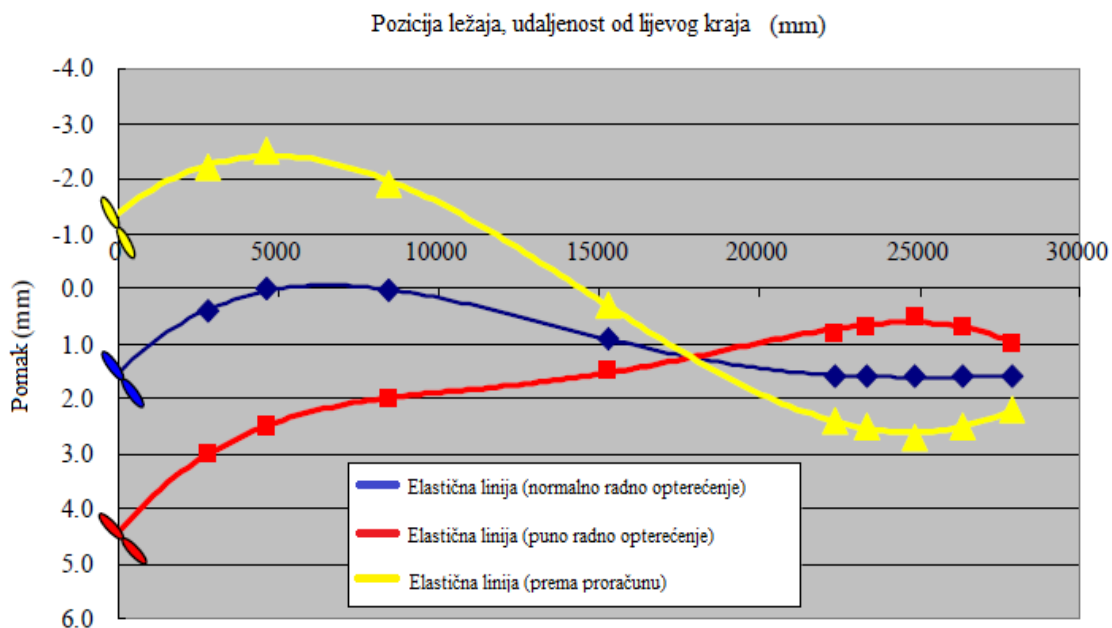


**Slika 6. Montaža vratila uz privremene oslonce [2]**

Nakon postavljanja vratila brodskog vijka, prirubnica vratila uzima se kao referenca za podešavanje visine svakog od oslonaca uključujući i privremene oslonce međuvratila. Privremeni oslonci postavljaju se kako bi u svakom trenutku montaže vod vratila bio statički određen. Temeljem toga potvrđuju se proračunati „SAG“ i „GAP“ za zadana vratila. Montažom međuvratila, njegova se prirubnica uzima kao nova referenca, te se na osnovi nje podešava pozicija glavnog porivnog motora.

SAG i GAP provjerava se između prirubnica i mora odgovarati ranije proračunatim analitičkim vrijednostima. Ako se takvo mjerenje provede dok je brod na opremnoj obali, brodogradilište bi trebalo biti u mogućnosti potpuno kontrolirati centraciju vratilnog voda, što znači da bi izmjerene SAG i GAP vrijednosti trebale biti sasvim usklađene s predviđenim vrijednostima.

Za novogradnje je tipično da centracija započinje kada je brod u moru u uvjetima maloga gaza i porivnim strojem u hladnom stanju. Promjene temperature i deformacije trupa uzrokovat će varijacije i promjene pomaka ležajeva. Također će se mijenjati i reakcije ležajeva. Na slici 7. prikazana je promjena elastične linije u ovisnosti o promjeni opterećenja i radnih uvjeta u brodskom porivnom sustavu.



**Slika 7. Pomak ležajeva i promjena elastične linije u različitim uvjetima opterećenja [2]**

Neka brodogradilišta imaju praksu provesti više postupaka centracije prije porinuća broda, što i nije naročito dobro. Daljnja provjera i validacija centracije nastavlja se dok je brod u moru. Bez uronjenog trupa broda teško je predvidjeti deformacije trupa broda koje će utjecati na pomake ležajeva i vratila. Međutim, ako je centracija vratilnog voda bila provedena u suhom doku, svaku promjenu i odstupanje u reakcijama ležaja od izračunatih do izmjerenih treba pripisati deformacijama trupa, koje mogu biti značajne.

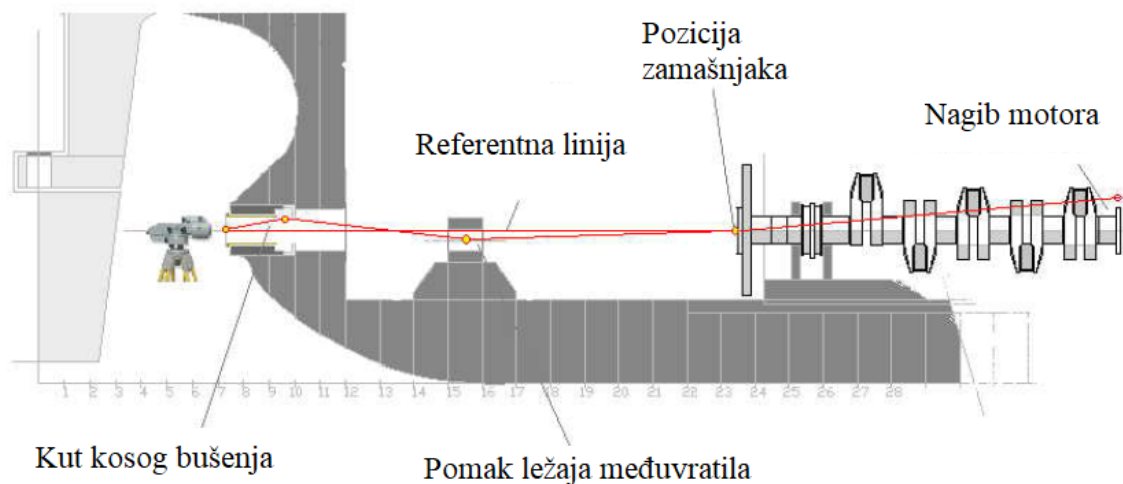
Puno je polemike oko toga koliko je zapravo isplativo raditi centraciju vratilnog voda dok je brod još uvijek u suhom doku. Opća politika klasifikacijskih društava je prihvatiti postupak koji daje zadovoljavajuće vrijednosti.

### 2.2.1. Utvrđivanje referentne linije

Postupak utvrđivanja referentne linije provodi se pomoću optičkih instrumenata, lasera ili žice klavira kao što je prikazano na slici 8. i obično se provodi na sljedeći način:

- optički instrument, laser ili klavirska žica postavljaju se ispred stražnjeg ležaja statvene cijevi,
- referentna linija je definirana tako da odgovara središnjoj liniji stražnjeg ležaja statvene cijevi,

- određuju se mjerne referentne točke na mjestima ležaja međuvratila, prirubnice zupčaničkog prijenosnika ili prirubnice glavnog motora,
- ležajevi, zupčanički prijenosnik i glavni motor se postavljaju na predviđena mjesta,
- označuju se kutovi kosog bušenja (preciznije: unutarnjeg tokarenja pod nagibom) ako je potrebno,
- ako će se nagib ležajeva koristiti umjesto kosog bušenja, ono se primjenjuje kod ležajeva statvene cijevi, ležaj se učvršćuje pod nagibom i spreman je za lijevanje epoksidne smole.



**Slika 8. Određivanje referentne linije [1]**

Za određivanje referentne linije vrlo je važno da se ispoštivaju izvjesni uvjeti na brodu u svrhu sprječavanja i smanjivanja poremećaja, koji mogu utjecati na već utvrđene položaje i pomake ležajeva motora, te nagiba u statvenom ležaju. Temperaturne promjene na konstrukciji broda utjecati će na pomake cijelog sustava, te je poželjno da se referentna linija određuje u ranim jutarnjim satima, tijekom oblačnog vremena, ili pak noću, kada je temperatura konstrukcije broda najstabilnija. Također, vrlo je važno da su svi veći postupci zavarivanja na krmi broda završeni, jer oni mogu utjecati na dodatne konstrukcijske deformacije uzrokovane zavarivanjem. [1]

Neka brodogradilišta za određivanje referentne linije koriste žicu klavira u slučaju kada nemaju optički instrument. Zbog malog progiba, žica klavira koristi se za određivanje referentne linije, te se povlači do prirubnice glavnog motora kao što je prikazano na slici 9.

Žica klavira



**Slika 9. Primjena žice klavira [1]**

Propisani pomak ležaja određuje se mjerenjem vertikalnog razmaka od žice klavira do pojedinog ležaja međuvratila.

### **2.2.2. Koso bušenje ležajeva statvene cijevi**

Postupak kosog bušenja (unutarnjeg tokarenja pod nagibom) ležajeva statvene cijevi je proces strojne obrade kako bi se osiguralo da je središnja linija unutarnjeg promjera ležaja postavljena pod određenim kutom odstupanja od referentne linije. Kako bi se omogućilo predviđanje korištenja postupka kosog bušenja, unutarnji promjer ležaja se prethodno obrađuje na manji promjer. Na slici 10. prikazan je poseban stroj za strojnu obradu ležajeva statvene cijevi (kolokvijalno zvan „bara“, a sam postupak „baravanje“), koji se pričvršćuje na krmeni blok i poravnava tako da odgovara željenom kutu odstupanja. Bušenje kroz ležaj odvija se u nekoliko navrata, ako je potrebno. Višestruki prolazi mogu biti potrebni kada se moraju ukloniti veće količine materijala zbog opasnosti od pregrijavanja ležaja kao i za osiguranje potrebnih tolerancija obrade.



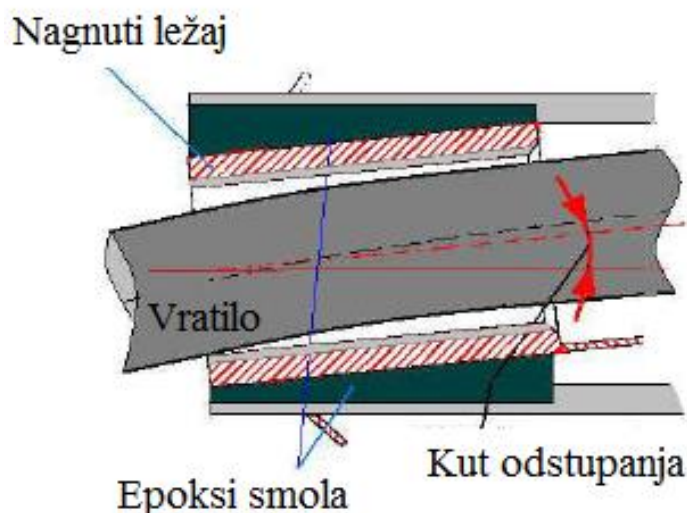
**Slika 10. Stroj za koso bušenje [1]**

Tokom centracije i montaže vratilnog voda, vrlo je bitno osigurati ispravno radno stanje ležaja statvene cijevi, što znači da se opterećenje na ležaj sa vratila raspoređuje ravnomjerno duž duljine ležaja. [1]

Koso bušenje je postupak koji se obično primjenjuje kako bi se osigurao zadovoljavajući rad stražnjega statvenog ležaja. Ovim postupkom nastoji se izjednačiti središnja linija toga ležaja, kako bi se smanjio kut odstupanja između rukavca vratila i ležajne blazinice. Postupak se primjenjuje u vrlo ranoj fazi procesa centracije, prije montaže vratila broskog vijka. [1]

### **2.2.3. Nagib ležaja statvene cijevi**

Metoda nagiba ležaja u statvenoj cijevi je drugi najzastupljeniji način koji se koristi s ciljem smanjenja kuta odstupanja. Umjesto strojne obrade unutarnjeg dijela ležaja nakon njegove ugradnje, ležaj se obrađuje na konačni promjer i postavlja pod nagibom u statvenoj cijevi kao što je prikazano na slici 11. Za učvršćivanje ležaja koristi se epoksidna smola. [1]



Slika 11. Nagib ležaja u statvenoj cijevi [1]

### 2.3. VALIDACIJA PRORAČUNA I MONTAŽE VRATILNOG VODA

Validacija centracije mjerenjem na brodu smatra se sastavnim dijelom postupka centracije vratilnog voda. Da bi centracija bila prihvatljiva, moraju se potvrditi sljedeći kriteriji prihvatljivosti:

- reakcije u ležajevima,
- vertikalni pomaci ležajeva,
- kutovi odstupanja ležajeva,
- neusklađenosti osi zupčanika.

U praksi i na brodu, za provjeru centracije vratilnog voda koriste se sljedeći postupci mjerenja:

- a) mjerenje otvaranja i spuštanja na razdvojenim prirubnicama vratila,
- b) mjerenje s pomoću tenzometarskih traka,
- c) mjerenje ležajnih reakcija s pomoću hidrauličke dizalice. [5]

#### 2.3.1. Mjerenje otvaranja i spuštanja na otvorenim prirubnicama

Postupak kojim se utvrđuje horizontalni i vertikalni razmak između dviju prirubnica često se koristi za provjeru stanja predmontaže vratilnog voda. Metoda je vrlo jednostavna, brza i ne zahtijeva posebnu opremu ili mjerila te se najčešće koristi komparator. Zbog upitne preciznosti metode, uglavnom se koristi za površnu provjeru, te

ju nije preporučljivo koristiti za konačnu provjeru centracije ili za ispravljanje trenutnog stanja centracije.

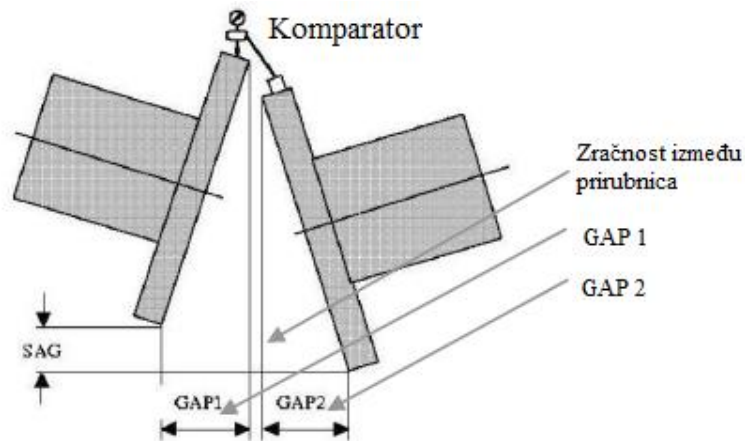
Proračunate vrijednosti otvaranja i spuštanja na prirubnicama za analitički model mogu se bitno razlikovati od trenutnog stanja na brodu i ako vrijednosti nisu dane za određeno stanje broda, metoda se ne može primijeniti i prihvatiti. Iako se ova metoda ne doima najtočnijom, ona može pokazati i uputiti na neke probleme u predmontaži vratilnog voda. Ako se primijete velike razlike trenutnih vrijednosti u odnosu na analitičke vrijednosti, to može ukazati na to da je utvrđivanja referentne linije poremećeno prije instalacije pogonskih strojeva ili je analiza pogrešno provedena. [1]

Nije preporučljivo započinjati mjerenjem otvaranja i spuštanja između prirubnica dok sljedeće nije ispunjeno:

- motor i reduktor moraju biti smješteni i montirani u strojarnici,
- privremeni oslonci moraju biti postavljeni,
- vratila su postavljena unutar broda,
- brodski vijak mora biti montiran,
- vratilo broskog vijka mora biti u kontaktu s donjim dijelom blaznice prednjeg ležaja statvene cijevi. [1]

Otvaranje i spuštanje između prirubnica najčešće se mjeri s pomoću komparatora ili mjernih listića. Preciznost komparatora prilikom mjerenja je do 0,001 mm dok je kod mjernih listića 0,05 mm, o čemu valja voditi računa već u projektnoj fazi centracije. Horizontalni razmak ili zračnost između prirubnica većinom se mjeri mjernim listićima. [1]

Komparator se postavlja na vrh jedne prirubnice te se učvršćuje na vrhu druge kao što je prikazano na slici 12. Vrlo je bitno za točnost mjerenja dobro pozicionirati i učvrstiti komparator. [1]



Slika 12. Mjerenje otvaranja i spuštanja između prirubnica [1]

### 2.3.2. Mjerenje ležajnih reakcija s pomoću hidrauličke dizalice

Metoda korištenja hidrauličke dizalice za mjerenje ležajnih reakcije zbog svoje jednostavnosti i točnosti, najzastupljenija je u praksi. Mjerenje se provodi s pomoću hidrauličke dizalice i pretvarača koji se postavljaju blizu ležaja za koji se mjeri ležajna reakcija. [1]

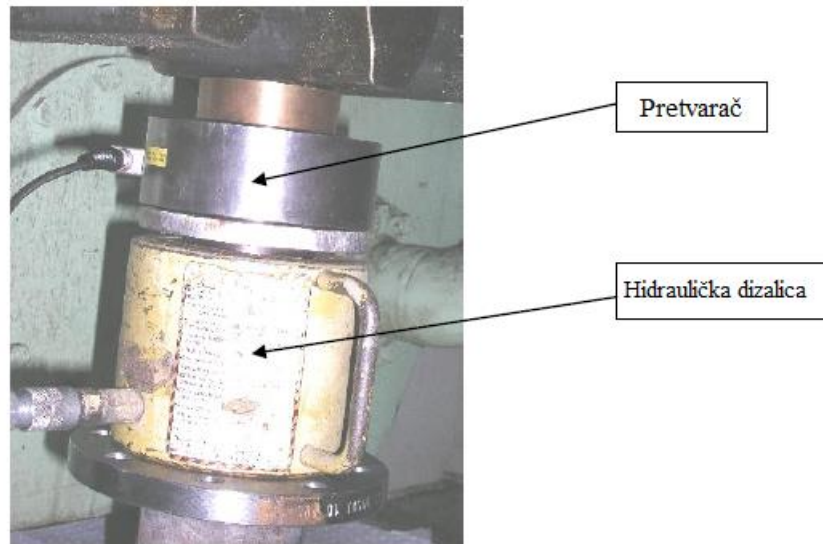
Prednosti ove metode su:

- točnost se poboljšava korištenjem pretvarača,
- koriste se jednostavni mjerni instrumenti,
- jedina metoda koja izravno bilježi opterećenje. [1]

Nedostaci ove metode su:

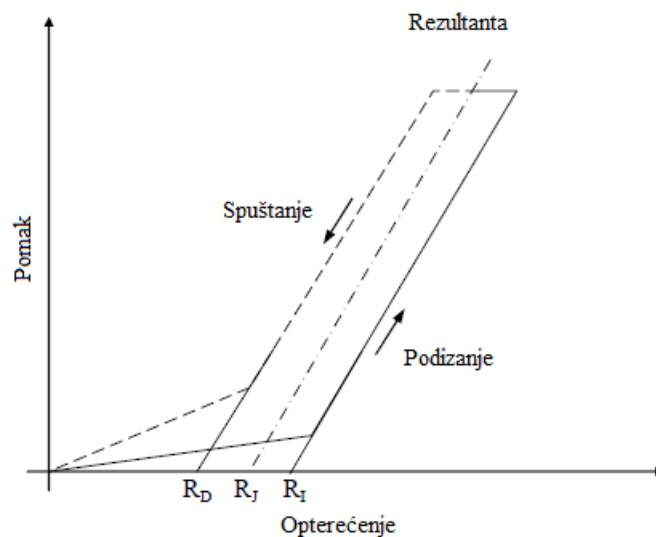
- jednako vrijeme pripreme za svako mjerenje,
- rezultati mjerenja znatno variraju kod ne korištenja pretvarača,
- problemi kod postavljanja hidrauličke dizalice i komparatora,
- metoda zahtjeva korištenje faktora popravka. [1]





**Slika 13. Hidraulička dizalica [1]**

Hidraulička dizalica postavlja se ispod vratilnog voda, što je bliže ležaju. Komparator, koji će mjeriti pomak vratila nakon njegova podizanja, postavlja se na mjesto koje neće biti pod utjecajem podizanja vratila ili deformacije temelja gdje se nalazi dizalica. Očitavanjem manometra na hidrauličkoj dizalici tijekom podizanja vratila, izračunava se vrijednost sile koja djeluje na vratilo. Isti se postupak ponavlja tokom spuštanja vratila. Dobivene vrijednosti zapisuju se u dijagram koji je prikazan na slici 14. zajedno sa zadanim pomacima. [2]



**Slika 14. Razlika u dobivenim vrijednostima prilikom spuštanja i podizanja vratila**

[2]

Na dijagramu se može primijetiti razlika u dobivenim vrijednostima prilikom podizanja i spuštanja vratila. Ta razlika pripisuje se unutarnjem trenju u hidrauličkoj dizalici. Srednja vrijednost dviju krivulja dobiva se iz sljedećeg izraza:

$$R_J = \frac{R_I + R_D}{2} \quad (1)$$

Hidraulička dizalica pomaknuta je aksijalno u odnosu na središnji presjek ležaja te se dobivena središnja vrijednost mora ispraviti odgovarajućim faktorom popravka, kojega treba unaprijed izračunati. [2]

### 2.3.3. Mjerenje s pomoću tenzometarskih traka

Tenzometrija omogućava provjeru momenta savijanja i aksijalnih naprezanja uslijed momenta savijanja uzduž cijelog dostupnog dijela voda vratila.

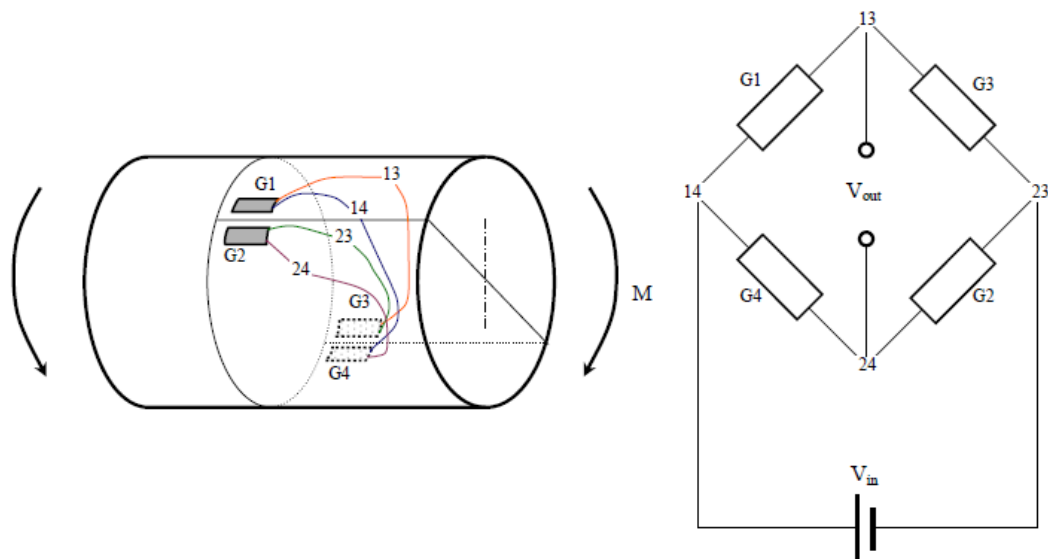
Prednosti ove metode su:

- omogućen je pristup mjestima o stanju opterećenja ležajeva gdje se ne može primijeniti mjerenje ležanih reakcija hidrauličkom dizalicom,
- jednom kada su tenziometarske trake postavljene, mjerenja se mogu ponavljati u vrlo kratkom vremenu,
- može pružiti podatke o vertikalnom i horizontalnom opterećenju ležajeva,
- može pružati istovremene informacije za više od jednog ležaja,
- mogućnost primjene na vod vratila u pogonu (bezkontaktne tenzometri).

Nedostaci ove metode su:

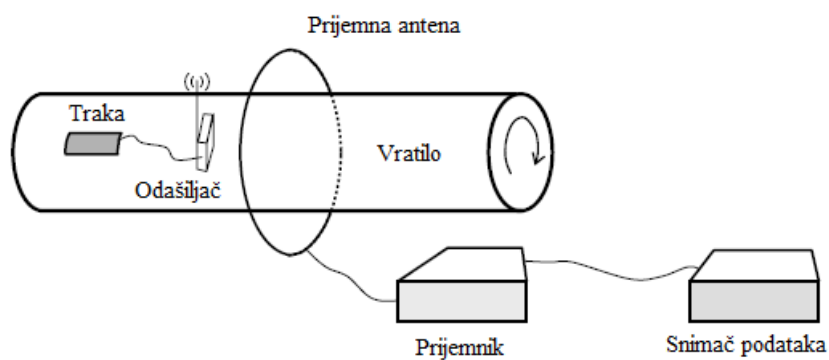
- zahtjeva dosta vremena za postavljanje opreme i mjernih traka,
- točnost dobivenih rezultata ovisi o modeliranju sustava,
- zahtjeva relativno sofisticiranu i skupu opremu za mjerenje.

Za mjerenje momenta savijanja i naprezanja uslijed momenta savijanja najčešće se koriste četiri tenziometarske trake koje se postavljaju u Wheatstoneov most kako bi se dobio veći učinak i poništio učinak sile poriva. Važno je zalijepiti dva skupa tenziometarskih traka u razmaku od 180°, kao što je prikazano na slici 15. [2]



**Slika 15. Mjerenje momenta savijanja korištenjem tenziometarskih traka postavljene u Wheatstoneov most [2]**

Budući da je vratilo u pogonu, za mjerenje momenta savijanja potreban je bežični sustav koji se naziva telemetrijski sustav i prikazan je na slici 16. U telemetrijskom sustavu, tenziometarske trake povezane su sa odašiljačem te se okreću zajedno sa vratilom. Oko vratila se postavlja antena koja prima podatke od odašiljača te ih šalje prijemniku, a on ih šalje do snimača podataka. [2]



**Slika 16. Telemetrijski sustav [2]**

### **3. DJELOVANJE DEFORMACIJA TRUPA NA PRORAČUN CENTRACIJE VRATILNOG VODA**

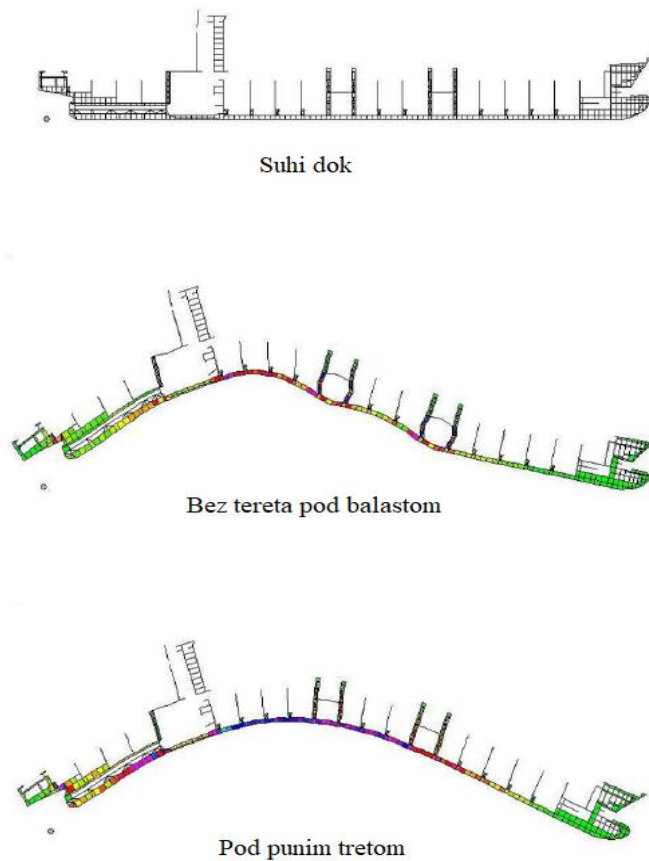
#### **3.1. DEFORMACIJE TRUPA UZROKOVANE PROMJENOM STANJA BRODA**

Deformacije trupa broda su primarni problem koji se javlja tijekom eksploatacije broda. Utjecaji koje će deformacije trupa imati na porivni sustav mogu znatno smanjiti životni vijek određenih dijelova brodskog porivnog sustava, a razlog tome je poremećaj centracije vratilnog voda. Najveći utjecaj imat će promjene stanja broda u kojem se brod trenutno nalazi i deformacije trupa kao njegova posljedica. Sposobnost predviđanja približnih deformacija trupa imati će veliku važnost kako bi se osigurala pravilna i točna centracija vratilnog voda s minimaliziranjem problema koji se mogu javiti prilikom centracije.

Kako bi bili u mogućnosti utvrditi utjecaj koji će deformacije trupa imati na centraciju vratilnog voda, idealno je mjeriti vertikalne pomake svih ležajeva. Promjene deformacije trupa biti će direktno povezane sa vertikalnim pomakom ležajeva koji podupiru vratilni vod. Stoga će poznavanje vertikalnog položaja ležaja za određeno stanje broda ( suhi dok, plovidba pod balastom, plovidba pod punim opterećenjem) omogućiti uvid u to kako se vertikalni pomak mijenja ovisno o stanju u kojem se brod nalazi. Promjena od jednog stanja do drugog pokazati će kako će se određeni ležaj ponašati, te kakav se pomak može očekivati.

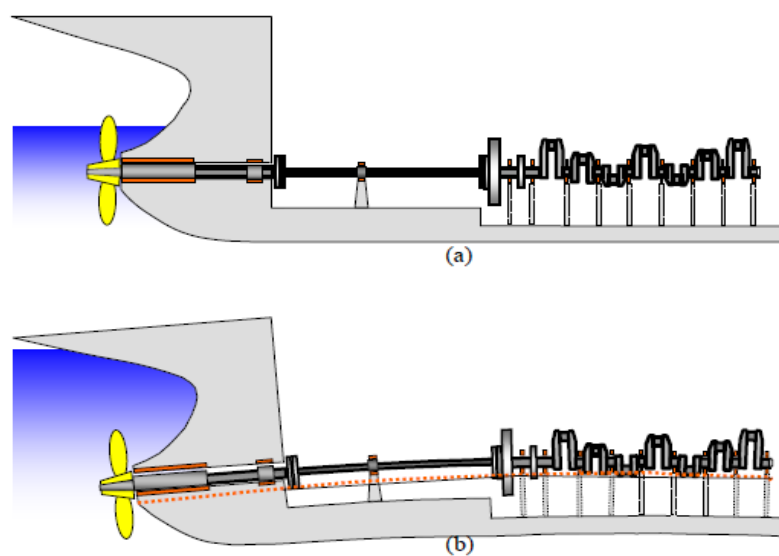
Brodovi koji su posebno osjetljivi na varijacije progiba i pregiba trupa su tankeri i brodovi za sipki teret, pretežito stoga što ti brodovi imaju kratak i vrlo krut vratilni vod i uglavnom su postrojenja bez zupčaničkog prijenosnika. Treba napomenuti i kontejnerske brodove gdje su vratila puno duža i fleksibilnija, ali zbog velikih deformacija centracija će također biti poremećena što će se posebno vidjeti na zadnjem ležaju porivnog motora. Na slici 17. približno je prikazano kako će se brod ponašati u stanju bez tereta i pod teretom te koji dijelovi će biti pod najvećim opterećenjem. [2]

Sposobnost predviđanja i utvrđivanja deformacija trupa za različite uvjete na brodu s određenom točnošću omogućiti će odabir propisanih poprečnih pomaka ležajeva. Važno je odabrati položaj ležaja u kojem će se osigurati zadovoljavajuće opterećenje u svim radnim uvjetima. Rezultat proračuna za statički odziv sustava trebao bi osigurati nesmetan rad brodskog porivnog sustava uz produljeni vijek trajanja ležajeva koji podupiru vratilni vod.



**Slika 17. Deformacije trupa u ovisnosti o stanju u kojem se brod nalazi [2]**

Promjene gaza broda također će imati utjecaj na deformacije trupa broda. Slika 18. prikazuje djelomično i u potpunosti uronjen brodski vijak gdje se može vidjeti progib krme broda kod potpuno uronjenog broskog vijaka. [2]



**Slika 18. Djelomično i u potpunosti uronjen brodski vijak [2]**

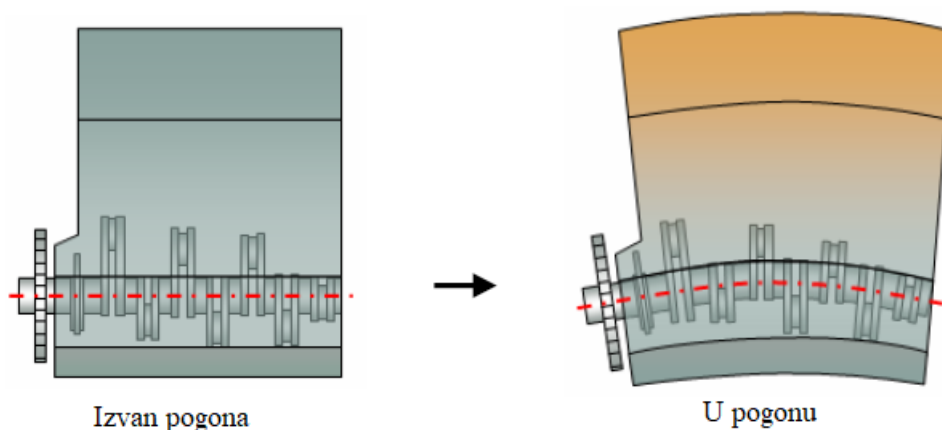
### 3.2. LOKALNE DEFORMACIJE TRUPA IZAZVANE TEMPERATURNIM ŠIRENJEM TEMELJNE PLOČE MOTORA

U režimu rada motora, njegova gornja strana koja se nalazi blizu komore izgaranja imati će veću temperaturu od donje strane gdje se nalazi temeljna ploča motora. Na slici 19. prikazani su približni rasponi temperatura bloka cilindra, kućišta i temeljne ploče za sporohodne dvotaktne motore. [2]

Blok cilindra 80~90°C
Kućište motora 40~50°C
Temeljna ploča 40~50°C

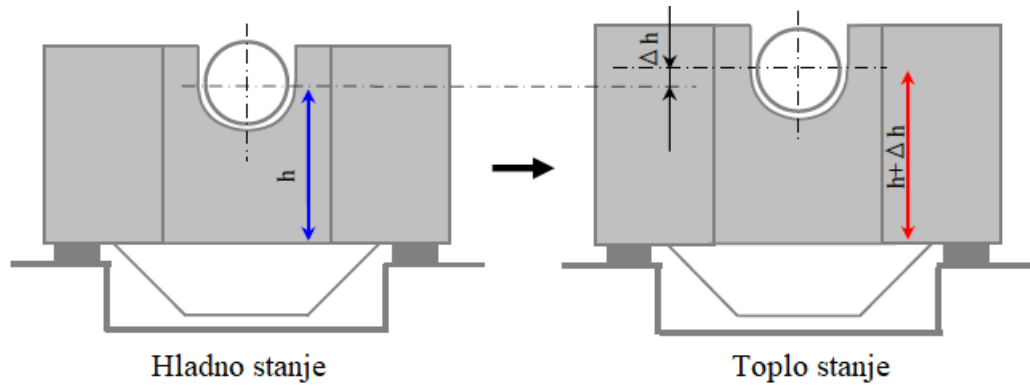
Slika 19. Primjer raspodjele temperatura motora u režimu rada [2]

Toplinske deformacije motora djelovati će u tri dimenzije dok će samo vertikalni pomak utjecati na centraciju vratilnog voda. Pomaci ležajeva tokom rada motora uglavnom su uzrokovani porastom temperature temeljne ploče motora. Zbog temperaturne razlike gornjeg i donjeg dijela motora doći će do uzdužnog širenja gornjih dijelova motora kao što je prikazano na slici 20. što će izazvati deformacije nastale pregibom motora te naposljetku bilo kakve pomake ležajeva. [2]



Slika 20. Pregib motora uzrokovan temperaturnom razlikom gornjeg i donjeg dijela motora [2]

Porast temperature temeljne ploče djelovati će na vertikalni pomak ležajeva kao što je prikazano na slici 21. Vertikalni pomak ležaja može se lako izračunati poznavanjem distribucija temperatura temeljne ploče motora. [2]



**Slika 21. Vertikalni pomak središta ležaja uzrokovan temperaturnim širenjem temeljne ploče [2]**

## 4. RAČUNALNI PROGRAM SKF SHAFTDESIGNER

Računalni program SKF ShaftDesigner razvijen je u svrhu različitih statičkih i dinamičkih proračuna broskog porivnog sustava. Razvio ga je dr. Yuriy Batrak iz Ukrajine, a potom otkupio poznati proizvođač ležajeva SKF. U njemu je moguće modelirati cijeli brodski porivni sustav, te se korisnicima omogućava korištenje različitih aplikacijskih modula koje program donosi sa sobom. Program je prije svega razvijen u svrhu rješavanja problema centracije voda vratila i vibracija koje se javljaju u broskom porivnom sustavu. [3]

U svrhu rješavanja problema centracije i vibracija, u programu je moguće analizirati različita stanja u kojima se brod nalazi tijekom svoga životnog ciklusa kao što su:

- promjene stanja krcanja tereta na brodu,
- stanje hladnog i toplog pogonskog stroja, uz utjecaj na deformacije trupa,
- analiza sustava sa spojenim i razdvojenim vratilima broskog porivnog sustava [3]

### 4.1. NAČELA UPORABE RAČUNALNOG PROGRAMA SKF SHAFTDESIGNER

Osnovna namjena računalnog programa ShaftDesigner je osigurati visokokvalitetne izračune centracije vratilnog voda i vibracija koje će djelovati na brodski porivni sustav u svrhu povećanja učinkovitosti i pouzdanosti u svim radnim uvjetima.

ShaftDesigner integrira sve vrste izračuna u jedan programski paket. Izrada jedinstvenog osnovnog modela omogućava jednostavnu provedbu raznovrsnih proračuna.

U programskom paketu dostupni su proračuni za:

- centraciju vratilnog voda,
- torzijske vibracije
- aksijalne vibracije
- savojne vibracije
- vibracije uslijed vitlanja (precesije, eng. „whirling“). [3]



Glavne prednosti uporabe računalnog programa ShaftDesigner su:

- 3D grafičko modeliranje,
  - uporaba jednoga osnovnog modela za sve aplikacije,
  - popis povijesti modeliranja i izračuna,
  - prilagodljive mjerne jedinice,
  - svaki dio vratilnog voda može se proizvoljno imenovati i označiti,
  - kontinuirani pozadinski rad aktivnih aplikacija,
  - izračuni se mogu izvesti u vertikalnim i horizontalnim ravninama istovremeno,
  - izvješća o izračunu mogu se izvesti u računalni program Microsoft Word.
- [3]

Program je namijenjen dvjema vrstama korisnika:

1. Projektantima koji projektiraju nove vratilne vodove, utvrđujući ispravnost položaja i odstupanja ležaja,
2. Projektanti koji utvrđuju vertikalne pomake ležajeva u odnosu na referentnu liniju za nove brodove i brodove u remontu, te koji utvrđuju opterećenja i pomake ležajeva.

Kod projektiranja i dimenzioniranja vratilnih vodova broskog porivnog sustava, strojarski projektanti generiraju globalni model bez preciznog pozicioniranja pojedinih komponenti. Ako opterećenje ležajeva ne ispunjava jedan od zahtjeva, može se promijeniti i položaj i pomak ležaja.

Za potrebe centracije vratilnog voda, projektant generira model prema nacrtima voda vratila. U takvoj situaciji pozicija svih komponenti je već poznata, te se određuje vertikalni pomak ležaja u odnosu na referentnu liniju. Od velike je važnosti da projektant napravi vrlo detaljan model sa ispravnim dimenzijama. Samo u tom slučaju može se napraviti ispravan izračun.

Optimalno centriran vratilni vod broskog porivnog sustava podrazumijeva raspored ležajeva sa određenim pozicijama u odnosu na referentnu liniju, koji pod svim uobičajenim radnim uvjetima osigurava pravilnu raspodjelu opterećenja ležajeva, pojedinačnih vratila, te koljenastog vratila u statičkim i u normalnim pogonskim uvjetima.

Tijekom svoje eksploatacije brod prolazi kroz razna stanja i radne uvjete koji znatno mogu djelovati i ostaviti posljedice na brodskom porivnom sustavu. Stanja koja su vrlo bitna s gledišta centracije vratilnog voda, a koja je moguće proračunati u programu ShaftDesigner su:

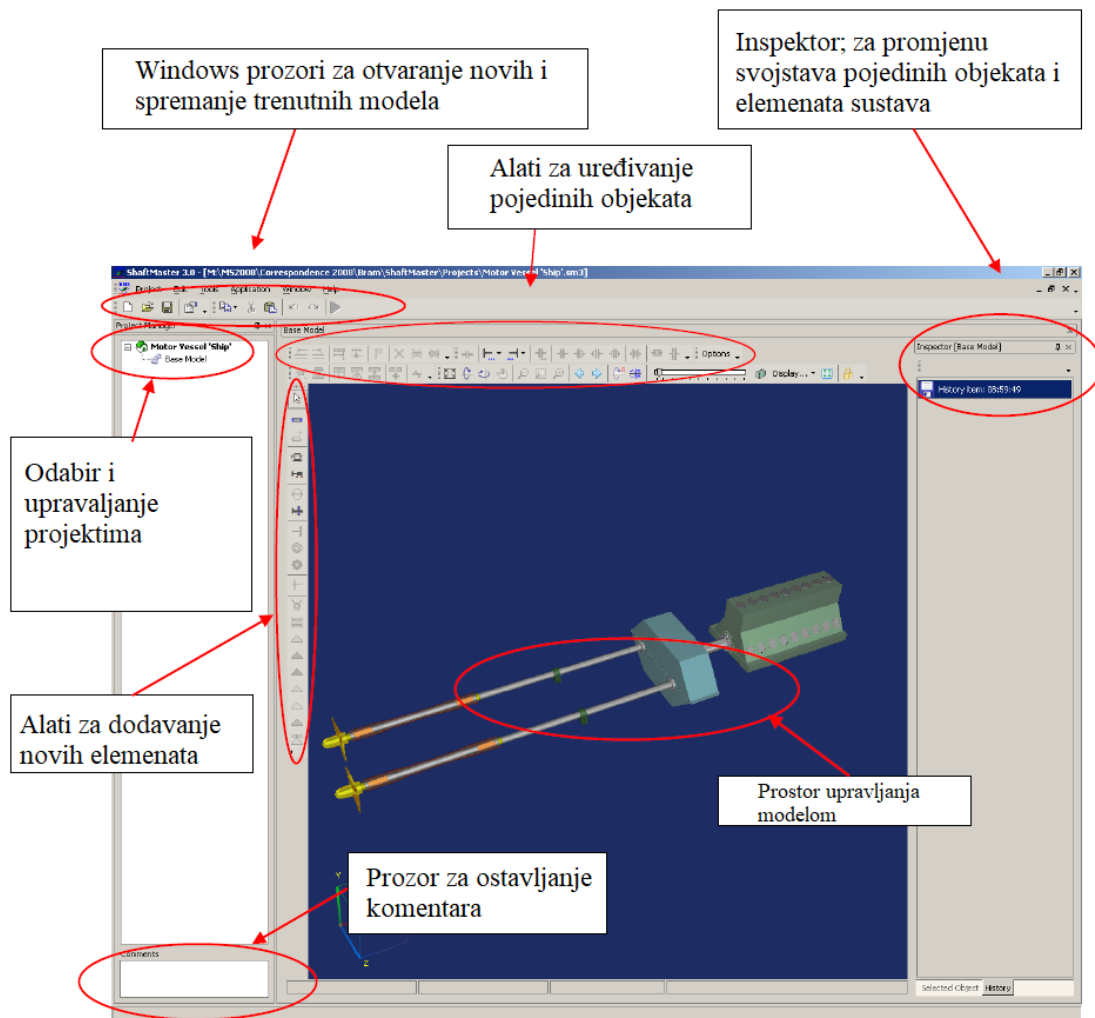
1. Stanje u kojem su svi pomaci ležajeva postavljeni u nulu, što pokazuje važnost proračuna centracije vratilnog voda
2. Idealni pomaci ležajeva – opterećenje ležaja u hladnom stanju za brod bez tereta i bez deformacija trupa,
3. Radni uvjeti – opterećenje ležajeva u radnim uvjetima, za koje se uzimaju u obzir deformacije trupa uslijed temperaturnog širenja temeljne ploče motora i ležajeva,
4. Uvjeti suhog doka – u ovome stanju brodski vijak se nalazi u zraku te nema drugih opterećenja na brodski vijak, osim njegove vlastite težine,
5. 100% MCR – dinamičko opterećenje ležajeva pri nazivnom opterećenju motora, uz temperaturno širenje temeljne ploče motora. [3]

#### **4.2. MODELIRANJE BRODSKOGA PORIVNOG SUSTAVA**

Računalni program SKF ShaftDesigner prilagođen je korisnicima, a njegovo vrlo jednostavno sučelje zasnovano na operativnom sustavu MS Windows omogućuje korisnicima rukovanje s više istodobnih projekata, osnovnih modela, aplikacija za izračun centracije vratilnog voda, ili vibracija odabranog realnog sustava.

Na slici 22. prikazan je zaslon programa sa osnovnim modelom te objašnjenjem pojedinih dijelova prozora programa. Program nudi vrlo jednostavan izbornik za dodavanje elemenata pojedinih dijelova brodskog porivnog sustava kao što su statvena cijev, brodski vijak s promjenljivim ili nepromjenljivim usponom, ležajevi međuvratila i statveni ležajevi. Nakon dodavanja novog elementa, sa desne strane pojavljuje se tzv. „inspektor“ u kojem je moguće uređivati karakteristike pojedinog elementa. [3]

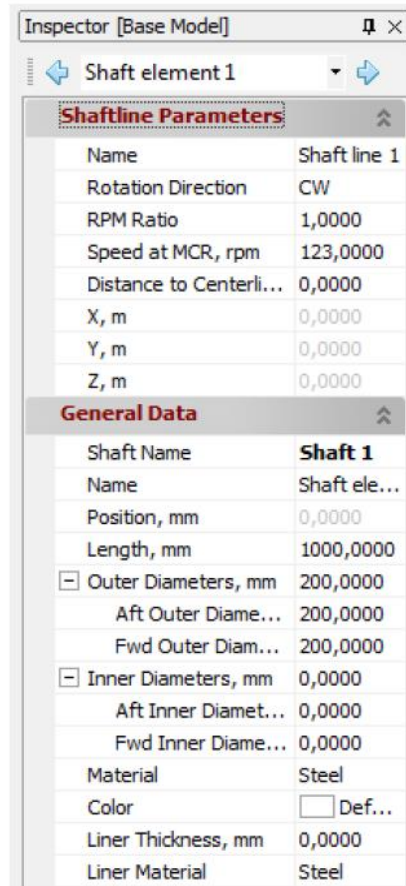
Za potrebe centracije vratilnog voda brodskog porivnog sustava, projektant mora precizno prema nacrtima modelirati svaki element brodskog porivnoga sustava, kako bi proračun na kraju bio što precizniji.



**Slika 22. Zaslom osnovnog modela [3]**

Nakon odabira i dodavanja novog elementa u brodski porivni sustav, s desne strane se pojavljuje izbornik u kojemu je moguće uređivati karakteristike pojedinog elementa. Sljedeća slika 23. prikazuje izbornik koji se u programu naziva „inspektor“. U njemu je moguće uređivati sve vrijednosti pojedinog elementa kao što su vanjski i unutarnji promjer pojedinog vratila, materijal, dužina, premazi za antikorozivnu zaštitu, te položaj samog elementa. [3]

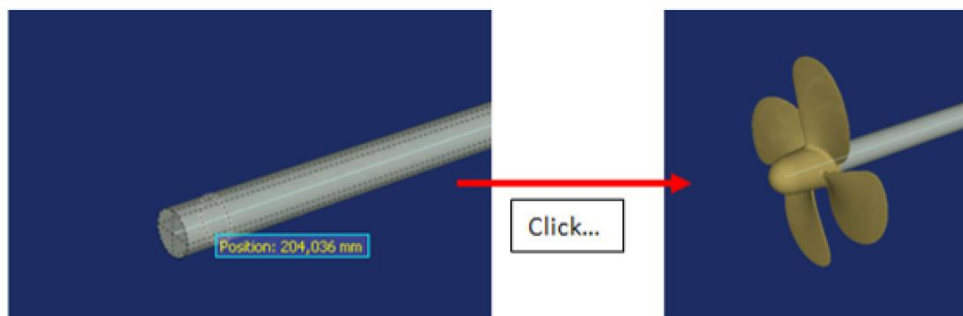
ShaftDesigner omogućuje korisniku brzo optimiziranje brodskih porivnih sustava, te mu pomaže u razumijevanju i izbjegavanju potencijalno štetnih problema usko vezanih uz centraciju i vibracije koje se javljaju u brodskom porivnom sustavu.



Slika 23. Inspektor [3]

#### 4.2.1. Modeliranje broskog vijka

Program korisnicima omogućava odabir broskog vijka s promjenljivim i sa nepromjenljivim usponom. Nakon ubacivanja broskog vijka kao što je prikazano na slici 24. i ovdje se pojavljuje inspektor u kojemu je moguće mijenjati vrijednosti i svojstva zadanog broskog vijka. Sve se promjene bilježe na osnovnom modelu. [3]



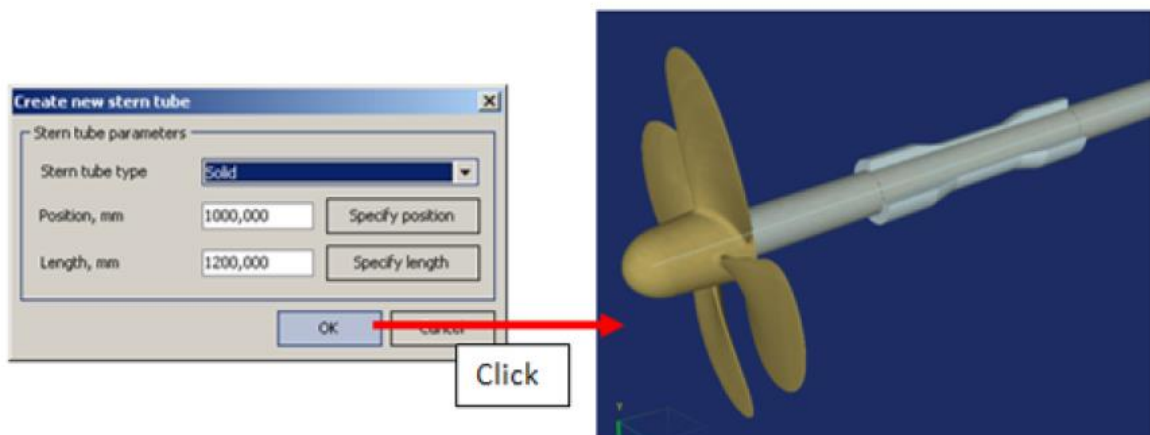
Slika 24. Prikaz postavljanja broskog vijka na vratilni vod [3]

U izborniku koji će se pojaviti nakon ubacivanja brodskog vijka moguće je promijeniti sljedeće vrijednosti:

- vrstu brodskog vijka,
- materijal brodskog vijka,
- poziciju brodskog vijka,
- promjer brodskog vijka,
- uspon brodskog vijka,
- broj krila brodskog vijka,
- duljinu glavine brodskog vijka,
- smjer vrtnje brodskog vijka, i
- masu brodskog vijka. [3]

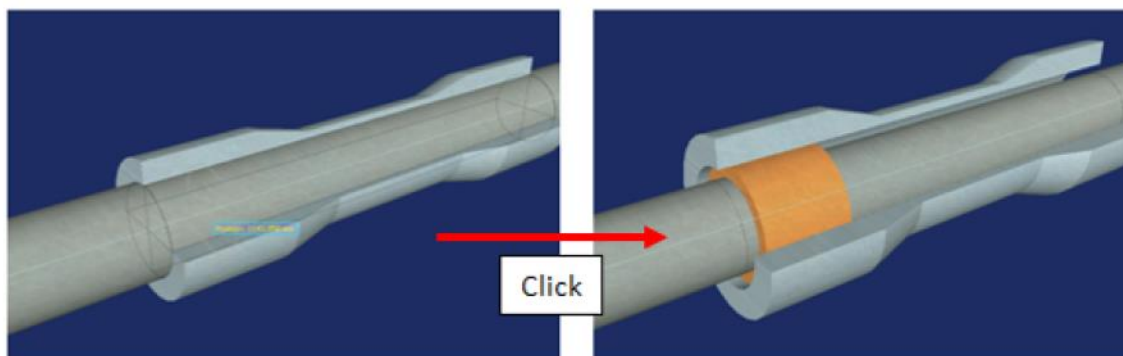
#### 4.2.2. Modeliranje statvene cijevi i ležajeva statvene cijevi

Prije dodavanja statvene cijevi modelu potrebno je odrediti poziciju i duljinu statvene cijevi, kao što je prikazano na slici 25. [3]



**Slika 25. Određivanje pozicije i duljine statvene cijevi [3]**

Ako je statvena cijev dio modela brodskoga porivnog sustava, moguće je postaviti ležajeve statvene cijevi. Nakon odabira kreiranja novog ležaja potrebno je odrediti poziciju na koju će se postaviti ležaj, kao što je prikazano na slici 26. [3]



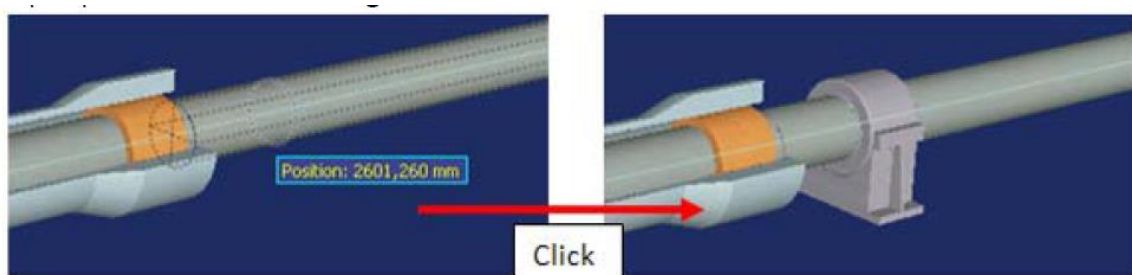
**Slika 26. Prikaz postavljanja ležaja statvene cijevi [3]**

U izborniku koji će se pojaviti nakon postavljanja ležaja moguće je promijeniti sljedeća svojstva i vrijednosti:

- materijal ležaja statvene cijevi,
- način podmazivanja statvenih ležajeva,
- duljinu statvenih ležajeva,
- zračnost statvenih ležajeva
- debljinu stjenke blazinice statvenih ležajeva. [3]

#### **4.2.3. Modeliranje ležaja međuvratila**

Nakon odabira postavljanja ležaja međuvratila potrebno je odrediti njihov uzdužni položaj na vratilnom vodu, koji mora biti između statvene cijevi i porivnog motora. Svojstva i vrijednosti koje se mogu promijeniti slične su ležajima statvene cijevi. Slika 27. prikazuje način ubacivanja ležaja međuvratila. [3]



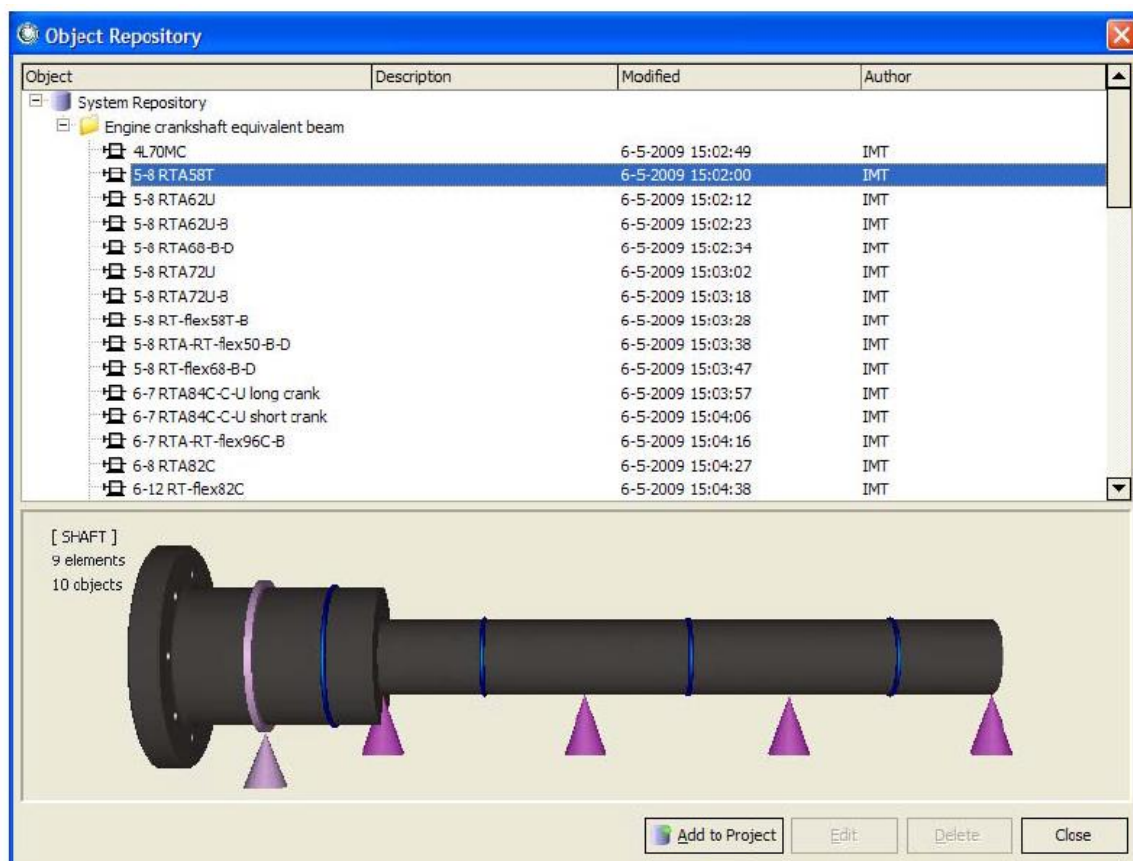
**Slika 27. Prikaz postavljanja ležaja međuvratila [3]**

#### 4.2.4. Modeliranje koljenastog vratila motora

Koljenasto vratilo porivnog motora u programu moguće je modelirati na dva načina:

1. Korisnik prema nacrtu koljenastog vratila proizvođača unosi sve podatke u program, koji modelira koljenasto vratilo
2. Korisnik modelira ekvivalentnu gredu, koja u proračunu zamjenjuje koljenasto vratilo. [3]

Program sa sobom donosi unaprijed modelirane ekvivalentne grede koljenastog vratila pojedinih proizvođača sporokretnih dizelskih motora, kao što su MAN B&W i Wärtsilä. Potrebno je odabrati model motora te ga dodati u model broskoga porivnog sustava. Slika 28. prikazuje jedan od modela ekvivalentne grede koljenastog vratila motora. [3]



Slika 28. Ekvivalentna greda koljenastog vratila motora [3]

## **5. RAČUNALNA SIMULACIJA PRORAČUNA CENTRACIJE VRATILNOG VODA U RAČUNALNOM PROGRAMU SKF SHAFTDESIGNER**

Moderno vrijeme obilježeno je naglim razvojem znanosti i tehnologije, što se odrazilo na brojne industrije. Nagli razvoj računala omogućio je procvat modeliranja i simulacija u svim granama tehnike i znanosti, a povećanjem brzine rada i kapaciteta memorije računala samo se širi opseg problema koji se uspješno simuliraju. Računalna simulacija podrazumijeva zadavanje geometrije, početnih i rubnih uvjeta, numeričko rješavanje postavljenog modela, te kritičku analizu rezultata. Za potrebe računalne simulacije na tržištu se pojavljuju komercijalni računalni alati, koji se sve više integriraju u dva smjera, prvo u CAD, CAM sustave i drugo u smislu simultanog rješavanja problema statičke čvrstoće, vibracija, prijelaza topline i strujanja fluida. [12]

Pojam računalna simulacija danas podrazumijeva:

- analizu realiteta (stvarnosti) s pomoću modela sastavljenog od instrukcija na računalu,
- uporabu modela za imitaciju ponašanja promatranog realiteta u ovisnosti o unaprijed zadanom scenariju. [6]

Za računalnu simulaciju centracije vratilnog voda i rješavanje problema i zadatka ovog diplomskog rada koristiti će se računalni program SKF ShaftDesigner.

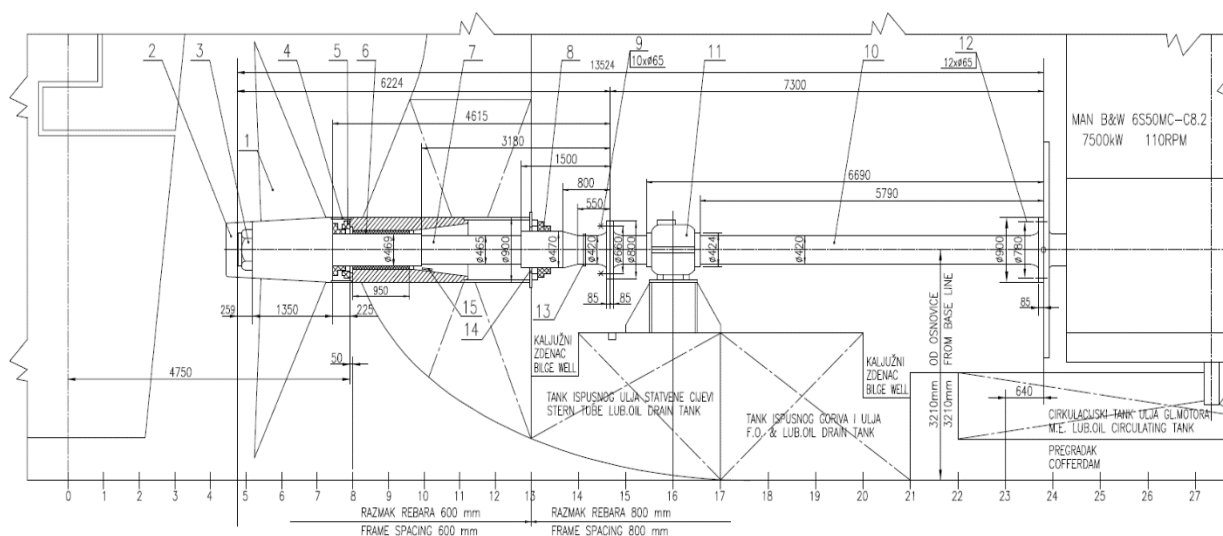
### **5.1. TEHNIČKI PODACI BRODSKOG PORIVNOG SUSTAVA**

Za potrebe ovoga diplomskog rada, sustav koji će se simulirati je Brodosplit-ova nekadašnja novogradnja 470, koja danas plovi pod imenom m/b „Solín“. Porivni stroj koji pokreće ovaj brod izrađen je u Brodosplitovoj Tvornici dizelskih motora po licenci MAN B&W, nazivne snage od 7500 kW pri 110 okr/min. Na slici 29. prikazan je brodski porivni sustav m/b Solín za prijevoz sipkog tereta, koji se sastoji od:

- broskog vijka,
- vratila broskog vijka,
- statvene cijevi sa stražnjim statvenim ležajem,
- međuvratila,
- ležaja međuvratila,



- porivnog stroja.



Slika 29. Brodski porivni sustav m/b „Solin“ [11]

### 5.1.1. Model brodskog porivnog sustava

Za izradu modela potrebno je unijeti sve podatke sukladne nacrtima kako bi rezultati proračun centracije vratilnog voda bili što točniji. Vratilo brodskog vijka i međuvratilo se modeliraju prema sljedećoj tablici 1. [10]

Tablica 1. Elementi vratila brodskog vijka i međuvratila

Pozicija elementa [mm]	Broj elementa	Dimenzije elementa				sredstvo uranjanja
		$l$ [m]	$d_{vl}$ [mm]	$d_{vd}$ [mm]	$d_u$ [mm]	
0	1	259	516	516	0	zrak
259	2	606	402	432	0	morska voda
865	3	744	432	469	0	morska voda
1609	4	115	469	469	0	morska voda
1724	5	200	469	469	0	ulje
1924	6	475	469	469	0	ulje
2399	7	475	469	469	0	ulje
2874	8	170	469	469	0	ulje
3044	9	1680	465	465	0	ulje

4724	10	170	470	470	0	ulje
4894	11	210	470	470	0	ulje
5104	12	320	470	470	0	zrak
5424	13	250	470	420	0	zrak
5674	14	220	420	420	0	zrak
5894	15	245	420	420	0	zrak
6139	16	85	800	800	0	zrak
6224	17	85	800	800	0	zrak
6309	18	525	420	420	0	zrak
6834	19	450	424	424	0	zrak
7284	20	450	424	424	0	zrak
7734	21	4350	420	420	0	zrak
12084	22	1355	420	420	0	zrak
13439	23	85	900	900	0	zrak

U svrhu što kvalitetnijeg izračuna ležajnih reakcija vrlo je bitno pozicionirati svaki od ležaja prema nacrtu. Za modeliranje ležaja međuvratila i statvenog ležaja potrebno je unijeti sljedeće podatke prema Tablici 2. U Tablici 3 prikazani su podaci potrebni za modeliranje brodskog vijka.

**Tablica 2. Podaci o ležajevima**

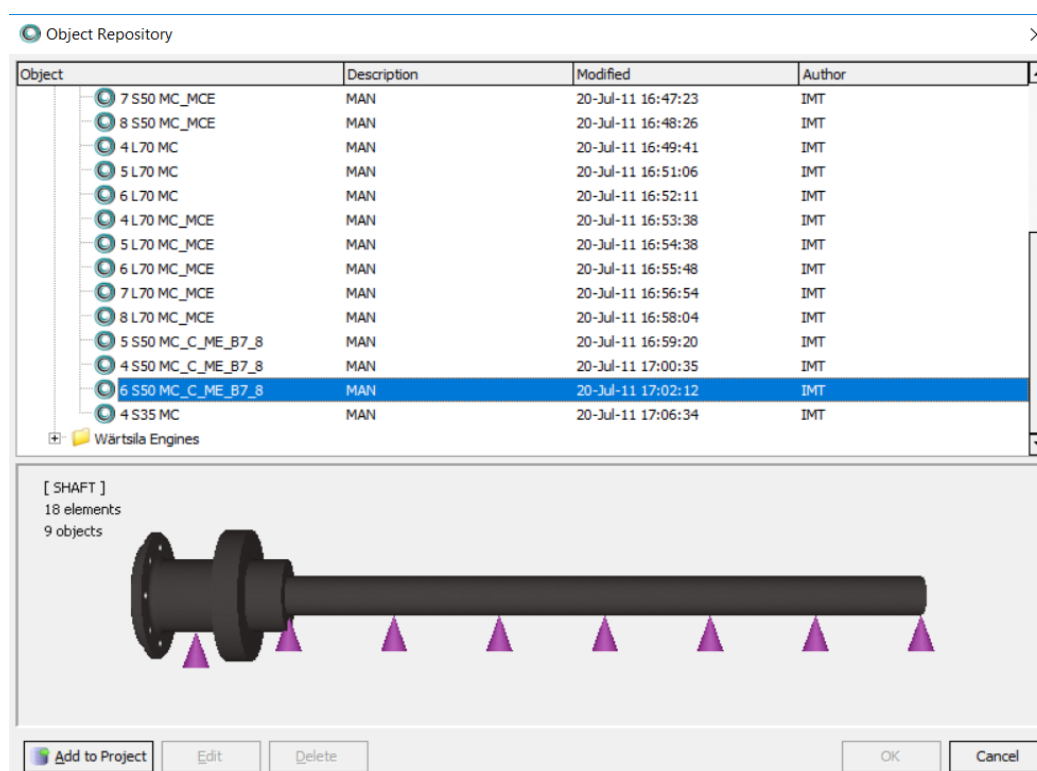
Vrsta ležaja	Pozicija [mm]	Dimenzije ležaja			
		Materijal	Duljina blazinice [mm]	Zračnost [mm]	Način podmazivanja
Ležaj statvene cijevi	7284	Bijela kovina	950	0,769	ulje
Ležaj međuvratila	2399	Bijela kovina	900	0,724	ulje

Dopuštene zračnosti u ležaju statvene cijevi i međuvratila dobivene su prema uputi za rad Hrvatskog registra brodova. [6]

**Tablica 3. Podaci o brodskom vijku**

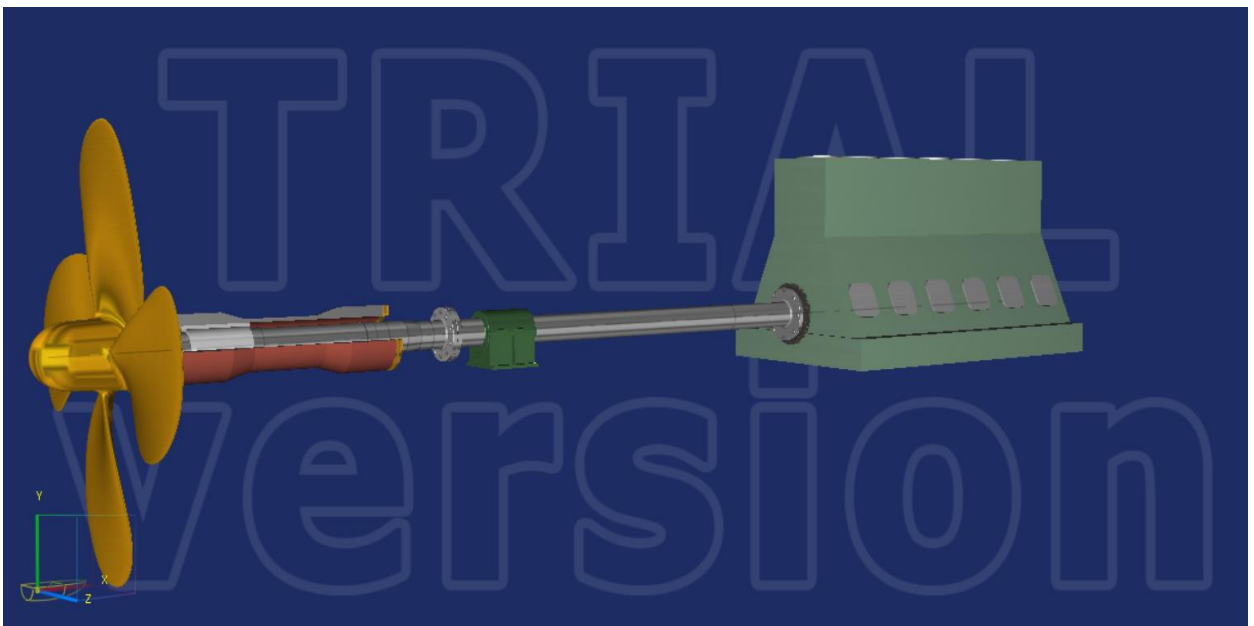
Materijal	Bronca
Promjer [mm]	6000
Ušpon [mm]	4365
Broj krila	4
Dužina glavine [mm]	1350
Masa [kg]	14446

Nakon modeliranja vratila brodskog vijka, međuvratila, brodskog vijka i ležaja međuvratila u model je potrebno dodati porivni motor. U programu ShaftDesigner moguće je dodati unaprijed definirane modele koljenastog vratila. Na slici 30. prikazan je model porivnog stroja MAN B&W 6S50MC-C koji će se dodati na prirubnicu međuvratila.



**Slika 30. Ekvivalentna greda koljenastog vratila motora MAN B&W 6S50MC-C [3]**

Nakon unosa svih potrebnih podataka, model je spreman za računalnu simulaciju centracije vratilnog voda. Proračunski slučaj na kojem će se pokazati primjenjivost računalnog programa ShaftDesigner je potpuno spojen vod vratila s potpuno uronjenim brodskim vijkom i sustavom u hladnom stanju. Proračun se provodi u okomitoj ravnini u kojoj se u obzir moraju uzeti utjecaji vlastite težine pojedinog elementa i uzgona za uronjene elemente. Model broskog porivnog sustava Brodosplitove novogradnje 470. prikazan je na slici 31.



**Slika 31. Model broskog porivnog sustava [3]**

## **5.2. REZULTATI PRORAČUNA CENTRACIJE VRATILNOG VODA U PROGRAMU SHAFTDESIGNER**

Proračunom centracije vratilnog voda potrebno je odrediti vertikalne položaje ležajeva broskog porivnog sustava u svrhu zadovoljavanja i osiguravanja kriterija prihvatljivosti. ShaftDesigner omogućava optimizaciju broskog porivnog sustava u svrhu pronalaženja idealnih uvjeta za sve radne uvjete tokom eksploatacije broda.

### **5.2.1. Rezultati proračuna uslijed nultih pomaka ležaja**

Ovaj dio cjelovitog proračuna je vrlo važan, jer pokazuje samu svrhu proračuna centracije vratilnog voda. Prije pokretanja računalne simulacije potrebno je postaviti

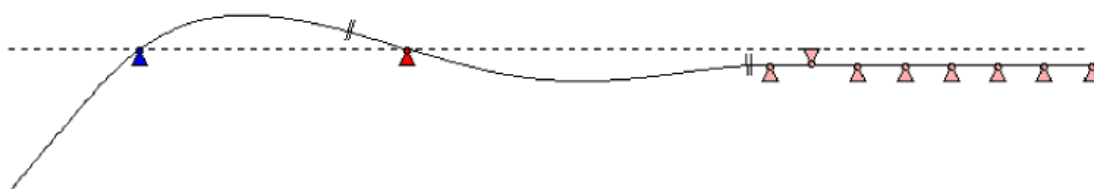
vertikalnu poziciju svih ležajeva na nulu. Kada je pozicija ležajeva postavljena, potrebno je odrediti medij u koji je pojedino vratilo uronjeno. Dio vratila broskog vijka u statvenoj cijevi biti će uronjen u ulje dok će preostali prednji dio vratila biti uronjen u morsku vodu.

Od velike je važnosti postaviti dodatne sile koje će djelovati na motor, a to je vlastita težina dijelova stapnog mehanizma, koja djeluje na koljenasto vratilo.

Pokretanjem računalne simulacije uz nulte pomake ležajeva dobivaju se sljedeći rezultati proračuna prikazani u Tablici 4. Iz prikazanoga se mogu vidjeti ležajne reakcije za svih 10 ležajeva.

Tablica 4. Rezultati proračuna uslijed nultih pomaka ležajeva

Ležaj	Pozicija [mm]	Pomak [mm]	Ležajna reakcija [kN]	Dopuštene vrijednosti [kN]	
				$F_{\min}$	$F_{\max}$
1	2399	0	226.0491	22.2775	360.8955
2	7284	0	13.5681	19.0800	457.9200
3	13918	0	181.6634	14.5500	291.0000
4	14663	0	-74.196	14.5500	291.0000
5	15513	0	98.7795	14.5500	291.0000
6	16363	0	96.2669	14.5500	291.0000
7	17212	0	97.5569	14.5500	291.0000
8	18063	0	93.3604	14.5500	291.0000
9	18913	0	113.8962	14.5500	291.0000
10	19763	0	34.1481	14.5500	291.0000

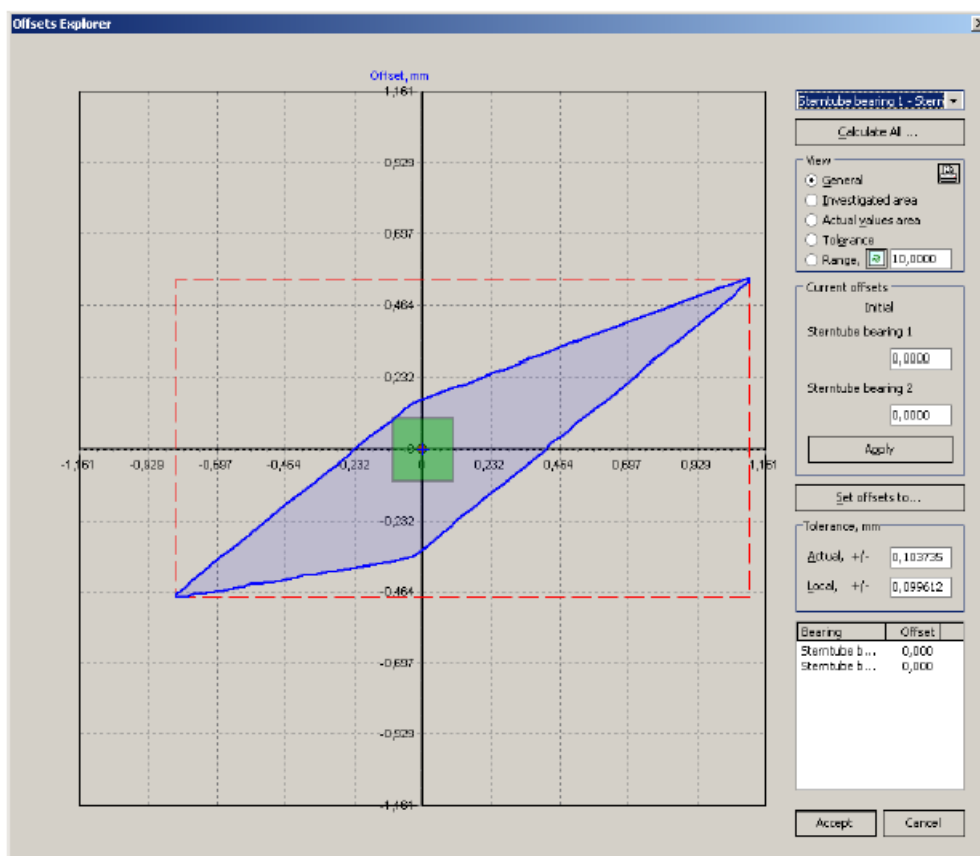


Slika 32. Elastična linija uz nulte pomake ležajeva [3]

## 5.2.2. Rezultati proračuna uz idealne pomake ležajeva

Nakon završetka proračuna centracije uz nulte pomake ležajeva potrebno je zadovoljiti uvjete u kojima će svaka ležajna reakcija biti u granicama dozvoljenih vrijednosti. Ono što ShaftDesigner nudi svojim korisnicima je mogućnost automatiziranog pronalaska dozvoljenih vertikalnih pomaka ležajeva uz zadovoljavanje kriterija prihvatljivosti.

Pokretanjem računalne simulacije za pronalaženje prihvatljivih pomaka ležajeva, program će ponuditi rezultate u granicama prihvatljivosti ukoliko je to moguće. Potrebno je odabrati ležajeve koji se žele optimirati, te postaviti kriterije prihvatljivosti kojima se treba udovoljiti. Simulacija također nudi tolerancije s kojima je moguće raditi, odnosno razliku između proračunskih vrijednosti i granica prihvatljivih vrijednosti. Kad su tolerancije male, prilikom centracije projektant mora raditi vrlo precizno. Ponekad nije moguće raditi s tolerancijama koje nudi računalni program ShaftDesigner.



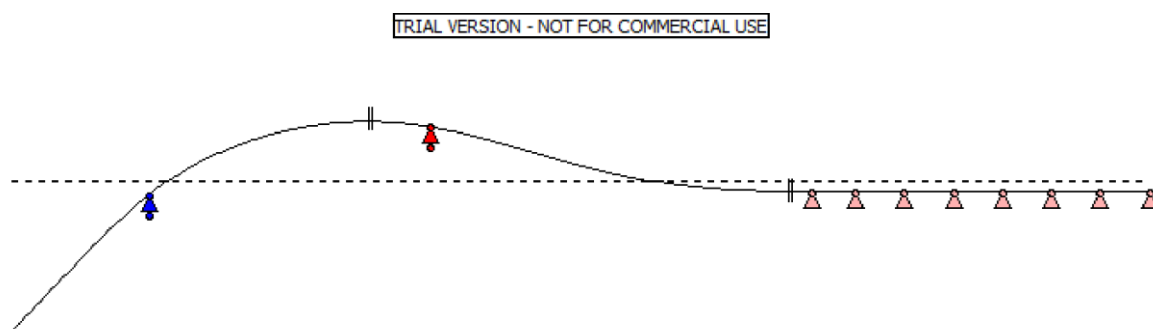
Slika 33. Pretraživač pomaka [3]

Na slici 33. u plavome prostoru prikazani su pomaci statvenog ležaja koji zadovoljavaju kriterije prihvatljivosti. U zelenom kvadratiću prikazane su tolerancije s kojima je moguće raditi.

Dobiveni rezultati proračuna centracije vratilnog voda za idealne uvjete gdje su sva opterećenja i reakcije u ležajevima u granicama prihvatljivosti prikazani su u tablici 5.

**Tablica 5. Rezultati proračuna uslijed idealnih pomaka ležajeva**

Ležaj	Pozicija [mm]	Pomak [mm]	Ležajna reakcija [kN]	Dopuštene vrijednosti [kN]	
				$F_{\min}$	$F_{\max}$
1	2399	0.3057	212.8604	22.2775	360.8955
2	7284	-1.2845	46.4349	19.0800	457.9200
3	13918	0	73.5270	14.5500	291.0000
4	14663	0	14.5500	14.5500	291.0000
5	15513	0	98.7181	14.5500	291.0000
6	16363	0	96.2792	14.5500	291.0000
7	17212	0	97.5544	14.5500	291.0000
8	18063	0	93.3609	14.5500	291.0000
9	18913	0	113.8961	14.5500	291.0000
10	19763	0	34.1481	14.5500	291.0000



**Slika 34. Elastična linija uz idealne pomake ležajeva [3]**

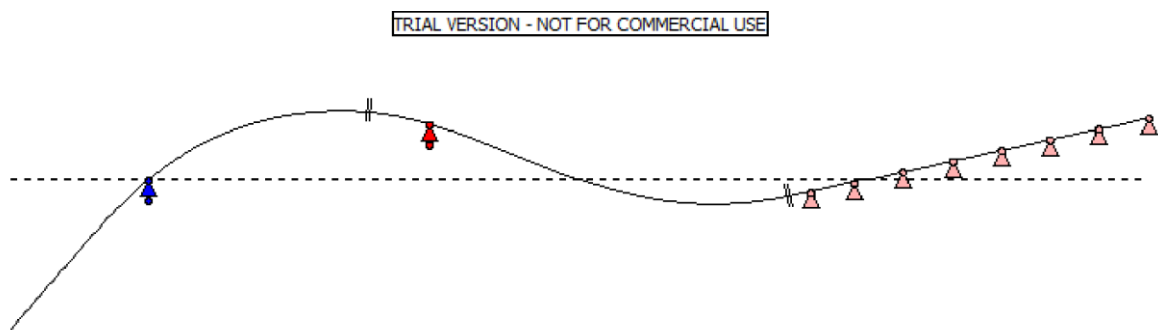
### 5.2.3. Rezultati proračuna uz projektirane pomake ležajeva

Unosom podataka iz Tablice 1. sa projektiranim pomacima ležajeva u program ShafDesigner dobivaju se rezultati proračuna prikazani u Tablici 6. Program također

prikazuje grafove momenta savijanja, progiba, nagiba, poprečnih sila i napreznja uslijed projektiranih pomaka ležajeva. Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da su rezultati ležajnih reakcija približno jednaki onima dobivenim u specijalno razvijenom programu „S04MarShAI“ od strane Hrvatskog registra brodova, čime je prikazani model verificiran.

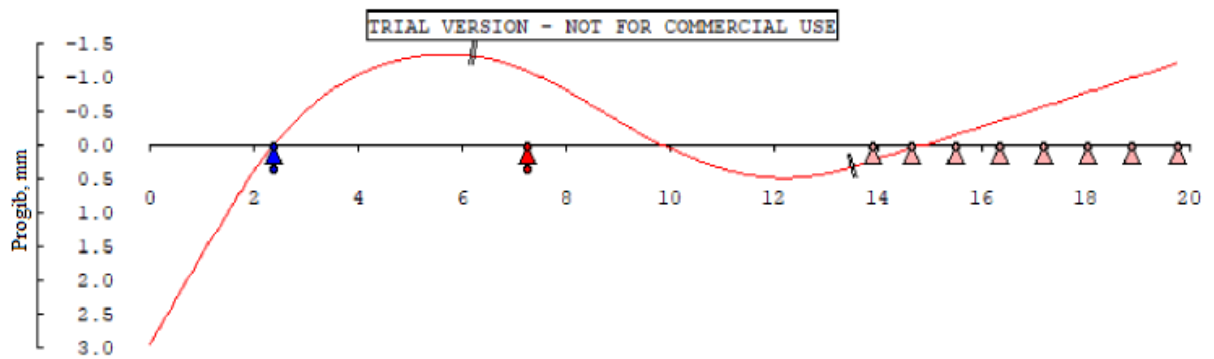
**Tablica 6. Rezultati proračuna uslijed projektiranih pomaka ležajeva**

Ležaj	Pozicija [mm]	Pomak [mm]	Ležajna reakcija [kN]	Dopuštene vrijednosti [kN]	
				F <sub>min</sub>	F <sub>max</sub>
1	2399	0	212.9452	22.2775	360.8955
2	7284	-1.1000	51.6512	19.0800	457.9200
3	13918	0	17.8761	14.5500	291.0000
4	14663	-0.1890	67.3554	14.5500	291.0000
5	15513	-0.4010	94.8323	14.5500	291.0000
6	16363	-0.6140	98.3580	14.5500	291.0000
7	17212	-0.8260	95.8550	14.5500	291.0000
8	18063	-1.0390	94.8941	14.5500	291.0000
9	18913	-1.2510	112.8476	14.5500	291.0000
10	19763	-1.4640	34.4751	14.5500	291.0000

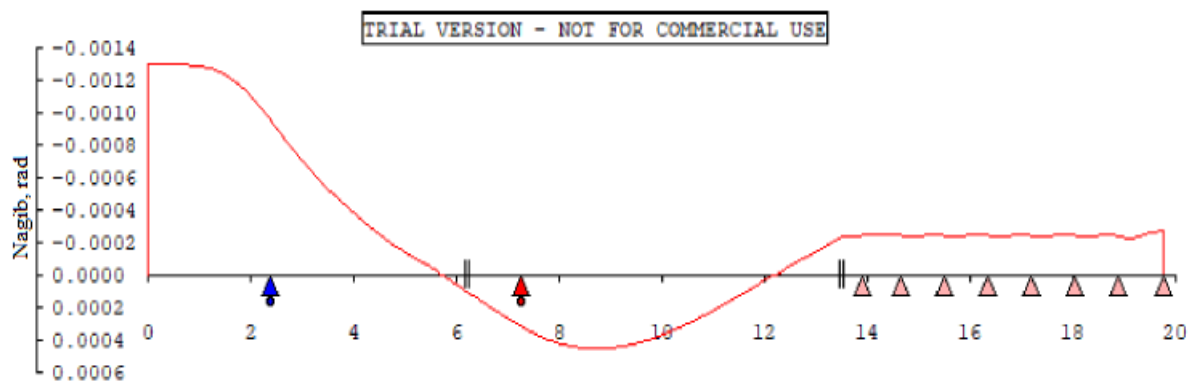


**Slika 35. Elastična linija uslijed projektiranih pomaka ležajeva [3]**

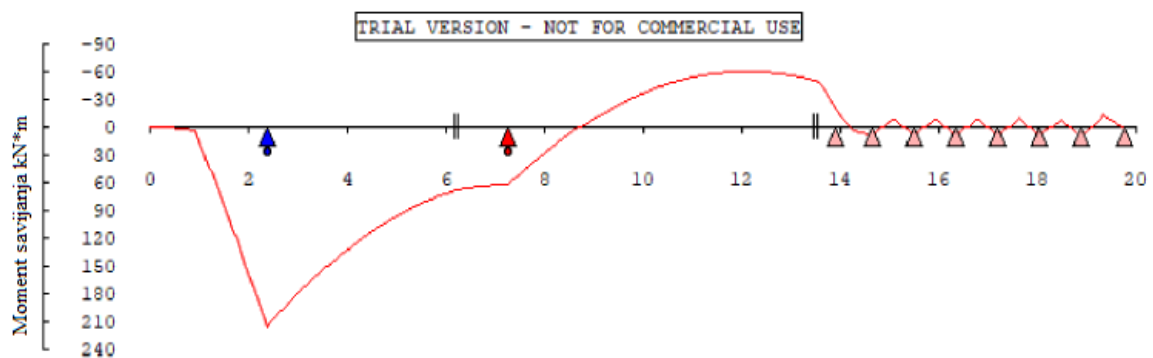




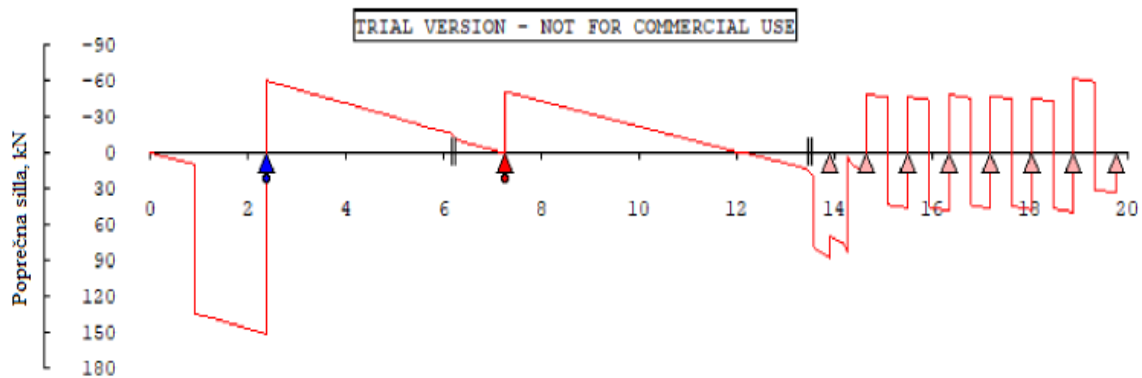
Slika 36. Dijagram progiba za projektirane pomake ležajeva



Slika 37. Dijagram nagiba za projektirane pomake ležajeva



Slika 38. Dijagram momenta savijanja za projektirane pomake ležajeva



Slika 39. Dijagram poprečnih sila za projektirane pomake ležajeva

### 5.3. REZULTATI PRORAČUNA CENTRACIJE VRATILNOG VODA PREMA HRB PRORAČUNU

„S04MarShAl“ je namjenski razvijen program Hrvatskog registra brodova, koji se na Pomorskom fakultetu koristi u svrhu proračuna centracije voda vratila s krutim i linearno elastičnim osloncima u jednoj ravnini. Utjecaji vlastite težine i uzgona uključeni su u stvarni sustav koji se sastoji od 8 ležajeva. Rezultati dobiveni u ovome programu prikazani su u svrhu usporedbe istih sa rezultatima dobivenih u računalnom programu ShaftDesigner. Proračunski slučajevi su isti, tj. proračun se radi s brodskim vijkom u potpunosti uronjenim u more, a za porivni stroj u hladnom stanju.

#### 5.3.1. Rezultati proračuna uslijed nultih pomaka ležajeva

Reakcije ležajeva dobivene u programu „S04MarShAl“ uz nulte pomake ležajeva prikazane su u Tablici 7. [10]

Tablica 7. Rezultati proračuna uslijed nultih pomaka ležajeva

Ležaj	Pozicija [mm]	Pomak [mm]	Ležajna reakcija [kN]
1	2399	0	229.368
2	7284	0	7.255
3	13918	0	199.095
4	14673	0	-91.566
5	15523	0	94.245

6	16373	0	87.596
7	17223	0	108.029
8	18073	0	31.939

### 5.3.2. Rezultati proračuna uslijed projektiranih pomaka ležajeva

Reakcije ležajeva dobivene u programu „S04MarShAl“ uz projektirane pomake ležajeva prikazane su u Tablici 8. [10]

**Tablica 8. Rezultati proračuna uslijed projektiranih pomaka ležajeva**

Ležaj	Pozicija [mm]	Pomak [mm]	Ležajna reakcija [kN]
1	2399	0	215.650
2	7284	-1.1	47.156
3	13918	0	31.299
4	14673	-0.18875	50.362
5	15523	-0.40125	93.864
6	16373	-0.61375	87.674
7	17223	-0.82625	108.014
8	18073	-1.03875	31.941

## 5.4. USPOREDBA I RASPRAVA REZULTATA PRORAČUNA CENTRACIJE VRATILNOG VODA

U svrhu usporedbe rezultata dobivenih u računalnom programu ShaftDesigner i rezultata dobivenih u programu „S04MarShAl“, rezultati se prikazuju sljedećim tablicama, u kojima se uspoređuju ležajne reakcije za nulte i za projektirane pomake ležajeva. U obzir će se uzeti 6 ležajeva stvarnog sustava počevši od statvenog ležaja.

**Tablica 9. Razlika ShaftDesigner proračuna prema HRB proračunu za nulte pomake ležajeva**

Pozicija	Ležaj	Pomak [mm]	Ležajne reakcije [kN]		Relativno odstupanje [%]	Apsolutno odstupanje [kN]
			ShaftDesigner	HRB		
2399	1	0	226.05	229.37	-1.5	-3.32
7284	2	0	13.57	7.26	87	6.31
13918	3	0	181.66	199.01	-8.8	-17.35
14673	4	0	-74.20	-91.57	-19	17.37
15523	5	0	98.78	94.25	4.8	4.53
16373	6	0	96.27	87.60	10	8.67

Dobiveni rezultati ležajnih reakcija za nulte pomake ležajeva u oba slučaja prikazuju usklađene rezultate gdje su u oba slučaja ležajne reakcije na četvrtom ležaju negativne. Veće odstupanje od 87% primjećuje se na ležaju statvene cijevi u rezultatima proračuna dobivenim u računalnom programu ShaftDesigner. Razlog je jednostavan: radi se o maloj vrijednosti ležajne reakcije, za koju je relativno odstupanje veliko, ali apsolutno odstupanje u granicama raspona apsolutnih odstupanja za ostale ležajeva.

**Tablica 10. Razlika ShaftDesigner proračuna prema HRB proračunu za projektirane pomake ležajeva**

Pozicija	Ležaj	Pomak [mm]	Ležajne reakcije [kN]		Relativno odstupanje [%]	Apsolutno odstupanje [kN]
			ShaftDesigner	HRB		
2399	1	0	212.95	215.65	-1.3	-2.7
7284	2	-1.1	51.65	47.16	9.5	4.49
13918	3	0	17.88	31.30	-42.9	-13.42
14673	4	-0.18875	67.36	50.36	33.7	17
15523	5	-0.40125	94.83	93.86	1.0	0.97
16373	6	-0.61375	98.36	87.67	12.2	10.69

Usporedbom rezultata dobivenih u programu ShaftDesigner s projektiranim pomacima ležajeva, sa rezultatima dobivenih u programu „S04MarShAl“, mogu se uočiti veća odstupanja na trećem i četvrtom ležaju stvarnog sustava, gdje je u slučaju programa ShaftDesigner ležajna reakcija na trećem ležaju manja za 42.89%, a na četvrtom veća za 33.74%. Obrnuto je kod rezultata proračuna dobivenih u programu „S04MarShAl“.

Iz prikazanih rezultata može se nedvojbeno zaključiti da programi ShaftDesigner i program S04MarShAl, koji se koriste na Pomorskom fakultetu daju međusobno usklađene rezultate.

ShaftDesigner pokazao se kao vrlo koristan i jednostavan alat pri izradi modela brodskog porivnog sustava. Korisničko sučelje projektantu omogućava da na vrlo jednostavan način odabere pojedini element brodskog porivnog sustava kojeg želi dodati u već postojeći model brodskog porivnog sustava. Mogućnost istraživanja i pronalaženja prihvatljivih vertikalnih pomaka pojedinih ležajeva projektantu omogućava da optimizira položaj svih dijelova brodskog porivnog sustava. Iz svega navedenoga može se zaključiti da ShaftDesigner svojim korisnicama omogućava brzo i jednostavno modeliranje brodskih porivnih sustava uz određeno vrijeme prilagodbe rada u samom programu.

## 6. ZAKLJUČAK

Kako bi se osigurao pouzdan rad brodskog porivnog sustava tijekom cijelog životnog vijeka broda vrlo je bitno pravilno proračunati centraciju (postrojavanje) vratilnog voda, provesti njegovu ugradnju prema proračunu, te na kraju i provjeriti postignuto stanje. Udovoljavanjem unaprijed postavljenim zahtjevima, životni vijek brodskoga porivnog sustava može se značajno produljiti. U ovom su radu posebno obrađene različite utjecajne veličine, uključujući i deformacije trupa, a koje mogu imati značajan utjecaj na poremećaj uvjeta centracije vratilnog voda što može ostaviti nepovoljne posljedice na brodski porivni sustav.

Računalne simulacije uvelike su doprinijele u rješavanju svakodnevnih problema s kojima se susreću brodograditelji i brodstrojari. Zadatak ovoga rada bio je prikazati računalnu simulaciju proračuna centracije brodskog porivnog sustava u specijalno razvijenom programu u svrhu istoga. Objašnjen je postupak nastanka modela brodskoga porivnog sustava s ciljem lakšeg razumijevanja i korištenja računalnog programa ShaftDesigner.

Program ShaftDesigner omogućava brzu optimizaciju brodskoga porivnog sustava u svrhu rješavanja problema centracije vratilnog voda. Svojom jednostavnošću projektantima omogućuje vrlo jednostavno modeliranje sustava u svrhu pronalaženja prihvatljivih vertikalnih pomaka određenog ležaja ili pronalaženja pozicija kod modeliranja novih sustava u svrhu zadovoljavanja deformacija i naprezanja brodskog porivnog sustava.

U cilju lakšeg razumijevanja i pristupa računalnom programu ShaftDesigner u diplomskom radu opisan je proračun, postupak montaže i provjere centracije vratilnog voda tim programom. Krajnji je cilj spriječiti moguća oštećenja, koja mogu nastati na ležajevima brodskoga porivnog sustava, te tako poremetiti normalan rad porivnog stroja. Kako bi proračun centracije vratilnog voda bio što točniji, te kako bi se spriječila moguća oštećenja i posljedični troškovi potrebno je u proračunu:

- koristiti ekvivalentni profil grede, koji će u proračunu zamijeniti koljenasto vratilo s ciljem što točnijeg izračuna ležajnih reakcija porivnog stroja,
- optimirati poziciju ležaja međuvratila, kako bi se smanjila osjetljivost vratilnog voda na promjene vertikalnog pomaka ležaja međuvratila,
- predvidjeti ponašanje svih ležajeva tijekom mijenjanja stanja krcanja broda,

- što je više moguće uz preporuke proizvođača smanjiti opterećenje stražnjega ležaja motora.

Dobiveni rezultati ležajnih reakcija uz idealne pomake ležajeva koji su se dobili preko naredbe pretraživača pomaka zadovoljavajući su i približno slijede rezultate dobivene u ranije razvijenom i ispitanom programu „S04MarShAl“. Unosom projektiranih pomaka ležajeva u ShaftDesigner dobivaju se također približno jednaki rezultati onima u programu „S04MarShAl“. U svrhu rješavanja problema centracije vratilnog voda broskog porivnog sustava može se zaključiti da je računalni program ShaftDesigner vrlo pouzdan, precizan i detaljan način dobivanja rezultata u svrhu rješavanja problema centracije, a njegova brzina i jednostavnost korištenja također je jedna od stavki koju valja naglasiti. Stoga ima smisla projektante koji se bave centracijom vratilnog voda poticati na uporabu programa ShaftDesigner.

## LITERATURA

- [1] American Bureau of Shipping: *Propulsion shafting alignment*, ABS Plaza, 2014.
- [2] Nippon Kaiji Kyokai: *Guidelines of shafting alignment*, ClassNK, 2006.
- [3] SKF: *ShaftDesigner – Shaft alignment and vibration calculation software*, SKF Solution Factory – Marine Services, 2014.
- [4] Vulić, N.; Šestan, A.; Cvitanić, V.: *Shafting alignment calculation and validation criteria*, Trogir/Split, 2006.
- [5] Vulić, N.: *Centracija vodova vratila, provjera i kriteriji prihvatljivosti*, Hrvatski registar brodova, 1997.
- [6] Goić, S.: *Dopuštene zračnosti u ležaju statvene cijevi*, Hrvatski registar brodova, 1997.
- [7] Vulić, N.; Katalinić, M.: *Modeliranje i simuliranje statičkog odziva pri centraciji voda vratila (predavanja na Moodle portalu Merlin)*, Pomorski fakultet, Split, 2018.
- [8] Vulić, N.; Katalinić, M.: *Teoretske osnove modeliranja i simulacije (predavanja na Moodle portalu Merlin)*, Pomorski fakultet, Split, 2018.
- [9] Vulić, N.: *Centracija voda vratila – podaci i provjera kriterija*, Hrvatski registar brodova, 2012.
- [10] Vulić, N.: *Marine shafting alignment calculations*, Hrvatski registar brodova, 2012.
- [11] Tehnička dokumentacija: *Smještaj linije vratila nov. 470*, Brodosplit, 2011.
- [12] <https://www.fsb.unizg.hr/rs/Web/home.htm> (10.08.2019.)



## POPIS SLIKA

Slika 1. Elastična linija vratilnog voda.....	2
Slika 2. Proračunski model vratila .....	7
Slika 3. Usporedba reakcija u ležajevima za različite promjere rukavca koljenastog vratila .....	9
Slika 4. Broj ležajeva koji se uzima u obzir prilikom proračuna centracije od strane brodogradilišta .....	9
Slika 5. Utjecaj odabira broja ležajeva motora na ležajne reakcije.....	10
Slika 6. Montaža vratila uz privremene oslonce .....	11
Slika 7. Pomak ležajeva i promjena elastične linije u različitim uvjetima opterećenja..	12
Slika 8. Određivanje referentne linije .....	13
Slika 9. Primjena žice klavira .....	14
Slika 10. Stroj za koso bušenje .....	15
Slika 11. Nagib ležaja u statvenoj cijevi .....	16
Slika 12. Mjerenje otvaranja i spuštanja između prirubnica.....	18
Slika 13. Hidraulička dizalica .....	19
Slika 14. Razlika u dobivenim vrijednostima prilikom spuštanja i podizanja vratila ...	19
Slika 15. Mjerenje momenta savijanja korištenjem tenziometarskih traka postavljene u Wheatstoneov most .....	21
Slika 16. Telemetrijski sustav .....	21
Slika 17. Deformacije trupa u ovisnosti o stanju u kojem se brod nalazi .....	23
Slika 18. Djelomično i u potpunosti uronjen brodski vijak .....	23
Slika 19. Primjer raspodjele temperatura motora u režimu rada .....	24
Slika 20. Pregib motora uzrokovan temperaturnom razlikom gornjeg i donjeg dijela motora .....	24
Slika 21. Vertikalni pomak središta ležaja uzrokovan temperaturnim širenjem temeljne ploče.....	25
Slika 22. Zaslون osnovnog modela .....	29
Slika 23. Inspektor .....	30
Slika 24. Prikaz postavljanja broskog vijka na vratilni vod .....	30
Slika 25. Određivanje pozicije i duljine statvene cijevi .....	31
Slika 26. Prikaz postavljanja ležaja statvene cijevi .....	32

<b>Slika 27. Prikaz postavljanja ležaja međuvratila .....</b>	<b>32</b>
<b>Slika 28. Ekvivalentna greda koljenastog vratila motora.....</b>	<b>33</b>
<b>Slika 29. Brodski porivni sustav m/b „Solin“ .....</b>	<b>35</b>
<b>Slika 30. Ekvivalentna greda koljenastog vratila motora MAN B&amp;W 6S50MC-C .....</b>	<b>37</b>
<b>Slika 31. Model broskog porivnog sustava.....</b>	<b>38</b>
<b>Slika 32. Elastična linija uz nulte pomake ležajeva .....</b>	<b>39</b>
<b>Slika 33. Pretraživač pomaka .....</b>	<b>40</b>
<b>Slika 34. Elastična linija uz idealne pomake ležajeva .....</b>	<b>41</b>
<b>Slika 35. Elastična linija uslijed projektiranih pomaka ležajeva .....</b>	<b>42</b>
<b>Slika 36. Dijagram progiba za projektirane pomake ležajeva .....</b>	<b>43</b>
<b>Slika 37. Dijagram nagiba za projektirane pomake ležajeva .....</b>	<b>43</b>
<b>Slika 38. Dijagram momenta savijanja za projektirane pomake ležajeva .....</b>	<b>43</b>
<b>Slika 39. Dijagram poprečnih sila za projektirane pomake ležajeva .....</b>	<b>44</b>

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Elementi vratila brodskog vijka i međuvratila .....	35
Tablica 2. Podaci o ležajevima.....	36
Tablica 3. Podaci o brodskom vijku .....	37
Tablica 4. Rezultati proračuna uslijed nultih pomaka ležajeva .....	39
Tablica 5. Rezultati proračuna uslijed idealnih pomaka ležajeva .....	41
Tablica 6. Rezultati proračuna uslijed projektiranih pomaka ležajeva .....	42
Tablica 7. Rezultati proračuna uslijed nultih pomaka ležajeva .....	44
Tablica 8. Rezultati proračuna uslijed projektiranih pomaka ležajeva .....	45
Tablica 9. Razlika ShaftDesigner proračuna prema HRB proračunu za nulte pomake ležajeva .....	46
Tablica 10. Razlika ShaftDesigner proračuna prema HRB proračunu za projektirane pomake ležajeva .....	46

