

Projekt sustava vratilnog voda broda za prijevoz automobila

Sinovčić, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2008

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:713674>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-17**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Mentor :

prof. dr. sc. Ante Šestan

Sinovčić Ivan

Zagreb, 2008.

SAŽETAK

Cilj ovoga rada je prikazati metodologiju projektiranja sustava vratilnog voda broda za prijevoz automobila. Rad započinje proračunom snage otpora i poriva broda. Nakon toga slijedi proračun osnovnih geometrijskih značajki sastavnih dijelova vratilnog voda. U nastavku slijedi proračun centracije vratilnog voda te opis njegove ugradnje u strukturu broskog trupa. Kao prilog su dani crteži sastava vratilnog voda.

**SADRŽAJ**

POPIS TABLICA.....	III
POPIS SLIKA.....	IV
POPIS OZNAKA.....	V
UVOD.....	1
1 PRELIMINARNI PRORAČUN SNAGE OTPORA I PORIVA BRODA.....	2
1.1 PRORAČUN SNAGE OTPORA I PORIVA BRODA PROGRAMOM „NAVCAD“	2
1.2 PRORAČUN SNAGE OTPORA I PORIVA BRODA PROGRAMOM „OTPOR“	6
1.3 IZBOR GLAVNOG PORIVNOG STROJA	9
1.3.1 PRELIMINARNI IZBOR SERIJE MOTORA I BROJA CILINDARA.....	9
1.3.2 PROVJERA IZABRANOG MOTORA	11
2 PRORAČUN I DIMENZIONIRANJE SASTAVNIH ELEMENATA VRATILNOG VODA.....	13
2.1 MATERIJALI ZA IZRADU VRATILNOG VODA	13
2.2 MEĐUVRATILO I VRATILO VIJKA	14
2.2.1 PRORAČUN MINIMALNOG PROMJERA MEĐUVRATILA.....	14
2.2.2 PRORAČUN MINIMALNOG PROMJERA VRATILA VIJKA	15
2.3 PRIRUBNICE I SPOJNI VIJCI	16
2.3.1 PRORAČUN DEBLJINE PRIRUBNICE I RADIJUSA ZAKRIVLJENJA	16
2.3.2 PRORAČUN SPOJNIH VIJAKA.....	17
2.3.2.1 PRORAČUN SPOJNIH VIJAKA PRIRUBNICA MEĐUVRATILA I VRATILA VIJKA	17
2.3.2.2 PRORAČUN SPOJNIH VIJAKA PRIRUBNICA MEĐUVRATILA I KOLJENASTOG VRATILA.....	20
2.4 PRORAČUN I IZBOR RADIJALNIH LEŽAJEVA.....	21
2.4.1 EFEKTIVNA DULJINA LEŽAJEVA	21
2.4.1.1 PRORAČUN EFEKTIVNE DULJINE LEŽAJEVA	21
2.4.2 IZBOR RADIJALNIH LEŽAJEVA.....	23
2.5 IZBOR BRTVENICA STATVENE CIJEVI	26
2.6 SUSTAV PODMAZIVANJA STATVENE CIJEVI	29
2.7 SPAJANJE BRODSKOG VIJKA S VRATILOM.....	33
2.7.1 PRORAČUN DOSJEDA BRODSKOG VIJKA NA KONUS VRATILA VIJKA	34
2.7.1.1 PRORAČUN POTREBNOG KONTAKTNOG TLAKA PRI 35 °C	34
2.7.1.2 PRORAČUN MINIMALNE DULJINE NAVLAČENJA PRI 35 °C.....	35
2.7.1.3 MINIMALNA DULJINA NAVLAČENJA PRI TEMPERATURI OKOLINE.....	36
2.7.1.4 PRORAČUN ODGOVARAJUĆEG KONTAKTNOG TLAKA PRI TEMPERATURI OKOLINE	36
2.7.1.5 PRORAČUN MINIMALNE SILE ZA NAVLAČENJE PRI TEMPERATURI OKOLINE.....	37
2.7.1.6 PRORAČUN MAKSIMALNOG DOZVOLJENOG TLAKA PRI 0 °C	37
2.7.1.7 PRORAČUN MAKSIMALNE DOZVOLJENE DULJINE NAVLAČENJA	37
3 PRORAČUN CENTRACIJE OSOVINSKOG VODA (POSTROJAVANJE).....	38
3.1 CLAPEYRON-OVA METODA	38
3.2 METODA KONAČNIH ELEMENATA	41
3.3 FAKTORI KOJI UTJEČU NA ELASTIČNU LINIJU VRATILNOG VODA	44
3.3.1 SVOJSTVA MATERIJALA SASTAVNIH DIJELOVA VRATILNOG VODA	44
3.3.2 TEŽINE I UZGONI.....	44



3.3.3	TOPLINSKE DEFORMACIJE.....	45
3.4	DOPUŠTENE SILE, MOMENTI SAVIJANJA I OPTEREĆENJA LEŽAJEVA.....	45
3.4.1	MAKSIMALNA DOPUŠTENA OPTEREĆENJA LEŽAJA	46
3.4.2	MAKSIMALNO DOPUŠTENE REAKCIJE U LEŽAJEVIMA	46
3.4.3	MINIMALNO DOPUŠTENE REAKCIJE U LEŽAJEVIMA	47
3.4.4	NAJVEĆI DOPUŠTENI ORIJENTACIJSKI NAGIB TANGENTE NA ELASTIČNU LINIJU VRATILNOG VODA U STATVENOM LEŽAJU	48
3.5	PRORAČUN POSTROJAVANJA RAČUNALNIM PROGRAMOM ALICALC.....	49
3.5.1	ULAZNI PARAMETRI.....	49
3.5.2	ODREĐIVANJE UTJECAJNIH FAKTORA.....	54
3.5.3	NUMERIČKI I GRAFIČKI PRIKAZ REZULTATA PRORAČUNA	55
3.6	POSTUPAK MONTAŽE VRATILNOG VODA.....	57
3.6.1	MONTAŽA VRATILNOG VODA NA NAVOZU.....	57
3.6.2	MONTAŽA VRATILNOG VODA NAKON PORINUĆA	58
3.7	MJERENJE SAP-A I GAP-A.....	61
3.8	MJERENJE REAKCIJA U LEŽAJEVIMA.....	62
	ZAKLJUČAK	64
	POPIS LITERATURE.....	65



Popis tablica

Tablica 1 Ulazni parametri (program NavCAD)	2
Tablica 2 Rezultati proračuna (program „NavCAD“)	4
Tablica 3 Ulazni parametri (program „Otpor“)	6
Tablica 4 Rezultati proračuna (program „Otpor“)	7
Tablica 5 Vrijednosti faktora k za međuvratila	14
Tablica 6 Geometrijske karakteristike ležajeva statvene cijevi	24
Tablica 7 Geometrijske karakteristike ležaja međuvratila	25
Tablica 8 Geometrijske karakteristike brtvenica	28
Tablica 9 Ulazni parametri (čvorne točke od 1 do 30)	50
Tablica 10 Ulazni parametri (čvorne točke od 31 do 59)	51
Tablica 11 Ulazni parametri (čvorne točke od 60 do 67)	52
Tablica 12 Primijenjene sile i momenti	53
Tablica 13 Raspored ležajeva	53
Tablica 14 Utjecajni faktori.....	54
Tablica 15 Optimalni položaji ležajeva.....	54
Tablica 16 Proračunske reakcije u ležajevima	55
Tablica 17 Vrijednosti SAP-a i GAP-a (faza 1)	58
Tablica 18 Proračunske reakcije u ležajevima (faza 2).....	59
Tablica 19 Utjecajni faktori (za spoj vratilo vijka, međuvratilo).....	59
Tablica 20 Vrijednosti SAP-a i GAP-a (faza 2)	59
Tablica 21 Proračunske reakcije u ležajevima (faza 3)	60

Popis slika

Slika 1 Prikaz snaga i brzina koje djeluju na brod	3
Slika 2 Prognozni dijagram (program „NavCAD“)	5
Slika 3 Prognozni dijagram (program „Otpor“)	8
Slika 4 Izbor glavnog porivnog stroja (MAN B&W)	10
Slika 5 Kombinirani dijagram	11
Slika 6 Dijagram specifične potrošnje goriva	12
Slika 7 Skica vratilnog voda	13
Slika 8 Prirubnica međuvratila (spoj sa vratilom vijka)	18
Slika 9 Prirubnica međuvratila (spoj sa koljenastim vratilom)	19
Slika 10 Skica ležaja statvene cijevi	23
Slika 11 Skica ležaja međuvratila	25
Slika 12 Brtvenica tipa Simplex	26
Slika 13 Stražnja brtvenica SC2M	27
Slika 14 Prednja brtvenica SC2Z	27
Slika 15 Skica stražnje brtvenice (geometrijske karakteristike)	28
Slika 16 Skica prednje brtvenice (geometrijske karakteristike)	28
Slika 17 Shema sustava za podmazivanje statvene cijevi	32
Slika 18 Navlačenje vijka na vratilo uz pomoć hidraulične naprave	33
Slika 19 Kontinuirana greda	39
Slika 20 Kontinuirana greda podijeljena na dva susjedna raspona (l_i i l_{i+1})	39
Slika 21 Kontinuirana greda čiji oslonci nisu na istoj visini	40
Slika 22 Prikaz osnovnog elementa sa silama pomacima i momentima	41
Slika 23 Položaj reakcije u stražnjem statvenom ležaju	48
Slika 24 Mehanički ekvivalent vratilnog voda	52
Slika 25 Elastična linija vratilnog voda	55
Slika 26 Dijagram poprečnih sila	56
Slika 27 Dijagram momenata savijanja	56
Slika 28 Dijagram savojnog naprezanja	56
Slika 29 Dijagram dopuštenih momenata savijanja i poprečnih sila na prirubnici motora	57
Slika 30 Postrojavanje vratilnog voda (faza 1)	58
Slika 31 Postrojavanje vratilnog voda (faza 2)	59
Slika 32 Postrojavanje vratilnog voda (faza 3)	60
Slika 33 Definicija SAG-a i GAP-a	61
Slika 34 Mjerenje SAG-a i GAP-a	61
Slika 35 Mjerenje reakcije u ležaju	62
Slika 36 Dijagram podizanja	63

Popis oznaka

A_K	površina krnjeg stošca, m^3
B	najveća širina broda, m
C_B	koeficijent istisnine
d_{35}	minimalna duljina navlačenja pri 35 °C, mm
D_{bv}	vršni promjer brodskog vijka, mm
D_C	promjer vršne kružnice spojnih vijaka, mm
d_H	srednji vanjski promjer glavine vijka, mm
d_m	promjer međuvratila, mm
d_{psl}	promjer vratila unutar prednjeg statvenog ležaja, mm
d_S	srednji promjer konusa vratila vijka, mm
d_{sc}	promjer vratila unutar i ispred statvene cijevi, mm
d_{ssl}	promjer vratila unutar stražnjeg statvenog ležaja, mm
d_T	minimalna duljina navlačenja pri temperaturi okoline, mm
d_v	promjer tijela spojnih vijaka, mm
E_m	modul elastičnosti materijala glavine vijka (Ni-Al bronca)
E_p	modul elastičnosti materijala vratila vijka (čelik)
F_N	minimalna sila navlačenja pri temperaturi okoline prema, N
F_T	sila poriva, N
G	težina elementa, N
g	ubrzanje sile teže, m/s^2
G_u	težina uronjenog elementa, N
h	udaljenost od postolja motora do središta koljenastog vratila, mm
h_a	visina kontrolnih tankova za prednju i stražnju brtvenicu, mm
h_{min}	iskustveni podatak za minimalnu visinu nivoa ulja u gravitacijskom tanku, mm
h_{ut}	minimalna visina nivoa ulja u gravitacijskom tanku, mm
L_{ef}	efektivna duljina ležaja, mm
L_{pp}	dužina između pramčane i krmene okomice, m
L_{wl}	dužina broda na vodnoj liniji, m
m	masa elementa, kg
M_T	okretni moment motora, Nm
m_u	masa uronjenog elementa, kg
N	broj okretaja brodskog vijka, min^{-1}
n_{bv}	broj brodskih vijaka
n_{kbv}	broj krila brodskog vijka
N_{ov}	optimalan broj okretaja brodskog vijka, min^{-1}
n_v	broj kalibriranih vijaka

ρ	pretlak morske vode, Pa
ρ_{35}	potrebni kontaktni pritisak pri 35 °C, Pa
ρ_a	pretlak u sustavu podmazivanja brtvenica, Pa
P_B	snaga motora na kočnici, kW
P_D	snaga dovedena brodskom vijku, kW
P_E	efektivna snaga tegljenja broda, kW
ρ_{\max}	Maksimalni dozvoljeni tlak pri temperaturi okoline, Pa
P_T	snaga poriva, kW
ρ_T	kontaktni tlak pri temperaturi okoline, Pa
ρ_{us}	pretlak ulja, Pa
$R_{1\max}$	maksimalna reakcija u stražnjem ležaju statvene cijevi, N
$R_{1\min}$	minimalna dopuštena reakcija u stražnjem ležaju statvene cijevi, N
$R_{2\max}$	maksimalna reakcija u prednjem statvenom ležaju, N
$R_{2\min}$	minimalna reakcija u prednjem ležaju statvene cijevi, N
$R_{3\min}$	minimalna reakcija u ležaju međuvratila, N
$R_{3\max}$	maksimalna reakcija u ležaju međuvratila, N
$R_{4\max}$	maksimalna reakcija u ležajevima motora, N
$R_{4\min}$	minimalna reakcija u ležajevima motora, N
R_m	vlačna čvrstoća materijala vratila, N/mm ²
r_m	radijus zaobljenja vratila na prirubnici međuvratila, mm
R_{mv}	vlačna čvrstoća materijala spojnog vijka, N/mm ²
r_p	radijus zaobljenja vratila na prirubnici vratila vijka, mm
R_S	minimalna elastična čvrstoća materijala glavine vijka, N/mm ²
R_T	sila otpora tegljenja broda, N
S	oplakana površina brodskog trupa, m ²
s_F	koeficijent sigurnosti protiv proklizavanja brodskog vijka
T	proračunski gaz broda, m
t	koeficijent upijanja
t_1	visina simetrane glavine propelera mjerena od kobilice, mm
t_{pm}	debljina prirubnice međuvratila, mm
t_{pp}	debljina prirubnice vratila vijka, mm
U	sila uzgona, N
v	brzina broda, čv
V	volumen elementa, m ³
v_A	brzina vode koja nastrojava na brodski vijak, čv
V_{gt}	volumen gravitacijskog tanka, m ³
V_{is}	volumen istisnine, m ³
V_{pb}	volumen tanka za podmazivanje prednje brtvenice, m ³



V_{sb}	volumen tanka za podmazivanje stražnje brtvenice, m^3
V_{sc}	volumen otvora u statvenoj cijevi, m^3
V_u	volumen ulja u sustavu, m^3
V_{vw}	volumen vratila vijka unutar statvene cijevi, m^3
w	koeficijent sustrujanja
α_m	koeficijent linearnog produljenja za legure bakra, $1/^\circ C$
α_{max}	maksimalna dopuštena vrijednost nagiba elastične linije vratilnog voda, mrad
α_p	koeficijent linearnog produljenja za lijevani i kovani čelik, $1/^\circ C$
γ_e	specifična težina elementa, N/m^3
γ_v	specifična težina medija u koji je element uronjen, N/m^3
η_0	stupanj korisnosti izoliranog vijka
η_B	stupanj korisnosti vijka postavljenog iza trupa broda
η_D	stupanj korisnosti propulzije
η_H	stupanj utjecaja trupa
η_R	stupanj utjecaja prijelaza
η_{vw}	stupanj korisnosti vratilnog voda
μ	koeficijent trenja između dodirnih ploha
ν_m	Poissonov koeficijent materijala glavine vijka (Ni-Al bronca)
ν_p	Poissonov koeficijent materijala vratila vijka (čelik)
ρ_e	gustoća elementa, kg/m^3
ρ_v	gustoća medija u koji je element uronjen, kg/m^3
β	koeficijent širenja ulja, $1/^\circ C$
Δh	toplinsko rastezanje temeljne ploče motora, mm
ΔV	dilatacija ulja u sustavu, m^3
θ	kut nagiba konusa



Zagreb, 18. ožujak 2008

Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad izradio samostalno koristeći se znanjem stečenim na ovom fakultetu, kao i navedenom literaturom.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Anti Šestanu i djelatnicima brodogradilišta „Uljanik“ i „Uljanik Strojogradnja“ na stručnoj pomoći.

Sinovčić Ivan

Uvod

U ovom će radu biti obrađena metodologija projektiranja sustava vratilnog voda. Također, biti će prikazan detaljan opis praktične primjene proračunskih vrijednosti za izradu sastavnih dijelova vratilnog voda i njihove ugradnje u cjelinu. Sustav vratilnog voda vrlo je važan za normalno funkcioniranje broda pri obavljanju njegove primarne zadaće, a to je transport ljudi i roba, pomorskim i riječnim putovima. On osigurava prijenos snage sa brodskog motora na brodski vijak. Stoga je projektiranje takvog sustava složen posao te zahtijeva poznavanje značajki glavnog porivnog stroja, dimenzija strojarnice, smještaja strojarnice, konstrukcije krmenog prostora te karakteristike brodskog vijka.

Rad će biti podijeljen u nekoliko cjelina, a to su :

- preliminarni proračun snage otpora broda te određivanje snage poriva
- izbor glavnog porivnog stroja
- proračun i dimenzioniranje svih sastavnih elemenata vratilnog voda
- proračun, izbor i odabir radijalnih ležajeva i brtvenica
- detaljan opis postupka montaže sustava vratilnog voda

Proračun snage otpora broda može se provesti na više načina. Jedan od njih je primjena računala, a drugi eksperimentalan. Primjenom računala i određenih namjenskih programskih paketa može se u vrlo kratkom vremenu i uz korištenje minimalnih sredstava doći do zadovoljavajućih rezultata. Drugi je način ispitivanje modela broda u bazenu. Iako su računala danas vrlo razvijena još se uvijek najtočniji rezultati dobivaju modelskim ispitivanjima. Stoga se proračunske vrijednosti dobivene računalima korigiraju modelskim ispitivanjima preračunatim na stvarni brod.

Nakon određivanja snage poriva slijedi izbor motora. Izbor motora provodi se pomoću prognoznog dijagrama koji je konstruiran pomoću podataka dobivenih prethodno spomenutim proračunom. Izabire se motor zadovoljavajućih karakteristika, snage i brzine vrtnje. Nakon toga slijedi još provjera izabranog motora konstruiranjem kombiniranog dijagrama izlaznih karakteristika motora, dobivenih od proizvođača motora, te prognoznog dijagrama.

Proračun i dimenzioniranje sastavnih dijelova vratilnog voda vršiti će se u skladu s aktualnim propisima klasifikacijskog društva „Bureau Veritas“.

Na kraju, kao posljednja cjelina, biti će detaljno opisan postupak montaže sustava vratilnog voda u brodski trup. Ova cjelina obuhvaća i postupak centracije vratilnog voda ili postrojavanje. Postrojavanje je vrlo važna faza pri projektiranju sustava vratilnog voda, jer se njome osigurava da svi ležajevi u sklopu vratilnog voda budu pravilno opterećeni. Mora se izbjegavati preopterećenje, a i nedovoljno opterećenje ležaja.

Kao prilog daje se crtež sastava vratilnog voda.

1 Preliminarni proračun snage otpora i poriva broda

Preliminarni proračun snage otpora broda biti će proveden uz pomoć računala. Usporediti će se rezultati dvaju programskih paketa. Jedan, sada dostupan za korištenje studentima FSB-a, Hydrocomp-ov „NavCAD“, te „Otpor“, interni program za preliminarni proračun snage otpora brodogradilišta „Uljanik“.

1.1 Proračun snage otpora i poriva broda programom „NavCAD“

„NavCAD“ je program za predviđanje i analizu brzine broda i snage otpora broda. Također, omogućuje izbor odgovarajućih komponenti sustava propulzije kao što su : porivni stroj, reduktor i brodski vijak.

Za proračun snage otpora i poriva broda potrebno je zadati ulazne podatke u kojima se nalaze geometrijske karakteristike trupa i geometrijske karakteristike broskog vijka. Tablica 1 prikazuje ulazne podatke.

Geometrijske karakteristike trupa	
L_{pp}	173 m
L_{wl}	168 m
B	31,5 m
T	7,8 m
V_{is}	21412 m ³
S	5160 m ²
L_{wl} / B	5,33
B / T	4,038
C_B	0,514
Geometrijske karakteristike broskog vijka	
n_{bv}	1
D_{bv}	5,94 m
n_{kbv}	4

Tablica 1 *Ulazni parametri (program NavCAD)*

gdje su :

L_{pp} – dužina između pramčane i krmene okomice, m

L_{wl} – dužina broda na vodnoj liniji, m

B – najveća širina broda, m

T – proračunski gaz broda

V_{is} – volumen istisnine

S – oplakana površina broskog trupa

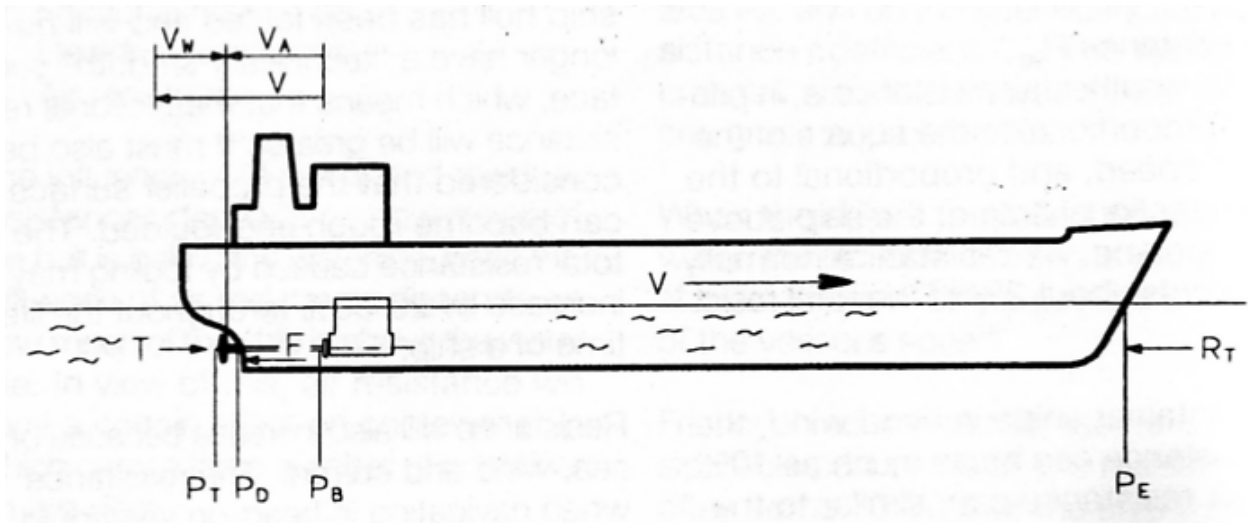
C_B – koeficijent istisnine

n_{bv} – broj broskih vijaka

D_{bv} – vršni promjer broskog vijka

n_{kbv} – broj krila broskog vijka

Na osnovu geometrijskih karakteristika broda moguće je izračunati silu otpora tegljenja broda R_T , odnosno snagu potrebnu za tegljenje broda ili snagu otpora broda. Potrebna sila poriva F_T kojom brodski vijak „gura“ brod brzinom v veća je od sile R_T . Ovo je uvjetovano gubicima koji će se poblježe objasniti.



Slika 1 Prikaz snaga i brzina koje djeluju na brod

Matematičke relacije između snaga prikazanih na slici 1 su :

efektivna snaga tegljenja broda:

$$P_E = R_T \cdot v$$

snaga poriva :

$$P_T = \frac{P_E}{\eta_H}$$

snaga dovedena brodskom vijku :

$$P_D = \frac{P_T}{\eta_B}$$

potrebna snaga porivnog stroja (snaga motora mjerena na kočnici) :

$$P_B = \frac{P_D}{\eta_{VV}}$$

gdje su :

R_T – sila otpora tegljenja broda, N

$\eta_H = \frac{1-t}{1-w}$ – stupanj utjecaja trupa

η_R – stupanj utjecaja prijelaza

η_0 – stupanj korisnosti izoliranog vijka

$\eta_B = \eta_0 \cdot \eta_R$ – stupanj korisnosti vijka postavljenog iza trupa broda

$\eta_D = \eta_H \cdot \eta_B$ – stupanj korisnosti propulzije

η_{VV} – stupanj korisnosti vratilnog voda

t – koeficijent upijanja

w – koeficijent sustrujanja

Programom „NavCAD“ dobivene su vrijednosti efektivne snage tegljenja broda P_E dok je snaga dovedena vijku P_D izračunata naknadno sa potrebnim koeficijentima određenim prema sličnom brodu :

$$\eta_R = 1,02$$

$$\eta_0 = 0,6$$

$$t = 0,208$$

$$w = 0,332$$

Rezultati proračuna su dani u tablici 2.

v [čv]	N [min^{-1}]	P_E [kW]	P_D [kW]	P_{D+SM} [kW]	$P_{D+SM+OM}$ [kW]
18	114	4677	6449	7416	8061
20	120	7366	10157	11680	12696
21	126	9058	12490	14364	15613
22	134	11014	15187	17465	18984

Tablica 2 Rezultati proračuna (program „NavCAD“)

gdje su :

v – brzina broda, čv

N – broj okretaja brodskog vijka, min^{-1}

P_E – efektivna snaga otpora broda, kW

P_D – snaga dovedena vijku, kW

P_{D+SM} – snaga dovedena vijku uvećana za dodatak SM

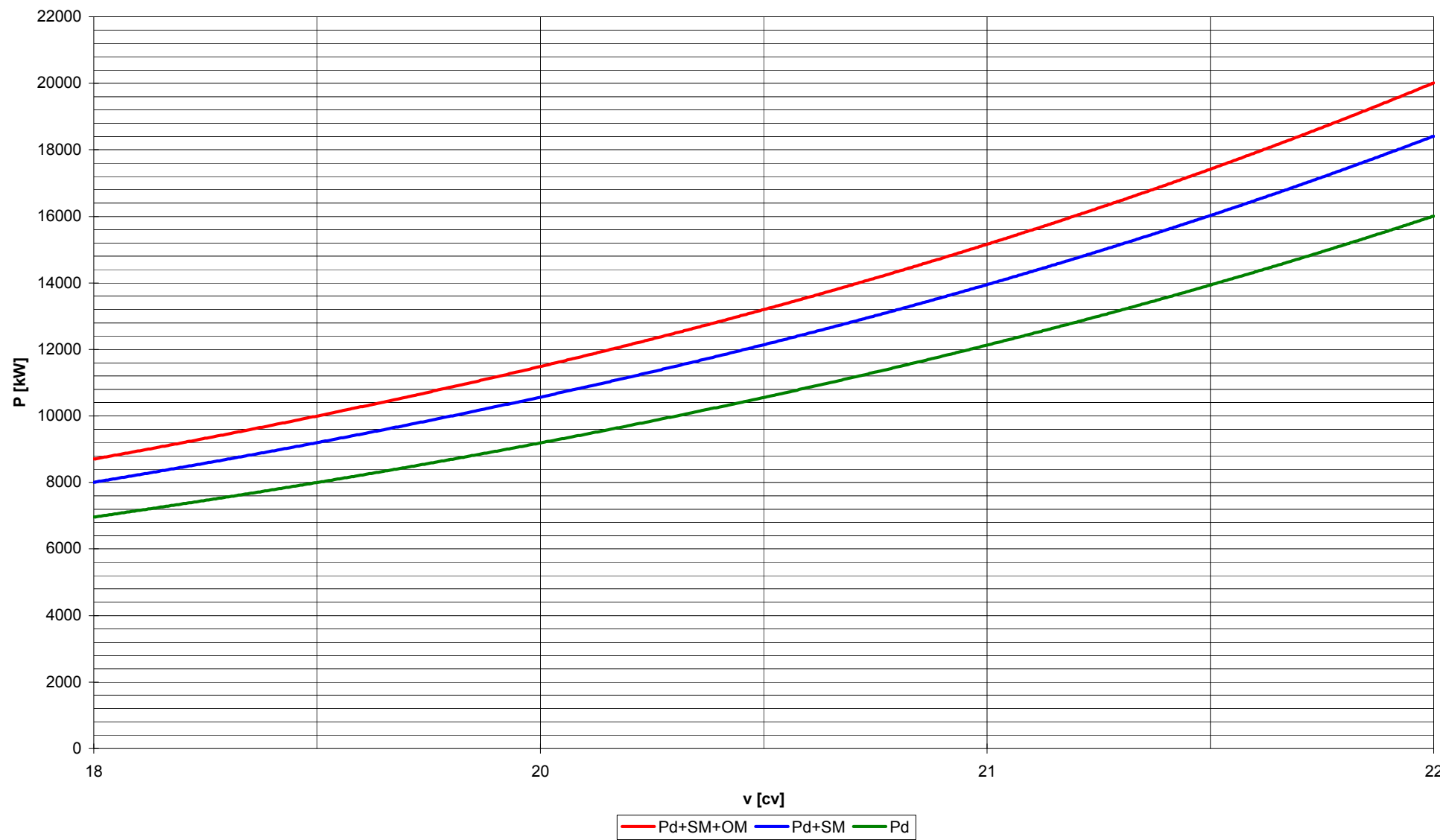
$P_{D+SM+OM}$ – snaga dovedena vijku uvećana za dodatke SM i OM

Nakon što je dobivena tablica sa vrijednostima snage dovedene vijku, ove se vrijednosti ucrtavaju u dijagram ovisnosti snage dovedene vijku o brzini ili $P=P(v)$, koji se naziva prognozni dijagram. U dijagram se ucrtavaju tri krivulje.

Prva krivulja prikazuje snagu dovedenu vijku za „čisti“ trup i brodski vijak te mirno more. Druge krivulje prikazuju efektivnu snagu uvećanu za određene dodatke, a to su :

- SM – „Sea margin“, dodatak snage koji uzima u obzir obraštanje trupa i propelera, morske struje i vremenske uvjete. Uobičajena vrijednost je 15%
- OM – „Engine margin“, dodatak kojim se osigurava da motor radi sa približno 90% opterećenja. Njime se osigurava rad s nižom potrošnjom goriva, te troškovima održavanja, a i zbog rezerve snage.

Prognozni dijagram je prikazan na slici 2.



Slika 2 Prognozni dijagram (program „NavCAD“)

1.2 Proračun snage otpora i poriva broda programom „Otpor“

Program „Otpor“ radi na istom principu kao i prije spomenuti. Razlika između ova dva programa je u tome što potonji uzima u obzir više utjecajnih faktora. Iz navedenog slijedi da će on davati i točnije rezultate. Postupak zadavanja ulaznih parametara jednak je kao i u prethodno opisanom programu, tj. unose se geometrijske značajke broda i broskog vijka. Ulazni parametri su prikazani u tablici 3.

Geometrijske karakteristike trupa	
L_{pp}	173 m
L_{wl}	168 m
B	31,5 m
T	7,8 m
V_{is}	21412 m ³
S	5160 m ²
L_{wl} / B	5,33
B / T	4,038
C_B	0,514
Geometrijske karakteristike broskog vijka	
n_{bv}	1
D_{bv}	5,94 m
n_{kbv}	4
P / D	0,91
A_E / A_0	0,7
N_{ov}	127

Tablica 3 Ulazni parametri (program „Otpor“)

gdje su :

L_{pp} – dužina između pramčane i krmene okomice, m

L_{wl} – dužina broda na vodnoj liniji, m

B – najveća širina broda, m

T – proračunski gaz broda

V_{is} – volumen istisnine

S – oplakana površina broskog trupa

C_B – koeficijent istisnine

n_{bv} – broj broskih vijaka

D_{bv} – vršni promjer broskog vijka

n_{kbv} – broj krila broskog vijka

P/D – omjer uspona i promjera vijka

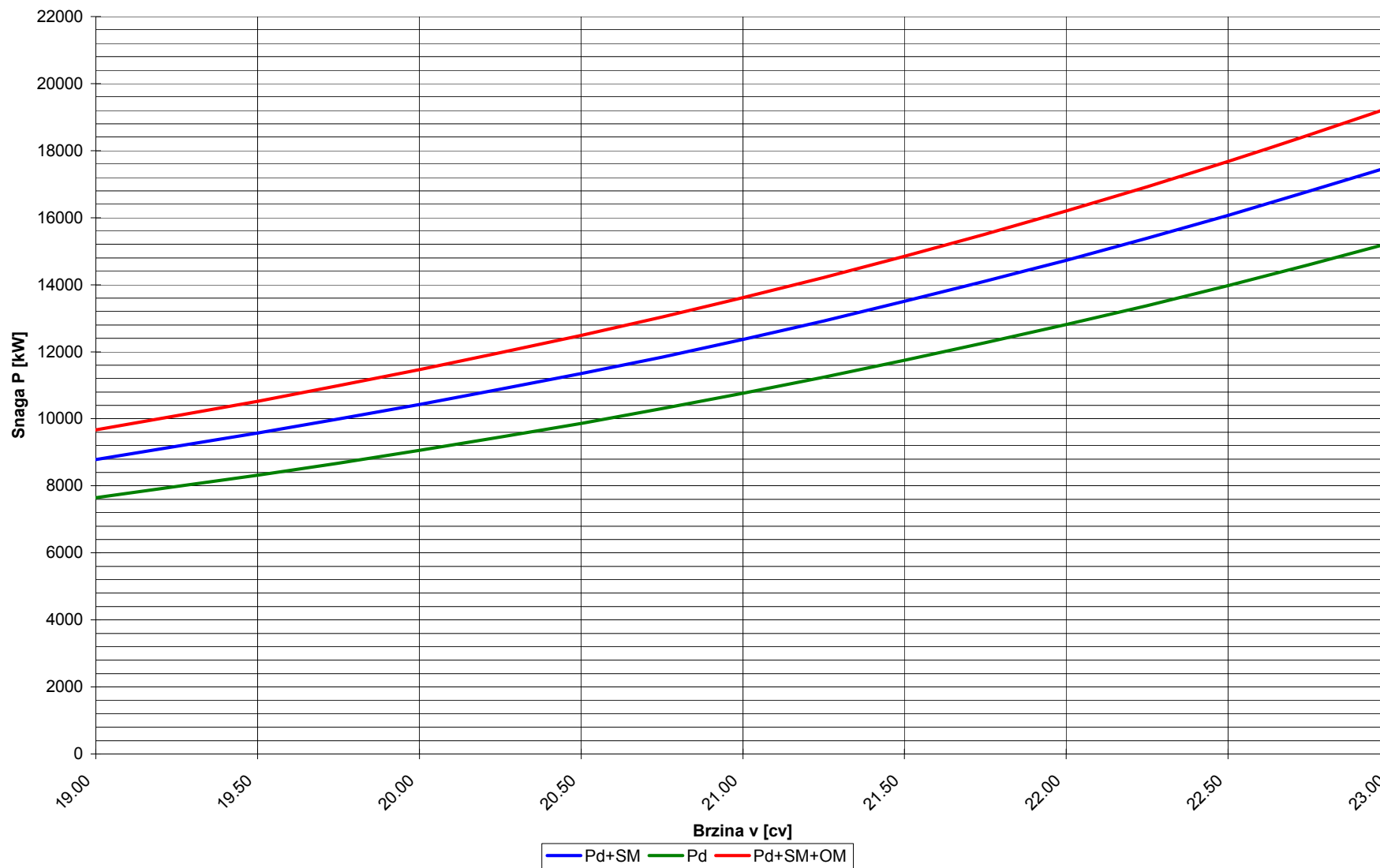
A_E / A_0 – omjer površine diska i površine krila broskog vijka

N_{ov} – optimalan broj okretaja broskog vijka

Program „Otpor“ uzima u obzir i prije navedene koeficijente i korisnosti tako da kao rezultat daje snagu predanu brodskom vijku. Rezultati su prikazani u tablici 4.

v [čv]	N [min^{-1}]	P_d [kW]	P_{d+SM} [kW]	$P_{d+SM+OM}$ [kW]
19.00	116	7640	8787	9665
19.50	119	8321	9569	10526
20.00	122	9064	10423	11465
20.50	126	9866	11346	12480
21.00	130	10756	12369	13606
21.50	133	11738	13499	14848
22.00	137	12811	14732	16205
22.50	141	13976	16072	17680
23.00	145	15238	17523	19275

Tablica 4 Rezultati proračuna (program „Otpor“)



Slika 3 Prognozni dijagram (program „Otpor“)

U usporedbi sa sličnim brodom, koji je nedavno porinut u brodogradilištu „Uljanik“, vidi se da drugi program daje puno točnije rezultate. Razlog tome je uzimanje u obzir više utjecajnih faktora. Program je optimiziran za specifičnosti broda za prijevoz automobila što također ima veliki utjecaj na rezultate. Naime, ti brodovi imaju „finiju“ (mali koeficijent istisnine) formu u odnosu na tankere te „NavCAD“ koji nema algoritme prilagođene takvoj formi brodova i ne može dati točnije rezultate. Iz navedenog razloga u daljnjem radu koristit će se vrijednosti dobivene programom „Otpor“.

1.3 Izbor glavnog porivnog stroja

Izbor glavnog porivnog stroja može se podijeliti u dvije faze :

- Preliminarni izbor serije motora i broja cilindara
- Provjera izabranog motora konstrukcijom tzv. „layout/load“ dijagrama (kombinirani dijagram izlaznih performansi motora te prognoznog dijagrama)

1.3.1 Preliminarni izbor serije motora i broja cilindara

Prema podacima iz prognoznog dijagrama, nakon što smo uzeli u obzir dodatke snage SM=15% i OM=10% možemo pretpostaviti seriju motora i broj cilindara.

Za $v=20.5$ čv iz prognoznog dijagrama slijedi :

- snaga dovedena vijku : $P_d=9866$ kW
- snaga uvećana za SM : $P_{d+SM}=11346$ kW
- snaga uvećana za SM i OM : $P_{d+SM+OM}=12480$ kW

Uz ove podatke bitan je i broj okretaja vijka koji iznosi $N=126$ min⁻¹.

Da bi se dobila potrebna snaga porivnog stroja snagu dovedenu vijku treba još uvećati za korisnost osovinskog voda koja prema iskustvenim preporukama iznosi :

$$\eta_{VV} = 0,985$$

Prema tome je maksimalna potrebna snaga koju motor mora biti u mogućnosti isporučiti jednaka :

$$P_B = P_{d+SM+OM} / \eta_{VV}$$

$$P_B = 12670 \text{ kW}$$

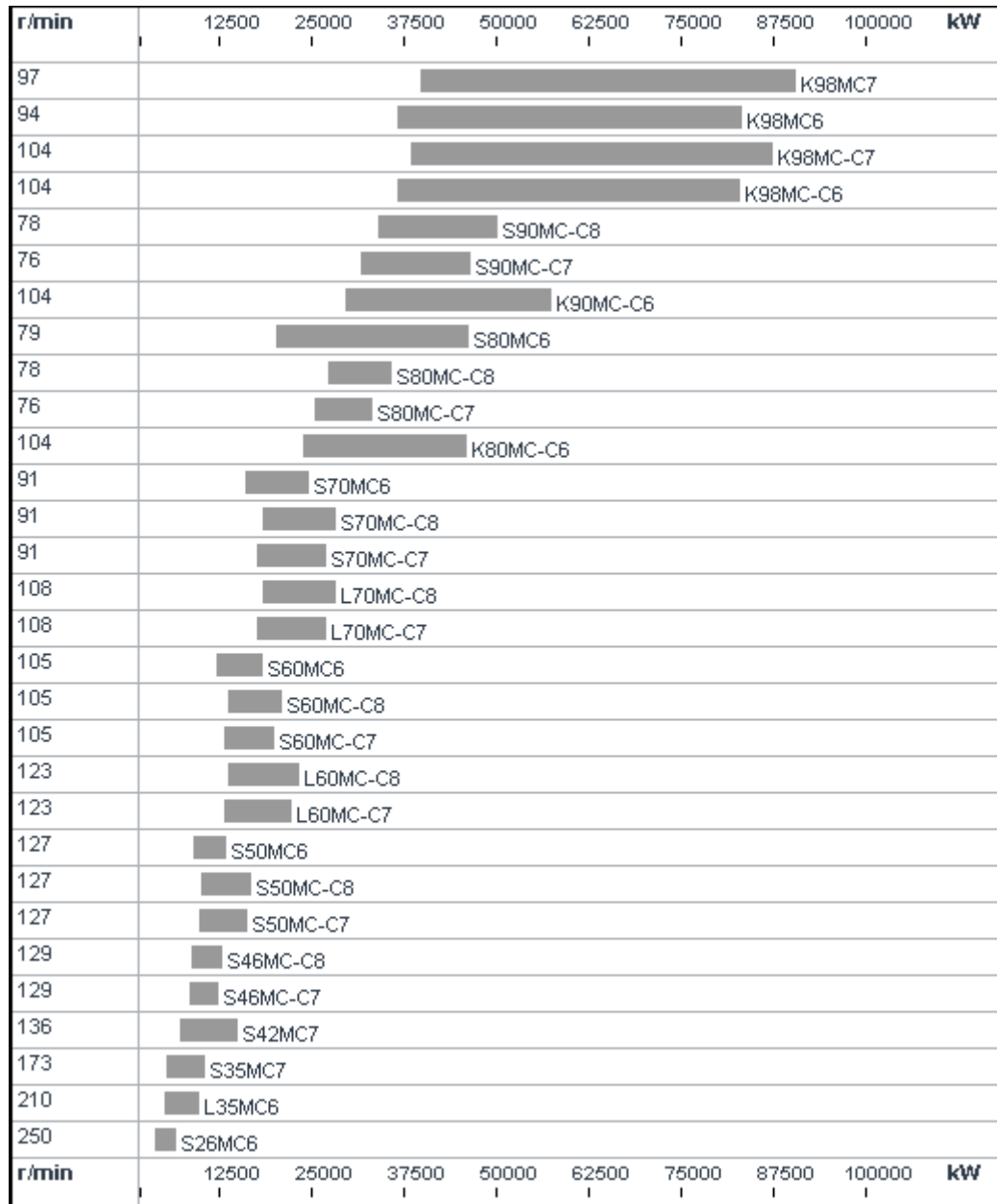
Sada se može izabrati stroj. Prema dijagramu na slici 4 izabrana je serija motora S-50MC-C7, a prema maksimalnoj potrebnoj snazi sa svim dodacima izabran je broj cilindara $N_C = 8$. Izabrani motor tada nosi oznaku 8S-50MC-C7.

Osnovne tehničke karakteristike ovog motora su sljedeće :

maksimalna trajna snaga $P_{MCR}=12640$ kW

broj okretaja : $N=127$ okr/min

specifična potrošnja goriva : SFOC=171g/kWh

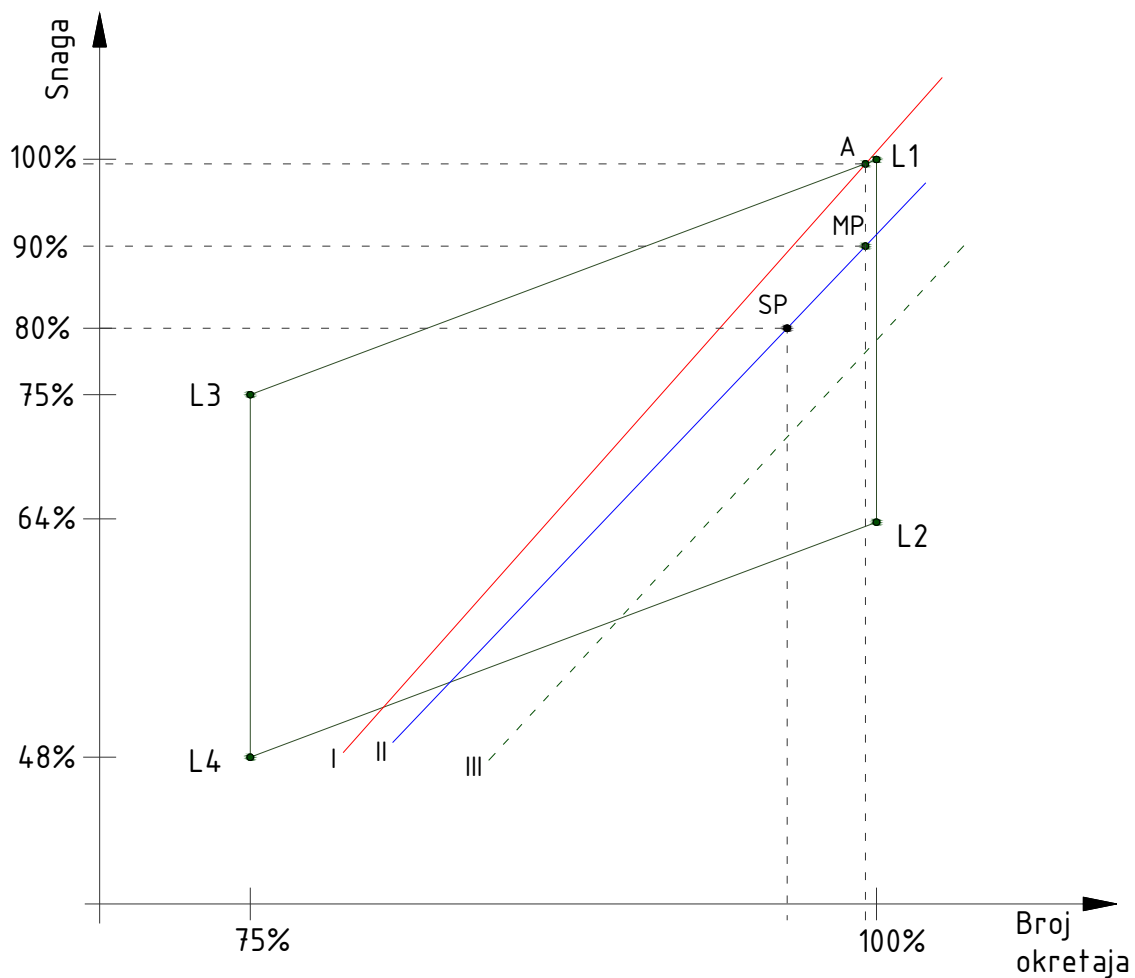


Slika 4 Izbor glavnog porivnog stroja (MAN B&W)

1.3.2 Provjera izabranog motora

Potrebno je provjeriti hoće li pretpostavljeni motor moći zadovoljiti potrebe za snagom pri različitim režimima rada, različitim opterećenjima i brzinama vrtnje.

Provjera se izvodi konstruiranjem kombiniranog dijagrama izlaznih performansi motora i prognoznog dijagrama. Taj je dijagram, radi jednostavnosti, crtan u logaritamskom mjerilu. Razlog je taj da se eksponencijalne krivulje mogu prikazati kao pravci. Izlazne karakteristike motora su zadane od proizvođača, a linije opterećenja se prenose iz prognoznog dijagrama.



Slika 5 Kombinirani dijagram

Objašnjenje oznaka iz dijagrama :

četverokut L1, L2, L3, L4 - predstavlja radno područje motora;

radna točka se može nalaziti bilo gdje unutar njega

linija I - predstavlja potrebnu snagu motora uz dodatke SM i OM

linija II - predstavlja potrebnu snagu motora uz dodatak SM

linija III - predstavlja potrebnu snagu motora sa „čistom“ oplatom i po mirnom moru

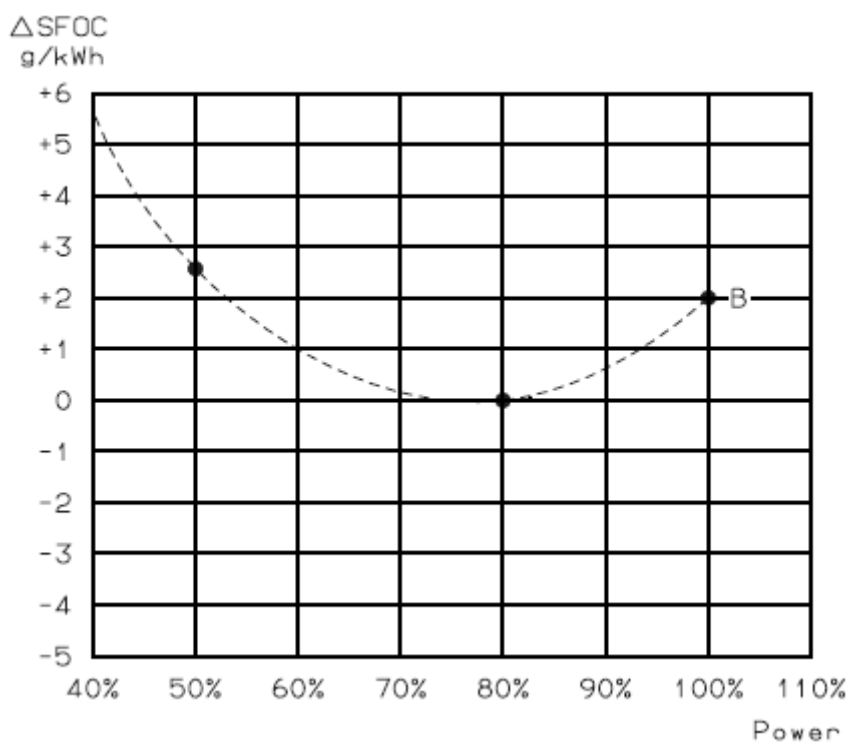
točka A - specificirana maksimalna trajna snaga P_{MCR}

točka MP - maksimalna trajna snaga (za propulziju)

točka SP - servisna snaga (za propulziju); pošto brzina u službi nije

zadana, a ona određuje ovu točku, izabrana je prema dijagramu na slici 6 prema najmanjoj specifičnoj potrošnji goriva

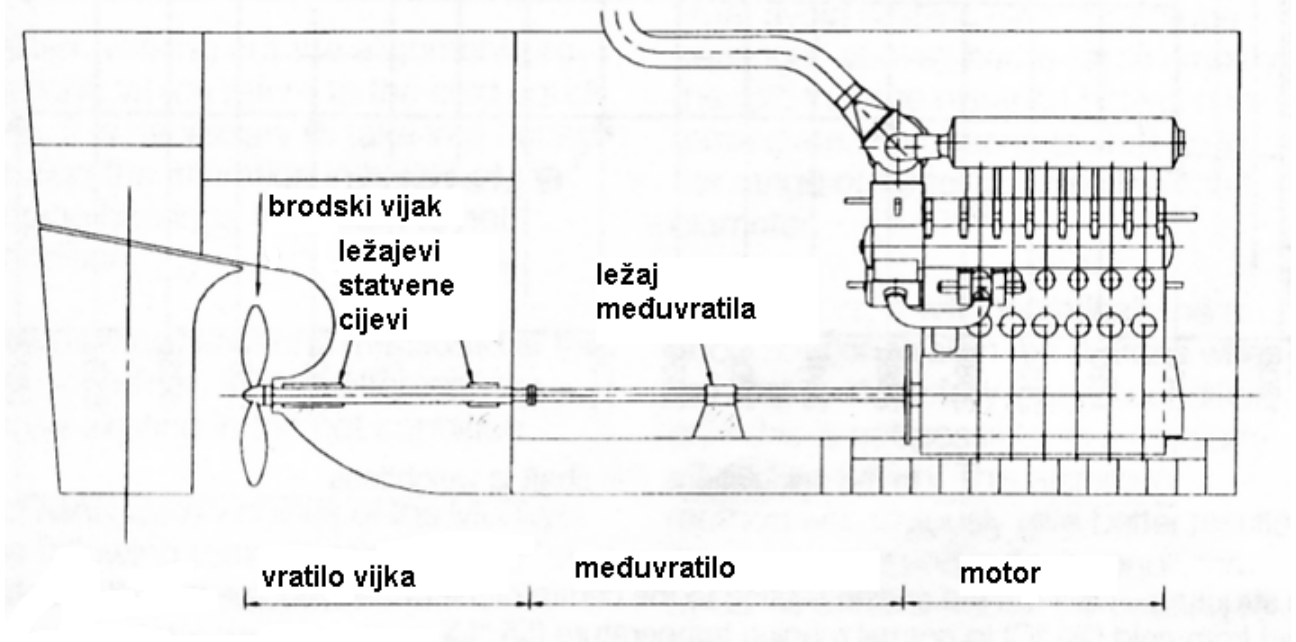
Prema konstruiranom dijagramu vidi se da motor 8S-50MC-C7 u potpunosti zadovoljava sve zahtjeve različitih režima rada.



Slika 6 Dijagram specifične potrošnje goriva

2 Proračun i dimenzioniranje sastavnih elemenata vratilnog voda

U ovom će se radu proračun i dimenzioniranje vratilnog voda za glavni porivni stroj vršiti prema aktualnim propisima klasifikacijskog društva „Bureau Veritas“. Skica sustava vratilnog voda prikazan je na slici 7.



Slika 7 Skica vratilnog voda

2.1 Materijali za izradu vratilnog voda

Klasifikacijsko društvo BV propisuje da materijali za izradu vratilnog voda moraju zadovoljiti sljedeće zahtjeve.

Općenito, vratila moraju biti izrađena od kovanog čelika vlačne čvrstoće R_m između 400 i 800 N/mm². Usvojena vrijednost čvrstoće materijala koja će se koristiti u sljedećem proračunu je :

$$R_m = 560 \text{ N/mm}^2$$

Spojni vijci na priрубnicama bilo kojeg dijela vratilnog voda moraju biti od kovanog, lijevanog ili vučenog čelika.

Općenito vlačna čvrstoća spojnih vijaka R_{mv} mora biti unutar sljedećih granica :

$$R_m \leq R_{mv} \leq 1,7 R_m , \text{ ali}$$

$$R_{mv} \leq 1000 \text{ N/mm}^2$$

Usvojena vrijednost čvrstoće materijala je : $R_{mv} = 800 \text{ N/mm}^2$

2.2 Međuvratilo i vratilo vijka

Minimalni promjer međuvratila i vratila vijka ne smije biti manji od onoga dobivenog formulom :

$$d = F \cdot k \cdot \left[\frac{P}{n \cdot (1 - Q^4)} \cdot \frac{560}{R_m + 160} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

gdje su :

Q - omjer unutarnjeg i vanjskog promjera vratila za slučaj šupljeg vratila
– za slučaj punog vratila Q = 0

F = 100 – za slučaj kada je glavni diesel motor direktno spojen na međuvratilo

k – faktor izabran prema tablici 5, a ovisi o konstrukcijskom rješenju vratila

n – broj okretaja vratila u minuti, prema odgovarajućoj snazi; min^{-1}

P – maksimalna trajna snaga pogonskog diesel motora kW

R_m – minimalna vrijednost vlačne čvrstoće materijala vratila, N/mm^2

vrijednost faktora k				
za međuvratila sa				
prirubnicama koje su sastavni dijelovi međuvratila	prešanim prirubnicama	utorima i perima	radijalnim provrtima; poprečnim provrtima	uzdužnim ozubljenjem
1,00	1,00	1,10	1,10	1,20

Tablica 5 Vrijednosti faktora k za međuvratila

2.2.1 Proračun minimalnog promjera međuvratila

Za međuvratilo vrijede ovi parametri :

$$Q = 0$$

$$F = 100$$

$$k = 1$$

$$n = 127 \text{ min}^{-1}$$

$$P = 12640 \text{ kW}$$

$$R_m = 560 \text{ N/mm}^2$$

Uvrštenjem ovih vrijednosti u jednadžbu (1) dobiva se vrijednost minimalnog promjera međuvratila :

$$d = 426,186 \text{ mm}$$

odabrani promjer je :

$$d_m = 445 \text{ mm}$$

2.2.2 Proračun minimalnog promjera vratila vijka

Minimalni promjer vratila vijka ne smije biti manji od onoga dobivenog formulom :

$$d_p = 100 \cdot k_p \cdot \left[\frac{P}{n \cdot (1 - Q^4)} \cdot \frac{560}{R_m + 160} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

gdje je :

k_p – faktor, čija vrijednost ovisi o različitim konstrukcijskim značajkama, a ostali simboli imaju isto značenje kao u (1)

$k_p = 1,26$ - za slučaj spoja, brodskog vijka i vratila vijka, perom

$k_p = 1,22$ - za slučaj spoja, navlačenjem brodskog vijka na konus vratila vijka, trenjem, bez pera
- za slučaj kad je statvena cijev propelerskog vratila podmazivana uljem i osigurana uljnim brtvenicama

Gornje vrijednosti faktora k_p primjenjive su za dio vratila vijka između prednjeg brida stražnjeg ležaja statvene cijevi i prednjeg brida glavine brodskog vijka.

Za dio vratila vijka između prednjeg brida stražnjeg ležaja statvene cijevi i prednjeg brida prednje brtvenice statvene cijevi primjenjuje se vrijednost :

$$k_p = 1,15$$

Uvrštenjem ovih vrijednosti u jednadžbu (2) dobivaju se sljedeće vrijednosti minimalnih promjera :

$$d_{p1} = 519,947 \text{ mm}$$

$$d_{p2} = 490,114 \text{ mm}$$

usvojene vrijednosti su :

$d_{ssl} = 545 \text{ mm}$ – promjer vratila unutar stražnjeg statvenog ležaja

$d_{psl} = 547 \text{ mm}$ – promjer vratila unutar prednjeg statvenog ležaja

$d_{sc} = 510 \text{ mm}$ – promjer vratila unutar i ispred statvene cijevi

2.3 Prirubnice i spojni vijci

Spojne prirubnice međuvratila i koljenastog vratila, te međuvratila i vratila vijka moraju imati debljinu od najmanje 0,2 promjera odgovarajućeg vratila i ne manju od promjera spojnih vijaka proračunatih prema vlačnoj čvrstoći ekvivalentnoj čvrstoći odgovarajućeg vratila.

Radijusi rukavaca moraju biti fino obrađeni i ne smiju zaći u područje ispod matica i glava spojnih vijaka. To se postiže pažljivim odabirom promjera prirubnice.

Za ostvarivanje spojeva koristit će se kalibrirani vijci. Tijela vijaka moraju točno nalijegati u provrt. Zbog točnog nalijeganja prikladni su za prenošenje promjenjivih sila. Kalibrirani vijci fiksiraju spojne dijelove točno jedan prema drugome.

2.3.1 Proračun debljine prirubnice i radijusa zakrivljenja

a) za međuvratilo
minimalna debljina prirubnice :

$$\begin{aligned}t_{pm} &\geq 0,2d, \text{ mm} \\t_{pm} &\geq 0,2 \cdot 426,186 \text{ mm} \\t_{pm} &\geq 85,237 \text{ mm}\end{aligned}$$

minimalni radijus zaobljenja :

$$\begin{aligned}r_m &\geq 0,08d, \text{ mm} \\r_m &\geq 0,08 \cdot 426,186 \text{ mm} \\r_m &\geq 34,09 \text{ mm}\end{aligned}$$

b) za vratilo vijka
minimalna debljina prirubnice :

$$\begin{aligned}t_{pp} &\geq 0,2d_p, \text{ mm} \\t_{pp} &\geq 0,2 \cdot 519,947 \text{ mm} \\t_{pp} &\geq 103,989 \text{ mm}\end{aligned}$$

minimalni radijus zaobljenja :

$$\begin{aligned}r_p &\geq 0,08d, \text{ mm} \\r_p &\geq 0,08 \cdot 519,947 \text{ mm} \\r_p &\geq 41,59 \text{ mm}\end{aligned}$$

Usvojene vrijednosti su :

$$\begin{aligned}t_{pm} &= 90 \text{ mm} \\r_m &= 35 \text{ mm} \\t_{pp} &= 110 \text{ mm} \\r_p &= 45 \text{ mm}\end{aligned}$$

2.3.2 Proračun spojnih vijaka

Promjer tijela, spojnog vijka, koje dosjeda u provrt ne smije biti manji od vrijednosti d_v dobivene sljedećom jednačbom :

$$d_v = 0,65 \cdot \left[\frac{d_m^3 \cdot (R_m + 160)}{n_v \cdot D_C \cdot R_{mv}} \right]^{0,5} \quad (3)$$

gdje su :

d_m – promjer međuvratila, mm

n_v – broj kalibriranih vijaka

D_C – promjer vršne kružnice spojnih vijaka, mm

R_m – vrijednost minimalne vlačne čvrstoće materijala međuvratila, N/mm²

R_{mv} – vrijednost minimalne vlačne čvrstoće materijala spojnih vijaka, N/mm²

Proračun spojnih vijaka zahtijeva istovremenu konstrukciju prirubnice i spojnih vijaka.

2.3.2.1 Proračun spojnih vijaka prirubnica međuvratila i vratila vijka

Prema slici 8 usvojene su sljedeće vrijednosti :

$$d_m = 445 \text{ mm}$$

$$n_v = 12$$

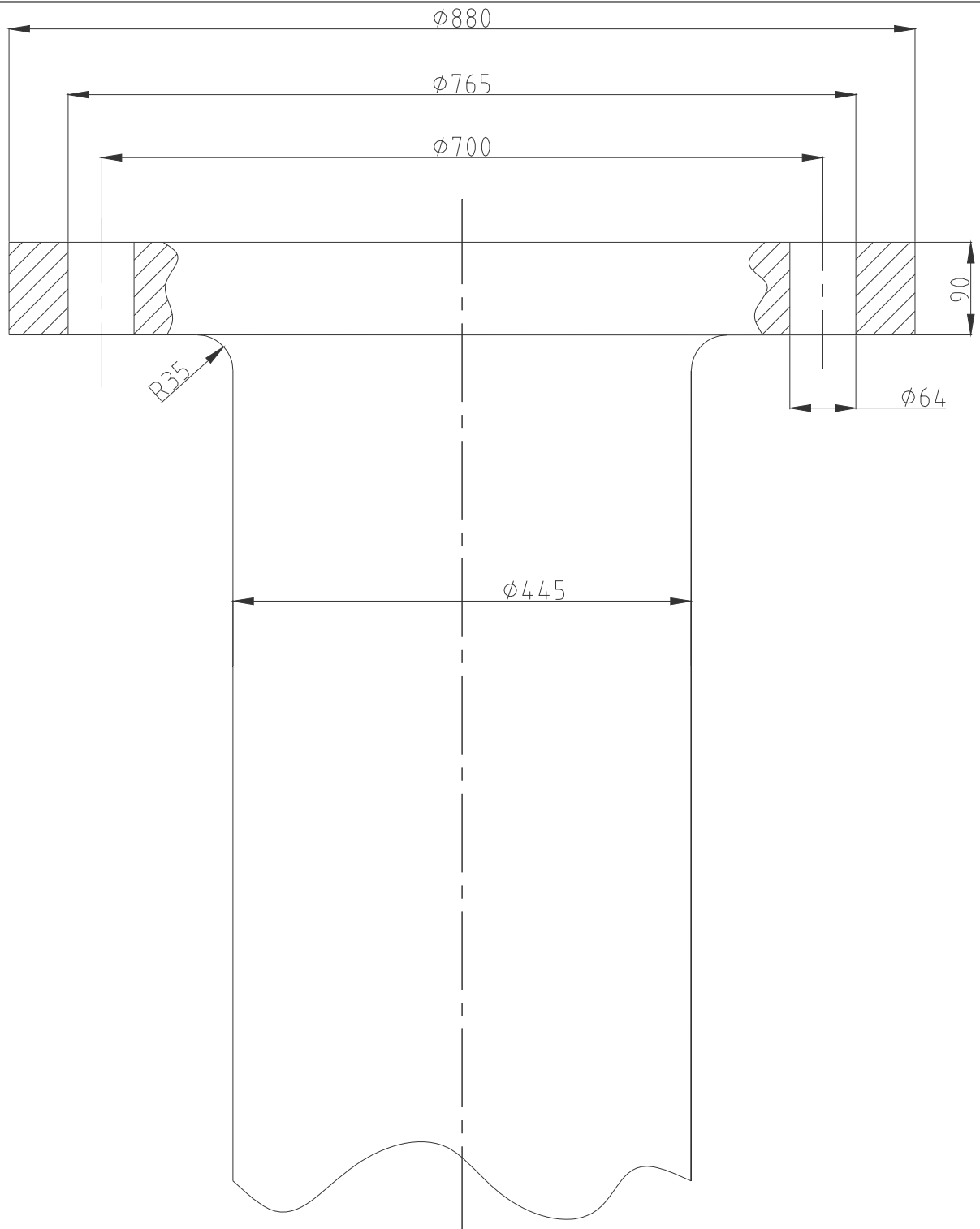
$$D_C = 765 \text{ mm}$$

$$R_m = 560 \text{ N/mm}^2$$

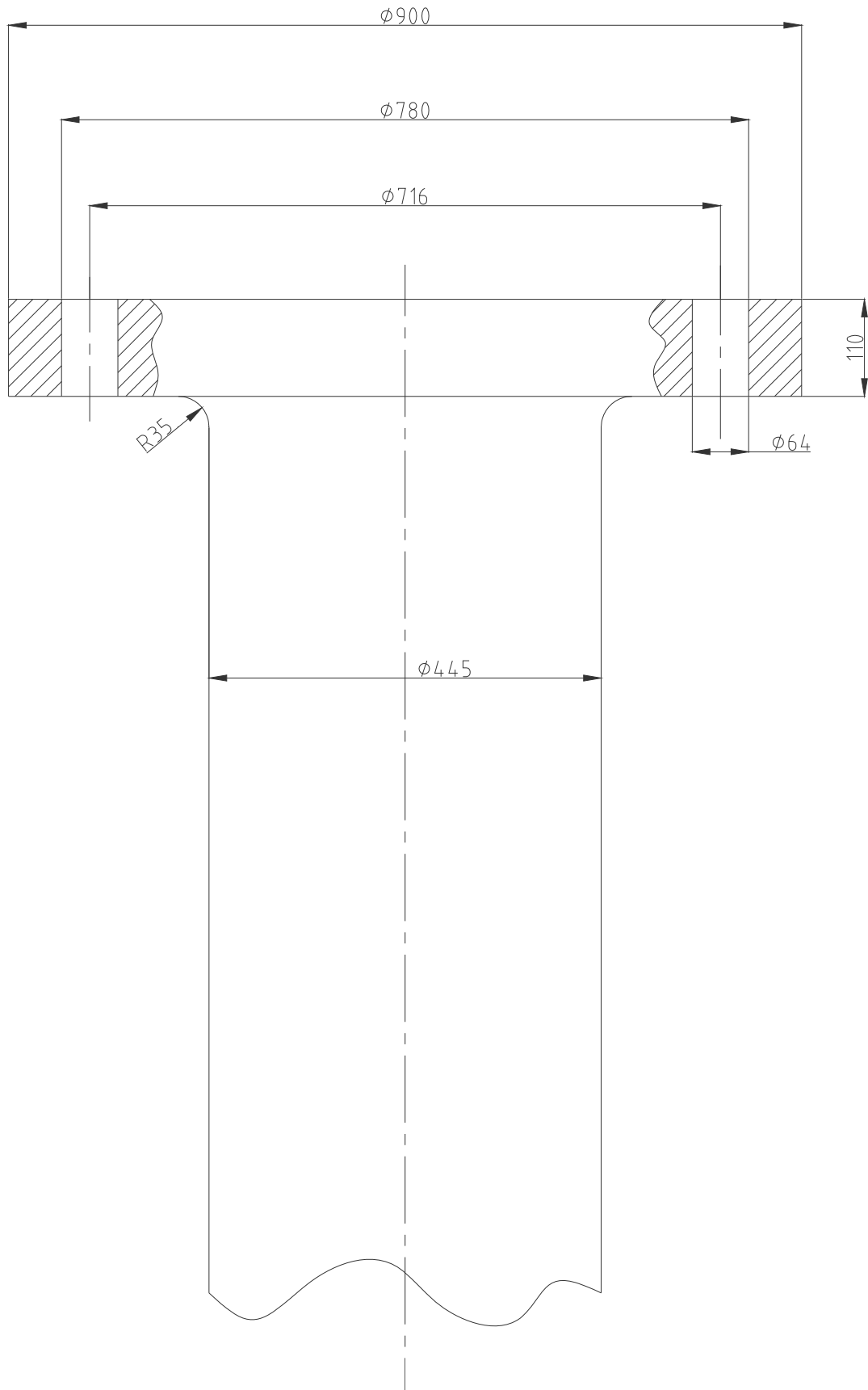
$$R_{mv} = 800 \text{ N/mm}^2$$

Uvrštavanjem ovih vrijednosti u jednačbu (3) dobiva se vrijednost minimalnog promjera tijela spojnog vijka :

$$d_v = 60,416 \text{ mm}$$



Slika 8 Prirubnica međuvratila (spoj sa vratilom vijka)



Slika 9 Prirubnica međuvratila (spoj sa koljenastim vratilom)

2.3.2.2 Proračun spojnih vijaka prirubnica međuvratila i koljenastog vratila

Pošto je prirubnica koljenastog vratila isporučena i poznatih dimenzija nastoji se prirubnicu međuvratila prilagoditi tim dimenzijama, ako je to moguće. Kako se vidi iz slike promjer prirubnice zadovoljava i nema opasnosti da radijusi rukavaca zađu u područje ispod matica i glava spojnih vijaka.

Prema slici 9 usvojene su sljedeće vrijednosti :

$$\begin{aligned}d_m &= 445 \text{ mm} \\n_v &= 12 \\D_C &= 780 \text{ mm} \\R_m &= 560 \text{ N/mm}^2 \\R_{mv} &= 800 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

Uvrštavanjem ovih vrijednosti u jednadžbu (3) dobiva se vrijednost minimalnog promjera tijela spojnog vijka :

$$d_v = 59,832 \text{ mm}$$

usvojena vrijednost promjera tijela spojnih vijaka je :

$$d_v = 64 \text{ mm}$$

2.4 Proračun i izbor radijalnih ležajeva

Ponuđeni izbor, prema preporuci klasifikacijskog društva „BV“, izvedbi ležajeva statvene cijevi i ležaja međuvratila je sljedeći :

- s košuljicom od bijelog metala i uljnim podmazivanjem
- od sintetičke gume ili plastičnih materijala s uljnim podmazivanjem
- od drvenih letvica podmazivanih vodom
- od sintetičkih materijala podmazivanih vodom

Rukovodeći se zahtjevom za smanjenjem duljine ležaja radi manjih gabarita statvene glavine biti će odabrani ležajevi s košuljicom od bijelog metala i uljnim podmazivanjem. Takav izbor opravdava i činjenica da je ova kombinacija uobičajena za trgovačke brodove.

2.4.1 Efektivna duljina ležajeva

Minimalna efektivna duljina ležaja s košuljicom od bijelog metala i sa uljnim podmazivanjem mora zadovoljiti sljedeći uvjet:

$$L_{ef} \geq 2d;$$

gdje je :

d – proračunski minimalni promjer vratila dobiven prema (2)

Ova relacija vrijedi za stražnji ležaj statvene cijevi dok za prednji ležaj statvene cijevi i ležaj međuvratila vrijedi :

$$L_{ef} \geq 0,5d$$

gdje je :

d – proračunski minimalni promjer vratila dobiven prema (1).

2.4.1.1 Proračun efektivne duljine ležajeva

a) stražnji ležaj statvene cijevi

$$\begin{aligned} L_{ef} &\geq 2d_{p1}, \text{ mm} \\ L_{ef} &\geq 2 \cdot 519,947 \text{ mm} \\ L_{ef} &\geq 1039,9 \text{ mm} \end{aligned}$$

Usvojena efektivna duljina je :

$$L_{ef} = 1100 \text{ mm}$$



b) prednji ležaj statvene cijevi

$$L_{ef} \geq 0,5d_{p2}, \text{ mm}$$
$$L_{ef} \geq 0,5 \cdot 490,114, \text{ mm}$$
$$L_{ef} \geq 245,057 \text{ mm}$$

Usvojena efektivna duljina je :

$$L_{ef} = 440 \text{ mm}$$

c) ležaj međuvratila

$$L_{ef} \geq 0,5d_m$$
$$L_{ef} \geq 0,5 \cdot 426,186, \text{ mm}$$
$$L_{ef} \geq 213,09 \text{ mm}$$

Usvojena efektivna duljina je :

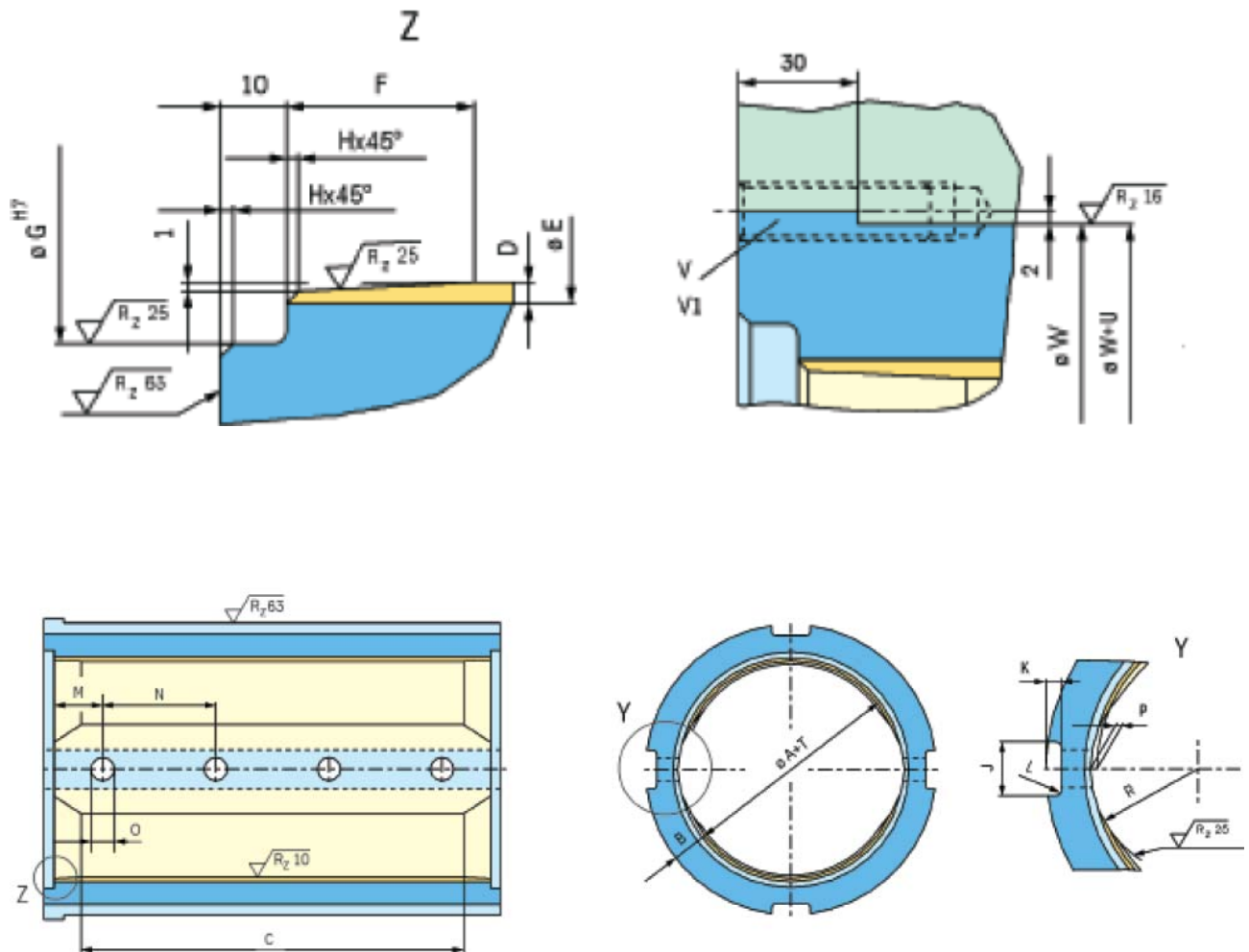
$$L_{ef} = 370 \text{ mm}$$

Ove vrijednosti su minimalne vrijednosti propisane od klasifikacijskog društva. One će biti korigirane prema proračunu centracije, ako bude potrebno.

2.4.2 Izbor radijalnih ležajeva

Prema ponuđenim izvedbama izabran je ležaj proizvođača Blohm+Voss Industries. Ležaj je izrađen od lijevanog čelika s blazinicom od bijelog metala s visokim sadržajem olova.

Izabrani ležajevi statvene cijevi su standardni ležajevi iz proizvodnog programa te se vanjska košuljica proizvodi iz lijevanog čelika GG 20/DIN, dok se za unutrašnju košuljicu koristi PbSb14Sn9CIAs.



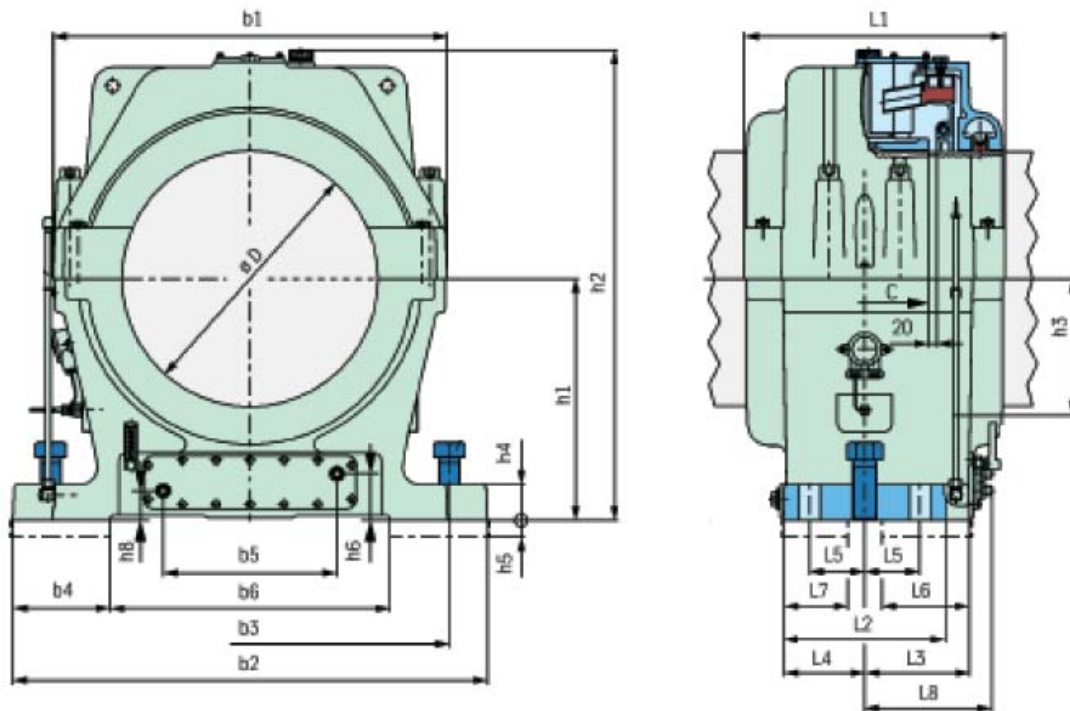
Slika 10 Skica ležaja statvene cijevi



A	$501 \div 600$
B	48
C	$0,5A \div 2A$
D	4
E	$A + T + 2D$
F	30
G	$E + O$
H	2
J	63
K	18
L	4
M	110
N	$260 \div 350$
O	40
P	6
R	$0,35A$
S	$0,8 \div 1,0$
T	$0,9 (+0,15)$
U	$+0,03/+0,05$
V	2 x M20x60
V1	8 x M20x60

Tablica 6 Geometrijske karakteristike ležajeva statvene cijevi

Izbor ležaja međuvratila vrši se prema promjeru međuvratila i efektivnoj dužini ležaja. Također, biti će izabran ležaj proizvođača Blohm+Voss Industries.



Slika 11 Skica ležaja međuvratila

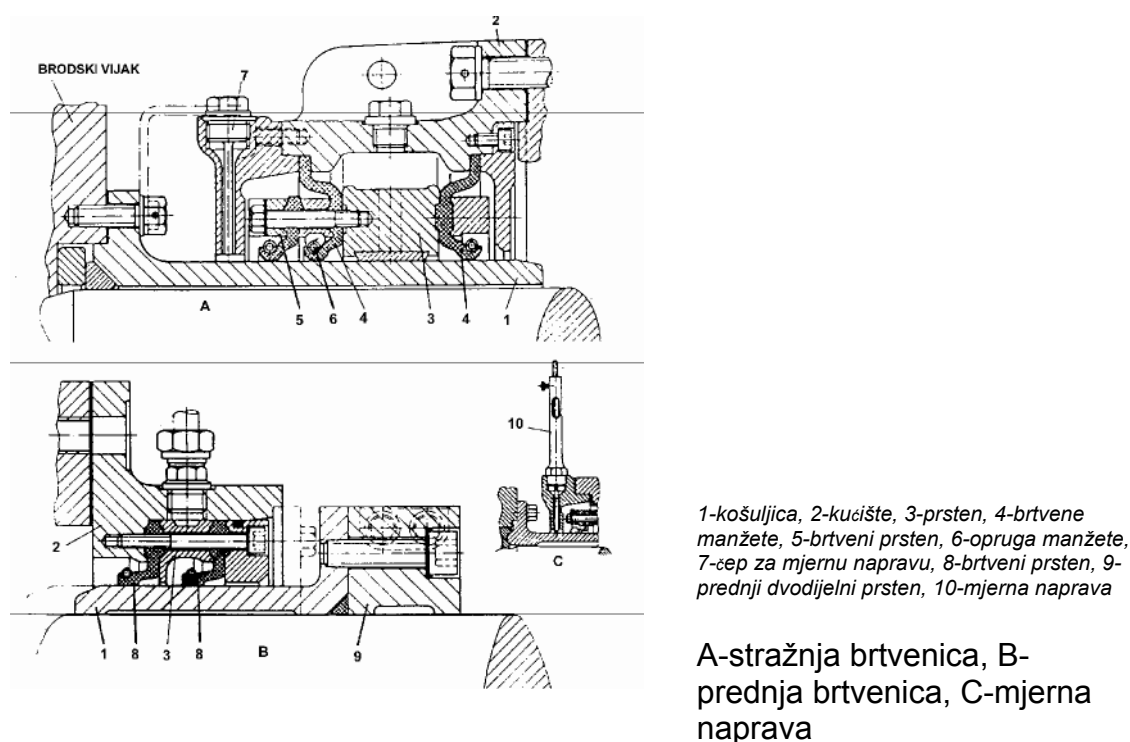
dimenzija	450
D	391 ÷ 450
vijci	4 x M36
b1	710
b2	870
b3	780
b4	205
b5	160
b6	460
c	210
h1	450
h2	843
h3	280
h4	60
h5	30
L1	490
L2	310
L3	203
L4	155
L5	110
L6	163
L7	115
L8	250
Masa	430

Tablica 7 Geometrijske karakteristike ležaja međuvratila

2.5 Izbor brtvenica statvene cijevi

Statvena cijev omogućava izlaz osovinskog voda iz trupa broda i sprječava prodiranje vode u osovinski tunel, tj. strojarnicu. Proteže se od prednje pregrade krmnog pika do kraja krmene statve. Izrađuje se od lijevanog željeza, lijevanog čelika ili čeličnog debelog lima oblikovanog zavarivanjem u okrugli presjek. Najčešća izvedba je statvena cijev s ležajevima od bijelog metala i specijalnim brtvenicama koje sprječavaju izlaženje ulja na vanjskoj stražnjoj i prednjoj strani statvene cijevi. Podmazivanje se izvodi iz jednog gravitacijskog tanka koji se postavi u strojarnici iznad linije osovinskog voda $3 \div 4$ m iznad linije maksimalnog gaza broda.

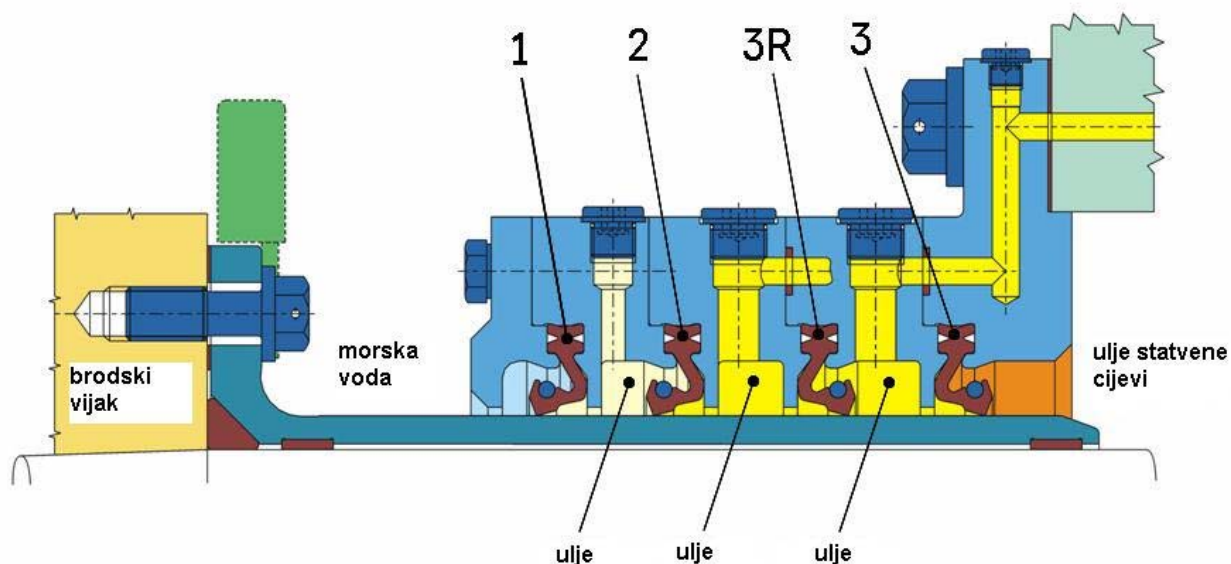
Izabrane su brtvenice tipa Simplex, jer su one uobičajene za trgovačke brodove.



Slika 12 Brtvenica tipa Simplex

Ova brtvenica se sastoji od kućišta (2), prstena (3) za nošenje brtvenih manžeta (4). Manžete su od sintetičkog kaučuka. Brtvene manžete kližu po navlaci (1) koja je pričvršćena na vijak i s njim se okreće. Navlaka je od specijalnog krom-čelika. U nastavku brtvenih manžeta (4) nalazi se dodatni brtveni prsten (5) koji sprječava ulaz nečistoće između navlake (1) i manžete (4). Rubovi manžete pritisnuti su na navlaku (1) preko ubačenih opruga (6). Kroz čep (7) može se postaviti mjerna naprava (10) sa sondom kojom se mjeri položaj navlake (1) po visini u odnosu na osovinu broskog vijka, tj. trošenje ležaja. Na nacrtu C prikazana je mjerna naprava prednje brtvenice. Prednja brtvenica je iste konstrukcije kao i stražnja, jedino joj nedostaju manžete, ali ima dva brtvena prstena (8).

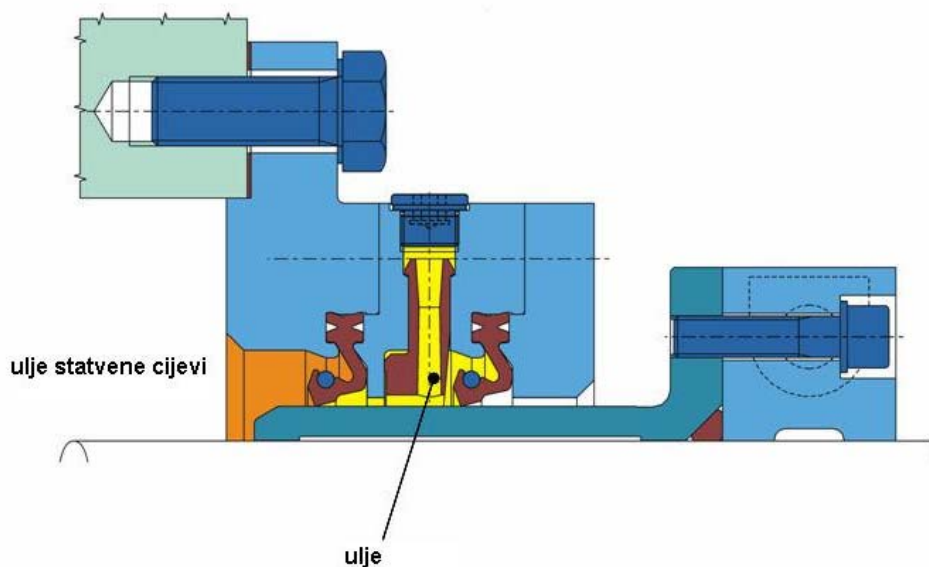
Prema ponudi izabrane su brtvenice proizvođača Blohm+Voss Industries.
Prema promjeru vratila na mjestu stražnje brtvenice izabrana je stražnja brtvenica SC2M.



Slika 13 Stražnja brtvenica SC2M

Konstrukcija stražnje „Multisafe“ Simplex-Compact brtvenice sa četiri brtvena prstena sadrži prsten 3R koji je okrenut prema statvenoj cijevi i služi kao pomoćni prsten. Koristeći odgovarajuće mimoilazne putove moguće je ostaviti ovaj prsten da se vrti bez opterećenja na košuljicu ili ga aktivirati ako je potrebno.

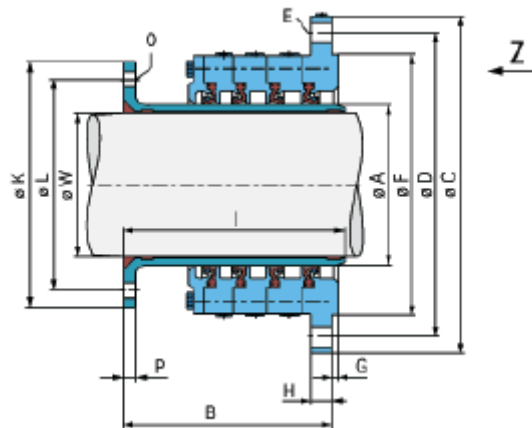
Prema promjeru vratila na mjestu prednje brtvenice izabrana je brtvenica SC2Z.



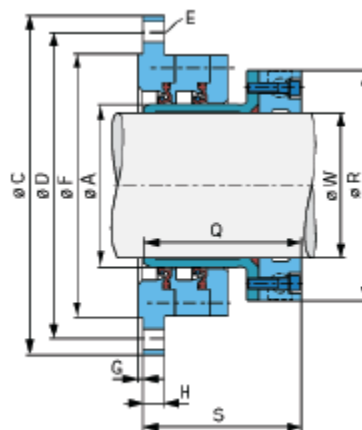
Slika 14 Prednja brtvenica SC2Z

Prednja brtvenica je potpuno neovisna o stražnjoj brtvenici i može biti kombinirana sa bilo kojom stražnjom, uljem podmazivanom, brtvenicom.

Da bi se osigurala što bolja funkcionalnost, obje brtvenice biti će spojene na svoje odvojene tankove ulja za podmazivanje.



Slika 15 Skica stražnje brtvenice (geometrijske karakteristike)



Slika 16 Skica prednje brtvenice (geometrijske karakteristike)

veličina brtvenice	A	560
max. promjer vratila	W	495 ÷ 523
dužina brtvenice	B	320
promjer prirubnice brtvenice	C	820
diobeni promjer spojnih vijaka	D	765
spojni vijci	E	12 x M24
promjer izbočenog dijela spojne prirubnice	F	700
visina izbočenog dijela spojne prirubnice	G	9
debljina spojne prirubnice	H1	35
duljina košuljice stražnja brtvenica	I	313
promjer prirubnice košuljice	K	675
diobeni promjer spojnih vijaka košuljice	L	630
spojni vijci košuljice	O	12 x M20
debljina prirubnice košuljice	P	25
duljina košuljice prednja brtvenica	Q	317
promjer prstena oslonca prednje brtvenice	R	670
masa prednje brtvenice	m_{pb}	357
masa stražnje	m_{sb}	428

Tablica 8 Geometrijske karakteristike brtvenica

2.6 Sustav podmazivanja statvene cijevi

Sustav podmazivanja statvene cijevi obuhvaća :

- prednji statveni ležaj
- prednju brtvenicu
- stražnji statveni ležaj
- stražnju brtvenicu

Statveni ležajevi se podmazuju uljem iz statvene cijevi dok je podmazivanje prednje i stražnje brtvenice izvedeno zasebnim krugovima podmazivanja.

Tlak ulja u sustavu podmazivanja statvene cijevi biti će odabran prema zahtjevu koji kaže da u niti jednom trenutku ne smije doći do prodora vode u statvenu cijev. Prema tome tlak ulja u sustavu podmazivanja statvene cijevi mora biti nešto veći od tlaka okolne morske vode. Time se osigurava da i u slučaju zakazivanja stražnje brtvenice (zbog istrošenosti ili nekog drugog razloga) ulje istječe u more bez oštećenja stražnjeg statvenog ležaja. Gubitak ulja nadoknadit će se iz tanka ulja za podmazivanje.

Pretlak u sustavu biti će osiguran gravitacijskim sustavom podmazivanja.

$T = 7,8 \text{ m}$ - gaz broda
 $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ - gustoća morske vode
 $t_1 = 3200 \text{ mm}$ - visina simetrale glavine propelera mjerena od kobilice

Pretlak morske vode u visini simetrale glavine propelera iznosi :

$$\begin{aligned} p &= \rho \cdot g \cdot (T - t_1) \\ p &= 1025 \cdot 9,81 \cdot (7,8 - 3,2) \\ p &= 46254 \text{ Pa} \\ p &= 0,46 \text{ bar} \end{aligned}$$

Pretlak ulja u sustavu, iskustveno :

$$p_{us} = (1 \div 2) \cdot p$$

Usvojena vrijednost pretlaka ulja u sustavu :

$$\begin{aligned} p_{us} &= 1,5 \cdot p \\ p_{us} &= 0,7 \text{ bar} \end{aligned}$$

Minimalna visina nivoa ulja u gravitacijskom tanku ulja za podmazivanje statvene cijevi je :

$$\begin{aligned} h_{ut} &= \frac{p_{us}}{\rho \cdot g} = \frac{70000}{930 \cdot 9,81} \\ h_{ut} &= 7,7 \text{ m} \end{aligned}$$

Iskustveni podatak za minimalnu visinu nivoa ulja u gravitacijskom tanku je :

$$h_{\min} > (T-t) + 3 \text{ m}$$
$$h_{\min} = 7,6 \text{ m}$$

Ova provjera pokazuje da je izabrana minimalna visina nivoa ulja od 7,7 m pravilno izabrana.

Prilikom dimenzioniranja tanka treba voditi računa da razlika između minimalnog i maksimalnog nivoa ulja ne smije biti veća od jednog metra. Također, treba voditi računa da kapacitet tanka mora biti dovoljan da se nadoknade razlike u volumenu zbog dilatacije ulja iz statvene cijevi.

Potreban volumen ulja u sustavu podmazivanja statvene cijevi :

$$V_u = V_{sc} - V_{vv} + V_{gt}$$
$$V_u = 4,96 - 1,17 + 0,25 = 4,04 \text{ m}^3$$

gdje su :

V_u – volumen ulja u sustavu, m^3

V_{sc} – volumen otvora u statvenoj cijevi, m^3

V_{vv} – volumen vratila vijka unutar statvene cijevi, m^3

V_{gt} – volumen gravitacijskog tanka, m^3

Dilatacija ulja u sustavu :

$$\Delta V = V_u \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) \cdot \beta$$
$$\Delta V = 4 \cdot (35 - 5) \cdot 0,00075$$
$$\Delta V = 0,091 \text{ m}^3$$

gdje je :

$\vartheta_2 = 35^\circ \text{ C}$ – temperatura toplog mora

$\vartheta_1 = 5^\circ \text{ C}$ – temperatura hladnog mora

$\beta = 0,00075 \text{ 1}^\circ\text{C}$ – koeficijent širenja ulja

Kontrola volumena gravitacijskog tanka :

$$\frac{3}{4} V_{gt} \geq 2 \cdot \Delta V$$
$$187,5 \geq 182, \text{ l}$$

Odabrani gravitacijski tank se puni sa $\frac{3}{4}$ ukupnog kapaciteta i zadovoljava tražene uvjete. U gravitacijski tank su ugrađeni nivokaz i alarm niskog nivoa ulja.

Pored ovog sustava podmazivanja, obje brtvenice, prednja i stražnja, će imati svoje zasebne krugove podmazivanja, kao što je već rečeno. Brtvenice su nepropusne i zaštićene kućištem, te u njemu tlak neće biti kao u prostoru statvene cijevi već nešto niži. Ukoliko dođe do propuštanja ulja ili do prodora vode to se može očitati promjenom nivoa ulja u zasebnim tankovima brtvenica. Ako dođe do podizanja nivoa ulja u tanku stražnje brtvenice aktivira se alarm, dok kod povećanja razine ulja u tanku prednje brtvenice, što označava prodor morske vode u brod, aktivira se alarm te automatski zaustavlja pogon.

Visina kontrolnih tankova za prednju i stražnju brtvenicu :

$$h_a = 0,5 \div 1 \text{ m}$$

Usvojene vrijednosti :

$$h_{a1} = 0,5 \text{ m}$$

$$h_{a2} = 0,7 \text{ m}$$

Pretlak u sustavu podmazivanja brtvenica :

$$\begin{aligned} p_a &= \rho \cdot g \cdot h_a \\ p_{a1} &= 0,045 \text{ bar} \\ p_{a2} &= 0,063 \text{ bar} \end{aligned}$$

Volumen tankova za podmazivanje brtvenica (prema preporuci) :

prednja brtvenica :

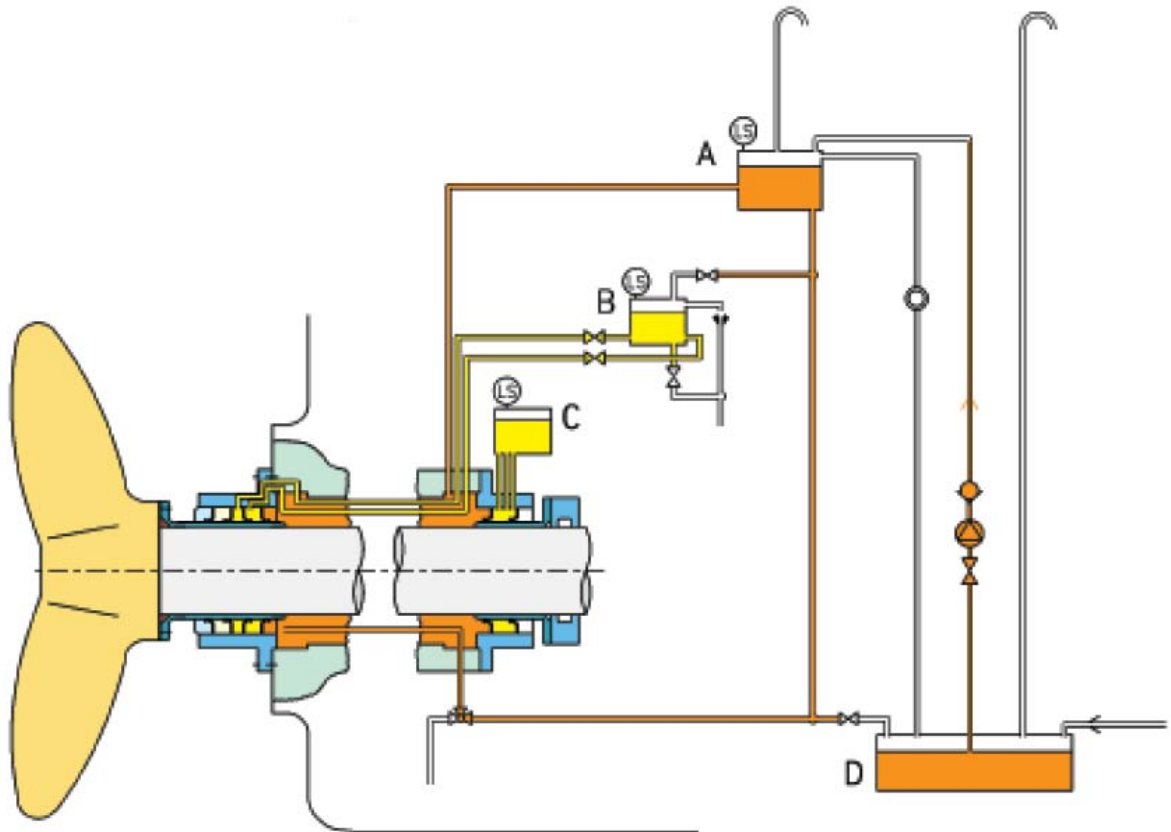
$$V_{pb} = 5 \text{ l}$$

stražnja brtvenica :

$$V_{sb} = 20 \text{ l}$$

Kao što je već spomenuto u tankovima za podmazivanje brtvenica se nalaze i nivokazi te alarmi visokog nivoa ulja.

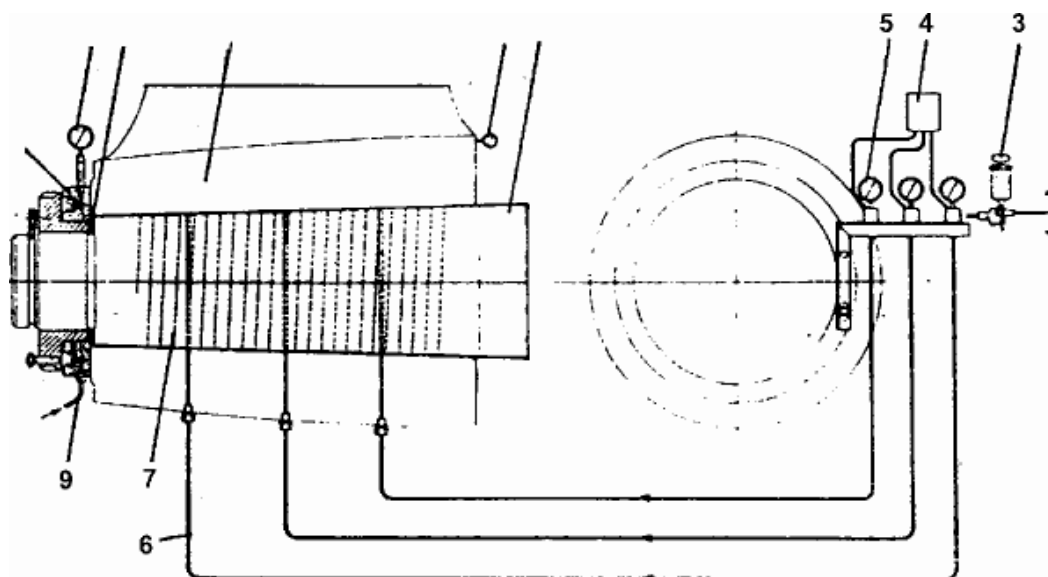
Shema sustava dana je na slijedećoj stranici.



Slika 17 Shema sustava za podmazivanje statvene cijevi

- A – Gravitacijski tank ulja statvene cijevi;*
- B – tank ulja za podmazivanje stražnje brtvenice statvene cijevi;*
- C - tank ulja za podmazivanje prednje brtvenice statvene cijevi*
- D – drenažni tank ulja statvene cijevi*

2.7 Spajanje broskog vijka s vratilom



Slika 18 Navlačenje vijka na vratilo uz pomoć hidraulične naprave
1-osovina vijka, 2-glavina vijka, 3-pumpa ulja, 4-spremnik ulja, 5-manometar,
6-visokotlačna cijev, 7-spiralni žljebovi, 8-hidraulična matica, 9-visokotlačna cijev, 10-manometar,
11-distantni prsten, 12-mjerni instrument

Metoda navlačenja broskog vijka na vratilo vijka je sljedeća :

Pomoću pumpe (slika 15 – pozicija 3) tlači se ulje u cijevima (6) u spiralne žljebove (7) u glavčini vijka (2). Tlak ulja iznosi do 800 bara. Dubina utora za spiralne žljebove iznosi 0,5 mm. U cilju postizavanja sigurnog čvrstog spoja među dodirnim ploham, spiralni žljebovi moraju završavati na $40 \div 60$ mm prije početka i završetka konusa u glavini vijka. Tlačenjem ulja postiže se tanak film ulja kojim se odijele konusne površine glavine vijka i vratila. Film ulja smanjuje opasnost od oštećenja dosjednih površina prilikom navlačenja ili izvlačenja vijka, a sila za aksijalno pomicanje je osjetno smanjena. Istodobno, dok se obavlja tlačenje ulja u spiralne žljebove, izvodi se aksijalno pomicanje vijka putem hidrauličke naprave u matici osovine (8). Kad se postigne zahtijevani položaj vijka na konusu osovine, otpusti se tlak ulja pa se ono vraća natrag u spremnik (4). Time se postiže vrlo čvrst spoj na dodirnim površinama konusa glavine vijka i osovine. U slučaju izvlačenja vijka s osovine, ulje se ponovo tlači pumpom (3) među spiralne žljebove (7), a izvlačenje se postiže korištenjem hidrauličnog alata u matici vratila (8).

Uz prednosti koje ova metoda pruža mogu se pojaviti i neke teškoće o kojima je potrebno voditi računa prije navlačenja:

- zbog različitih materijala (brodski vijak-osovina), odnosno različitog modula elastičnosti, mogu nastati plastične deformacije na glavi broskog vijka koja je od mekšeg materijala;
- različit materijal broskog vijka i osovine ima različite koeficijente toplinske dilatacije. Vijak navučen na konus osovine pri niskim temperaturama okoline može, donekle, olabaviti u plovidbi tropskim morima.

2.7.1 Proračun dosjeda brodskog vijka na konus vratila vijka

Prema zahtjevu klasifikacijskog društva BV konus na vratilu vijka ne smije biti veći od 1 : 15, pa je izabrani konus 1 : 20.

Prije završnog navlačenja brodskog vijka na vratilo potrebno je provjeriti dodirnu površinu. Dodirna površina ne smije biti manja od 70% teoretske dodirne površine. Dodirna površina se provjerava tzv. testom na „plavljenje“. Test je tako prozvan, jer se izvodi bojanjem konusne površine glavine vijka, te njenim oslanjanjem na konus vratila vijka. Nakon toga se vijak skida i gleda se plavi otisak na konusu vratila vijka.

2.7.1.1 Proračun potrebnog kontaktnog tlaka pri 35 °C

Minimalni potrebni pritisak pri 35 °C prema BV :

$$p_{35} = \frac{s_F \cdot F_T}{A \cdot B} \left[-s_F \cdot \theta + \left(\mu^2 + B \cdot \frac{F_T^2}{F_T^2} \right)^{0,5} \right]$$

gdje su :

$s_F = 2,8$ – koeficijent sigurnosti protiv proklizavanja brodskog vijka po konusu vratila vijka. (ne smije biti manji od 2,8 pri kombiniranom djelovanju okretnog momenta i porivne sile pri maksimalnoj trajnoj snazi koja se ostvaruje pri zadanom broju okretaja.)

$F_T = 718262$ N – porivna sila pri zadanoj brzini od 20,5 čv; proračunato prema :

$$F_T = \frac{R_T}{v_A}$$

$v_A = v \cdot (1-w)$ – brzina vode koja nstrujava na vijak

$A = 100\%$ - teoretska dodirna površina (površina krnjeg stošca), mm²

$\mu = 0,05 \div 0,1$ – koeficijent trenja između dodirnih ploha, usvojeno $\mu = 0,075$

$\theta = 1/40$ – kut nagiba konusa

$$B = \mu^2 - s_F^2 \theta^2$$

F , N – obodna sila na dodirnoj površini

$$F = \frac{2000 \cdot C \cdot M_T}{d_s}$$

C – koeficijent koji za sporohodne diesel motore iznosi $C = 1,2$

M_T – okretni moment motora pri zadanoj brzini od 20,5 čv.

$d_s = 513,25$ mm – srednji promjer konusa vratila vijka

$$M_T = \frac{P}{\omega} = \frac{30 \cdot P}{n \cdot \pi} = \frac{30 \cdot 12640}{127 \cdot \pi}$$

$$M_T = 950418 \text{ Nm}$$

tada je :

$$F = \frac{2000 \cdot 1,2 \cdot 950418}{513,25}$$

$$F = 2400 \text{ kN}$$

i uz :

$$B = 0,075^2 - 2,8^2 \cdot \left(\frac{1}{40}\right)^2$$

$$B = 7,25 \cdot 10^{-4}$$

je minimalni potrebni pritisak pri 35 °C :

$$p_{35} = \frac{2,8 \cdot 718262}{A \cdot 7,25 \cdot 10^{-4}} \left[-2,8 \cdot \frac{1}{40} + \left(0,075^2 + 7,25 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{2400000^2}{718262^2} \right)^{0,5} \right]$$

$$p_{35} = 130739334 \frac{\text{N}}{\text{A}}$$

$A = A_K$ – površina krnjeg stošca

$$A_K = \pi \cdot (r^2 + r_1^2 + (r + r_1) \cdot S_K)$$

$$S_K = \sqrt{h^2 + (r + r_1)^2} = 1186,73 \text{ mm}$$

$$A_K = 2328422 \text{ mm}^2$$

pa je :

$$p_{35} = 56,15 \text{ N/mm}^2$$

2.7.1.2 Proračun minimalne duljine navlačenja pri 35 °C

Minimalna duljina navlačenja pri 35 °C prema BV :

$$d_{35} = \frac{p_{35} \cdot d_{PM}}{2 \cdot \theta} \left[\frac{1}{E_m} \left(\frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} + \nu_m \right) + \frac{1 - \nu_p}{E_p} \right] \quad (4)$$

gdje su :

$E_m = 118000 \text{ N/mm}^2$ – modul elastičnosti materijala glavine vijka (Ni-Al bronca)

$E_p = 206000 \text{ N/mm}^2$ - modul elastičnosti materijala vratila vijka (čelik)

$K = d_H/d_{PM}$

$d_H = 1066,5 \text{ mm}$ – srednji vanjski promjer glavine vijka na mjestu koje odgovara srednjem promjeru konusa

$\nu_p = 0,29$ – Poissonov koeficijent materijala vratila vijka (čelik)

$\nu_m = 0,33$ - Poissonov koeficijent materijala glavine vijka (Ni-Al bronca)

Uvrštavanjem ovih vrijednosti u jednadžbu (4) dobiva se :

$$d_{35} = \frac{56,15 \cdot 513,25}{2 \cdot \frac{1}{40}} \left[\frac{1}{118000} \left(\frac{2,078^2 + 1}{2,078^2 - 1} + 0,33 \right) + \frac{1 - 0,29}{206000} \right]$$

$$d_{35} = 11,42 \text{ mm}$$

Budući da će se montaža vršiti pri temperaturi od 20 °C izračunate vrijednosti moraju se preračunati.

2.7.1.3 Minimalna duljina navlačenja pri temperaturi okoline

Minimalna duljina navlačenja pri temperaturi okoline prema BV :

$$d_T = d_{35} + \frac{d_{PM}}{2 \cdot \theta} \cdot (\alpha_m - \alpha_p) \cdot (35 - \vartheta)$$

gdje su :

$\vartheta = 20 \text{ °C}$ – temperatura okoline

$\alpha_p = 12,0 \cdot 10^{-6} \text{ mm/mm °C}$ – koeficijent linearnog produljenja za lijevani i kovani čelik

$\alpha_m = 17,5 \cdot 10^{-6} \text{ mm/mm °C}$ - koeficijent linearnog produljenja za legure bakra

$$d_T = 11,42 + \frac{513,25}{2 \cdot \frac{1}{40}} \cdot (17,5 \cdot 10^{-6} - 12,0 \cdot 10^{-6}) \cdot (35 - 20)$$

$$d_T = 12,26 \text{ mm}$$

2.7.1.4 Proračun odgovarajućeg kontaktnog tlaka pri temperaturi okoline

Kontaktни tlak navlačenja pri temperaturi okoline prema BV :

$$p_T = p_{35} \cdot \frac{d_T}{d_{35}}$$

$$p_T = 60,28 \text{ N/mm}^2$$

2.7.1.5 Proračun minimalne sile za navlačenje pri temperaturi okoline

Minimalna sila navlačenja pri temperaturi okoline prema BV :

$$F_N = A \cdot p_T \cdot (\mu + \theta)$$

$$F_N = 2328422 \cdot 60,28 \cdot \left(0,075 + \frac{1}{40}\right)$$

$$F_N = 14036 \text{ kN}$$

2.7.1.6 Proračun maksimalnog dozvoljenog tlaka pri 0 °C

Maksimalni dozvoljeni tlak pri temperaturi okoline prema BV :

$$p_{\max} = \frac{0,7 \cdot R_{S,\min} \cdot (K^2 - 1)}{(3 \cdot K^4 + 1)^{0,5}}$$

uz :

$R_{S,\min} = 260 \text{ N/mm}^2$ – minimalna elastična čvrstoća materijala glavine vijka

$$p_{\max} = 80 \text{ N/mm}^2$$

Maksimalni tlak je veći od kontaktnog tlaka p_T , što zadovoljava.

2.7.1.7 Proračun maksimalne dozvoljene duljine navlačenja

Maksimalna duljina navlačenja pri temperaturi okoline prema BV :

$$d_{\max} = d_{35} \cdot \frac{p_{\max}}{p_{35}}$$

$$d_{\max} = 16,27 \text{ mm}$$

3 Proračun centracije osovinskog voda (Postrojavanje)

Kod brodova kojima je glavni porivni stroj sporohodni diesel motor direktno spojen s brodskim vijkom, relativno velikog promjera i mase, preko relativno kratkog i krutog vratilnog voda može se dogoditi da vratilni vod bude opterećen velikim momentima savijanja te smičnim silama. Ti momenti i sile se prenose na koljenasto vratilo motora. Pomicanjem, u vertikalnom smjeru, ležaja međuvratila i ležajeva motora, može se naprezanja održati u njihovim dopuštenim granicama. To se treba osigurati proračunom centracije vratilnog voda.

Osovinski vod postavljen na ležajeve, sa spojkama međusobno učvršćenim vijcima, se može, s aspekta nauke o čvrstoći, promatrati kao greda na više oslonaca. Veličine reakcija grede određene su opterećenjem u rasponima te dužinama raspona. Naprezanje grede je određeno veličinom reakcija grede, momentima inercije grede te međusobnim vertikalnim položajem oslonaca.

Budući da se kod osovinskog voda mogu mijenjati samo međusobni položaji ležajeva, slijedi da veličine reakcija u ležajevima ovise samo o njihovom položaju.

Da bi se mogli ustanoviti međusobni položaji ležajeva osovinskog voda, potrebno je:

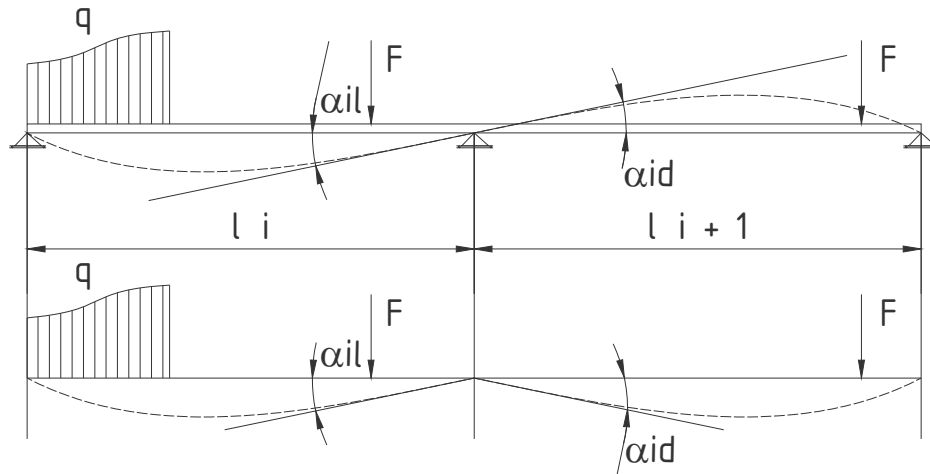
- proračunom odrediti veličine reakcija za slučaj da svi ležajevi leže na istom pravcu
- izračunati promjene reakcija u ležajevima za slučaj jediničnog pomaka svakog pojedinog ležaja kojeg je moguće pomicati
- proračunati veličine reakcija ležajeva za sve položaje ležajeva u određenom području, koje je podijeljeno u n nivoa u kojima se određeni ležaj može naći
- pronaći optimalan položaj ležajeva da bi se zadovoljili zahtjevi opteretivosti ležaja

Proračun kontinuirane grede može se provesti primjenom Clapeyron-ove metode ili metode triju momenata.

3.1 Clapeyron-ova metoda

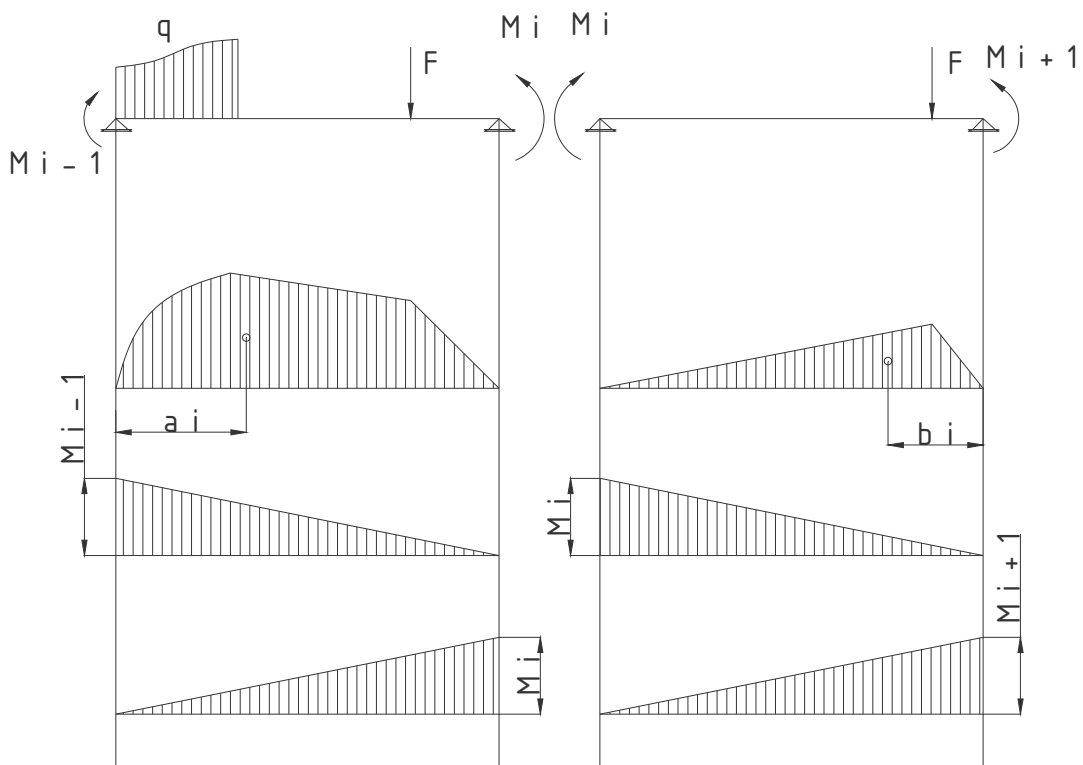
Clapeyron-ova metoda se svodi na rješavanje jednadžbi triju momenata. Kada su poznati reaktivni momenti mogu se lako odrediti reakcije u osloncima.

Pretpostavka za korištenje ove metode je da su svi oslonci kontinuirane grede na istoj visini te da su sve sile vertikalne. Elastična linija je tada kontinuirana linija. Iz uvjeta ravnoteže slijedi da je horizontalna reakcija jednaka nuli. Da bi se dobio osnovni sustav, zamišlja se da su u presjecima iznad oslonaca umetnuti zglobovi. Dopunske nepoznanice biti će tada reaktivni momenti u zglobovima. Momenti iznad krajnjih oslonaca jednaki su nuli. Na slici 19 prikazan je osnovni sustav sa zadanim vanjskim opterećenjem i reaktivnim momentima.



Slika 19 Kontinuirana greda

Takva greda se izreže na dva susjedna raspona l_i i l_{i+1} , što je prikazano na slici 20.

Slika 20 Kontinuirana greda podijeljena na dva susjedna raspona (l_i i l_{i+1})

Djelovanje kontinuirane grede lijevo i desno od izrezanog dijela zamjenjuje se silama i reaktivnim momentima. Pošto sile u tim presjecima ne izazivaju nikakve deformacije grede, izostavljene su. Ako se sada primjeni metoda rastavljanja zadanog, statički neodređenog nosača u osnovne statički određene sustave dobiti će se dvije grede opterećene na savijanje vanjskim silama i reaktivnim momentima. Pri tome treba uzeti u obzir da su reaktivni momenti na mjestima presjeka jednaki za lijevu i desnu stranu ($M_i = M_{il} = M_{id}$). U tom slučaju se osnovni sustav sastoji od dvije jednostavne grede koje su u A_{i-1} , A_i i A_{i+1} zglobno vezane za oslonce. Oslonac A_i je zajednički za obje grede.

Smisao reaktivnih momenata zavisi od opterećenja grede. Pošto je greda kontinuirana, elastična linija mora imati zajedničku tangentu u presjeku iznad oslonca A_i . To znači da su kutovi nagiba tangente u toj točki jednaki za obje grede tj. $\alpha_{il} = \alpha_{id}$. Ako se pretpostavi da zadana vanjska opterećenja i reaktivni momenti djeluju na svaku gredu odvojeno dobiti će se odgovarajući dijagrami momenata savijanja. S F_i^* se označava površina momentnog dijagrama uslijed vanjskog opterećenja lijeve grede, sa S_i težište te površine, a sa a_i udaljenost tog težišta od lijevog oslonca. Analogno tome sa F_{i+1}^* , S_{i+1} i b_{i+1} odgovarajuće vrijednosti momentnog dijagrama za desnu gredu.

Koristeći uvjet jednakosti nagiba tangente na elastičnu liniju, nakon potrebnih transformacija, slijedi opći oblik jednadžbe triju momenata :

$$M_{i-1}l_i + 2M_i \left[l_i + l_{i+1} \left(\frac{I_i}{I_{i+1}} \right) \right] + M_{i+1}l_{i+1} \left(\frac{I_i}{I_{i+1}} \right) = -\frac{6F_i^* a_i}{l_i} - \frac{6F_{i+1}^* b_{i+1}}{l_{i+1}} \left(\frac{I_i}{I_{i+1}} \right)$$

Ova jednadžba izražava odnos između momenta u tri uzastopna oslonca kontinuiranog nosača u zavisnosti od odgovarajućih raspona i njihovih opterećenja.

Clapeyron-ova jednadžba može se napisati toliko puta koliko greda ima unutarnjih oslonaca ($n-1$ puta). Na taj se način dobiva ($n-1$)-na linearna jednadžba sa istim brojem nepoznanica. Ova jednadžba vrijedi samo za krute oslonce koji se nalaze na istoj visini.

No ona se može, modificirana, primijeniti i na slučaj kada oslonci nisu na istoj visini. Kutove γ_i i γ_{i+1} čine pravci kroz susjedne oslonce ($i-1$) i (i), te (i) i ($i+1$) sa horizontalnom linijom, što je prikazano na slici 21.

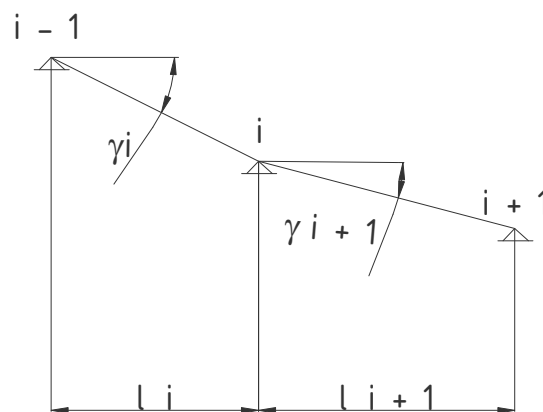
Modificirana Clapeyron-ova jednadžba tada glasi :

$$M_{i-1}l_i + 2M_i \left[l_i + l_{i+1} \left(\frac{I_i}{I_{i+1}} \right) \right] + M_{i+1}l_{i+1} \left(\frac{I_i}{I_{i+1}} \right) = -\frac{6F_i^* a_i}{l_i} - \frac{6F_{i+1}^* b_{i+1}}{l_{i+1}} + 6EI_i(\gamma_i - \gamma_{i+1}) \quad (5)$$

Ako su z_{i-1} , z_i i z_{i+1} udaljenosti oslonaca ($i-1$), (i) i ($i+1$) u odnosu na izabranu bazu, onda je:

$$\gamma_i = \frac{z_{i-1} - z_i}{l_i} \quad \gamma_{i+1} = \frac{z_i - z_{i+1}}{l_{i+1}}$$

Kada se uvrste ovi izrazi u (5) lako se mogu izračunati reaktivni momenti koji su izazvani razlikama visina.



Slika 21 Kontinuirana greda čiji oslonci nisu na istoj visini

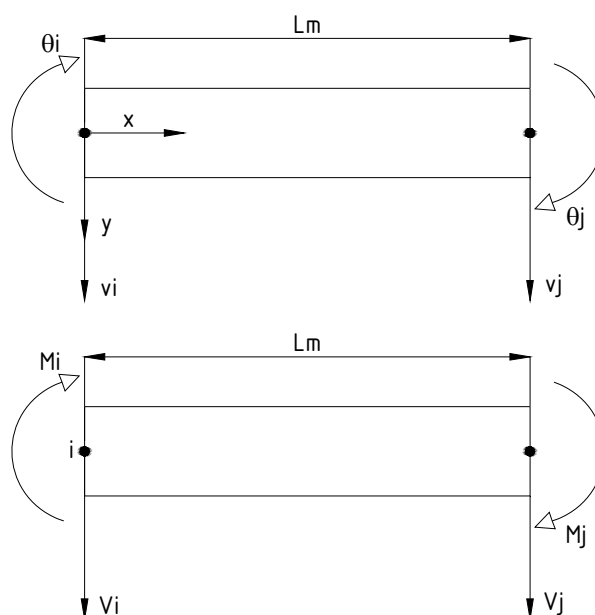
Opisana metoda je vrlo prikladna za rješavanje proračuna centracije vratilnog voda. Ona nudi rješenje za opisivanje statički neodređenog nosača sustavom jednostavnih, statički određenih, nosača te je stoga prikladna čak i za ručno rješavanje. No ovakvo rješavanje proračuna centracije zahtijeva puno vremena, jer zahtijeva rješavanje velikog broja linearnih jednadžbi. Zato se ova metoda sve rjeđe koristi u suvremenoj brodograđevnoj praksi. Moderan način rješavanja proračuna centracije vratilnog voda je primjena metode konačnih elemenata koja će biti opisana u sljedećem poglavlju.

3.2 Metoda konačnih elemenata

Mnogi praktični inženjerski problemi su ili ekstremno komplicirani ili ih je nemoguće proračunati konvencionalnim analitičkim metodama. Ove metode uključuju pronalaženje matematičkih jednadžbi koje definiraju potrebne varijable. Jedan od primjera je raspodjela naprezanja i pomaka krutih dijelova. U prošlosti se to rješavalo pojednostavljuvanjem problema do te razine da se on može riješiti analitički uz primjenu velikih faktora sigurnosti. Danas, kada su računala vrlo razvijena, za inženjerske analize se koriste numeričke metode. Jedna takva metoda je metoda konačnih elemenata.

U ovom radu biti će opisana primjena metode konačnih elemenata na kruto spojene konzolne nosače, jer je mehanički ekvivalent vratilnog voda greda oslonjena na osloncima. Nosači mogu biti opterećeni na savijanje i uvijanje uz dodatak opterećenja na vlak ili tlak. Pošto su, u većini slučajeva, naprezanja i pomaci izazvani opterećenjem na vlak ili tlak zanemarivi u odnosu na one izazvane opterećenjem na savijanje može se ovakve elemente smatrati savršeno krutim prema opterećenju na vlak ili tlak.

U slučaju da je dužina nosača veća od širine nosača se može podijeliti, po dužini, na mnogo jednakih elemenata. Prvi korak u analizi je ispitati svojstva svakog elementa zasebno. Koordinatni sustav je izabran tako da se os x poklapa sa uzdužnom osi elementa. Svi elementi su numerirani i njihov broj je m . Njihova dužina, moment tromosti u ravnini x - y i Young-ov modul su L_m , I_m i E_m . Element je spojen sa susjednim elementima u čvorovima i i j . Kada je struktura opterećena, pomak u smjeru osi y , točke i , je označen sa v_i , a rotacija u smjeru kazaljke na satu, točke i , je označen sa θ_i , a odgovarajuće sile i momenti su označeni sa V_i , M_i . Element je prikazan na slici 22.



Slika 22 Prikaz osnovnog elementa sa silama pomacima i momentima

Da bi se nastavilo s analizom potrebno je pronaći odgovarajuću formu varijacija pomaka u smjeru osi y duž elementa. Jedna od mogućih formi je :

$$v(x) = C_1 + C_2x + C_3x^2 + C_4x^3 \quad (6)$$

gdje su C_1 do C_4 konstante za određeni element. Preporučljivo je koristiti polinom kao funkciju pomaka. Njegova kubična forma omogućuje sljedeće načine gibanja i deformacija elementa :

- (1) Translacija ($C_1 \neq 0$)
- (2) Rotacija ($C_2 \neq 0$)
- (3) Naprezanje na savijanje ($C_3 \neq 0$)
- (4) Smično naprezanje ($C_4 \neq 0$)

Rotacija, u smjeru kazaljke na satu, na bilo kojem dijelu elementa definirana je kao :

$$\theta = \frac{dv}{dx} = C_2 + 2C_3x + 3C_4x^2 \quad (7)$$

Do vrijednosti konstanti dolazi se uvrštavanjem rubnih uvjeta, odnosno izračunavanja vrijednosti pomaka u točkama i i j :

$$\begin{aligned} v_i &= v(0) = C_1 \\ \theta_i &= \theta(0) = C_2 \\ v_j &= v(L_m) = C_1 + C_2L_m + C_3L_m^2 + C_4L_m^3 \\ \theta_j &= \theta(L_m) = C_2 + 2C_3L_m + 3C_4L_m^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Vrijednosti konstanti C_1 i C_2 su izravno dobivene dok se vrijednosti konstanti C_3 i C_4 izračunavaju kombinacijom ostale dvije jednadžbe :

$$\begin{aligned} C_3 &= -\frac{3v_i}{L_m^2} - \frac{2\theta_i}{L_m} + \frac{3v_j}{L_m^2} - \frac{2\theta_j}{L_m} \\ C_4 &= \frac{2v_i}{L_m^3} + \frac{\theta_i}{L_m^2} - \frac{2v_j}{L_m^3} + \frac{\theta_j}{L_m^2} \end{aligned} \quad (9)$$

Prema teoriji savijanja slijede izrazi za momente savijanja i poprečne sile :

$$\begin{aligned} M &= E_m I_m \frac{d^2v}{dx^2} = E_m I_m (2C_3 + 6C_4x) \\ V &= \frac{dM}{dX} = 6E_m I_m C_4 \end{aligned} \quad (10)$$

Kada se u jednadžbe (10) uvrste rubni uvjeti za čvorne točke i i j dobivaju se četiri jednadžbe sa četiri nepoznanice. Ove se jednadžbe mogu zapisati matricno što je prikazano u jednadžbi (11).

$$\begin{bmatrix} V_i \\ M_i \\ V_j \\ M_j \end{bmatrix} = \frac{E_m I_m}{L_m^3} \begin{bmatrix} 0 & 6 \\ -2 & 0 \\ 0 & -6 \\ 2 & 6L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_3 \\ C_4 \end{bmatrix} \quad (11)$$

ako se u (11) uvrste vrijednosti za C_3 i C_4 , prema (9), slijedi :

$$\begin{bmatrix} V_i \\ M_i \\ V_j \\ M_j \end{bmatrix} = \frac{E_m L_m}{L_m^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L_m & -12 & 6L_m \\ 6L_m & 4L_m^2 & -6L_m & 2L_m^2 \\ -12 & -6L_m & 12 & -6L_m \\ 6L_m & 2L_m^2 & -6L_m & 4L_m^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ \theta_i \\ v_j \\ \theta_j \end{bmatrix} \quad (12)$$

ili :

$$R_m = k_m \cdot \delta_m$$

gdje su :

R_m – vektor sile

δ_m – vektor pomaka

k_m – matrica krutosti (simetrična)

Sljedeća faza analize je zbrajanje sila i pomaka svih elemenata da bi se dobila slika ponašanja cjelokupne strukture.

$$F = \Sigma R_m = \Sigma k_m \delta_m = K \delta$$

gdje je K ukupna matrica krutosti, a vektori F i δ predstavljaju vanjske sile i pripadajuće pomake.

3.3 Faktori koji utječu na elastičnu liniju vratilnog voda

3.3.1 Svojstva materijala sastavnih dijelova vratilnog voda

Sastavni dijelovi vratilnog voda izrađeni su od čelika, koji se u dovoljnoj mjeri može smatrati izotropnim materijalom. Njegova su elastična svojstva određena modulom elastičnosti E i modulom smicanja G .

3.3.2 Težine i uzgoni

U proračunu su uzeta u obzir opterećenja izazvana vlastitom težinom vratilnog voda i njegovih ostalih sastavnih dijelova. U obzir se, također, uzima i djelovanje sile uzgona na sastavne dijelove vratilnog voda, brodski vijak i poklopac broskog vijka.

Zbog djelovanja sile uzgona masa uronjenih elemenata vratilnog voda se smanjuje. Sila uzgona, odnosno smanjenje mase se računa na sljedeći način :

$$G_u = G - U = \gamma_e \cdot V - \gamma_v V = \gamma_e V \left(1 - \frac{\gamma_v}{\gamma_e} \right)$$

$$m_u \cdot g = m \cdot g \cdot \left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_e} \right)$$

$$m_u = m \cdot \left(1 - \frac{1025}{7650} \right)$$

$$m_u = 0,866 \cdot m \quad (13)$$

gdje su :

G_u – težina uronjenog elementa, N

G – težina elementa, N

γ_e – specifična težina elementa, N/m³

γ_v – specifična težina medija (morske vode) u koji je element uronjen, N/m³

ρ_v – gustoća medija u koji je element uronjen, kg/m³

ρ_e – gustoća elementa, kg/m³

V – volumen elementa, m³

U – sila uzgona, N

m_u – masa uronjenog elementa, kg

m – masa elementa, kg

g – ubrzanje sile teže, m/s²

Prema izrazu (13) izračunavaju se mase sljedećih elemenata :

a) propelera

$$m_{up} = 0,866 \cdot m_p = 0,866 \cdot 16395 = 14198 \text{ kg}$$

b) poklopca propelera

$$m_{upp} = 0,866 \cdot m_{pp} = 0,866 \cdot 1294 = 1121 \text{ kg}$$

c) navoja vratila vijka

$$m_{unv} = 0,866 \cdot m_{nv} = 0,866 \cdot 394 = 341 \text{ kg}$$

d) konusa vratila vijka

$$m_{uk} = 0,866 \cdot m_k = 0,866 \cdot 848 = 734 \text{ kg}$$

3.3.3 Toplinske deformacije

Toplinsko rastezanje temeljne ploče kod diesel motora neposredno spojenog na vratilni vod uzima se u obzir zbog malog razmaka između ležajeva izlaznog vratila motora u odnosu na razmak ostalih ležajeva. Manji razmak među ležajevima znači veću krutost što dovodi do velikog utjecaja pomaka ovih ležaja na reakcije u ostalim ležajevima. Zato se proračun provodi posebno za hladno i posebno za toplo stanje.

Prilikom rada motora dolazi do pomicanja ležajeva u motoru zbog povećanja temperature. Taj se pomak može izračunati prema preporuci proizvođača motora MAN B&W za određenu seriju motora. Tako za motor iz serije S-50MC-C7 vrijedi :

$$\Delta h = h \cdot (t_2 - t_1) \cdot C$$

gdje su :

$h = 1088 \text{ mm}$ – udaljenost od postolja motora do središta koljenastog vratila

$t_2 = 55 \text{ °C}$ – temperatura motora (toplo stanje)

$t_1 = 20 \text{ °C}$ – temperatura motora (hladno stanje)

$C = 6,3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/°C}$ – konstanta rastezanja

tada je :

$$\Delta h = 0,24 \text{ mm}$$

3.4 Dopuštene sile, momenti savijanja i opterećenja ležajeva

Pomaci ležajeva u poprečnom smjeru u potpunosti određuju reakcije u ležajevima te oblik elastične linije vratilnog voda. U nastavku će se navesti preporuke i ograničenja kojima treba udovoljiti vratilni vod.

3.4.1 Maksimalna dopuštena opterećenja ležaja

Reakcije u ležajevima su ograničene srednjim tlakom :

$$p_{sr} = \frac{R}{d_{VL} \cdot l_L}$$

gdje su :

R – reakcija u promatranom ležaju

d_{VL} – vanjski promjer vratila u ležaju, mm

l_L – duljina ležaja

Kriterij najvećeg dopuštenog naprezanja glasi : $p_{sr} < p_{max}$, gdje p_{max} ovisi o konstrukciji ležaja.

3.4.2 Maksimalno dopuštene reakcije u ležajevima

Maksimalno dopušteno opterećenje ležaja (maksimalni dopušteni tlak), izrađenog od bijelog metala i podmazivanog uljem, iznosi, prema zahtjevu klasifikacijskog društva BV, $p_{max} = 0,8 \text{ Mpa}$.

Tada je maksimalna reakcija u stražnjem ležaju statvene cijevi :

$$R_{1max} = p_{max} \cdot d_{ssl} \cdot l_{ef} = 0,8 \cdot 545 \cdot 1100 = 415 \text{ kN}$$

Maksimalna reakcija u prednjem statvenom ležaju je :

$$R_{2max} = p_{max} \cdot d_{psi} \cdot l_{ef} = 0,8 \cdot 547 \cdot 440 = 167 \text{ kN}$$

Maksimalna reakcija u ležaju međuvratila :

$$R_{3max} = p_{max} \cdot d_{lm} \cdot l_{ef} = 133 \text{ kN}$$

Maksimalna reakcija u ležajevima motora je propisana od strane proizvođača i iznosi :

$$R_{4max} = 291 \text{ kN}$$

3.4.3 Minimalno dopuštene reakcije u ležajevima

Vertikalne komponente u ležajevima moraju biti usmjerene prema gore, jer bi reakcija u suprotnom smjeru dodatno opteretila susjedne ležajeve. Nulta reakcija znači veći razmak među ležajevima što se nepovoljno odražava na vlastite frekvencije vibracija vratilnog voda. Kriterij najmanjeg opterećenja ležajeva u vertikalnoj ravnini biti će :

$$R \geq R_{\min} = 0,05 R_{\max} > 0$$

gdje su :

R – reakcija u promatranom ležaju, N

R_{\min} – minimalna dopuštena reakcija u ležaju, N

R_{\max} – maksimalna dopuštena reakcija u ležaju, N

Minimalna dopuštena reakcija u stražnjem ležaju statvene cijevi :

$$R_{1\min} = 0,05 \cdot R_{1\max} = 20,75 \text{ kN}$$

Minimalna reakcija u prednjem ležaju statvene cijevi :

$$R_{2\min} = 0,05 \cdot R_{2\max} = 8,35 \text{ kN}$$

Minimalna reakcija u ležaju međuvratila :

$$R_{3\max} = 0,05 \cdot R_{3\max} = 6,65 \text{ kN}$$

Minimalna reakcija u ležajevima motora je propisana od strane proizvođača motora i iznosi :

$$R_{4\min} = 14,55 \text{ kN}$$

3.4.4 Najveći dopušteni orijentacijski nagib tangente na elastičnu liniju vratilnog voda u statvenom ležaju

Nagib elastične linije predstavlja kut između tangente na elastičnu liniju vratilnog voda i osi ležaja. Kut se izražava u radijanima. Najveći nagib koji se teoretski može postići u ležaju iznosi :

$$\alpha_{\max} = \frac{z_{\max}}{L_{\text{ef}}} \quad (14)$$

gdje su :

$z_{\max} = 0,9 \text{ mm}$ – najveća zračnost u ležaju s obzirom na dosjed vratila i ležaja

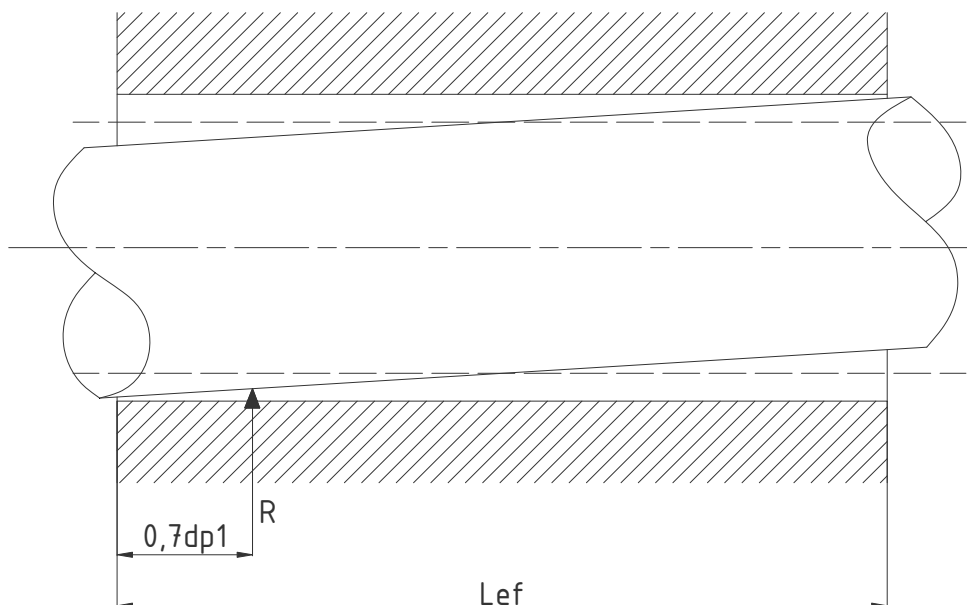
$L_{\text{ef}} = 1100 \text{ mm}$ - efektivna dužina ležaja

Uvrštenjem ovih vrijednosti u jednadžbu (14) dobiva se maksimalna dopuštena vrijednost nagiba elastične linije vratilnog voda :

$$\alpha_{\max} = 8,18 \cdot 10^{-4} \text{ rad} = 0,8 \text{ mrad}$$

Najveći nagib elastične linije vratilnog voda očekuje se u stražnjem ležaju statvene cijevi zbog djelovanja težine brodskog vijka. Ako proračunski nagib u stražnjem ležaju statvene cijevi prelazi najveću dopuštenu vrijednost koja je definirana izrazom (14) kriterij se može zadovoljiti kosim postavljanjem stražnjeg statvenog ležaja.

Položaj reakcije u stražnjem ležaju statvene cijevi pretpostavlja se da je na udaljenosti $0,7 \cdot d_{\text{ssl}}$ od prednjeg kraja statvenog ležaja.



Slika 23 Položaj reakcije u stražnjem statvenom ležaju

Za ostale ležajeve se pretpostavlja reakcija na polovini dužine ležaja.

3.5 Proračun postrojavanja računalnim programom ALICALC

Proračun postrojavanja izvršit će se računalnim programom ALICALC. Ovaj je program razvijen u poduzeću „Uljanik Strojogradnja“ te ga se koristi za proračun centracije vratilnog voda na brodovima izrađenim u brodogradilištu „Uljanik“, koji koriste glavne porivne strojeve proizvođača MAN B&W.

Program je temeljen na metodi konačnih elemenata. Vratilni vod je podijeljen na segmente točnih dimenzija poprečnog presjeka i opterećenjima postavljenim u čvornim točkama. Svaki čvor ima dva stupnja slobode gibanja :

- a) translaciju – pomak u smjeru okomitom na os vratila odnosno os x
- b) rotaciju – pomak oko osi okomite na os x

Prema tome vratilo može biti opterećeno silom, koja djeluje u smjeru okomito na os vratila, te momentom, koji djeluje oko osi okomite na os vratila.

Sustav vratilnog voda je podijeljen tako da se čvorne točke nalaze u karakterističnim točkama, a to su :

- a) na mjestima gdje se povećava ili smanjuje promjer vratila
- b) na mjestima na kojima se nalaze opterećenja
- c) u spojnim točkama i u osloncima
- d) na mjestima koja zahtijevaju vrijednosti poprečnih sila i momenata

Za vratila za koja se uzima u obzir opterećenje vlastitom težinom, čvorne točke su postavljene u prikladno malim razmacima da bi se dobio što točniji oblik deformacije, jer se opterećenje težinom promatra kao kontinuirano opterećenje.

Čvorne točke se numeriraju brojevima (1,2,3, itd.), tako da je točka 1, točka sa najmanjom apscisom, a točka m, točka sa najvećom apscisom.

Svaki element je definiran sa dužinom i vanjskim promjerom. Težina elemenata se proračunava preko volumena elementa i gustoće čelika, od kojeg je vratilo napravljeno. Koljenasto vratilo se uzima kao ravno vratilo sa krutošću koja odgovara stvarnom koljenastom vratilu. Sve ostale sile, koljena koljenastog vratila, ojnice, klipovi, se postavljaju zbrojnom silom na mjestu polovine cilindra.

3.5.1 Ulazni parametri

Na sljedećim stranicama su prikazane tablice 9, 10 i 11 sa ulaznim parametrima. One sadrže geometrijske karakteristike mehaničkog ekvivalenta vratilnog voda. Mehanički ekvivalent vratilnog voda prikazan je na slici 24.



Element Br.	x (m)	l(m)	D (m)	d (m)	gustoća (kg/m ³)	E (N/m ²)	G (N/m ²)	Komentar
1	0.000							početak
		0.1500	0.6500	0.0000	0.0	2.05e+011	7.83e+010	poklopac propelera
2	0.150							
		0.2500	0.6500	0.0000	0.0	2.05e+011	7.83e+010	poklopac propelera
3	0.400							
		0.5350	0.5200	0.0000	6825.0	2.05e+011	7.83e+010	vratilo vijka
4	0.935							
		0.5350	0.5300	0.0000	6825.0	2.05e+011	7.83e+010	vratilo vijka
5	1.470							
		0.3580	0.5400	0.0000	6825.0	2.05e+011	7.83e+010	vratilo vijka
6	1.828							
		0.2320	0.5450	0.0000	6825.0	2.05e+011	7.83e+010	vratilo vijka
7	2.060							rebro 007
		0.2215	0.5450	0.0000	6825.0	2.05e+011	7.83e+010	vratilo vijka
8	2.281							
		0.3785	0.5450	0.0000	6825.0	2.05e+011	7.83e+010	vratilo vijka
9	2.660							rebro 008
		0.4680	0.5450	0.0000	6825.0	2.05e+011	7.83e+010	vratilo vijka
10	3.128							
		0.7320	0.5100	0.0000	7010.0	2.10e+011	8.14e+010	vratilo vijka
11	3.860							rebro 010
		0.6000	0.5100	0.0000	7010.0	2.10e+011	8.14e+010	vratilo vijka
12	4.460							rebro 011
		0.6000	0.5100	0.0000	7010.0	2.10e+011	8.14e+010	vratilo vijka
13	5.060							rebro 012
		0.6000	0.5100	0.0000	7010.0	2.10e+011	8.14e+010	vratilo vijka
14	5.660							rebro 013
		0.6000	0.5100	0.0000	7010.0	2.10e+011	8.14e+010	vratilo vijka
15	6.260							rebro 014
		0.6000	0.5100	0.0000	7010.0	2.10e+011	8.14e+010	vratilo vijka
16	6.860							rebro 015
		0.6000	0.5100	0.0000	7010.0	2.10e+011	8.14e+010	vratilo vijka
17	7.460							rebro 016
		0.6000	0.5100	0.0000	7010.0	2.10e+011	8.14e+010	vratilo vijka
18	8.060							rebro 017
		0.6000	0.5100	0.0000	7010.0	2.10e+011	8.14e+010	vratilo vijka
19	8.660							rebro 018
		0.2000	0.5100	0.0000	7010.0	2.10e+011	8.14e+010	vratilo vijka
20	8.860							
		0.3550	0.5470	0.0000	7850.0	2.10e+011	8.14e+010	vratilo vijka
21	9.215							prednji ležaj statvene cijevi
		0.6550	0.5470	0.0000	7850.0	2.10e+011	8.14e+010	vratilo vijka
22	9.870							
		0.2400	0.5100	0.0000	7850.0	2.10e+011	8.14e+010	vratilo vijka
23	10.110							rebro 020
		0.7400	0.5100	0.0000	7850.0	2.10e+011	8.14e+010	vratilo vijka
24	10.850							
		0.1100	0.8800	0.0000	7850.0	2.10e+011	8.14e+010	vratilo vijka
25	10.960							rebro 021
		0.0900	0.8800	0.0000	7850.0	2.10e+011	8.14e+010	međuvratilo
26	11.050							
		0.7600	0.4450	0.0000	7850.0	2.10e+011	8.14e+010	međuvratilo
27	11.810							rebro 022
		0.8500	0.4450	0.0000	7850.0	2.10e+011	8.14e+010	međuvratilo.
28	12.660							rebro 023
		0.7250	0.4450	0.0000	7850.0	2.10e+011	8.14e+010	međuvratilo
29	13.385							
		0.1750	0.4450	0.0000	7850.0	2.10e+011	8.14e+010	međuvratilo
30	13.560							

Tablica 9 Ulazni parametri (čvorne točke od 1 do 30)

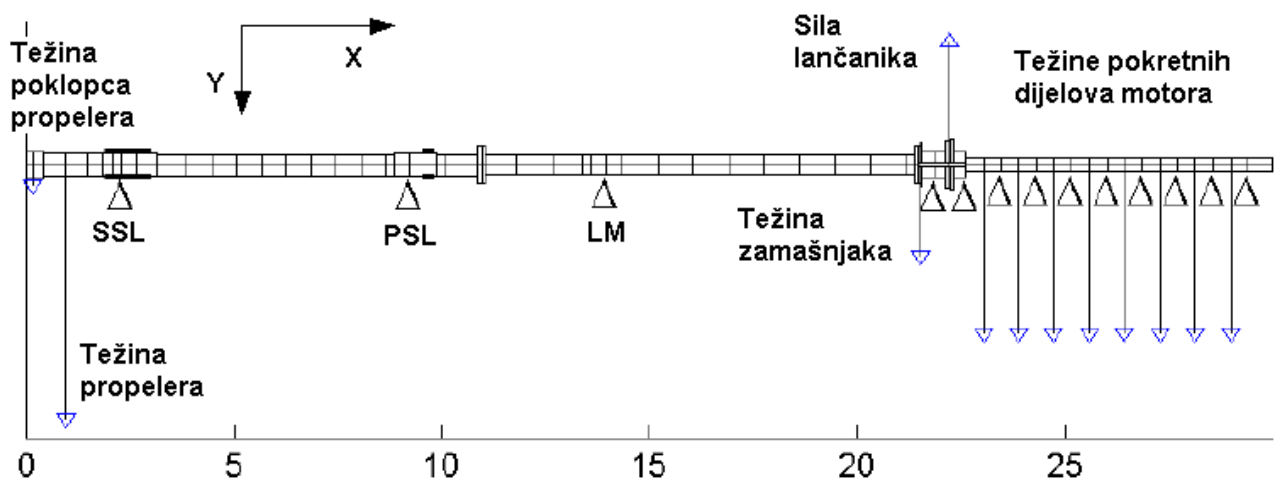


Element Br.	x (m)	l(m)	D (m)	d (m)	gustoća (kg/m ³)	E (N/m ²)	G (N/m ²)	Komentar
	13.935	0.3750	0.4500	0.0000	7850.	2.10e+011	8.14e+010	međuvratilo
31								ležaj međuvratila
	14.310	0.3750	0.4500	0.0000	7850.	2.10e+011	8.14e+010	međuvratilo
32								
	15.210	0.9000	0.4450	0.0000	7850.	2.10e+011	8.14e+010	međuvratilo
33								rebro 026
	16.060	0.8500	0.4450	0.0000	7850.	2.10e+011	8.14e+010	međuvratilo
34								rebro 027
	16.910	0.8500	0.4450	0.0000	7850.	2.10e+011	8.14e+010	međuvratilo
35								rebro 028
	17.760	0.8500	0.4450	0.0000	7850.	2.10e+011	8.14e+010	međuvratilo
36								rebro 029
	18.610	0.8500	0.4450	0.0000	7850.	2.10e+011	8.14e+010	međuvratilo
37								rebro 030
	19.460	0.8500	0.4450	0.0000	7850.	2.10e+011	8.14e+010	međuvratilo
3								rebro 031
	20.310	0.8500	0.4450	0.0000	7850.	2.10e+011	8.14e+010	međuvratilo
39								rebro 032
	21.160	0.8500	0.4450	0.0000	7850.	2.10e+011	8.14e+010	međuvratilo
40								rebro 033
	21.370	0.2100	0.4450	0.0000	7850.	2.10e+011	8.14e+010	međuvratilo
41								
	21.460	0.0900	0.9000	0.0000	7850.	2.10e+011	8.14e+010	međuvratilo
42								prirubnica
	21.525	0.0650	0.9000	0.0850	7850.	2.10e+011	8.14e+010	koljenasto vratilo
43								zamašnjak
	21.567	0.0420	1.0600	0.0850	7850.	2.10e+011	8.14e+010	koljenasto vratilo
44								
	21.854	0.2870	0.6000	0.0850	7850.	2.10e+011	8.14e+010	koljenasto vratilo
45								stražnji ležaj motora.
	22.108	0.2540	0.6000	0.0850	7850.	2.10e+011	8.14e+010	koljenasto vratilo
46								
	22.214	0.2540	1.1000	0.0850	7850.	2.10e+011	8.14e+010	koljenasto vratilo
47								zamašnjak
	22.260	0.1060	1.1000	0.0850	7850.	2.10e+011	8.14e+010	koljenasto vratilo
48								
	22.320	0.0460	1.2200	0.0850	7850.	2.10e+011	8.14e+010	koljenasto vratilo
49								
	22.609	0.0600	0.6000	0.0850	7850.	2.10e+011	8.14e+010	koljenasto vratilo
50								ležaj motora
	23.034	0.2890	0.3240	0.0000	0.0	2.10e+011	8.14e+010	koljenasto vratilo
51								cilindar 1
	23.459	0.4250	0.3240	0.0000	0.0	2.10e+011	8.14e+010	koljenasto vratilo
52								ležaj motora
	23.884	0.4250	0.3240	0.0000	0.0	2.10e+011	8.14e+010	koljenasto vratilo
53								cilindar 2
	24.309	0.4250	0.3240	0.0000	0.0	2.10e+011	8.14e+010	koljenasto vratilo
54								ležaj motora
	24.734	0.4250	0.3240	0.0000	0.0	2.10e+011	8.14e+010	koljenasto vratilo
55								cilindar 3
	25.159	0.4250	0.3240	0.0000	0.0	2.10e+011	8.14e+010	koljenasto vratilo
56								ležaj motora
	25.584	0.4250	0.3240	0.0000	0.0	2.10e+011	8.14e+010	koljenasto vratilo
57								motor
	26.009	0.4250	0.3240	0.0000	0.0	2.10e+011	8.14e+010	koljenasto vratilo
58								ležaj motora
	26.434	0.4250	0.3240	0.0000	0.0	2.10e+011	8.14e+010	koljenasto vratilo
59								motor
	13.935	0.4250	0.3240	0.0000	0.0	2.10e+011	8.14e+010	koljenasto vratilo

Tablica 10 Ulazni parametri (čvorne točke od 31 do 59)

Element Br.	x (m)	l(m)	D (m)	d (m)	gustoća (kg/m ³)	E (N/m ²)	G (N/m ²)	Komentar
60	26.859							ležaj motora
		0.4250	0.3240	0.0000	0.0	2.10e+011	8.14e+010	koljenasto vratilo
61	27.284							motor
		0.4250	0.3240	0.0000	0.0	2.10e+011	8.14e+010	koljenasto vratilo
62	27.709							ležaj motora
		0.4250	0.3240	0.0000	0.0	2.10e+011	8.14e+010	koljenasto vratilo
63	28.134							motor
		0.4250	0.3240	0.0000	0.0	2.10e+011	8.14e+010	koljenasto vratilo
64	28.559							ležaj motora
		0.4250	0.3240	0.0000	0.0	2.10e+011	8.14e+010	koljenasto vratilo
65	28.984							motor
		0.4250	0.3240	0.0000	0.0	2.10e+011	8.14e+010	koljenasto vratilo
66	29.409							ležaj motora
		0.5510	0.3240	0.0000	0.0	2.10e+011	8.14e+010	koljenasto vratilo
67	29.960							

Tablica 11 Ulazni parametri (čvorne točke od 60 do 67)



Slika 24 Mehanički ekvivalent vratilnog voda

Ulazni parametri sadrže još raspored i iznose sila i momenata, koji opterećuju vratilni vod, te raspored oslonaca, odnosno ležajeva vratilnog voda.



čvor	X (m)	F (N)	M (Nm)	Komentar
2	0.150	-10998.0	0	poklopac propelera
4	0.935	-139285.0	0	propeler
43	21.525	-50080.0	0.0	zamašnjak
47	22.214	67300.0	0.0	lančaničnik
51	23.034	-92300.0	0.0	cilindar 1
53	23.884	-92300.0	0.0	cilindar 2
55	24.734	-92300.0	0.0	cilindar 3
57	25.584	-92300.0	0.0	cilindar 4
59	26.434	-92300.0	0.0	cilindar 5
61	27.284	-92300.0	0.0	cilindar 6
63	28.134	-92300.0	0.0	cilindar 7
65	28.984	-92300.0	0.0	cilindar 8

Tablica 12 *Primijenjene sile i momenti*

čvor	X (m)	Y (m)	zračnost (m)	R_{\min} (N)	R_{\max} (N)	Komentar
8	2.281	0.00000	0.0009	54000	335000	stražnji statveni ležaj
21	9.215	0.00000	0.0000	20000	135000	prednji statveni ležaj
31	13.935	0.00180	0.0000	15000	104000	ležaj međuvratila
45	21.854	0.00400	0.0000	14550	291000	stražnji ležaj motora
50	22.609	0.00521	0.0000	14550	291000	ležaj motora
52	23.459	0.00657	0.0000	14550	291000	ležaj motora
54	24.309	0.00793	0.0000	14550	291000	ležaj motora
56	25.159	0.00929	0.0000	14550	291000	ležaj motora
58	26.009	0.01065	0.0000	14550	291000	ležaj motora
60	26.859	0.01201	0.0000	14550	291000	ležaj motora
62	27.709	0.01337	0.0000	14550	291000	ležaj motora
64	28.559	0.01473	0.0000	14550	291000	ležaj motora
66	29.409	0.01609	0.0000	14550	291000	ležaj motora

Tablica 13 *Raspored ležajeva*

3.5.2 Određivanje utjecajnih faktora

Kada su definirani mehanički ekvivalent vratilnog voda, položaji i iznosi opterećenja te raspored oslonaca određuju se veličine reakcija oslonaca za slučaj da su svi oslonci na istoj visini. Nakon toga, odabire se jedinični pomak oslonca od 0,1 mm. Jedan oslonac se pomakne za odabranu veličinu pomaka dok ostali oslonci ostaju na istoj visini. Sada se proračunavaju razlike u iznosu reakcija koje su izračunate za slučaj da su svi oslonci na istoj visini. Ovaj postupak se ponavlja za svaki oslonac koji je moguće micati. Pretpostavlja se da je funkcija po kojoj se mijenja veličina reakcija u osloncima izazvana pomakom određenog oslonca linearna. Ako je promjena linearna, za pomak oslonca od n jediničnih pomaka će razlika veličine reakcije biti veća n puta. Razlike u veličini reakcija izazvanih jediničnim pomacima svakog oslonca zasebno nazivaju se utjecajni faktori. Utjecajni faktori su prikazani u tablici 14.

Razlika reakcije u ležaju (N)	stražnji statveni ležaj	prednji statveni ležaj	ležaj međuvratila	stražnji ležaj motora	ležaj motora	ležaj motora	ležaj motora
pomak bloka motora za 0,1 mm	-103	780	-1441	5614	-4985	172	-46
rotacija bloka motora oko stražnjeg ležaja motora za 0,1 mrad	294	-2217	5495	32413	29646	1020	273
pomak stražnjeg statvenog ležaja za 0,1 mm	399	-1095	800	-502	410	-14	4
pomak prednjeg statvenog ležaja za 0,1 mm	1095	3543	-3229	3791	-3095	107	-29
pomak ležaja međuvratila za 0,1 mm	800	-3229	3870	-8903	7670	-264	71

Tablica 14 Utjecajni faktori

Nakon što su utvrđeni utjecajni faktori, računalo optimizira sustav tako da odabere najpovoljniju kombinaciju pomaka da bi se reakcije ležaja održale u dopuštenim granicama.

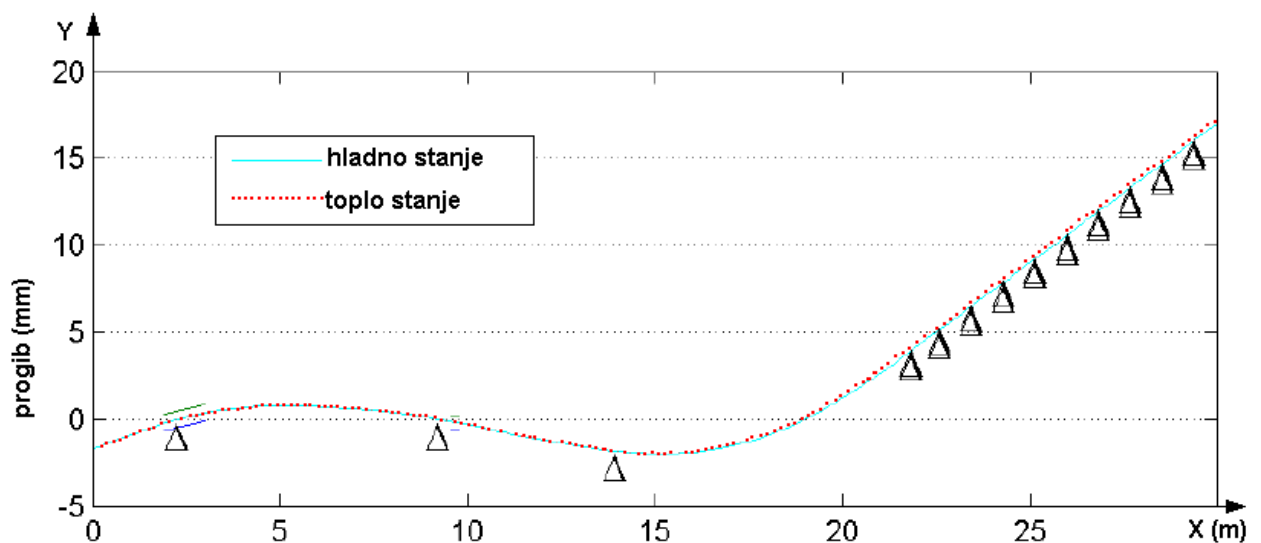
stražnji statveni ležaj – vertikalna pozicija	0.00 mm
stražnji statveni ležaj – rotacija oko točke u kojoj djeluje reakcija	0.50 mm/m
prednji statveni ležaj – vertikalna pozicija	0.00 mm
prednja brtvenica – vertikalna pozicija	-0.20 mm
ležaj međuvratila – vertikalna pozicija	-1.80 mm
blok motora – vertikalna pozicija	4.00 mm
blok motora – rotacija oko stražnjeg ležaja motora	1.60 mm/m

Tablica 15 Optimalni položaji ležajeva

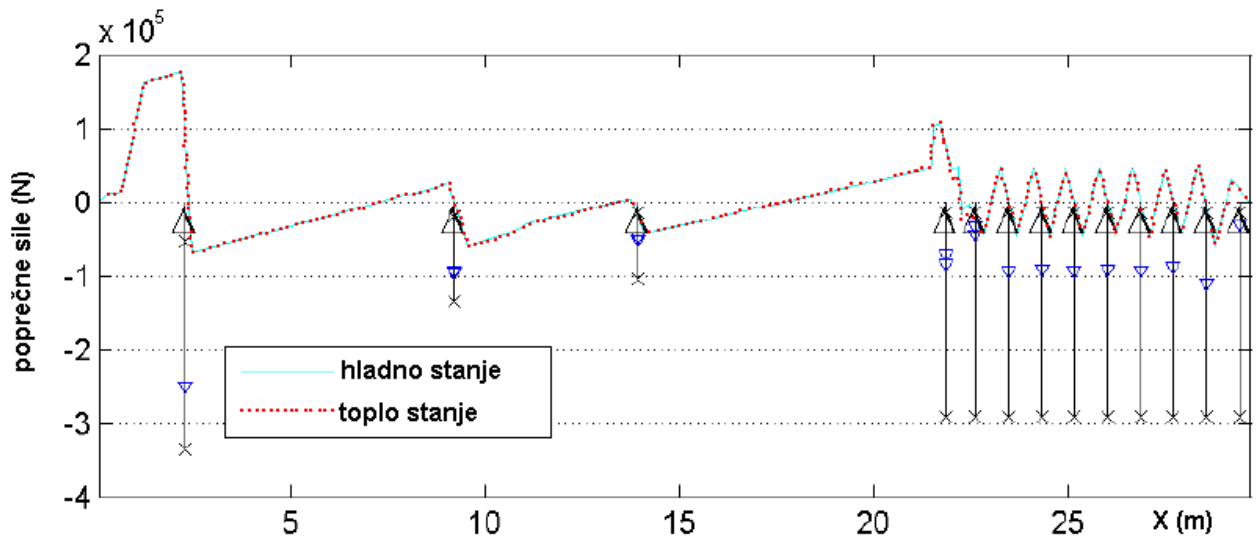
3.5.3 Numerički i grafički prikaz rezultata proračuna

Br.	X(m)	proračunske reakcije				granice reakcija		Komentar
		Y(mm)	reakcija (N)	Y(mm)	reakcija (N)	R_{min} (N)	R_{max} (N)	
8	2.281	0.00	250506	0.00	250258	54000	335000	stražnji statveni ležaj
21	9.215	0.00	93405	0.00	95278	20000	135000	prednji statveni ležaj
31	13.935	-1.80	51439	-1.80	47981	15000	104000	ležaj međuvratila
45	21.854	4.00	71260	4.24	84733	14550	291000	stražnji ležaj motora.
50	22.609	5.21	44625	5.45	32660	14550	291000	ležaj motora
52	23.459	6.57	93848	6.81	94260	14550	291000	ležaj motora
54	24.309	7.93	91861	8.17	91751	14550	291000	ležaj motora
56	25.159	9.29	92506	9.53	92536	14550	291000	ležaj motora
58	26.009	10.65	91914	10.89	91906	14550	291000	ležaj motora
60	26.859	12.01	93640	12.25	93642	14550	291000	ležaj motora
62	27.709	13.37	87328	13.61	87327	14550	291000	ležaj motora
64	28.559	14.73	110849	14.97	110850	14550	291000	ležaj motora
66	29.409	16.09	31521	16.33	31521	14550	291000	ležaj motora

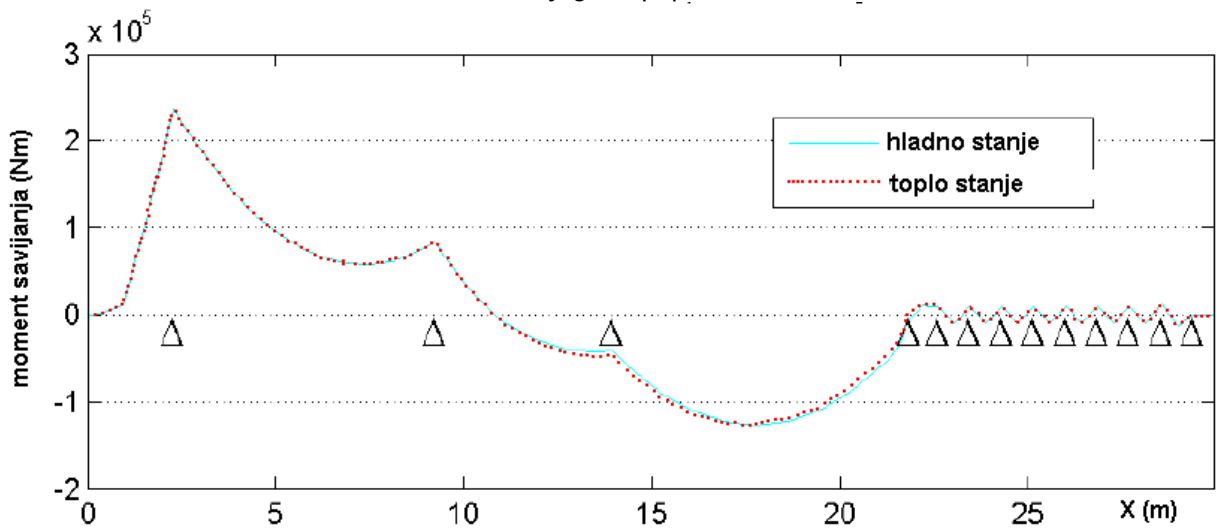
Tablica 16 Proračunske reakcije u ležajevima



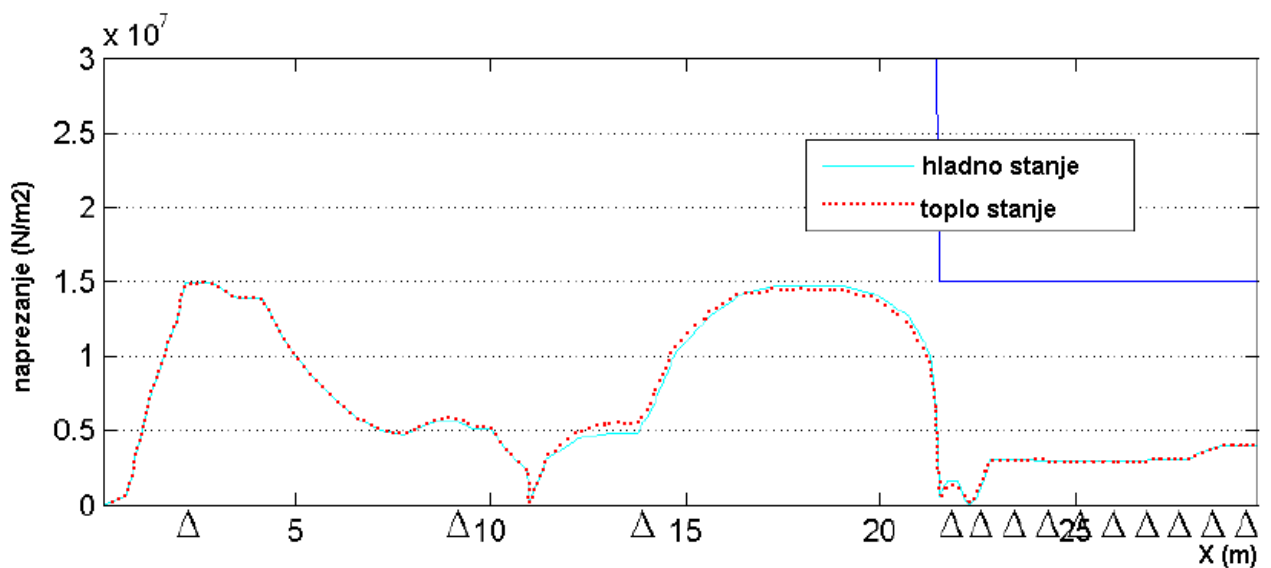
Slika 25 Elastična linija vratilnog voda



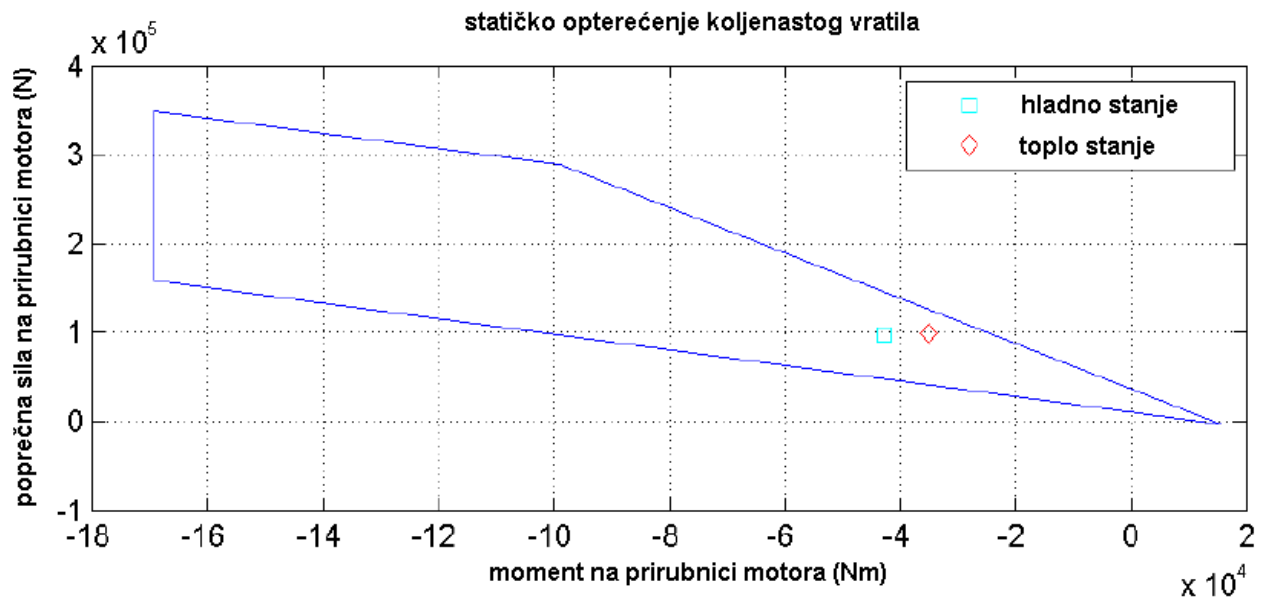
Slika 26 Dijagram poprečnih sila



Slika 27 Dijagram momenata savijanja



Slika 28 Dijagram savojnog naprezanja



Slika 29 Dijagram dopuštenih momenata savijanja i poprečnih sila na prirubnici motora

3.6 Postupak montaže vratilnog voda

Prema fazama tehnologije gradnje broda postupak montaže vratilnog voda se može podijeliti u dvije faze :

- 1) montaža vratilnog voda na navozu.
- 2) montaža vratilnog voda nakon porinuća

3.6.1 Montaža vratilnog voda na navozu

Montaža vratilnog voda započinje na navozu. U predmontaži se, u sekcije krmenog dijela broda, montiraju glavine statvene cijevi i statvena cijev. Nakon što su sekcije ugrađene u trup broda i završene sve velike zavarivačke operacije započinje se sa centracijom ležajeva. Ležajevi statvene cijevi se ugrađuju u glavine statvene cijevi sa zračnošću od $10 \div 20$ mm. Ležajevi se pričvršćuju vijcima koji su postavljeni u radijalnom i aksijalnom smjeru za glavinu statvene cijevi. Ovi vijci omogućuju pozicioniranje ležajeva statvene cijevi. Za centriranje ležajeva mogu se koristiti optički ili laserski instrumenti centracije. Također, može se koristiti i napeta klavirska žica. U brodogradilištu „Uljanik“ koristi se optička oprema. Centracija se obavlja tako da se optički instrument fiksira na krajnjem dijelu broda. Kada se postavi referentna točka mogu se odrediti centri ležajeva pomoću tri ili više točaka na obodu provrta ležaja. Nakon što su određeni centri ležajeva, ležajevi se postavljaju tako da svi ležajevi i stražnja prirubnica motora budu na istoj visini.

Kada je centracija obavljena, ležajevi statvene cijevi se zalijevaju epoksidnom smolom koju se još naziva i „chockfast“. Procedura zalijevanja statvene cijevi je sljedeća. Da bi zalijevanje moglo početi, „chockfast“ se grije na temperaturu od 30 °C. „Chockfast“ se tada miješa sa otapalom. Kada je smjesa spremna, zalijevanje se vrši kroz prostor između glavine statvene cijevi i ležaja statvene cijevi koji je unaprijed predviđen (zračnost $10 \div 20$ mm). Vrijeme skrućivanja, odnosno polimerizacije smole, je različito za različite smole i temperaturu predgrijanja te može trajati 12 ili 24 sata. Kada je smola polimerizirala može se ugraditi vratilo vijka. Vratilo je konstrukcijski prilagođeno ugradnji iz strojarnice pošto je korišten brodski vijak sa fiksnim položajem krila.

Pošto se ugrađuje vijak sa fiksnim položajem krila, vratilo vijka će biti osigurano stoperom koji onemogućuje aksijalni pomak vratila vijka, ali osigurava njegovu slobodnu rotaciju pri porinuću. Prije samog porinuća, brodski vijak se montira na vratilo vijka postupkom koji je opisan u točki 2.7. Međuvratilo se u ovoj fazi samo fizički nalazi u strojarnici no još nije pozicionirano. Ovime završava prva faza montiranja vratilnog voda.

3.6.2 Montaža vratilnog voda nakon porinuća

Nakon porinuća započinje postrojavanje vratilnog voda. Pošto se postrojavanje obavlja za neopterećeno stanje broda, nema tereta, cilj je postrojavanja vratilni vod prednapregnuti te tako osigurati da se reakcije u ležajevima održe u dopuštenim granicama i kada se brod nakrcna teretom. Postrojavanje je bazirano na prethodno proračunatim vrijednostima SAG-a i GAP-a. Ovakva je metoda uobičajena za brodove sa jednim vratilom vijka, oslonjenim na dva ležaja statvene cijevi, te jednim međuvratilom oslonjenim na jedan ležaj međuvratila.

Prije početka postrojavanja sve velike zavarivačke operacije moraju biti završene, kako bi se izbjegle deformacije trupa za vrijeme postrojavanja, motor mora biti postavljen na temelje, te propeler mora biti potpuno uronjen. Zbog velikog utjecaja temperature na postupak postrojavanja preporučuje se izvođenje postrojavanja po oblačnom vremenu ili po noći. Također, treba provjeriti da li vratilo vijka leži u podnožju prednjeg statvenog ležaja. Ako to nije slučaj treba ga silom dovesti u taj položaj prije početka centracije. Međuvratilo je postavljeno na ležaj međuvratila i jedan privremeni ležaj. Ležajevi se postavljaju u svoje optimalne položaje proračunate u točki 3.5. Vrijednosti SAP-a i GAP-a dane su u tablici 17.

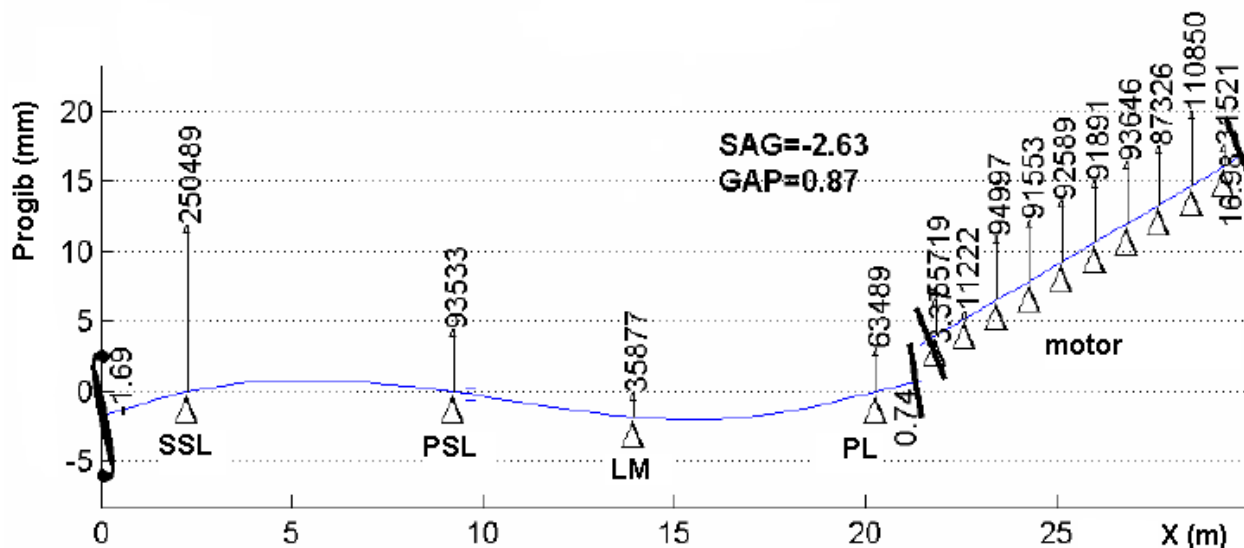
spoj	SAP	GAP
međuvratilo – vratilo vijka	2,71	0,62
međuvratilo – koljenasto vratilo	2,94	1,12

Tablica 17 Vrijednosti SAP-a i GAP-a (faza 1)



Slika 30 Postrojavanje vratilnog voda (faza 1)

U sljedećoj fazi se podiže međuvratilo dok vrijednosti SAP-a i GAP-a ne budu jednake nuli. Sada se spajaju prirubnice vratila vijka i međuvratila spojnim vijcima. Spojni vijci se mogu odmah montirati, bez dodatne obrade provrta, jer se za vrijeme probnog postrojanja u radionici provrta bušilo istovremeno na obje prirubnice na točnu mjeru.



Slika 31 Postrojanje vrtilnog voda (faza 2)

Nakon spajanja vratila vijka s međuvratilom provjeravaju se reakcije u ležajevima. U tablici 18 su dane proračunske vrijednosti reakcija :

Ležaj	reakcija (N)	korekcijski faktor
prednji statveni	93533	0,914
ležaj međuvratila	35877	0,940

Tablica 18 Proračunske reakcije u ležajevima (faza 2)

U slučaju da izmjerena reakcija odstupa od vrijednosti dane u tablici 13 treba provesti korekciju vertikalnog položaja ležajeva prema vrijednostima utjecajnih faktora danih u tablici 19.

razlika u veličini reakcije	prednji ležaj statvene cijevi	ležaj međuvratila
ležaj međuvratila podignut za 0,1 mm	-2962	2993
privremeni ležaj međuvratila podignut za 0,1 mm	582	-795

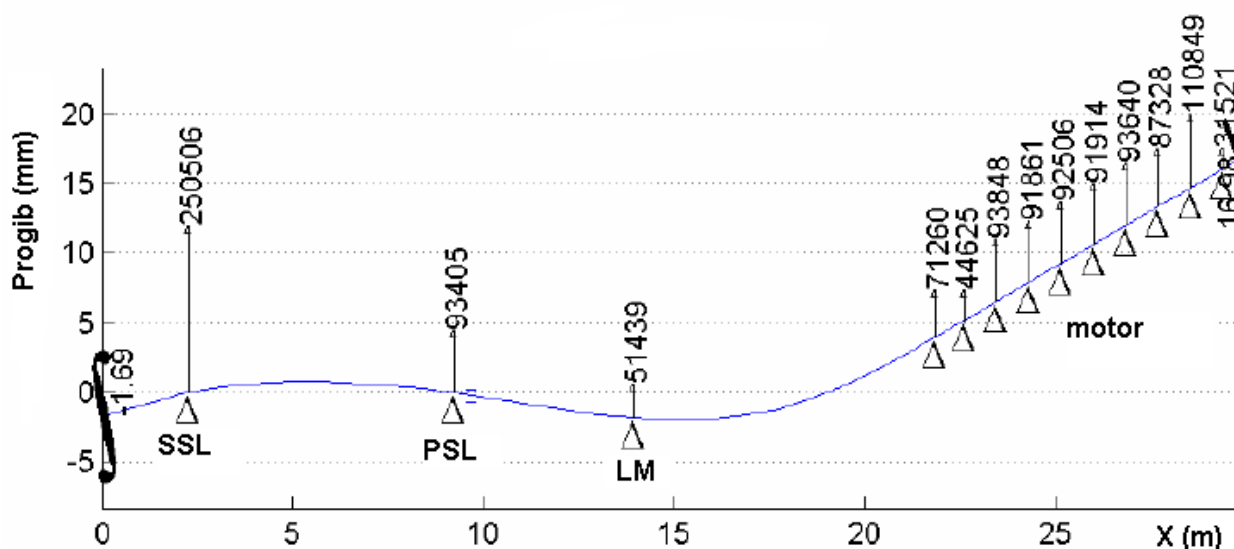
Tablica 19 Utjecajni faktori (za spoj vratilo vijka, međuvratilo)

Ako se provjerene reakcije poklapaju sa proračunskim nastavlja se s postrojanjem. Treba provjeriti vrijednosti SAP-a i GAP-a na spoju međuvratila i koljenastog vratila.

spoj	SAP	GAP
međuvratilo koljenasto vratilo	-2,63	0,87

Tablica 20 Vrijednosti SAP-a i GAP-a (faza 2)

U posljednjoj fazi postrojanja vratilnog voda podiže se privremeni ležaj (PL) međuvratila sve dok vrijednosti SAP-a i GAP-a, na mjestu spoja međuvratila i koljenastog vratila, ne budu jednake nuli. Vratila se privremeno spajaju i skida se privremeni ležaj.



Slika 32 Postrojanje vratilnog voda (faza 3)

Na kraju treba još jednom provjeriti reakcije u prednjem ležaju statvene cijevi, ležaju međuvratila te tri stražnja ležaja motora. Ako izmjerene reakcije značajnije odstupaju od proračunskih mora se ponovo centrirati motor, jer bi u ovoj fazi trebalo biti moguće mijenjati reakcije samo pomicanjem motora.

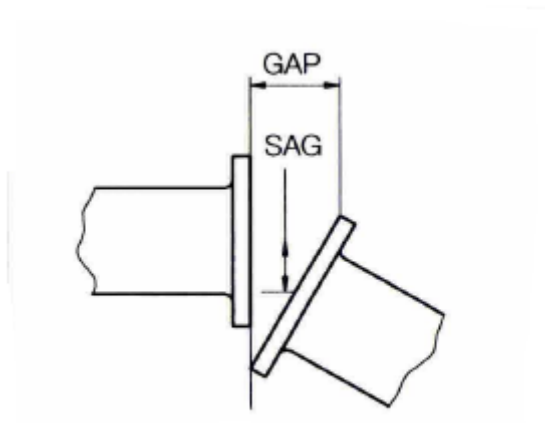
mjerna točka	korekcijski faktor	sila podizanja vratila	preračunata reakcija u ležaju
prednji statveni ležaj	0.913	102341	93405
ležaj međuvratila	0.956	53807	51437
stražnji ležaj motora	1.529	46620	71260
ležaj motora	1.094	40800	44625
ležaj motora	0.926	101360	93848

Tablica 21 Proračunske reakcije u ležajevima (faza 3)

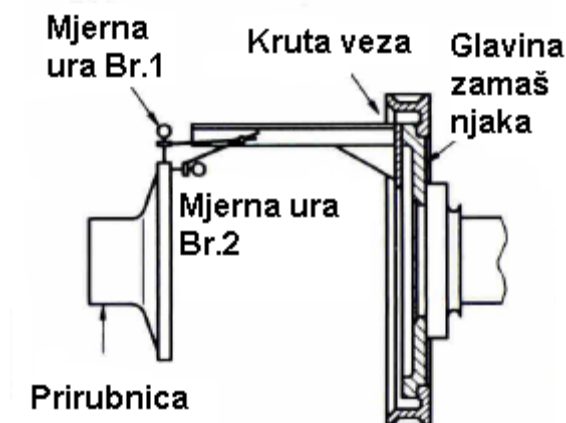
Posebnu pažnju treba posvetiti stražnjem ležaju motora te osigurati da se reakcija koja se u njemu javlja održi u dozvoljenim granicama. Prema proračunu iz točke 3.4.2 i 3.4.3, reakcija u stražnjem ležaju motora se mora nalaziti između 14,55 i 219 kN. Prema preračunatim reakcijama vidi se da reakcija u stražnjem ležaju motora zadovoljava.

Ako i ostale vrijednosti reakcija zadovoljavaju vrši se završno zalijevanje postolja ležaja međuvratila i postolja motora „chockfastom“. Ovime završava postrojanje vratilnog voda. Uobičajeno je još provjeriti reakcije u ležajevima prije pokusne plovidbe, hladno stanje, te nakon pokusne plovidbe, toplo stanje.

3.7 Mjerenje SAP-a i GAP-a



Slika 33 Definicija SAG-a i GAP-a



Slika 34 Mjerenje SAG-a i GAP-a

Definicija SAG-a i GAP-a je prikazana na slici 33. SAP i GAP se mogu mjeriti simultano pomoću dvije mjerne ure kako je prikazano na slici 34.

Nosač na koji su spojene mjerne ure mora biti krut toliko da progib njegove krajnje točke ne prelazi 0,1 mm. Također, veza između zamašnjaka i nosača mjernih ura mora biti kruta tako da krutost veze bude razmjerna krutosti nosača.

Mjerenje se provodi tako da se zamašnjak okrene za jedan puni krug, a vrijednosti sa mjernih ura se očitavaju svaku četvrtinu kruga.

Očitavanja sa mjerne ure su označena :

- t_1 i t_2 – očitano sa vrha
- s_1 i s_2 – očitano sa desna
- b_1 i b_2 – očitano sa dna
- p_1 i p_2 – očitano s lijeva

SAG se mjeri mjernom urom broj 1 i definiran je kao :

$$\text{SAG} = 0,5 \cdot (t_1 - b_1)$$

SAG u horizontalnom smjeru mora biti jednak nuli što se osigurava sa :

$$s_1 = p_1$$

GAP se mjeri sa mjerne ure broj 2 i definiran je kao :

$$\text{GAP} = b_2 - t_2$$

GAP u horizontalnom smjeru mora biti jednak nuli što se osigurava sa :

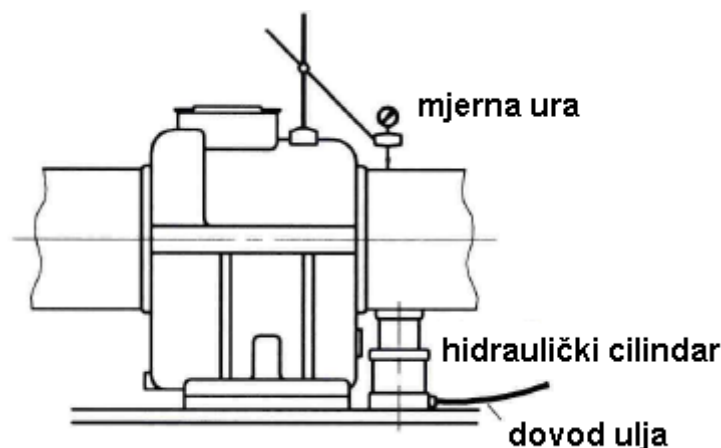
$$s_2 = p_2$$

3.8 Mjerenje reakcija u ležajevima

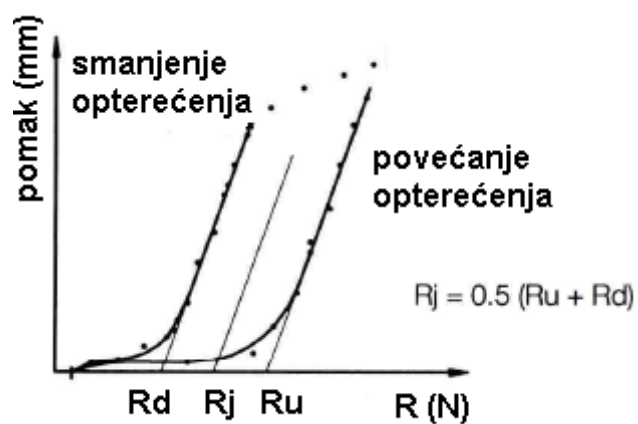
Mjerenje reakcije u ležajevima može biti provedena simultanim mjerenjem sile blizu ležaja gdje se želi mjeriti reakcija, kao i pripadajući pomak vratila u vertikalnom smjeru prema slici 35.

Mjerenje se provodi na sljedeći način :

Hidraulična dizalica se smjesti ispod vratila u blizini ležaja u kojem se reakcija želi mjeriti. Iznad vratila se postavi mjerna ura koja je smještena točno iznad hidrauličke dizalice i kruto spojena sa ležajem. Povećava se sila dizanja povećavanjem tlaka ulja u hidrauličnoj dizalici. Očitavaju se vrijednosti pritiska ulja i pomaka vratila. Sila podizanja je određena tlakom ulja i površinom klipa hidrauličnog cilindra. Ove vrijednosti se ucrtavaju u graf (slika 34). Uslijed relativno velikog unutarnjeg trenja u hidrauličkom cilindru dolazi do razlike između točaka dobivenih povećanjem i smanjenjem opterećenja. To se u dijagramu očituje sa dvije krivulje, kako je pokazano na slici 36. Sada se u graf ucrtava srednje vrijednosti između onih dobivenih povećanjem i smanjenjem opterećenja. Time se dobiva treća krivulja koja predstavlja silu u hidrauličnom cilindru. Kada se mjeri reakcija u ležaju mjeri se sve dok se ne stabilizira pomak vratila na mjernoj uri, jer to pokazuje da je vratilo dotaklo gornji rub ležaja.



Slika 35 Mjerenje reakcije u ležaju



Slika 36 Dijagram podizanja

Reakcija u ležaju (R) je određena silom podizanja vratila blizu određenog ležaja (R_j) i korekcijskim faktorom (C).

$$R = C \cdot R_j$$

Zaključak

Točno međusobno podešavanje elemenata porivnog sustava na temelju trupa je pretpostavka za pogon bez smetnji. Ovaj zahtjev dolazi sve više do izražaja kod suvremenih trgovačkih brodova. Zbog povećanja teretnog prostora, odnosno dimenzija broda, povećava se i potrebna snaga porivnog stroja. Povećana snaga porivnih strojeva, pretežno sporohodni diesel motori, zahtjeva povećanje dimenzija i mase brodskog vijka. Kada je pogonski motor direktno spojen s brodskim vijkom, relativno velikog promjera i mase, preko relativno kratkog i krutog vratilnog voda može se dogoditi da vratilni vod bude opterećen velikim momentima savijanja te smičnim silama. Deformacije uzrokovane opterećenjem ali i valjanjem brodske čelične strukture, na kojoj je temeljen brodski porivni stroj, imaju vrlo veliki utjecaj na pogonski motor da bi se zanemarile. Zadatak centracije vratilnog voda je osigurati da opterećenja ležajeva i pogonskog stroja ne prijeđe dopuštene granice i to za sve režime rada pogonskog stroja. Stoga je ova faza projektiranja vratilnog voda vrlo bitna i treba joj posvetiti najveću pažnju. Ispravnim proračunom centracije, te centracijom vratilnog voda na brodu moguće je bitno smanjiti broj oštećenja dijelova pogonskog sustava.

Popis literature

- [1]..... : „MAN B&W Basic principles of ship propulsion“,
MAN B&W Diesel A/S
- [2]..... : „MAN B&W Engine selection guide“,
MAN B&W Diesel A/S, 2005
- [3]..... : „Simplex-Compact“ katalog, Blohm + Voss Industries GmbH, Hamburg
- [4]..... : „Hrvatski registar brodova“, Split, 2004
- [5]..... : „Bureau Veritas“, Pariz, 2006
- [6]..... : „MAN B&W Shaft alignment for direct coupled low-speed diesel
propulsion plant, MAN B&W Diesel A/S
- [7]D. Bazjanac : „Nauka o čvrstoći“, Tehnička knjiga, Zagreb, 1966
- [8]K.H.Decker : „Elementi strojeva“, Tehnička knjiga, Zagreb, 1987
- [9]I. Alfrević : „Nauka o čvrstoći“, Tehnička knjiga, Zagreb, 1989
- [10]B.Kraut : „Strojarski priručnik“, Tehnička knjiga, Zagreb, 1976
- [11].....: „Brodograđevno nazivlje“, Hrvatsko brodograđevno društvo, 1995