

Procjena izlazne snage kod proizvodnje električne energije iz morskih valova

Orlović, Robert

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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:235:451007>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Robert Orlović

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr. sc. Ivan Čatipović, dipl. ing.

Student:

Robert Orlović

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru Izv. Prof. dr.sc. Ivanu Čatipoviću, na strpljenju, uloženom vremenu i ukazanoj pomoći tijekom izrade ovog završnog rada.

Zahvaljujem se svojim prijateljima, kolegama, a posebno roditeljima, bratu i sestri što su mi bili podrška kroz cijeli život pa tako i kroz studij.

Robert Orlović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
 Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
 Povjerenstvo za završne i diplomске ispite studija brodogradnje



| | |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1 | |
| Ur.broj: 15 - 1703 - 21 - | |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Robert Orlović** Mat. br.: 0035205961

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Procjena izlazne snage kod proizvodnje električne energije iz morskih valova**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Estimation of power output in the production of electricity from sea waves**

Opis zadatka:

Smatra se da su energetske najbogatiji valovi koncentrirani na području od 40 do 60 stupnjeva zemljopisne širine na sjevernoj i južnoj hemisferi. Energija valova u navedenom području varira između 30 i 70 kW/m a najveći iznos od 100 kW/m može se pronaći u Atlantiku. Stoga je zbog prirodnog potencijala valova proizvodnja električne energije iz morskih valova danas pronašla gotovo svakodnevnu primjenu. Općenito su razvijena tri načina korištenja energije valova tj. tri tipa električnih generatora na valove: plutajući tip, tip s pomičnim klipom te tip s lopaticama. U ovom završnom radu potrebno je provesti procjenu izlazne snage električne energije za odabrani tip generatora.

U okviru završnog rada potrebno je:

1. Modelirati formu odabranog tipa generatora električne energije.
2. Odabrati reprezentativna stanja mora za zadanu lokaciju.
3. Provesti proračun prijenosnih funkcija.
4. Provesti proračun izlazne snage električne energije.
5. Napraviti sistematičan prikaz dobivenih rezultata.

Zadatak zadan:
30. studenoga 2020.

Datum predaje rada:
1. rok: 18. veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatićević

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatićević

SADRŽAJ

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | UVOD..... | 6 |
| 1.1 | Ljuljajući uređaj..... | 6 |
| 2 | LINEARNA TEORIJA VALOVA | 7 |
| 2.1 | Harmonijski ravninski valovi | 7 |
| 2.2 | Trajektorije čestice vala | 8 |
| 2.3 | Energija | 9 |
| 2.3.1 | Kinetička energija..... | 9 |
| 2.3.2 | Potencijalna energija..... | 10 |
| 2.3.3 | Ukupna energija vala..... | 11 |
| 3 | MORSKI VALOVI | 12 |
| 3.1 | Princip superpozicije | 12 |
| 3.2 | Spektralni momenti..... | 13 |
| 3.3 | Teorijski spektri..... | 14 |
| 3.3.1 | Bretschneiderov spektar..... | 14 |
| 3.3.2 | JONSWAP spektar | 15 |
| 3.4 | Difrakcijski i radijacijski valovi..... | 15 |
| 3.5 | Oblici njihanja | 16 |
| 3.6 | Jednadžbe dinamičke ravnoteže..... | 18 |
| 3.6.1 | Određivanje komponenti jednadžbe dinamičke ravnoteže njihanja..... | 18 |
| 4 | ODABRANI MODEL..... | 22 |
| 4.1 | Dimenzije uređaja | 22 |
| 4.1.1 | Dimenzije oscilirajuće ploče..... | 23 |
| 5 | PRORAČUN..... | 24 |
| 5.1 | Princip rada programskog paketa HydroSTAR..... | 24 |
| 5.2 | Priprema podataka i proračun | 24 |
| 5.3 | Proračun snage oscilirajućeg valnog pretvarača..... | 32 |
| 6 | Zaključak..... | 35 |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 1 Ljuljajući uređaj..... | 6 |
| Slika 2 Progresivni harmonijski val..... | 8 |
| Slika 3 Trajektorije čestica vala u fluidu ograničene dubine..... | 9 |
| Slika 4 Superpozicija dvaju ravninskih valova istog smjera..... | 13 |
| Slika 5 Površina ispod spektra valova | 14 |
| Slika 6 Linearni i kutni pomaci broda | 17 |
| Slika 7 Oscilirajući valni pretvarač..... | 22 |
| Slika 8 Prikaz kvadra iz programa HydroStar | 24 |
| Slika 9 Ulazna datoteka za naredbu hsrdf..... | 25 |
| Slika 10. Ulazna datoteka za naredbu hsmcn | 26 |
| Slika 11 Prijenosna funkcija..... | 27 |
| Slika 12 Kutna brzina za nailazne valove od 0° | 28 |
| Slika 13 Kutna brzina za nailazne valove od 30° | 28 |
| Slika 14 Kutna brzina za nailazne valove od 60° | 29 |
| Slika 15 Kutna brzina za nailazne valove od 90° | 29 |
| Slika 16 Ulazna datoteka za naredbu hspec..... | 31 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Prikaz rezultata za značajnu valnu visinu od 1,5 m | 32 |
| Tablica 2 Prikaz rezultata za značajnu valnu visinu od 2,5 m..... | 33 |
| Tablica 3 Prikaz izlazne snage struje za ljuļajući uređaj na | 34 |
| Tablica 4 Prikaz usporedbe rezultata | 34 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|-----------------|-----------------------|---|
| i, j, k | - | jedinični vektori u smjeru osi x, y i z redosljedno |
| ρ | kg/m^3 | gustoća morske vode |
| p | Pa | tlak |
| g | m/s^2 | ubrzanje zemljine sile teže |
| z | m | geodetska visina |
| Φ_w | m^2/s | potencijal brzine strujanja vala |
| ζ | m | elevacija vala |
| ζ_a | m | valna amplituda |
| ω | rad/s | valna frekvencija |
| d | m | dubina vode |
| H | m | valna visina |
| λ | m | valna duljina |
| T | s | valni period |
| Φ_0 | m^2/s | potencijal nailaznog vala |
| Φ_7 | m^2/s | difrakcijski potencijal |
| \mathbf{v} | - | vektor brzine strujanja fluida |
| x_b, y_b, z_b | - | koordinatni sustav broda |
| x_0, y_0, z_0 | - | nepomični koordinatni sustav |
| x, y, z | - | translacijski koordinatni sustav |
| β | ° | kursni kut |
| M_{jk} | - | matrica mase tijela |
| A_{jk} | - | matrica pridruženih masa |
| B_{jk} | - | matrica hidrodinamičkog prigušenja |
| C_{jk} | - | matrica krutosti povratnih hidrostatskih sila |
| A_{wl} | m^2 | površina vodne linije |

| | | |
|-------------------|---------|--|
| ω_e | rad/s | susretna frekvencija |
| η_{aj} | m | realna vrijednost amplitude njihanja ($i=1,2,3$) |
| RAO | - | operator amplitude odziva |
| $H_{1/3}$ | m | značajna valna visina |
| F_i | | amplituda uzbudne sile ($i=x,y,z$) |
| M_i | Nm | amplituda uzbudnog momenta ($i=x,y,z$) |
| $S_\zeta(\omega)$ | m^2/s | spektar valova |
| $S_{Ri}(\omega)$ | m^2/s | spektar odziva ($i=1...6$) |
| P | kW | snaga |
| P_e | kW | izlazna snaga električne struje |

SAŽETAK

Cilj ovog završnog rada je provesti procjenu dobivene snage oscilirajućeg valnog pretvarača za određeno stanje mora. U svrhu provedbe modelirana je ljuljajuća ploča te proračunate prijenosne funkcije i spektri odziva za zadane kutove nailaska vala. Okvir oscilirajućeg valnog pretvarača je čvrstom vezom povezan za morsko dno dok je ploča vezana za okvir zglobovom vezom. Ljuljajuća ploča je vezana za sustav za prijenos snage (eng: Power Take-Off Systems –PTO) koji pretvara energiju valova u električnu energiju.

Ploča je modelirana u programskom paketu Hydrostar (Bureau Veritas), također sam proračun prijenosnih funkcija je izveden u programskom paketu Hydrostar koji se temelji na linearnoj teoriji potencijalnog strujanja i trodimenzionalnoj metodi rubnih elemenata.

Ključne riječi: oscilirajući valni pretvarač, PTO, HydroSTAR, obnovljivi izvori energije, električna energija

Summary

The objective of this final assignment is to conduct an assessment of power oscillating wave surge converter for a certain state of the sea. For the purpose of the assignment a flap plate was modelled and transfer functions were calculated, as well as response spectrums for each angle of incoming wave directions. The frame of oscillating wave surge converter is tightly bonded for the seabed while the plate is bonded to the frame with joint. Oscillating plate is connected to Power Take-Off System (PTO) witch transfers wave energy into electric energy.

The plate was modelled in HydroSTAR software (Bureau Veritas), furthermore the calculation of transfer functions was carried out in HydroSTAR, which is based on linear theory of potential flow and three-dimensional boundary element method.

Key words: oscillating wave surge converter, PTO, HydroSTAR, renewable energy sources, electricity

1 UVOD

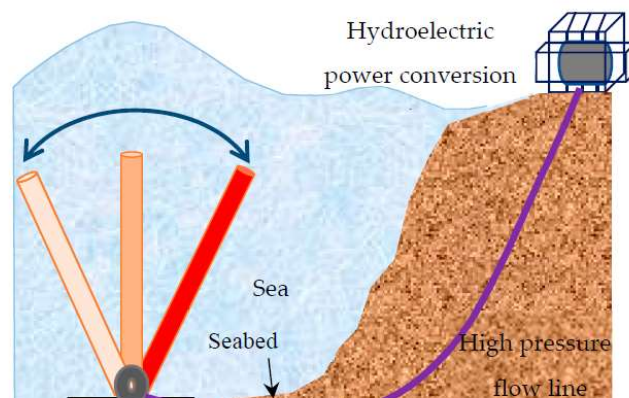
Obnovljivi izvori energije su izvori energije koji se samostalno ili primjenom određenih postupaka konstantno obnavljaju. To znači da se mogu iznova iskorištavati bez njihova trajnog iscrpljivanja. Obnovljivi izvori energije su: solarna energija, energija vjetra, hidroenergija, energija oceana, geotermalna energija, biomasa i biogoriva .

Elektrane na valove su elektrane koje koriste energiju valova za proizvodnju električne energije. Energija valova obnovljivi je izvor energije. To je energija najvećim dijelom uzrokovana djelovanjem vjetra preko površine oceana. Smatra se da su energetske najbogatiji valovi koncentrirani na području od 40 do 60 stupnjeva zemljopisne širine na sjevernoj i južnoj hemisferi. Energija valova u navedenom području varira između 30 i 70 kW/m, a najveći iznos od 100 kW/m može se pronaći na području Atlantika. Ukupna energija valova koji udaraju u svjetsku obalu je procijenjena na 2-3 milijuna MW, što je ogroman neiskorišten potencijal.

Danas su poznata tri načina korištenja energije valova, a kategorizirani su prema metodi kojom prihvaćaju valove: preko plutuća, pomičnog klipa i njihalica ili lopatica.

1.1 Ljuljajući uređaj

Uređaj funkcionira na način da se kinetička energija vala pretvara u rad gibanja zaustavne ploče i hidrauličke crpke koja pogoni generator. Uređaj na slici 1. je pričvršćen za morsko dno. Ploča koja je povezana sa zglobovom niže se pri nailasku valova u oba smjera.



Slika 1 Ljuljajući uređaj [4]

2 LINEARNA TEORIJA VALOVA

Uzrok valnog gibanja vanjski su poremećaji koji djeluju na fluid. Valove je, prema tipu uzročnih sila, moguće podijeliti na gravitacijske, kapilarne i elastične. U području pomorstvenosti izučavaju se samo gravitacijski valovi. Čestice fluida pomaknute iz ravnotežnog položaja uslijed djelovanja vanjskih sila, prisiljene su na oscilacijsko gibanje. Gravitacijski valovi nastaju djelovanjem vjetra, djelovanjem uronjenog tijela, zatim kao unutrašnji valovi nastali između područja fluida različitih gustoća ili nehomogenih fluida, plimni valovi i sl.

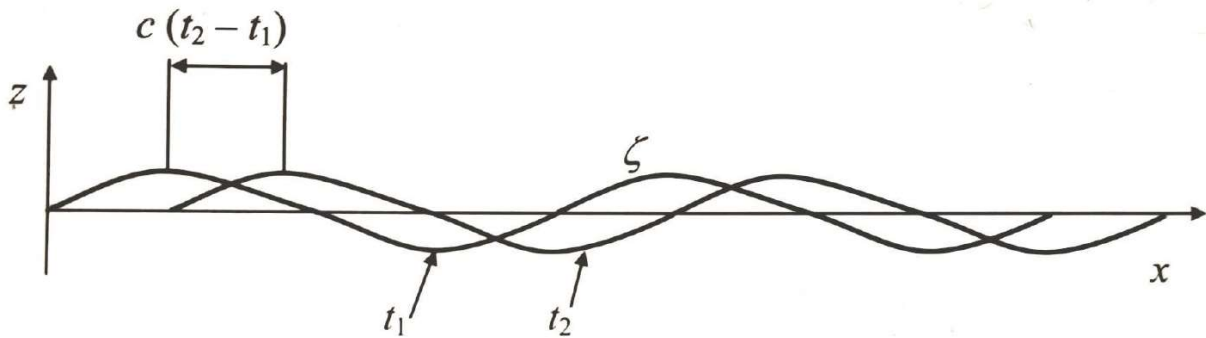
2.1 Harmonijski ravninski valovi

Naziv harmonijski valovi odnosi se na periodično ponavljanje valnih obilježja u vremenu i prostoru. Ako je oblik valnog gibanja jednak u ravninama paralelnih presjeka, valovi se nazivaju i ravninskima. Pozitivni smjer osi z ide vertikalno prema gore, dok je pozitivni smjer osi x , koja leži na mirnoj slobodnoj površini, u smjeru napredovanja vala. Dubina vode d je pozitivna vrijednost mjerena između dna vode i razine mirne vode. Evalvacija ili podizaj slobodne površine ξ opisan je kao harmonijski val amplitude ξ_a koja je definirana kao vertikalna udaljenost ekstremnih pomaka slobodne površine od razine mirne vode. Valna visina H definirana je kao vertikalna udaljenost između vrha brijega i dola, odnosno kao dvostruka vrijednost valne amplitude.

$$H = 2\xi_a \quad (1)$$

Profil vala u potpunosti je definiran pomoću karakterističnih fizikalnih veličina. Duljina vala λ , visina vala H , u prostoru, a u vremenu period vala T . Duljina vala definirana je kao horizontalna udaljenost između dva uzastopna brijega mjereno u smjeru napredovanja vala. Vremenski razmak između nailaska dvaju uzastopnih brjegov naziva se valnim periodom T . Omjer između valne visine i valne duljine naziva se strmina vala α . Evalvacija valnog profila izražava se kao funkcija položaja x i vremena t kao što je prikazano slikom 2.

$$\xi = \xi_a \cos(kx - \omega t) \quad (2)$$



Slika 2 Progresivni harmonijski val [1]

2.2 Trajektorije čestice vala

Ako se pretpostavi da je srednji položaj čestice fluida u valu u točki (x_1, z_1) tada su $(x-x_1)$ i $(z-z_1)$ pomaci čestice u odnosu na taj položaj. Uz pretpostavku male valne strmine te su vrijednosti dovoljno malene da se razlike u brzini, koje su posljedica pomaka položaja, mogu zanemariti (vrijednosti drugog reda). Pomaci čestica dobiju se integracijom izraza

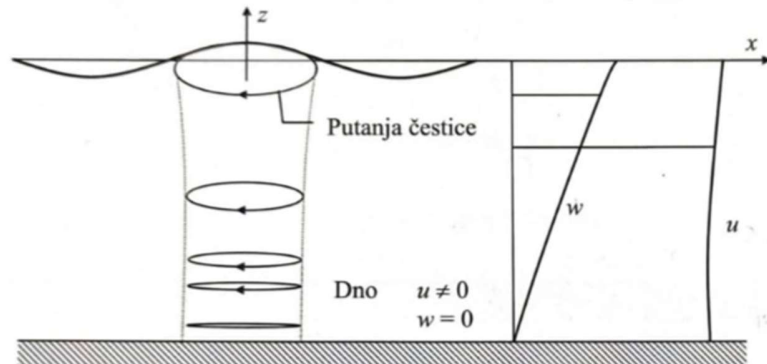
$$x = \int u dt = -\xi_a \frac{\cosh k(d+z_1)}{\sinh kd} \sin(kx_1 - \omega t) + C_1 \quad (3)$$

$$z = \int w dt = +\xi_a \frac{\sinh k(d+z_1)}{\sinh kd} \cos(kx_1 - \omega t) + C_2 \quad (4)$$

Gdje je točka (C_1, C_2) točka oko koje se giba čestica, a ona ne može biti znatno udaljena od položaja čestice u ravnotežnom položaju, odnosno $C_1 \approx x_1$, $C_2 \approx z_1$. Trajektorije ili putanje čestica dobiju se eliminacijom varijable vremena usljed koje se u općenitom slučaju dobije izraz za eliptičke putanje čestica.

$$\frac{(x-x_1)^2}{\left(-\xi_a \frac{\cosh k(d+z_1)}{\sinh kd}\right)^2} + \frac{(z-z_1)^2}{\left(\xi_a \frac{\sinh k(d+z_1)}{\sinh kd}\right)^2} = 1 \quad (5)$$

Vidljivo je da gibanje čestice zamire s dubinom što je prikazano na slici 2. Na mirnoj slobodnoj površini ($z_l=0$) polovica vertikalne osi elipse jednaka je amplitudi vala ζ_a , dok se na dnu ($z_l=-d$) u skladu s rubnim uvjetom, čestice gibaju samo u horizontalnom smjeru, odnosno trajektorije su horizontalne linije.



Slika 3 Trajektorije čestica vala u fluidu ograničene dubine [1]

2.3 Energija

Vrlo je važno u mehanici valova poznavati energiju vala kao i brzinu kojom se ta energija prenosi. Mehanička energija valova dobije se kao suma kinetičke energije K i potencijalne energije P . Promatra se elementarna masa fluida dm koja se giba brzinom v .

2.3.1 Kinetička energija

Kinetička energija K određuje se na sljedeći način.

$$K = \int \frac{1}{2} (u^2 + w^2) dm \quad (6)$$

Uz $dm = \rho dx dz$ izraz prelazi u

$$K = \frac{1}{2} \rho \iint_{-d}^{\xi} (u^2 + w^2) dz dx \quad (7)$$

Rastavljenjem raspona integrala u vertikalnom smjeru na dio integrala od dna do mirne slobodne površine i na dio od mirne slobodne površine i do profila vala dobije se:

$$K = \frac{1}{2}\rho \iint_{-d}^0 (u^2 + w^2) dz dx + \frac{1}{2}\rho \iint_0^\xi (u^2 + w^2) dz dx \quad (8)$$

Kada integriramo drugi član dobijemo zapravo izraz drugog reda koji se uvažavajući pretpostavke linearne teorije može zanemariti, te slijedi da je kinetička energija jednaka:

$$K = \frac{1}{2}\rho \iint_{-d}^0 (u^2 + w^2) dz dx \quad (9)$$

Uvrštavanjem izraza za komponente brzine (2.70), te rješavanjem gornjeg integrala, dobije se kinetička energija:

$$K = \frac{1}{4}\rho g \xi_a^2 \lambda \quad (10)$$

za val duljine λ i jedinične širine.

$$K = \frac{1}{4}\rho g \xi_a^2 \quad (11)$$

Za jediničnu horizontalnu površinu vala.

2.3.2 Potencijalna energija

Potencijalna energija P za elementarnu masu $dm = \rho dx$ s težištem na $\frac{\xi}{2}$ iznosi za val duljine λ

$$P = \frac{1}{2} \int_0^\lambda \rho g \xi^2 dx = \frac{1}{2} \rho g \xi^2 \int_0^\lambda \cos^2(kx - \omega t) dx \quad (12)$$

odnosno uz određene matematičke operacije

$$P = \frac{1}{4} \rho g \xi^2 \lambda \quad (13)$$

za val duljine λ i jedinične širine

$$P = \frac{1}{4} \rho g \xi^2 \quad (14)$$

za jediničnu horizontalnu površinu vala

2.3.3 Ukupna energija vala

Uspoređujući konačne izraze za kinetičku i potencijalnu energiju uočava se da su apsolutne vrijednosti energija za određeni val jednake, a ukupna energija E dobije se kao njihov zbroj:

$$E = K + P = \frac{1}{2} \rho g \xi^2 = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (15)$$

za jediničnu površinu vala gdje je H visina vala.

3 MORSKI VALOVI

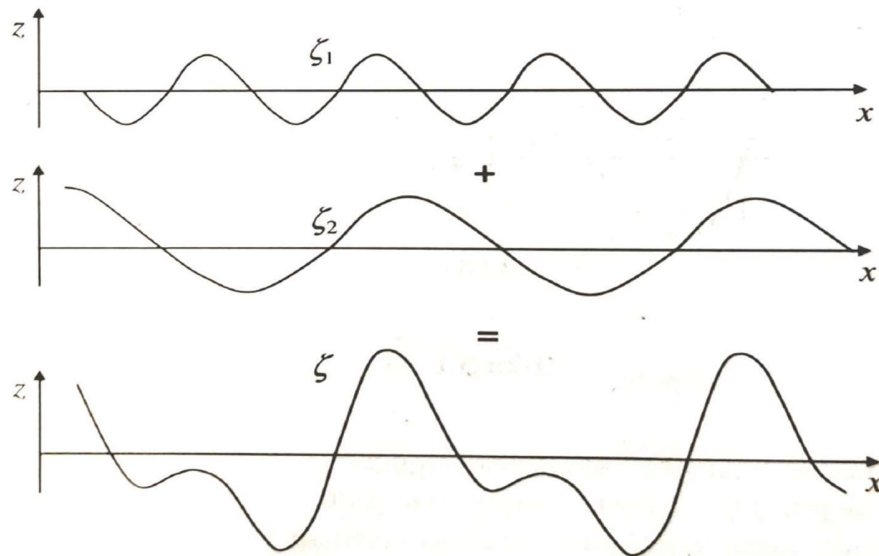
Kada je teorija harmonijskih valova poznata, mogu se razmatrati morski valovi čija je priroda znatno složenija. Površina mora često je vrlo nepravilna, a ta se nepravilnost očituje u neravninama koje u svakom trenutku mjenjaju svoj oblik. Gravitacijski valovi nastaju na nekoliko načina:

- Uslijed gravitacijske privlačnosti nebeskih tijela (posebice Sunca i Mjeseca), nazivaju se plimni valovi
- Uslijed pomaka morskog dna zbog potresa, erupcije vulkana ili klizanja tla, nazivaju se seizmički valovi ili tsunami
- Uslijed normalnih i tangencijalnih sila na površini mora, a kojima je uzrok vjetar, nazivaju se vjetrovni valovi

Ovaj rad će se baviti valovima kojima je uzrok vjetar, odnosno vjetrovnim valovima.

3.1 Princip superpozicije

Svaki morski val moguće je prikazati, polazeći od principa superpozicije, kao sumu harmonijskih valova različitih značajki. Na slici 3. prikazan je profil morskog vala ζ u određenom trenutku koji je nastao superpozicijom, odnosno zbrajanjem profila dvaju harmonijskih valova ζ_1 i ζ_2 u istom trenutku.



Slika 4 Superpozicija dvaju ravninskih valova istog smjera [1]

3.2 Spektralni momenti

Ako se morski val prikaže kao superpozicija harmonijskih komponenti

$$\xi(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \xi_{ai} \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (16)$$

Te ako je broj promatranih veličina dovoljno velik, varijanca procesa može se pisati kao

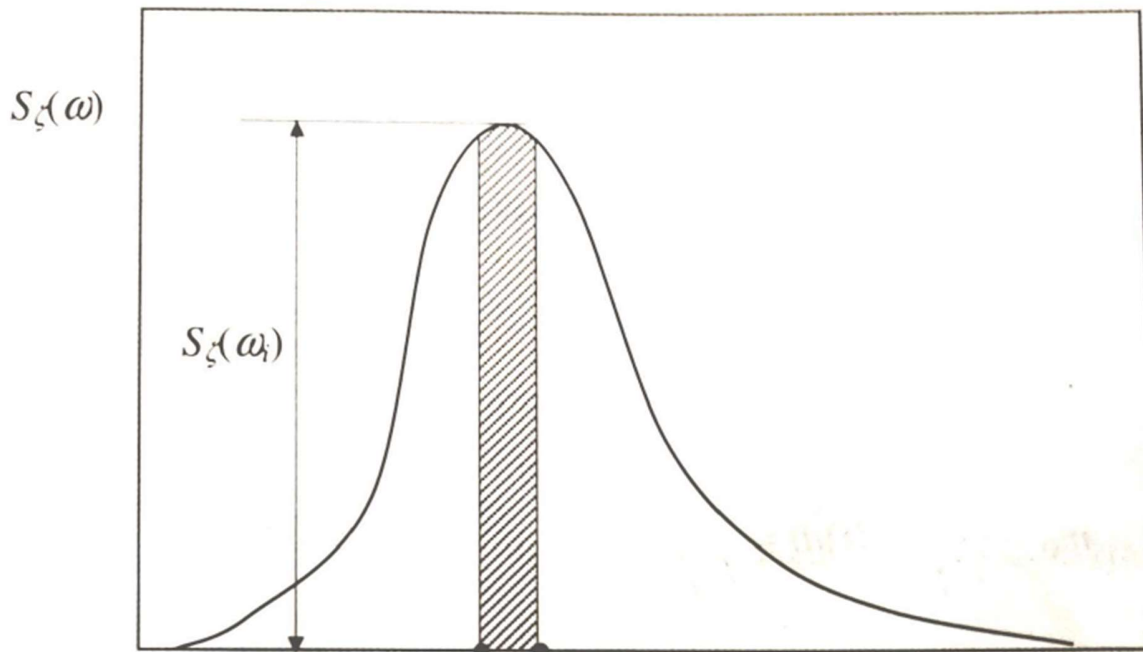
$$m_0 = \frac{1}{T} \int_0^T \xi^2(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{i=1}^{\infty} [\xi_{ai} \cos(\omega t + \varepsilon)]^2 dt \quad (17)$$

Uz određene matematičke operacije možemo dobiti

$$m_0 = \sum_{i=1}^{\infty} S_{\xi}(\omega_i) \Delta\omega = \int_0^{\infty} S_{\xi}(\omega_i) d\omega \quad (18)$$

Izraz koji predstavlja površinu ispod krivulje spektra valova.

Varijanca valnog procesa opisanog spektrom jednaka je površini ispod tog spektra, što je prikazano na slici 5. koji nazivamo nultim momentom spektra.



Slika 5 Površina ispod spektra valova [1]

3.3 Teorijski spektri

Spektar valova, dobiven iz zapisa morskih valova u određenoj točki oceana i tijekom određenog vremenskog perioda, predstavlja jedinstveni i neponovljivi eksperimentalni rezultat. Takav spektar može se koristiti za mora sličnih karakteristika, ali njegova primjena je ograničena. Praksa sugerira korištenje idealnih spektara, koji su definirani teorijskim formulama.

3.3.1 Bretschneiderov spektar

Ukratko ćemo opisati Bretschneiderov spektar iz razloga zato što JONSWAP koristi Bretschneiderov spektar za računanje spektra valova za vrijeme trajanja olujnog stanja na moru. Bretschneiderov spektar dvoparametarski je spektar koji se koristi za otvorena mora. Radi se o vrlo značajnom modelu teorijskog spektra valova.

$$S^B_{\xi}(\omega) = \frac{A}{\omega^5} e^{-\frac{B}{\omega^4}} \quad (19)$$

A i B su konstante pojedinog spektra koje ovise o parametrima spektra, a najčešće se uzima

$$A = \frac{173 H_{1/3}^2}{\bar{T}^4} \quad (20)$$

$$B = \frac{-692}{\bar{T}^4} \quad (21)$$

Ova formulacija se još naziva i ITTC valni spektar jer je prihvaćena kao standardna za pomorstvene proračune za otvorena mora.

3.3.2 JONSWAP spektar

JONSWAP spektar (Joint North Sea Wave Project, 1968.) pokušaj je opisa uvjeta olujnog stanja mora. Spektar je unimodalan (ima jedan ekstrem) i opisuje valove u ograničenom akvatoriju. Spektar je izražen u ovom obliku:

$$S_{\xi}^J(\omega) = 0,658 S_{\xi}^B(\omega) \gamma^{\exp\left(-\frac{(\omega-\omega_m)^2}{2\sigma^2\omega_m^2}\right)} \quad (22)$$

S_{ξ}^B označava Bretschneiderov spektar dok ω_m označava modalnu frekvenciju. Parametar γ izražava odnos maksimalnih spektralnih energija JONSWAP i Bretschneiderova spektra, dok je σ širina krivulje. Najčešće parametar γ poprima vrijednosti $1 < \gamma < 7$, uz uobičajenu vrijednost $\gamma=3,3$ za sjeverno more.

3.4 Difrakcijski i radijacijski valovi

Val čiji je model predočen u obliku harmonijskog progresivnog vala, predat će dio svoje energije tijelu, a dio energije će zajedno s valom nastaviti napredovanje iza tijela. Tijelo na koje je naišao val oscilacijski će se gibati, odnosno njihati. Tijelo će emitirati energiju radijalno u svim horizontalnim smjerovima. Energija predana tijelu pretvorit će se u energiju njihanja, a taj dio energije jednak je razlici energije vala prije interakcije s tijelom i energijom nakon interakcije s tijelom. Val je doživio promjenu, koja se osim pojavom nove komponente, očituje i smanjenjem njegove visine. Valna je

duljina ostala ista, a period i frekvencija vala također su ostali nepromjenjeni. Ta pojava naziva se difrakcija ili lom. Razlika energija nailaznog vala i njegova oblika nakon sudara s tijelom, u ravnoteži je s ostalim komponentama nastalim gibanjem tijela, a to su:

- Energija inercijskih sila mase tijela
- Energija uslijed rada povratnih sila nastalih pomakom tijela iz ravnotežnog položaja
- Energija valova radijacije koji se šire od tijela

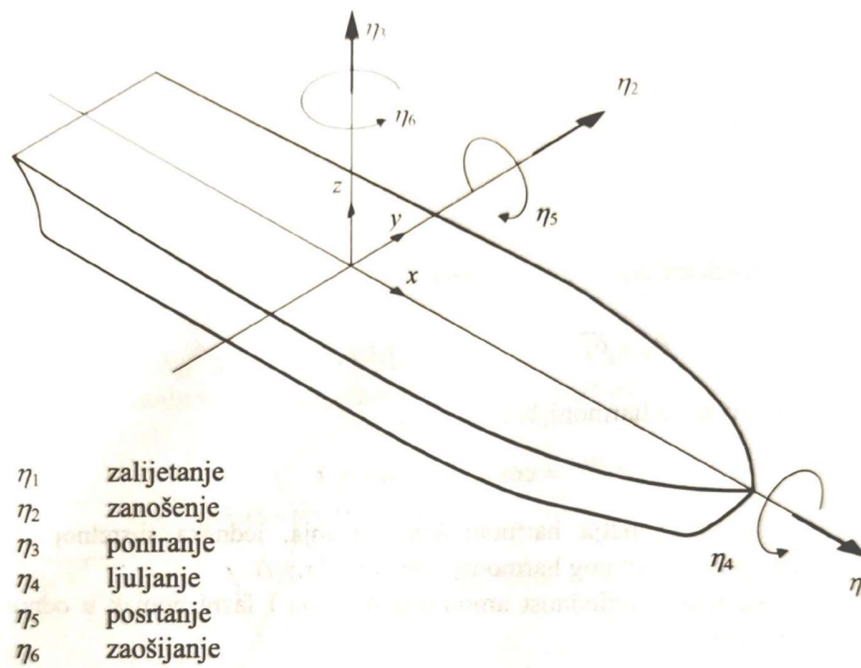
U cijelom modelu, koji opisuje njihanje tijela na valu, posebnu ulogu ima energija radijacijskih valova koja se očituje kao:

- Prigušivanje njihanja tijela
- Prividno povećanje mase tijela tijekom njihanja

Periodičko ponavljanje prijenosa energije, između sustava progresivnih harmonijskih valova i uronjenog tijela, rezultirati će oscilacijskim gibanjem ili njihanjem tijela, u općem slučaju sa šest stupnjeva slobode gibanja, odgovarajuće brzine i ubrzanja. Ovaj rad će imati jedan stupanj slobode gibanja, rotacijsko gibanje oko osi x .

3.5 Oblici njihanja

Rezultirajuća oscilacijska gibanja broda ili njihanje sastoje se od triju translacijskih gibanja u smjeru osi x,y,z i triju rotacijskih gibanja oko osi x,y,z prikazanih na slici 5.



Slika 6 Linearni i kutni pomaci broda [1]

- Zalijetanje (engl. Surge): $\eta_1 = \eta_{a1} \cos(\omega_e t + \varepsilon_1)$
- Zanošenje (engl. Sway): $\eta_2 = \eta_{a2} \cos(\omega_e t + \varepsilon_2)$
- Poniranje (engl. Heave): $\eta_3 = \eta_{a3} \cos(\omega_e t + \varepsilon_3)$
- Ljuljanje (engl. Roll): $\eta_4 = \eta_{a4} \cos(\omega_e t + \varepsilon_4)$
- Posrtanje (engl. Pitch): $\eta_5 = \eta_{a5} \cos(\omega_e t + \varepsilon_5)$
- Zaošijanje (engl. Yaw): $\eta_6 = \eta_{a6} \cos(\omega_e t + \varepsilon_6)$

Svaki oblik gibanja u odnosu na val pomaknut za različiti fazni kut ε . Polazeći od položaja broda u stanju mirovanja, pozitivan pomak η_1 odgovara pomaku u smjeru napredovanja, η_2 odgovara bočnom pomaku uljevo, η_3 odgovara izronu. Rotacijski pomaci slijede pravilo desne ruke, odnosno pozitivan pomak η_4 odgovara uranjanju desnog boka broda, η_5 odgovara uranjanju pramca i η_6 odgovara zakretanju krme u desno.

3.6 Jednadžbe dinamičke ravnoteže

Jednadžbe se temelje na drugom Newtonovu zakonu gibanja koji određuje da su pri translaciji sile koje djeluju na tijelo one jednake umnošku mase i ubrzanja. Za rotaciju momenti koji djeluju ekvivalentni su umnošku kutne brzine i momenta tromosti. Tijelo koje se njiše na valu je u stanju dinamičke ravnoteže u svakom trenutku. Dinamička ravnoteža njihanja je izražena je sjedećim sustavom diferencijalnih jednadžbi koji izražava ravnotežu inercijskih, hidrodinamičkih i uzbudnih sila:

$$([M_{jk}] + [A_{jk}])\{\ddot{\eta}\} + [B_{ij}]\{\dot{\eta}\} + [C_{ij}]\{\eta\} = \xi_a\{F_j(t)\} = Re\{\xi_a\{F_j\}e^{i\omega t}\} \quad (23)$$

$[M_{ij}]$ – Matrica mase tijela

$[A_{ij}]$ – Matrica dodatnih masa

$[B_{ij}]$ – matrica hidrodinamičkog prigušenja

$[C_{ij}]$ - Matrica krutosti povratnih sila

$[\ddot{\eta}_{ij}]$ – Vektor ubrzanja

$[\dot{\eta}_{ij}]$ - Vektor brzina

$[\eta_{ij}]$ – vektor pomaka

$\{F_j(t)\}$ – vektor uzbudnih sila u ovisnosti o vremenu

$\{\delta_{ij}\}$ – Vektor kompleksnih amplituda pomaka

3.6.1 Određivanje komponenti jednadžbe dinamičke ravnoteže njihanja

- Matrica mase tijela

Kako bi se odredila matrica mase $[M_{ij}]$ potrebno je poznavati samu masu tijela i vertikalni položaj mase te odrediti momente tromosti mase tijela oko koordinatnih osi. Matrica mase tijela sa šest stupnjeva slobode glasi:

$$[M_{ij}] = \begin{bmatrix} M_{11} & 0 & 0 & 0 & M_{15} & 0 \\ 0 & M_{22} & 0 & M_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -M_{42} & 0 & I_{44} & 0 & -I_{46} \\ M_{51} & 0 & 0 & 0 & I_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I_{46} & 0 & I_{66} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Gdje su:

M – masa tijela

$$I_{44} = \int_L (y_b^2 + z_b^2) dm \quad (25)$$

$$I_{55} = \int_L (x_b^2 + z_b^2) dm \quad (26)$$

$$I_{66} = \int_L (x_b^2 + y_b^2) dm \quad (27)$$

I_{jj} – moment tormosti mase oko j-tih osi

$$I_{46} = \int_L x_b z_b dm \quad (28)$$

I_{jk} – centrifugalni moment mase

Jedini centrifugalni moment masa koji se javlja u matrici je I_{46} , uz pretpostavku uzdužne simetrije. Ostali elementi su jednaki nuli ako se ishodište koordinatnog sustava poklapa s težištem tijela te ako ono ima barem jednu ravninu simetrije.

- Matrica dodatnih masa i matrica radijacijskog prigušenja

Dodatna masa odnosi se na postojanje dodatne sile koje je potrebna da ubrza okolni medij zbog čega se razmatrano tijelo ponaša kao da ima dodatnu masu. U ovom slučaju okolni medij je voda. Matrica dodatnih masa $[A_{jk}]$ i matrica radijacijskog prigušenja $[B_{jk}]$ sastoje se od članova određenih pomoću teorije potencijalnog strujanja.

- Matrica krutosti povratnih hidrostatskih sila

Povratne sile i momenti koji djeluju na tijelo koje se njiše u tekućini slijede iz integracije hidrostatičke komponente u Bernoullijevoj jednažbi. Kod tijela simetričnih, kao kod brodova koji su simetrični u odnosu na uzdužnu vertikalnu ravninu, integracija većeg broja elemenata matrice po oplakanoj površini S_0 zbog simetričnosti je jednaka nuli, pa rezultirajuća matrica krutosti povratnih sila glasi:

$$[C_{jk}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} & 0 & C_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{53} & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

gdje su:

$$C_{33} = \rho g A_{wl} \quad (30)$$

$$C_{35} = C_{53} = -\rho g M_{wl} \quad (31)$$

$$C_{44} = Mg \overline{GM} \quad (32)$$

$$C_{55} = \rho g I_{wl} \quad (33)$$

A_{wl} – površina vodne linije

M_{wl} – statički moment površine vodne linije

I_{wl} – moment inercije površine vodne linije

\overline{GM} – metacentarska visina

Pomaci, brzine i ubrzanja

Oscilacijsko gibanje tijela opisan je zakonom koji se može prikazati i u kompleksnom obliku:

$$\eta_j(t) = \operatorname{Re}\{\delta_j e^{-i\omega_e t}\} = \eta_{cj} \cos\omega_e t + \eta_{sj} \sin\omega_e t = \eta_{aj} \cos(\omega_e t + \varepsilon_j) \quad j = 1 \dots 6 \quad (34)$$

gdje su:

δ_j - kompleksne amplitude njihanja

ω_e - kružna frekvencija harmonijskog njihanja

η_{aj} - realna vrijednost amplitude njihanja

ε_j - fazni pomak u odnosu na val

Brzina se dobije kao prva derivacija pomaka po vremenu:

$$\begin{aligned}\dot{\eta}_j(t) &= \frac{\partial}{\partial t} \eta_j(t) = \operatorname{Re}\{-i\omega_e \delta_j e^{-i\omega_e t}\} = -\omega_e \sin(\omega_e t + \varepsilon_j) = \\ &= \omega_e \eta_{aj} \cos\left(\omega_e t + \varepsilon_j + \frac{\pi}{2}\right) \quad j = 1 \dots 6\end{aligned}\quad (35)$$

ubrzanje se dobije kao derivacija brzine po vremenu:

$$\begin{aligned}\ddot{\eta}_j(t) &= \frac{\partial^2}{\partial t^2} \eta_j(t) = \operatorname{Re}\{-\omega_e^2 \delta_j e^{-i\omega_e t}\} = -\omega_e^2 \eta_{aj} \cos(\omega_e t + \varepsilon_j) = \\ &= \omega_e^2 \eta_{aj} \cos(\omega_e t + \varepsilon_j + \pi) \quad j = 1 \dots 6\end{aligned}\quad (36)$$

Inercijske sile i momenti

Momente koji djeluju na tijelo prikazujemo kao sumu uzbudne sile F_j i hidrodinamičke sile F_{Hj} i ovisno u vremenu.

$$F_{\eta_j}(t) = F_j(t) + F_{Hj}(t) \quad (37)$$

Rješenjem problema djelovanje valova na nepomično tijelo dobiju se uzbudne sile. Hidrodinamičke sile određujemo rješenjem problema njihanja tijela na mirnoj slobodnoj površini. Koristeći matričnu notaciju, inercijske sile i momente oko koordinatnih osi izražavamo kao:

$$\{F_j\} = [M_{kj}]\{\ddot{\eta}_j\} = \operatorname{Re}\{-\omega^2 [M_{kj}]\{\delta_j\}e^{-i\omega t}\} \quad (38)$$

4 ODABRANI MODEL

Cilj ovog završnog rada je ispitati koliko energije može isporučiti uređaj koji energiju valova pretvara u električnu energiju. Postoji više principa dobivanja električne energije iz energija valova, a odabran je oscilirajući valni pretvarač (engl. oscillating wave surge converter). Postrojenje je pričvršćeno za morsko dno. Ploča koja je povezana sa zglobom se njiše s nailaskom valova u oba smjera. To njihanje koristimo za pokretanje hidrauličke pumpe (PTO uređaj), energija u hidrauličkoj tekućini se pomoću hidrauličkog motora pretvara u mehaničku energiju. Tlak i protok kroz hidraulični motor stvaraju kutni brzinu i okretni moment koji se može pretvoriti u električnu energiju putem električnog generatora.

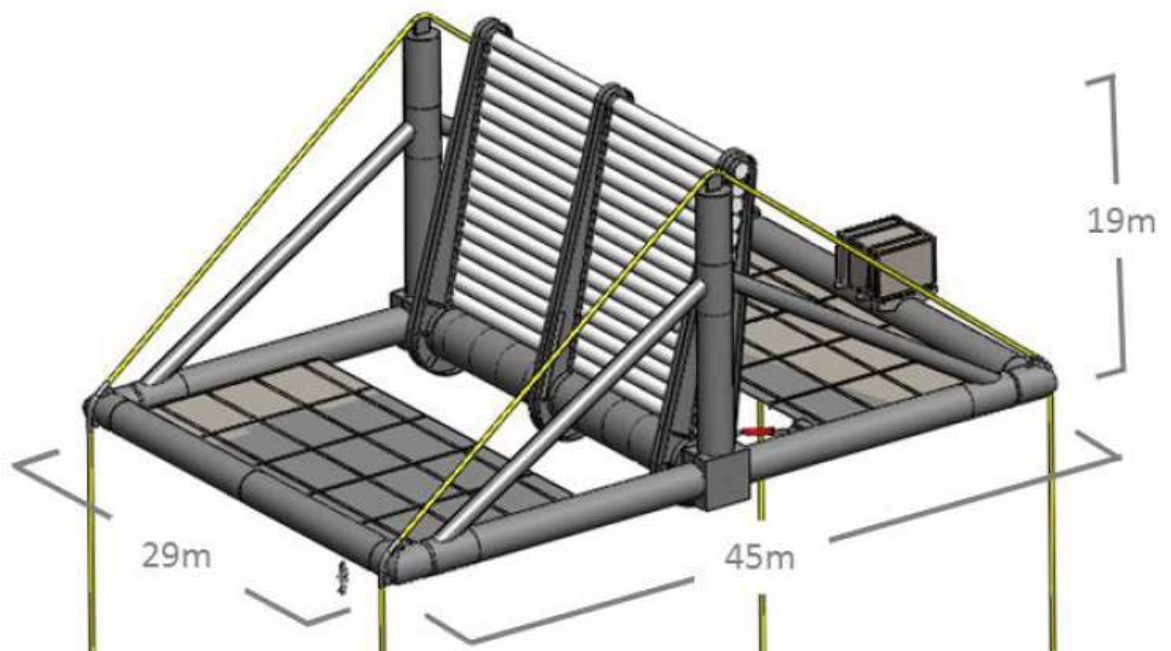
4.1 Dimenzije uređaja

Dimenzije uređaja su odabrane prema modelu rađenom na Pacific Northwest National Laborator.

Dimenzije čitavog uređaja su :

- Duljina: 45 m
- Širina: 29 m
- Visina: 19 m
- Gaz: 17.5 m

Uređaj je prikazan na slici 6.



Slika 7 Oscilirajući valni pretvarač [4]

4.1.1 Dimenzije oscilirajuće ploče

Lokalni za lokalni koordinatni sustav je korišten desni kartezijev koordinatni sustav postavljen tako da x os prolazi kroz osovinu. Dimenzije ploče koja oscilira zajedno s osovnom ispod slobodne površine su

- Duljina: 25 m
- Širina: 1 m
- Visina: 17,5 m

5 PRORAČUN

Za proračun odziva ljuļajućeg uređaja na valovima korišten je programski paket HydroSTAR.

5.1 Princip rada programskog paketa HydroSTAR

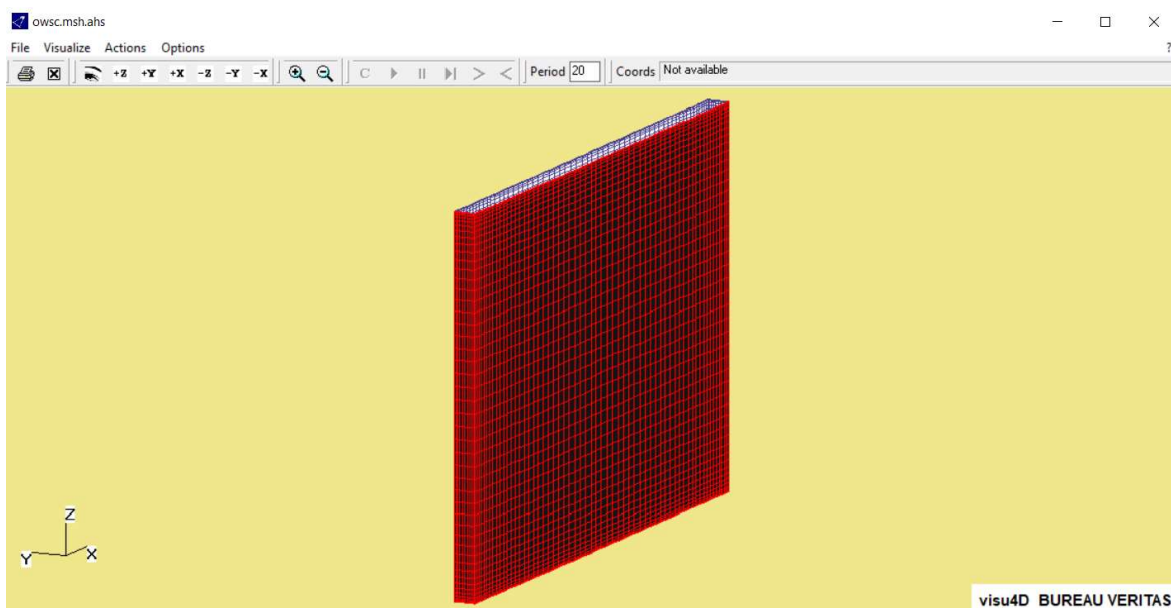
Programski paket HydroSTAR temelji se na potencijalnoj teoriji i panelnoj metodi. Potencijalna teorija omogućuje izračun sila prvog i drugog reda na temelju modela i parametara valova, te izračun radijacijske i difrakcijske komponente potencijala brzine.

5.2 Priprema podataka i proračun

Prema dimenzijama ploče oscilirajućeg valnog pretvarača uneseni su podaci u HydroStar preko naredbe `hsmsh -bte`. Naredba `hsmsh -bte` daje mogućnost unosa dimenzija za kvadar, dimenzije koje su unesene su:

- L: 25 m
- B: 1 m
- T: 17,5 m

Nakon unosa dimenzija HydroSTAR generira mrežu panela do vodne linije. Pomoću naredbe `hvisu` prikazujemo vizualni izgled kvadra koji je unesen predhodnom naredbom, u ovom slučaju kvadar, prikazan na slici 7 je ploča koja simulira oscilirajući valni pretvarač.

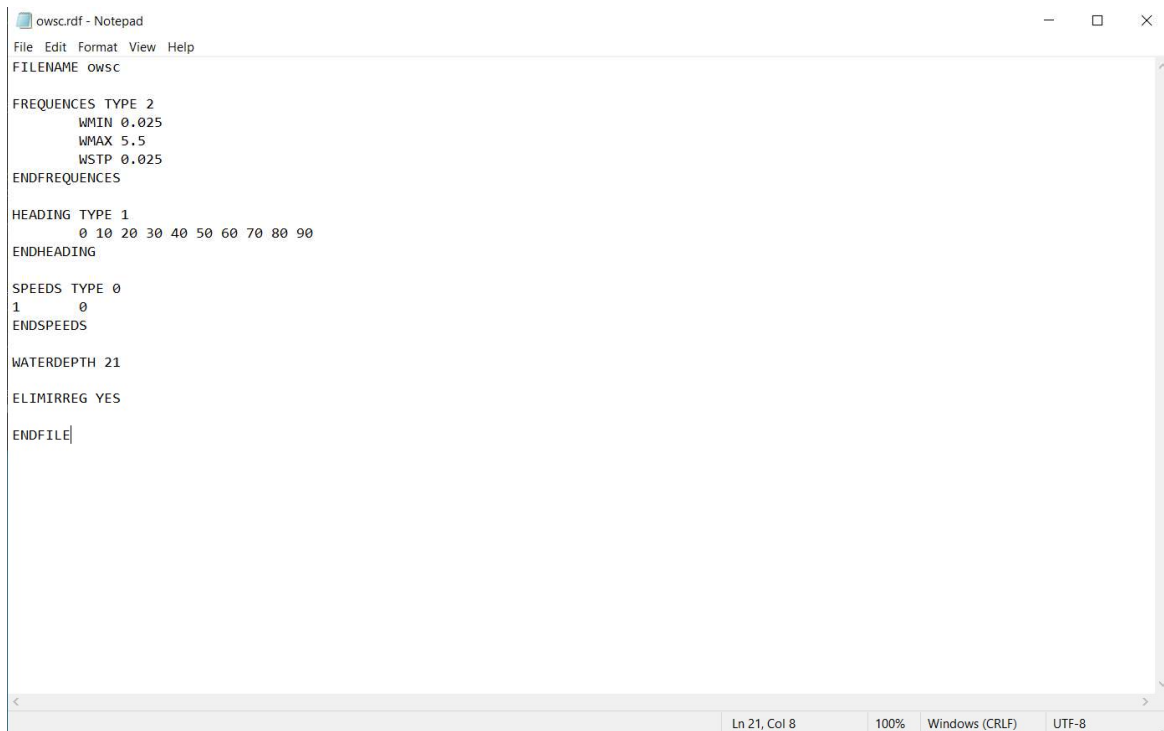


Slika 8 Prikaz kvadra iz programa HydroStar

Nakon generiranja kvadra i mreže radimo proračun difrakcije i radijacije. Ulazni podaci su:

- Frekvencije naiznih valova
- Kutevi nailaska vala
- Dubina vide
- Brzina tijela

Ulazni podaci se upisuju u txt datoteku. Nakon kreiranja txt datoteke s njom se ulazi u program HydorSTAR upisuje se naredba hsrdf koja daje izlazne podatke o dodatnoj masi, matrici prigušenja, matrici hidrostatske krutosti te uzbudne sile i momente za frekvencije koje smo zadali. Prikaz ulazne datoteke za naredbu hsrdf je na slici 8.



```
owsc.rdf - Notepad
File Edit Format View Help
FILENAME owsc

FREQUENCES TYPE 2
  WMIN 0.025
  WMAX 5.5
  HSTP 0.025
ENDFREQUENCES

HEADING TYPE 1
  0 10 20 30 40 50 60 70 80 90
ENDHEADING

SPEEDS TYPE 0
  1 0
ENDSPEEDS

WATERDEPTH 21

ELIMIRREG YES

ENDFILE|
```

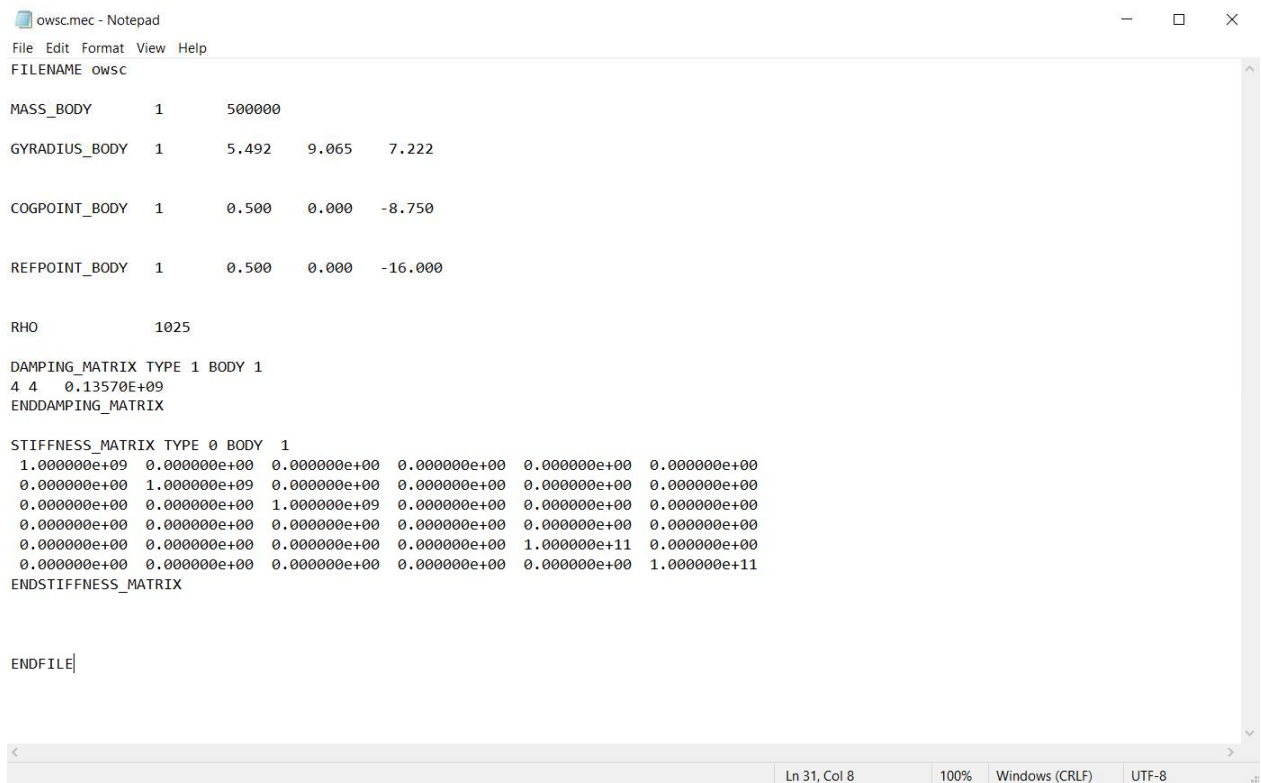
Slika 9 Ulazna datoteka za naredbu hsrdf

S izlaznim podacima hsrdf naredbom i ulaznim podacima ulazi se u Hydrostar s naredbom hsmcn. Ulazni podatci su napisani u txt datoteci, a to su:

- Masa ploče
- Radijusi tromosti

- Težište masa tijela
- Početna točka
- Prigušenje
- Matrista krutosti

Prikaz ulazne datoteke za naredbu hsmcn je na slici 9.



```

owsc.mec - Notepad
File Edit Format View Help
FILENAME owsc

MASS_BODY      1      500000

GYRADIUS_BODY  1      5.492    9.065    7.222

COGPOINT_BODY  1      0.500    0.000   -8.750

REFPOINT_BODY  1      0.500    0.000  -16.000

RHO            1025

DAMPING_MATRIX TYPE 1 BODY 1
4 4  0.13570E+09
ENDDAMPING_MATRIX

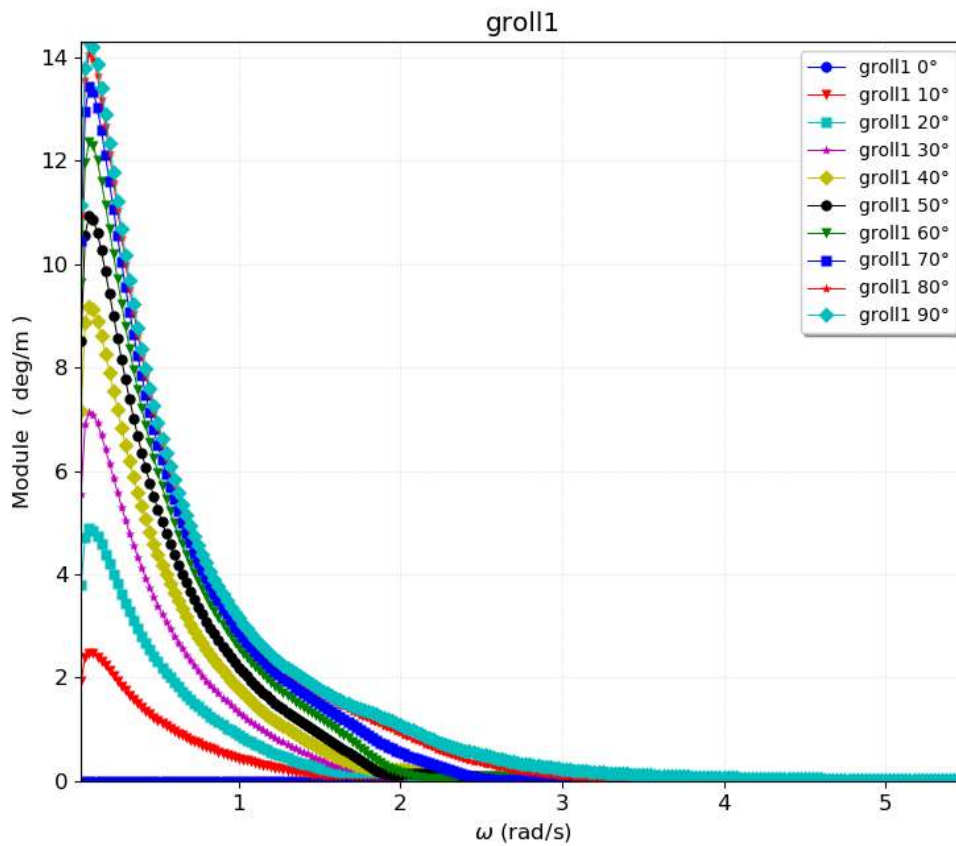
STIFFNESS_MATRIX TYPE 0 BODY 1
1.000000e+09  0.000000e+00  0.000000e+00  0.000000e+00  0.000000e+00  0.000000e+00
0.000000e+00  1.000000e+09  0.000000e+00  0.000000e+00  0.000000e+00  0.000000e+00
0.000000e+00  0.000000e+00  1.000000e+09  0.000000e+00  0.000000e+00  0.000000e+00
0.000000e+00  0.000000e+00  0.000000e+00  0.000000e+00  0.000000e+00  0.000000e+00
0.000000e+00  0.000000e+00  0.000000e+00  0.000000e+00  1.000000e+11  0.000000e+00
0.000000e+00  0.000000e+00  0.000000e+00  0.000000e+00  0.000000e+00  1.000000e+11
ENDSTIFFNESS_MATRIX

ENDFILE
Ln 31, Col 8  100%  Windows (CRLF)  UTF-8

```

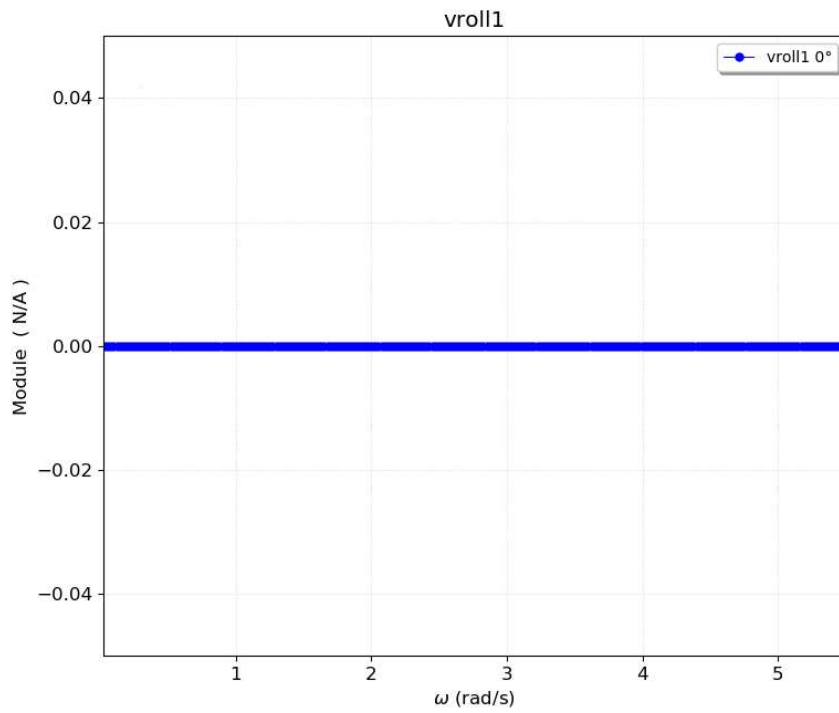
Slika 10orlovic9 Ulazna datoteka za naredbu hsmcn

Izlazni podatak, prikazan na slici 10., prijenosna je funkcija s kojom se može dobiti odaziv oscilirajućeg valnog pretvarača. Ideja koja stoji iza postavljanja velikih brojeva u matricu krutosti za zaustavljanje translacijskih pomaka i rotacijskih zakreta dolazi iz metode konačnih elemenata. Naime, u metodi konačnih elemenata u slučaju velike krutosti u određenom smjeru gotovo potpuno sprečava pomak. Pomak postoji u tom smjeru, ali je tako malen da ga možemo zanemariti. Rezultat je 1 stupanj slobode gibanja ljuljajućeg uređaja i to rotacija oko osi x . Graf rotacijskog pomaka oko x osi za sve kuteve nailaska vala.

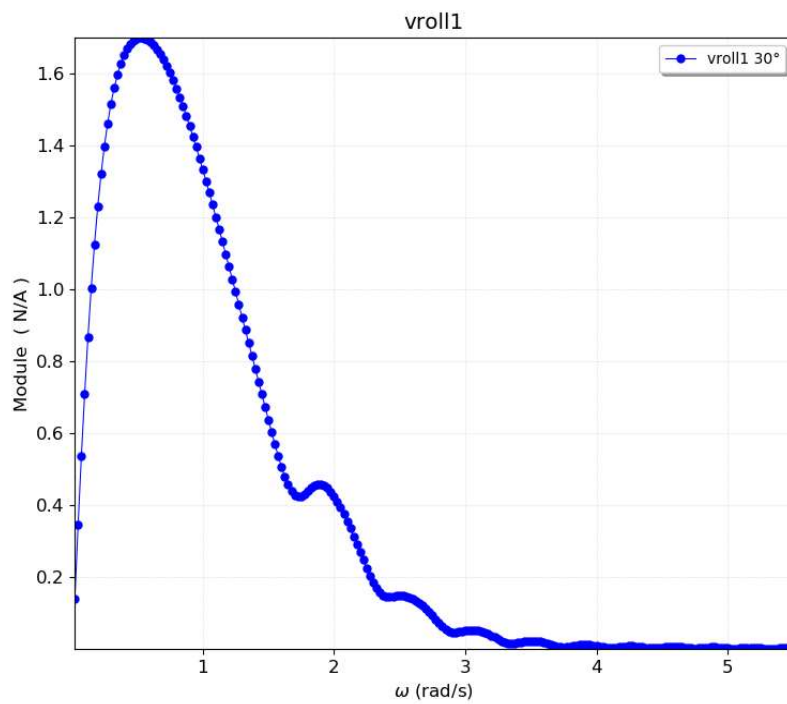


Slika 11 Prijenosna funkcija

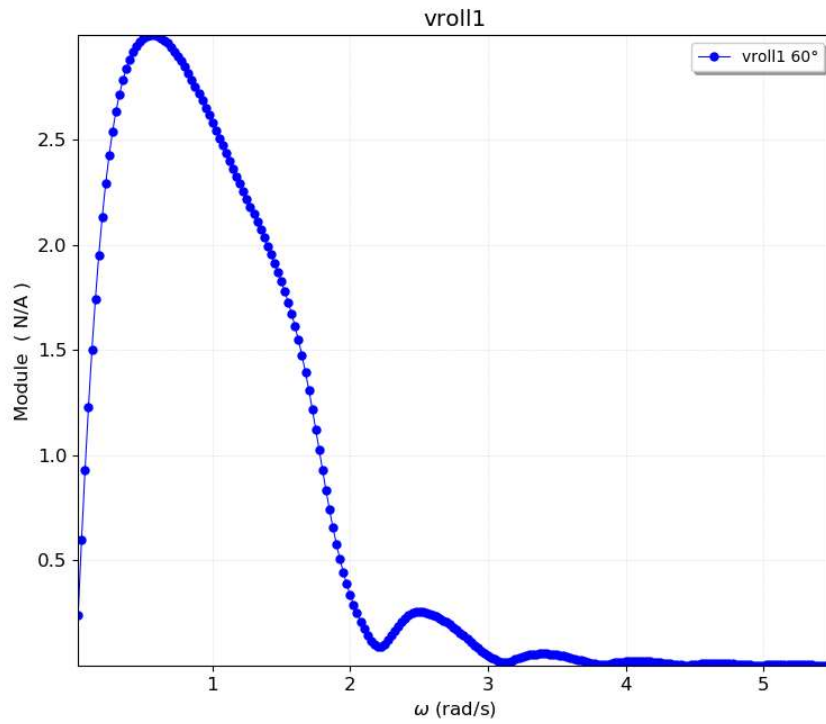
Za prigušenje PTO uređaja tj uzeto je ekvivalentno radijacijskoj matrici prigušenja za član 4,4 i frekvenciju vala 2,5 rad/s. Prigušenje je dodano u proračun u rotaciji oko x osi. Prikazuju se grafovi kutnih brzina oko osi x ljuljajućeg uređaja za nailazne valove oko od 0° do 90° s korakom od 30°



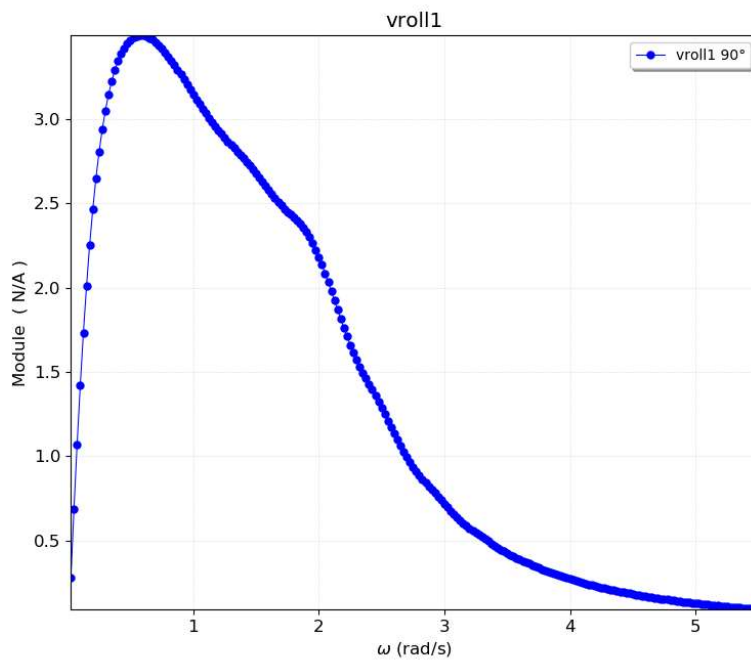
Slika 12 Kutna brzina za nailazne valove od 0°



Slika 13 Kutna brzina za nailazne valove od 30°



Slika 14 Kutna brzina za nailazne valove od 60°



Slika 15 Kutna brzina za nailazne valove od 90°

Kada su dobivene prijenosne funkcije potrebno je unijeti i spektar valova kako bi se odredili odazivi ljujajućeg uređaja. Odazivi su potrebni kako bi se dobio vrijednost spektralnog momenta m_0 koji je potreban za izračun snage ljujnog uređaja. U HydroStar je unesena funkcija hspec koja za ulazne podatke ima:

- Prijenosnu funkciju
- Zadano stanje mora
- Odabrani spektar valova
- Raspon i korak integracije
- Tip izlaznih podataka koje trebamo dobiti

Spektar valova je unesen preko txt datoteke. Korišten je JONSWAP spektar valova s parametrom $\gamma=3,3$ i značajne valne visine od 1.5 i 2.5 metra. Period se računa preko sljedećeg izraza za kutnu frekvenciju (prema definiciji za Tabainov spektar):

$$\omega_m = 0,32 + \frac{1.8}{H_S + 0.60} \quad (39)$$

Period se dobije preko izračunate kutne brzine:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (40)$$

Dobiveni periodi za značajne valne visine su:

T=5,34 s za val značajne visine 1,5 m

T=6,97 s za val značajne visine 2,5 m

```
owsc.hspec - Notepad
File Edit Format View Help
RAO_FILE
vro111.rao
ENDRAO_FILE

F_INTERPOL NATURAL
H_INTERPOL NATURAL

SPECTRE_TYPE
JONSWAP 3.3
ENDSPECTRE_TYPE

OMEGA 0.01 5.5
STEP 0.001
NB_HSTEP 180

LIST_SEASTATE NBMODE 1
0      1.5    5.34
10     1.5    5.34
20     1.5    5.34
30     1.5    5.34
40     1.5    5.34
50     1.5    5.34
60     1.5    5.34
70     1.5    5.34
80     1.5    5.34
90     1.5    5.34
0      2.5    6.97
10     2.5    6.97
20     2.5    6.97
30     2.5    6.97
40     2.5    6.97
50     2.5    6.97
60     2.5    6.97
70     2.5    6.97
80     2.5    6.97
90     2.5    6.97
ENDLIST_SEASTATE

AZIMUTH
0
1.0
```

Slika 16 Ulazna datoteka za naredbu hspec

Kada je dobiven spektar odziva može se preći na proračun snage koju isporučuje oscilirajući valni pretvarač.

5.3 Proračun snage oscilirajućeg valnog pretvarača

Za proračun snage oscilirajućeg valnog pretvarača korištena je formula

$$\bar{P} = m_o * B \quad (41)$$

m_o – površina ispod spektra odziva

B – prigušenje

m_o površinu ispod spektra valova ili nulti moment spektra odziva za ljujanje koji je dobiven iz HydroSTAR-a u obliku excel tablice. U tablici 1. ispisani su rezultati za značajnu valnu visinu 1,5 m. U tablici se nalaze za kuteve nailaska valova od 0° do 90° s korakom od 10° spektralni momenti, period, snaga na ljujajućem uređaju te izlazna snaga električne struje. U tablici 2. salaze se rezultati za značajnu valnu visinu 2,5 m.

Tablica 1. Prikaz rezultata za značajnu valnu visinu od 1,5 m

| #raofile | Wave direction | m0 | Tp 1 | P(kW) | Pe(kW) |
|----------|----------------|----------|----------|--------|----------|
| vroll1 | 0.00E+00 | 4.84E-01 | 5.34E+00 | 20.007 | 16.50578 |
| vroll1 | 1.00E+01 | 5.39E-01 | 5.34E+00 | 22.289 | 18.38843 |
| vroll1 | 2.00E+01 | 5.98E-01 | 5.34E+00 | 24.699 | 20.37668 |
| vroll1 | 3.00E+01 | 6.59E-01 | 5.34E+00 | 27.228 | 22.4631 |
| vroll1 | 4.00E+01 | 7.23E-01 | 5.34E+00 | 29.886 | 24.65595 |
| vroll1 | 5.00E+01 | 7.90E-01 | 5.34E+00 | 32.664 | 26.9478 |
| vroll1 | 6.00E+01 | 8.60E-01 | 5.34E+00 | 35.566 | 29.34195 |
| vroll1 | 7.00E+01 | 9.34E-01 | 5.34E+00 | 38.592 | 31.8384 |
| vroll1 | 8.00E+01 | 1.01E+00 | 5.34E+00 | 41.75 | 34.44375 |
| vroll1 | 9.00E+01 | 1.09E+00 | 5.34E+00 | 45.016 | 37.1382 |

Tablica 2 Prikaz rezultata za značajnu valnu visinu od 2,5 m

| #raofile | Wave direction 1 | m0 | Tp 1 | P(kW) | P _e (kW) |
|----------|---------------------|----------|----------|---------|---------------------|
| vroll1 | 0.00E+00 | 1.67E+00 | 6.97E+00 | 69.156 | 57.0537 |
| vroll1 | 1.00E+01 | 1.86E+00 | 6.97E+00 | 77.051 | 63.56708 |
| vroll1 | 2.00E+01 | 2.07E+00 | 6.97E+00 | 85.401 | 70.45583 |
| vroll1 | 3.00E+01 | 2.28E+00 | 6.97E+00 | 94.165 | 77.68613 |
| vroll1 | 4.00E+01 | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 103.341 | 85.25633 |
| vroll1 | 5.00E+01 | 2.73E+00 | 6.97E+00 | 112.932 | 93.1689 |
| vroll1 | 6.00E+01 | 2.98E+00 | 6.97E+00 | 122.976 | 101.4552 |
| vroll1 | 7.00E+01 | 3.23E+00 | 6.97E+00 | 133.434 | 110.0831 |
| vroll1 | 8.00E+01 | 3.49E+00 | 6.97E+00 | 144.306 | 119.0525 |
| vroll1 | 9.00E+01 | 3.77E+00 | 6.97E+00 | 155.632 | 128.3964 |

U tablici se nalazi nulti moment spektra, smjer nailaska vala, značajna valna visina, period, izračunata snaga i izlazna snaga električne struje. Korisnost PTO uređaja je 82,5 % te je umnoškom dobivene snage i korisnosti izračunata izlazna snaga struje na generatoru.

$$P_e = \eta_{PTO} * \bar{P} \quad (42)$$

Za usporedbu izračuna orijentirati ćemo se prema izračunu instituta Pacific Northwest National Laborator koji su za oscilirajući valni pretvarač dobili ove rezultate prikazane u tablici.

Tablica 3 Prikaz izlazne snage struje za ljuljajući uređaj na
Pacific Northwest National Laborator [4]

| | | Energy Period, Te [sec] | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 4.5 | 5.5 | 6.5 | 7.5 | 8.5 | 9.5 | 10.5 | 11.5 | 12.5 | 13.5 | 14.5 | 15.5 | 16.5 | 17.5 |
| Significant Wave Height, Hs [m] | 0.75 | 12 | 17 | 19 | 21 | 23 | 22 | 21 | 19 | 19 | 17 | 16 | 14 | 13 | 12 |
| | 1.25 | 32 | 41 | 45 | 48 | 52 | 49 | 45 | 42 | 40 | 36 | 35 | 32 | 29 | 27 |
| | 1.75 | 58 | 72 | 77 | 82 | 87 | 81 | 74 | 70 | 67 | 60 | 58 | 53 | 49 | 45 |
| | 2.25 | 91 | 110 | 116 | 119 | 127 | 117 | 108 | 102 | 97 | 86 | 83 | 76 | 71 | 65 |
| | 2.75 | 131 | 155 | 160 | 163 | 172 | 159 | 145 | 138 | 130 | 116 | 110 | 101 | 95 | 87 |
| | 3.25 | 175 | 204 | 209 | 210 | 221 | 203 | 186 | 176 | 166 | 148 | 140 | 130 | 121 | 110 |
| | 3.75 | 224 | 259 | 262 | 262 | 272 | 250 | 228 | 215 | 205 | 183 | 173 | 160 | 148 | 135 |
| | 4.25 | 277 | 317 | 319 | 316 | 327 | 299 | 272 | 257 | 246 | 220 | 207 | 192 | 177 | 162 |
| | 4.75 | 335 | 360 | 360 | 360 | 360 | 349 | 317 | 302 | 288 | 259 | 243 | 225 | 209 | 190 |
| | 5.25 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 349 | 333 | 299 | 280 | 261 | 242 | 220 |
| 5.75 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 340 | 319 | 299 | 276 | 251 | |
| | | 5.2 | 6.4 | 7.5 | 8.7 | 9.9 | 11.0 | 12.2 | 13.3 | 14.5 | 15.7 | 16.8 | 18.0 | 19.1 | 20.3 |
| | | Peak Period, Tp [sec] | | | | | | | | | | | | | |

Usporedba ovih rezultata, prikazana na tablici 4. pokazuje sličnost u izračunu prema institutu Pacific Northwest National Laborator. Za značajnu visinu vala 1,5 m, koristeći linearnu interpolaciju, izlazna snaga električne struje je 56,5 kW, a za značajnu visinu vala 2,5 m izlazna snaga električne energije struje je 138 kW. Rezultati ovog rada za nailazne valove zamaknute 90° su za značajnu visinu 1,5 m iznosi 37,5 kW, dok za značajnu visinu 2,5 m iznosi 128,4 kW izlazne snage električne struje.

Tablica 4 Prikaz usporedbe rezultata

| H _{1/3} [m] | HydroSTAR [kW] | PNNL [kW] | % |
|-------------------------|-------------------|-----------|-------|
| 1.5 | 37.5 | 56.5 | 66.37 |
| 2.5 | 128.4 | 138 | 93.04 |

6 Zaključak

Iz navedenih rezultata vidljivo je koliko se energije može iskoristiti od oscilirajućeg valnog pretvarača. U doba kada tražimo nove izvore energije koji su oslobođeni stakleničkih plinova, ovo je jedan od perspektivnih uređaja na koji možemo računati u budućnosti. Jadransko more možda nije toliko perspektivno za ovaj način dobivanja električne energije, ali sjeverni Atlantik bi definitivno trebao iskoristiti ovakav potencijal. Negativna strana ovog pretvarača slična je kao i za ostale obnovljive izvore energije, a to je da ne možemo sa sigurnošću znati u kojem trenutku ćemo imati određenu dobavu električne energije.

LITERATURA

- [1] Čorić, V.; Prpić-Oršić J. : *Pomorstvenost plovnih objekata*; Zigo, Rijeka, 2006.
- [2] Martić, K. : *Završni rad*; Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2020.
- [3] Petrović, D. : *Završni rad*; Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2020
- [4] A. Copping, S. Geerlofs, and L.A. Hanna: Reference Model 5 (RM5): Oscillating Surge Wave Energy Converter; Pacific Northwest National Laboratory 2015
- [5] H. Behzad R. Panahi: Optimization of Bottom-hinged Flap-type Wave Energy Converter for a Specific Wave Rose; Department of Civil Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran 2017
- [6] <https://en.wikipedia.org>