PROJEKTIRANJE IN IZVEDBA KRMILJENJA ČOLNA

PROJEKTIRANJE IN IZVEDBA KRMILJENJA ČOLNA

Strojništvo

Tomaž Jurkovič, S3Č

Mentor: Martin Kavšek - SSKŠ

2020

Srednja strojna in kemijska šola, ŠCLJ

Kazalo:

1. **SEZNAM PRILOG:** 3
2. **UVOD** 3
3. **TEORETIČNI DEL:** 4
4. VRSTE KRMILJENJA 4
   - 4.1 Hidravlično krmiljenje 5
   - 4.2 Mehansko krmiljenje 6
   - Krmiljenje z uporabo zobate letve: 6
5. IZBIRA KRMILNEGA SISTEMA 9
6. **EKSPERIMENTALNI DEL:** 10
7. NAČRTOVANJE PEDESTALA 10
8. SILA IN MOMENT NA KRMILU 11
9. SILA NA VOLANU 12
10. **REZULTATI IN RAZPRAVA** 13
    - 10.1 Izračun sile na krmilu 13
    - 10.2 Izračun momenta na krmilu 13
    - 10.3 Dimenzioniranje verige in verižnika 14
    - 10.4 Izračun sile na volanu 14
11. **ZAKLJUČEK** 15
12. **LITERATURA** 15

1. SEZNAM PRILOG:

Priloga 1: Tabela členkastih verig

2. UVOD

Krmiljenje čolna je najpomembnejši del čolna, takoj za lastnostjo, da lebdi na vodi in se premika. Danes poznamo veliko različnih načinov krmiljenja plovil, ki se razvijajo že odkar so ljudje začeli potovati po vodi. Plovilo ima lahko eno ali več krmil pod vodo in enega ali več volanov na palubi ali drugod. Razdalje med temi so lahko zelo velike ali pa so elementi kompaktno nameščeni v majhen prostor.

V raziskovalni nalogi bomo s pomočjo že znanih krmilnih sistemov določili sistem, primeren za 10 metersko jadrnico Elan 333 z enim krmilom in enim volanom, nameščenim na sredini zadnje strani palube. Jadrnico izdelujemo zasebno, zato želimo, da je izbira res primerna in nam v vseh pogledih ustreza.

Nalogo smo pričeli z določanjem lastnosti krmilnih sistemov in raziskovanjem različnih tipov in vrst, ki bi nam lahko ustrezali. Na podlagi prednosti in slabosti bomo izbrali sistem ter ga dimenzionirali in s pomočjo 3D modela predstavili posamezne elemente in njihovo medsebojno delovanje. Ugotavljali smo tudi zakaj je krmiljenje volana tako lahko vodljivo, čeprav je krmilo veliko in težko.

3. TEORETIČNI DEL:

V teoretičnem delu so predstavljene vrste krmiljenja in utemeljitev izbire krmilnega sistema.

4. VRSTE KRMILJENJA

Pri tej jadrnici lahko izbiramo med tremi različnimi vrstami krmiljenja. Vsako od teh ima svoje prednosti in slabosti in upoštevati moramo mnogo faktorjev kot so:

- Težavnost namestitve: še posebej pomembna je, če sistem nameščamo sami in brez pomoči profesionalcev. Zaradi podobnih funkcij krmilnih sistemov je to eden pomembnejših dejavnikov pri izbiri za nas. Enostavnost namestitve pomeni tudi bolj enostavno vzdrževanje ali menjava delov.

- Cena: med različnimi vrstami krmiljenja je velika razlika v cenah, zato je pomembno da vemo kateri cenovni razred je za nas ustrezen. Višja cena sistema ni vedno najbolj optimalna, saj z dražjo ceno po navadi pride tudi do večje kompleksnosti izdelka. Težje in dražje je tudi vzdrževanje in zamenjava delov.

- Porabljen prostor: to je zelo pomemben dejavnik pri manjših čolnih na katerih pa še vedno lahko bivamo. Pri vodnih plovilih te vrste je prostor omejen in tudi najmanjše razlike v velikosti prostora lahko močno vplivajo na udobje.

- Teža sistema: je najbolj pomembna pri plovilih, katerih namen je velika hitrost vožnje. Večja teža plovilo zaustavlja saj to plovilo izpodrine več vode in je posledično trenje oz. upor višje. Posledica tega je seveda nižja hitrost ali pa višja poraba goriva.

- Vzdrževanje: Po dolgotrajni uporabi se krmilni sistemi začnejo obrabljati. Da zagotovimo optimalno delovanje je treba določene elemente zamenjati, očistiti ali pa jih ponovno napeti.

- Pozicija elementov: Pozicija krmila in volana je ključna pri izbiri. Če je volan na zadnji strani plovila je razdalja do krmila veliko krajša, kot pa če je volan v sredini plovila.

- Potreben moment proizveden na osi krmila: To je posebej pomembno pri večjih plovilih z močnejšimi motorji. Pri velikih silah in hitrostih je obračanje volana težje ali pa ga je težje ustrezno nadzorovati.

4.1 Hidravlično krmiljenje

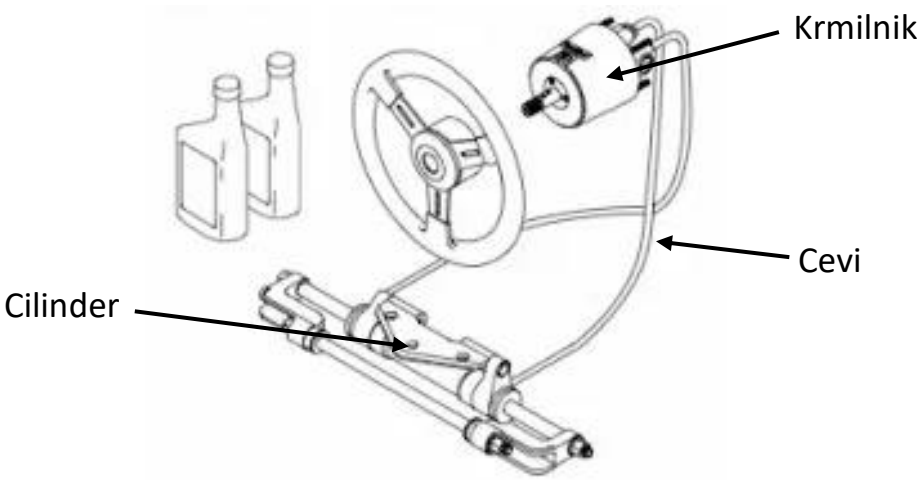
Ta vrsta krmiljenja uporablja hidravlične komponente v prid močnega in zanesljivega krmiljenja. S povečano močjo motorja in hitrostjo plovila se sile, ki jih proizvaja voda na krmilu, zelo povečajo ter postanejo bolj nepredvidljive in sunkovite. Hidravlično krmiljenje nam omogoča stabilno in nadzorovano vodenje plovila pri velikih hitrostih. Zaradi uporabe cilindrov lahko brez napora na volanu z lahkoto in zelo odzivno upravljamo krmilo ne glede na razmere, ki nam jih ponudijo okoliščine. Tak sistem krmiljenja je tudi najbolj odporen proti koroziji.

Glavni elementi hidravličnega krmiljenja:

- Krmilnik: Sestavljen je iz črpalke in ventilov. Ko obrnemo volan se črpalka aktivira in olje premakne bat v cilindru. S tem rotacijo na volanu spremenimo v linearno silo, ki deluje na element ki obrača krmilo.

- Cilinder: Ob zasuku volana se premika med dvema točkama. S pomočjo vrvi ali droga je povezan z krmilom.

- Cevi in olje: olje se pretaka po ceveh ter premika bat.

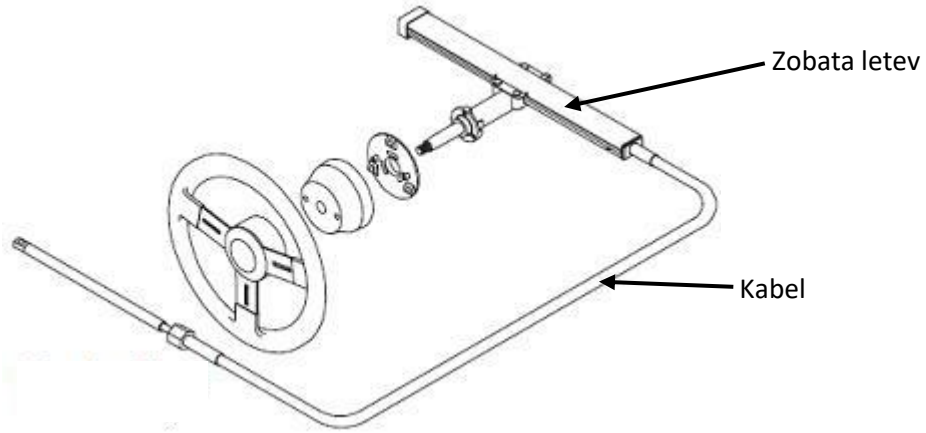


Slika 1: Skica hidravličnega krmilnega sistema (Automobileglobe, 2019)

4.2 Mehansko krmiljenje

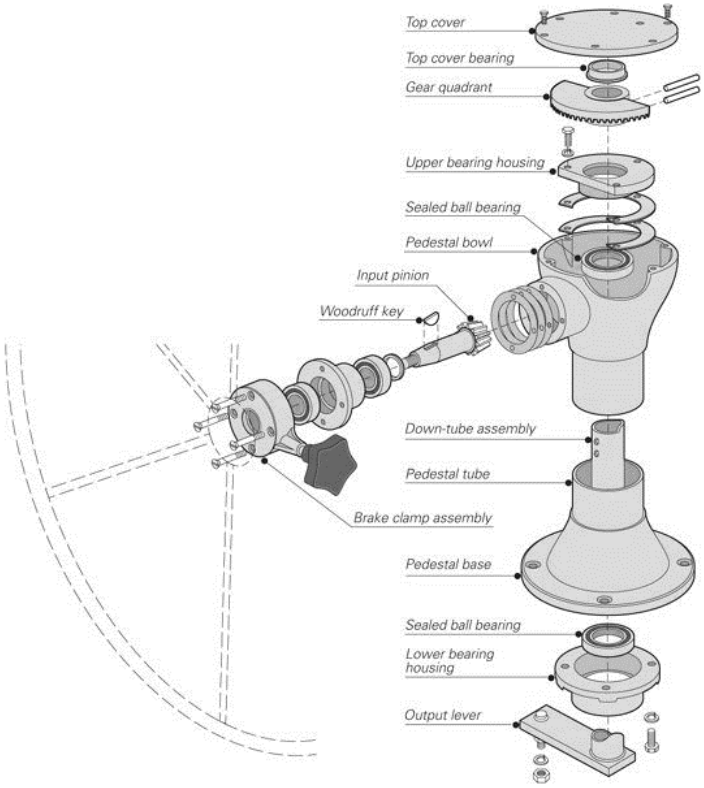
Tak tip krmiljenja za premik krmila potrebuje samo mehanske komponente. Sila potrebna za premik krmila je večja kot pri hidravličnem sistemu, zato se mehansko krmiljenje načeloma uporablja pri manjših plovilih z nižjimi hitrostmi. Za naš primer plovila so primerne štiri vrste mehanskega krmiljenja:

Krmiljenje z uporabo zobate letve: Pri takem sistemu krmiljenja je na volanu vpet zobnik. Z obračanjem volana s pomočjo zobnika premikamo zobato letev levo in desno ter tako dobimo linerarno silo na kablih, vpetih na zobato letev. Kabli so oviti okrog kvadranta, ki vrti krmilo. Pri takem sistemu je trenje majhno in velika sila na volanu ni potrebna. Slabost takih sistemov je, da so zelo široki ter tako niso primerni za prostorske zahteve večine plovil.

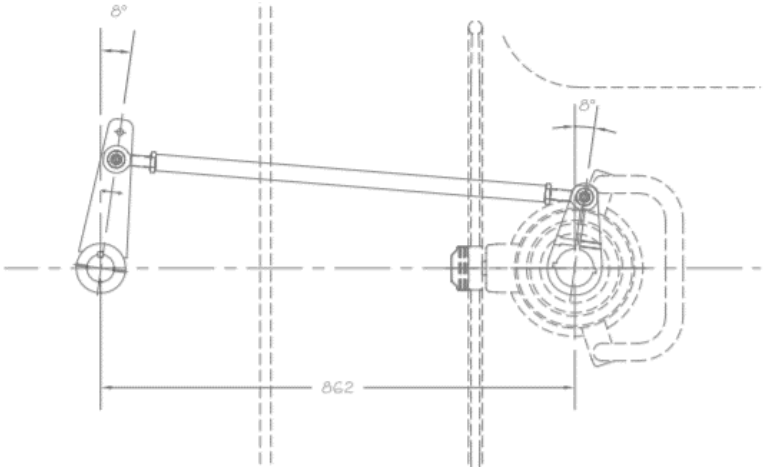


Slika 2: Skica krmilnega sistema z uporabo zobate letve (Jamestowndistributors, 2018)

Edsonov pedestal: Prednost tega sistema je krmiljenje brez vrvi. Možno je tudi krmiliti dve krmili na enkrat, če velikost plovila to zahteva. Pedestal deluje na principu polkrožne zobate letve. Rotacijo na volanu tako najprej obrnemo za 90° - navpično, nato pa s pomočjo dveh ročic in povezovalne palice moment prenesemo vodoravno za želeno dolžino – do krmila. Pri tem sistemu je točk s trenjem več kot pri ostalih, a je zračni prostor odzivnosti ničen. Z velikostjo polkrožne zobate letve določamo prestavno razmerje med volanom in krmilom.

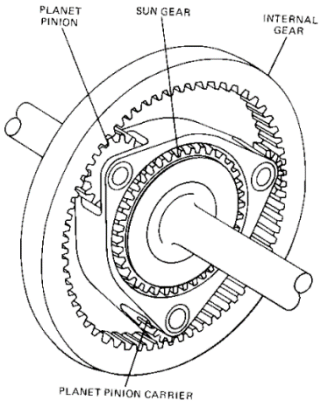


Slika 3: Skica Edsonovega pedestala (Wing, 2004)



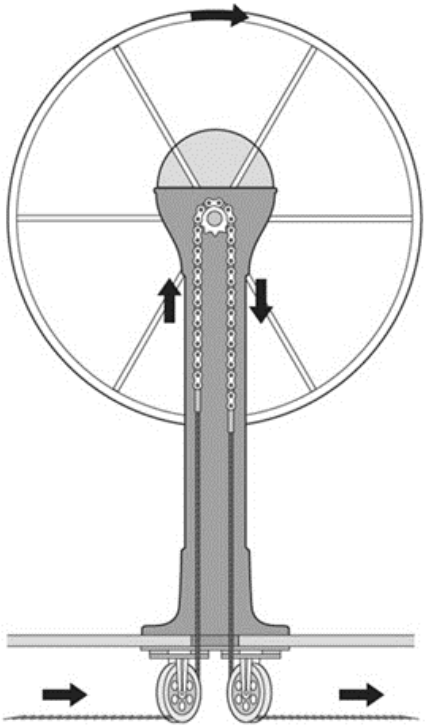
Slika 4: Tloris ročic in palice Edsonovega pedestala (Jefa, 2006)

Rotacijsko krmiljenje: Ta sistem deluje s pomočjo narebrenega kabla in zobnikov. Vrtljaje na volanu s pomočjo redukcije ali planetarnega zobniškega sistema (Slika 5) spremenimo na take vrtljaje , da ustrezajo premiku narebrenega kabla. Glede na prestavno razmerje kontroliramo koliko obratov volana je potrebnih za maksimalni premik krmila. S tem se spreminja tudi sila potrebna za vrtenje volana. Več vrtljajev – manjša je potrebna sila. Tak sistem, še posebej izvedba s planetarnim zobniškim sistemom, se zaradi več trenja hitreje in bolj obrablja. Sistem je zahtevnejši tudi pri vzrdževanju in menjavi delov.

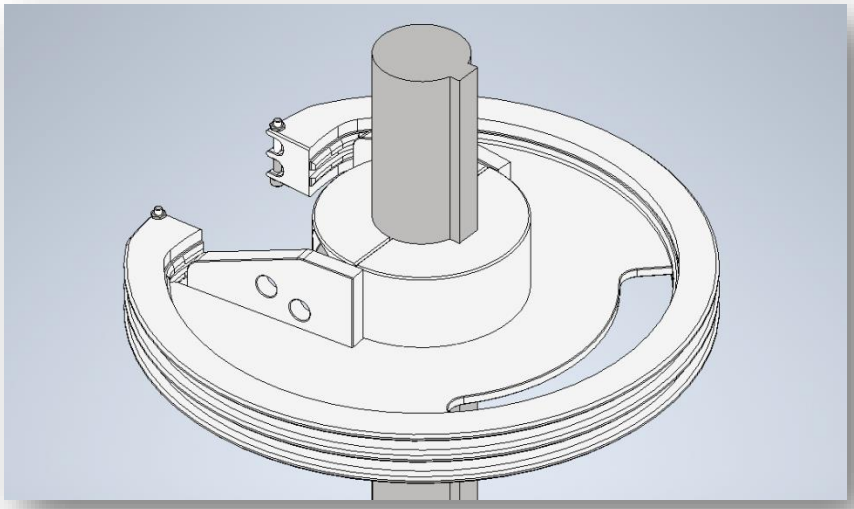


Slika 5: Skica planetarnega zobniškega sistema (free-ed.net)

<u>Verižno krmiljenje:</u> Ta sistem je izmed mehanskih sistemov krmiljenja najosnovnejši. Na steblu pedestala je vpet verižnik, po katerem teče veriga (Slika 6, 9). Veriga je na vsaki strani povezana z vrvmi, ki pa se preko jermenic (Slika 8) zavežejo okoli kvadranta (Slika 7), ki drži krmilo. Ne glede na smer vrtenja, je ena od vrvi obremenjena na nateg – ta prenaša silo proizvedeno na krmilu. Vrv, ki ni obremenjena na nateg, ne sme opletati, zato mora biti točno določene dolžine. V kolikor je sistem pravilno nameščen z pravilno dolžino vrvi, ponuja zelo dober odzivni čas in majhno potrebno silo na volanu. Izmed vseh sistemov je ta tudi najlažji za namestitev, vzdrževanje in menjavo delov. Pri vzdrževanju je najpomembnejše stanje verige in pravilna napetost vrvi. Za optimalno delovanje moramo stanje sistema pregledati vsaj dvakrat na leto.

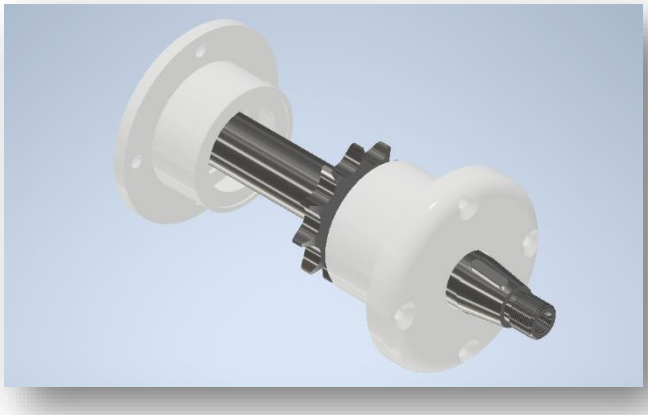


Slika 6: Skica prikaza delovanja verižnega krmilnega sistema (Wing, 2004)



Slika 7: 3D model kvadranta (jaz, 2020)

Slika 8: 3D model jermenic v ohišju (jaz, 2020)



Slika 9: 3D model elementa, ki drži verižnik (jaz, 2020)

5. IZBIRA KRMILNEGA SISTEMA

Glede na lastnosti, prednosti in slabosti predstavljenih krmilnih sistemov sta za našo jadrnico najbolj primerna dva sistema: Edsonov pedestal in verižno krmiljenje. Ker želimo na pedestalu pri volanu imeti še nekatere poljubne inštrumente kot so merilec hitrosti, merilec vetra in globine, navigacijski sistem ter krmilnike za kontroliranje sidra in sprednjih bočnih motorjev, bomo pedestal raje načrtovali sami in uporabili sistem krmiljenja z verigo. S tem bomo krmilni sistem bolj prilagodili našim željam in potrebam za bolj udobno in personalizirano plovbo.

Na sliki desno je prikazan 3D model krmilnega sistema brez pedestala. Program v katerem je model narisan je večinoma narejen za statične modele in ne za komplicirane dinamične komponente kot je premik verige. Položaj verige in vrvi je označen z črnimi črtami.

Slika 10: 3D model celotnega krmilnega sistema (jaz, 2020)

6. EKSPERIMENTALNI DEL:

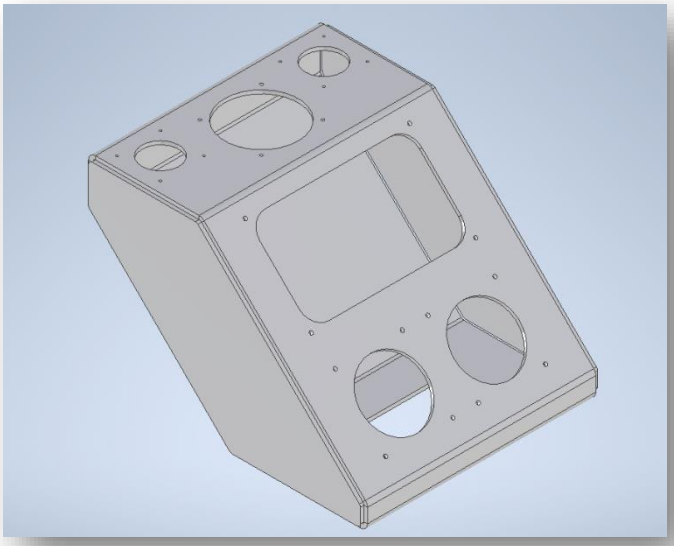
V eksperimentalnem delu je predstavljeno načrtovanje pedestala in opredeljene so enačbe za izračun sil.

7. NAČRTOVANJE PEDESTALA

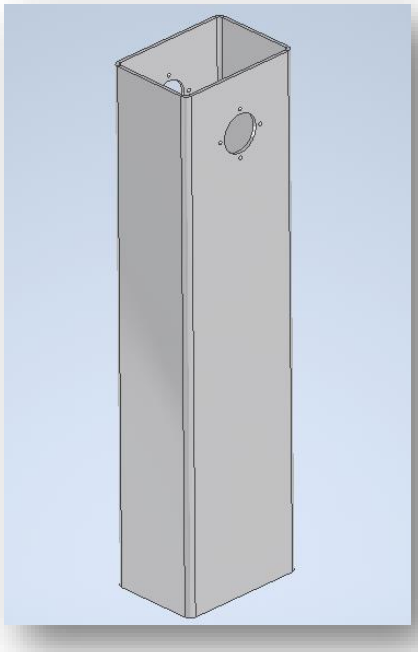
Pedestal moramo načrtovati tako, da bo zadovoljeval prostornim potrebam inštrumentov na vrhu in hkrati delom krmilnega sistema. Mora biti tudi trpežen proti zunanjim silam, koroziji, čim manjši in lep na pogled. Ne sme pa biti preveč kompleksen za izdelavo, saj so konstrukcijki postopki, ki so nam na voljo, omejeni.

Pedestal bo izdelan iz 5 mm aluminijaste pločevine. Aluminij je dobro odporen proti koroziji in lahek, zato je najbolj primeren material. Najprej moramo oblikovati glavo pedestala, ki mora biti dovolj velika za vse inštrumente hkrati pa vodotesna, saj inštrumente povezuje elektrika. Imeti mora čim manj odprtin in razstavljivih delov, da je za vodo manj dostopnih točk.

Glava (Slika 11) bo sestavljena iz petih delov pločevine, ki bodo najprej odrezani, zviti v pravo obliko in nato med sabo zvarjeni. Trije deli bodo sestavljali glavno ohišje glave, dva dela pa bosta tvorila razstavljivo odprtino, narejeno za dostop v notranjost, ki bo na zadnji strani glave. Glavni namen te odprtine je možnost pregleda, vzdrževanja in menjave inštrumentov ter njihovih električih povezav. Pokrov odprtine bo na glavo privijačen in seveda pravilno zatesnjen proti vdoru vode.



Slika 11: 3D model glave pedestala (jaz, 2020)



Slika 12: 3D model stebla pedestala (jaz, 2020)

Enaka odprtina bo narejena tudi na steblu pedestala (Slika 12), ki bo namenjena dostopu do krmilne verige in zobnika po katerem teče. Steblo bo v pravokotno obliko zvito in na eni strani zavarjeno. Na dnu bo zavarjeno na del pločevine, ki bo privijačen v železno dno palube, obdano z plastiko.

8. SILA IN MOMENT NA KRMILU

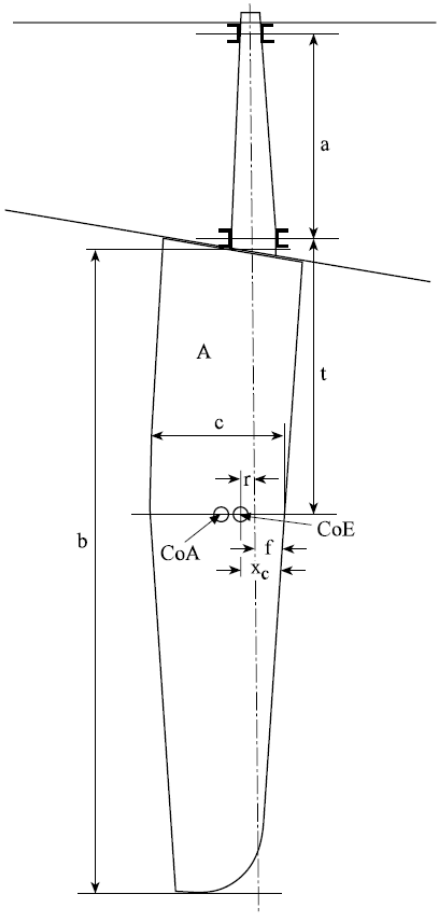
Najprej bomo izračunali silo, ki deluje na krmilo v najbolj ekstremnih pogojih. Z njo bomo lahko izračunali moment oz. navor na osi krmila in posledično silo potrebno za vodenje volana. Krmilo je bilo izbrano že v naprej. Prijemališče sile je v težišču krmila. Moment deluje na osi krmila.

<u>Silo na krmilo F_k bomo izračunali po enačbi:</u>

$$F_k = 0{,}136 \cdot c_l \cdot v^2 \cdot A \; [kN]$$

$$c_l = \frac{0{,}11}{\left(1+\frac{2}{AR_e}\right)} \cdot \alpha$$

$$AR_e = 2 \cdot \frac{b^2}{A}$$



Slika 14: Skica krmila (DNVGL, 2016)

kjer:

$0{,}136$ = faktor gostote vode in pretvorbe hitrosti iz vozlov $[\frac{kg}{m^3}]$

A = površina ene strani krmila [m^2]

v_0 = predpostavljena maksimalna hitrost jadrnice v vozlih [kn] (1 kn ≈ 0,5144 $\frac{m}{s}$)

c_l = krmilni koeficient

b = srednja višina krmila [m]

AR_e = koeficient razmerja med dimenzijami krmila

α = maksimalni kot pred pričetkom poravnave plovila [°]

<u>Moment M_k bomo izračunali bo enačbi:</u>

$$M_k = F_k \cdot r \; [Nm]$$

kjer:

r = razdalja med prijemališčem sile in osjo krmila [m]

9. SILA NA VOLANU

S pomočjo pridobljene sile in momenta na krmilu bomo izračunali s kolikšno največjo silo moramo krmiliti volan. Maksimalna sila deluje samo ob začetku obračanja volana, po tem se začne zmanjševati, saj se plovilo začne poravnavati. Maksimalni možen premik krmila pred začetkom poravnave plovila je približno 13°.

Izpeljava enačbe:

F_{vrv} = sila na vrvi oz. verigi [N]

F_{vol} = sila na volanu [N]

d_{kv} = premer kvadranta [N]

d_{ve} = premer verižnika [m]

d_{vol} = premer volana [m]

M_{ve} = moment na osi verižnika [Nm]

$$M_k = F_{vrv} \cdot \frac{d_{kv}}{2} \rightarrow F_{vrv} = \frac{2 \cdot M_k}{d_{kv}}$$

$$M_{ve} = F_{vrv} \cdot \frac{d_{ve}}{2} = F_{vol} \cdot \frac{d_{vol}}{2} \rightarrow \boldsymbol{F_{vol}} = \frac{2 \cdot M_{ve}}{d_{vol}} = \frac{2 \cdot F_{vrv} \cdot \frac{d_{ve}}{2}}{d_{vol}} = \frac{\frac{2 \cdot M_k \cdot d_{ve}}{d_{kv}}}{d_{vo}} = \frac{\boldsymbol{2 \cdot M_k \cdot d_{ve}}}{\boldsymbol{d_{vol} \cdot d_{kv}}}$$

10. REZULTATI IN RAZPRAVA

Preden lahko dimenzioniramo vse komponente sistema in določimo silo potrebno za krmiljenje volana, moramo izračunati silo, ki deluje na krmilo.

10.1 Izračun sile na krmilu

A = 0,869 m^2

v = 12 kn

$c_l = \frac{0,11}{\left(1+\frac{2}{AR_e}\right)} \cdot \alpha = \frac{0,11}{\left(1+\frac{2}{5,644}\right)} \cdot 13 \cong 1,056$

$AR_e = 2 \cdot \frac{b^2}{A} = 2 \cdot \frac{1,566^2}{0,869} \cong 5,644$

α = 13°

$$\boldsymbol{F_k} = 0,136 \cdot 1,056 \cdot 12^2 \cdot 0,869 \cong \mathbf{17,97}\ \boldsymbol{kN}$$

Kot vidimo je obremenitev krmila v ekstremih lahko zelo velika (do ~1830 kg). Kljub temu je življenska doba kompozitnih krmil približno 25 let.

10.2 Izračun momenta na krmilu

r = 10,36 cm

F_k = 17970 N

$$\boldsymbol{M_k} = 17970 \cdot 0,1036 = \mathbf{1861,7}\ \boldsymbol{Nm}$$

Razdaljo med težiščem in osjo krmila sem določil s pomočjo 3D modela v programu Autodesk Inventor.

10.3 Dimenzioniranje verige in verižnika

Verižnik bomo dimenzionirali po verigi, verigo pa po izračunani sili ter kvadrantu, ki smo ga izbrali po eni izmed standardnih premerov za specifikacije te jadrnice (30 cm). Najprej bomo izračunali silo, pod katero sta obremenjeni vrv in veriga.

$$F_{vrv} = \frac{2 \cdot M_k}{d_{kv}} = \frac{2 \cdot 1861{,}7}{0{,}3} \cong 12{,}6\ kN$$

S pomočjo te sile lahko s pomočjo tabele po standardu DIN 8187 za enojne členkaste verige določimo vrsto verige 084 (Priloga 1). Maksimalna obremenitev te verige je 16 kN, kar je za naše razmere zadovoljivo, saj potrebujemo nekolikšen faktor varnosti. Premer vrvi je določen glede na kvadrant – v tem primeru je vrv jeklena, premera 5 mm. Glede na verigo bo imel verižnik srednji premer 55 mm ter 13 zob.

10.4 Izračun sile na volanu

Kljub veliki teži krmila in silami, ki delujejo nanj, lahko volan večino časa krmilimo z lahkoto. Ob manjših hitrostih lahko volan krmilimo tudi samo z enim prstom. Glede na našo izračunano maksimalno silo bomo izračunali, s kolikšno silo moramo krmiliti volan premera 1 m, da premaknemo krmilo oz. ga zadržimo v isti poziciji. Zaradi izkoristka verige in ležajev bomo sili dodali še 8%.

$$F_{vol} = \frac{2 \cdot M_k \cdot d_{ve} \cdot 100}{d_{vol} \cdot d_{kv} \cdot 92} = \frac{2 \cdot 1861{,}7 \cdot 0{,}055 \cdot 100}{1 \cdot 0{,}3 \cdot 92} \cong 742\ N$$

Premikanje mase 75 kg za krmiljenje se lahko zdi zelo veliko, a moramo upoštevati da malokrat plujemo s tako veliko hitrostjo. Upoštevati moramo tudi, da volana ponavadi ne premikamo tako sunkovito kot smo si zadali mi (13° krmila naenkrat). Skupaj z ostalimi fizičnimi dejevnostmi med visokohitrostno plovbo lahko razumemo, da je jadranje lahko resen fizičen šport.

11. ZAKLJUČEK

Cilj naloge je bil uspešno dosežen in ugotovili smo kateri krmilni sistem je za našo jadrnico primeren ter kako deluje in se montira. Izračunali smo napetosti pod katerimi so obremenjeni elementi, da si lažje predstavljamo nevarnosti okvare sistema medtem ko plujemo. Obstaja še vprašanje ali se bo v bližnji prihodnosti razvil kakšen še bolj primeren sistem in ali bo takrat smiselna zamenjava. Kljub temu je eden izmed pomembnejših delov gradnje jadrnice rešen in načrtovan, čaka nas samo še praktčna izvedba krmilnega sistema ter vgradnja na jadrnico.

12. LITERATURA

Wing, Charlie. (2004). How Boat Things Work: An Illustrated Guide. Pridobljeno iz knjižnice.

Nyakno, Jonah. (2019). How to Convert your boat to a Hydraulic Steering System. [Fotografija na spletu]. Pridobljeno s https://automobileglobe.com/how-to-convert-your-boat-to-a-hydraulic-steering-system/

Jamestown Distributors. Teleflex HPS Rack & Pinion Mechanical Steering. [Fotografija na spletu]. Pridobljeno s https://www.jamestowndistributors.com/userportal/document.do?docId=706

Bestmarineradio. (2020). Best Boat Steering Systems. Pridobljeno s https://bestmarineradio.com/boating-gear/best-boat-steering-system/#tab-con-4

Boat Accessories Australia. (2018). Hydraulic Vs Mechanical Boat Steering & A Guide to Steering Systems. Pridobljeno s https://www.boataccessoriesaustralia.com.au/blog/our-blog/hydraulic-vs-mechanical-boat-steering-a-guide-to-s/

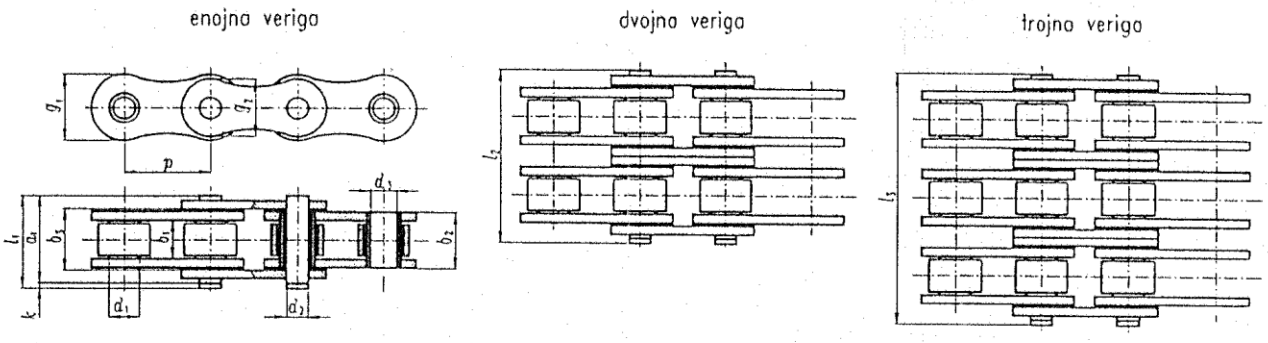
Born Again Boating. Rotary Vs. Rack and Pinion Boat Steering: Which is Better?. Pridobljeno s https://www.bornagainboating.com/rotary-vs-rack-and-pinion-steering/

Gulf Coast Air & Hydraulics. (2020). Choosing the Right Steering System for Your Boat. Pridobljeno s http://wegetstuffdone.com/choosing-right-steering-system-boat/

Powerboat Nation. (2012). Selecting A Mechanical Steering System. Pridobljeno s https://www.powerboatnation.com/selecting-mechanical-steering-system/

Priloga 1

Tabela 189: Mere členkastih verig z valjci po DIN 8187 (izvleček)



Enojna členkasta veriga z valjci po DIN 8187										
Vrsta verige		p [mm]	h_1 [mm]	d_p [mm]	e [mm]	g [mm]	l_r [mm]	F_B [kN]	A [cm²]	q [kg/m]
	03	5	2,5	3,2	–	4,1	7,4	2,2	0,06	0,08
	04	6	2,8	4,0	–	5,0	7,4	3,0	0,08	0,12
05 B		8	3,0	5,0	5,64	7,11	8,6	5,0	0,11	0,18
06 B		9,525	5,72	6,35	10,24	8,26	13,5	9,0	0,28	0,41
081		12,7	3,3	7,75	–	9,91	10,2	8,2	0,21	0,28
082		12,7	2,38	7,75	–	9,91	8,2	10,0	0,17	0,26
083		12,7	4,88	7,75	–	10,3	12,9	12,0	0,32	0,42
084		12,7	4,88	7,75	–	11,15	14,8	16,0	0,36	0,59
085		12,7	6,38	7,77	–	9,91	14,0	6,8	0,32	0,38
08 B		12,7	7,75	8,51	13,92	11,81	17,0	18,0	0,50	0,70
10 B		15,875	9,65	10,16	16,59	14,73	19,6	22,4	0,67	0,95
12 B		19,05	11,68	12,07	19,46	16,13	22,7	29,0	0,89	1,25
	16 B	25,4	17,02	15,88	31,88	21,08	36,1	60,0	2,10	2,70
	20 B	31,75	19,56	19,05	36,45	26,42	43,2	95,0	2,96	3,60
	24 B	38,1	25,4	25,4	48,36	33,4	53,4	160	5,54	6,70
	28 B	44,45	30,99	27,94	59,56	37,06	65,1	200	7,39	8,30
	32 B	50,8	30,99	29,21	58,55	42,29	67,4	250	8,10	10,5
	40 B	63,5	38,1	39,37	72,29	52,96	82,6	355	12,75	16,0
	48 B	76,2	45,72	48,26	91,21	63,88	99,1	560	20,61	25,0
	56 B	88,9	53,34	53,98	106,6	77,85	114	850	27,90	35,0
	64 B	101,6	60,96	63,5	119,98	90,17	130	1120	36,25	60,0
	72 B	114,3	68,58	72,39	136,27	103,63	147	1400	46,19	80,0