Projektni indeks energetske učinkovitosti broda za prijevoz rasutog tereta

Piljić, Davor

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

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:235:554550

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Davor Piljić

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Nikola Vladimir, dipl. ing.

Student:

Davor Piljić

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se mentoru, doc. dr. sc. Nikoli Vladimiru, dr. sc. Ivici Ančiću i Maji Perčić, mag. ing. na potpori, stručnoj pomoći i savjetima pruženim tijekom izrade ovoga rada.

Davor Piljić

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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Davor Piljić** Mat. br.: 0035200047

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PROJEKTNI INDEKS ENERGETSKE UČINKOVITOSTI BRODA ZA PRIJEVOZ RASUTOG TERETA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX OF A BULK CARRIER**

Opis zadatka:

U fazi osnivanja, za sve brodove u međunarodnoj plovidbi veće od 400 GT, potrebno je provesti proračun postignutog projektnog indeksa energetske učinkovitosti (EEDI), kao i njegovu usporedbu sa zahtjevanom vrijednošću za odabrani tip broda, u svrhu izdavanja Međunarodnog certifikata energetske učinkovitosti (IEEC). Za motorni brod „STOJA", izgrađen u brodogradilištu „ULJANIK" iz Pule, potrebno je na temelju podataka iz projektne dokumentacije broda i rezultata pokusne plovidbe proračunati postignuti Projektni indeks energetske učinkovitosti broda prema Pravilima za utvrđivanje i kontrolu energetske učinkovitosti brodova, MARPOL Prilog VI. Nadalje, potrebno je analizirati utjecaj pojedinih proračunskih veličina na vrijednost EEDI-a te ukazati na potrebu eventualnih korekcija projekta kod budućih gradnji istih ili sličnih brodova.

Zadatak obuhvaća:

1. Analizu dostupne literature i upoznavanje s regulatornim okvirom u području energetske učinkovitosti brodova, s posebnim naglaskom na postupak izdavanja IEEC-a.
2. Specifikaciju elemenata brodskog energetskog sustava i definiranje svih karakterističnih parametara koji ulaze u proračun EEDI-a.
3. Proračun postignutog EEDI-a i njegova usporedba sa zahtjevanom vrijednošću.
4. Analizu i procjenu utjecaja pojedinih proračunskih veličina na vrijednost EEDI-a.
5. Ukazati na mogućnost poboljšanja projekta s aspekta energetske učinkovitosti.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu, te eventualno dobivenu stručnu pomoć.

Zadatak zadan:
29. studenog 2018.

Rok predaje rada:
1. rok: 22. veljače 2019.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.
3. rok: 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 25.2. - 1.3. 2019.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.
3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Nikola Vladimir

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

SADRŽAJ

SADRŽAJ I

POPIS SLIKA III

POPIS TABLICA IV

POPIS OZNAKA V

SAŽETAK VII

SUMMARY VIII

1. UVOD 1

2. REGULATORNI OKVIR U PODRUČJU ENERGETSKE UČINKOVITOSTI BRODOVA 3

2.1. Izmjena MARPOL-a 3

2.2. Pravno administrativni okvir 3

2.3. Pravila za proračun EEDI-a 5

2.4. Brodski plan upravljanja energetskom učinkovitošću (SEEMP) 6

3. PROJEKTNI INDEKS ENERGETSKE UČINKOVITOSTI (EEDI) I MEĐUNARODNI CERTIFIKAT ENERGETSKE UČINKOVITOSTI (IEE CERTIFIKAT) 8

3.1. Zahtijevani EEDI 8

3.2. Postignuti EEDI 12

3.3. Postupak izdavanja međunarodnog certifikata energetske učinkovitosti IEEC 18

3.3.1. Preliminarna certifikacija EEDI-a u fazi osnivanja 18

3.3.2. Završna certifikacija EEDI-a na pokusnoj plovidbi 20

3.3.3. Certifikacija EEDI-a u slučaju veće preinake 20

4. TEHNIČKE ZNAČAJKE ANALIZIRANOG BRODA 22

4.1. Opći podaci i osnovne dimenzije broda 22

4.2. Brodski energetski sustav 22

4.2.1. Glavni (pogonski) stroj 23

4.2.2. Pomoćni stroj 24

4.2.3. Kompozitni kotao 24

5. EEDI ANALIZIRANOG BRODA I NJEGOVA USPOREDBA SA ZAHTIJEVANOM VRIJEDNOŠĆU 26

5.1. Proces predviđanja krivulja snage u projektnoj fazi 26

5.2. Prognozni dijagrami 27

5.3. Izračun EEDI-a 30

6. MOGUĆNOST POBOLJŠANJA PROJEKTA S ASPEKTA ENERGETSKE UČINKOVITOSTI 33

6.1. Sustav zračnog podmazivanja 34

6.2. Utilizacija otpadne toplinske energije za proizvodnju električne energije 35

6.3. Korištenje snage vjetra 36

7. ZAKLJUČAK 37

POPIS SLIKA

Slika 1. Brod za prijevoz rasutog tereta „Stoja“ 2
Slika 2. Struktura SEEMP-a 6
Slika 3. Referentna krivulja za pojedinu fazu redukcije 9
Slika 4. Faze primjene smanjenja referentnog EEDI-a 10
Slika 5. Članovi izraza za proračun postignutog EEDI-a 18
Slika 6. Dijagram toka u postupku izdavanja IEEC-a 21
Slika 7. Principijelna shema energetskog sustava broda „Stoja“ 23
Slika 8. Dijagram toka predviđanja krivulja snage 26
Slika 9. Prognozni dijagram pri teškom balastu (modelska ispitivanja) 27
Slika 10. Prognozni dijagram pri najvećem gazu (modelska ispitivanja) 28
Slika 11. Prognozni dijagram pri teškom balastu (pokusna plovidba) 29
Slika 12. Kategorije inovativnih energetski učinkovitih tehnologija 33
Slika 13. Skica sustava zračnog podmazivanja 34
Slika 14. Utilizacija otpadne toplinske energije 35
Slika 15. Korištenje snage vjetra 36

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrijednosti parametara za određivanje EEDI referentne krivulje za različite tipove brodova 9
Tablica 2. Vrijednosti faktora smanjenja *X* (u postotcima) EEDI referentne krivulje u vremenskim intervalima za različite tipove brodova 11
Tablica 3. Koeficijent pretvorbe goriva u CO_2 16
Tablica 4. Opći podaci broda 22
Tablica 5. Značajke pogonskog (glavnog) dizelskog motora 24
Tablica 6. Značajke pomoćnog stroja 24
Tablica 7. Značajke kombiniranog kotla 25
Tablica 8. Izmjereni podaci iz prognoznog dijagrama 28

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
C_{FAE}	kg CO_2/kg goriva	faktor pretvorbe goriva u CO_2 pomoćnih strojeva
C_{FME}	kg CO_2/kg goriva	faktor pretvorbe goriva u CO_2 glavnog stroja
f_c	-	faktor smanjene zapremine
f_{eff}	-	faktor dostupnosti inovativnih energetski učinkovitih tehnologija
f_i	-	faktor smanjene nosivosti
f_i	-	korekcijski faktor posebnih konstrukcijskih značajki Broda
f_w	-	koeficijent stanja mora
DWT	t	nosivost broda
MCR_{ME}	kW	maksimalna trajna snaga motora
P'_{AEeff}	kW	ukupna snaga sustava (energetskog izvora) za proizvodnju električne energije korištenjem otpadne toplinske energije
P_{AE}	kW	snaga pomoćnih strojeva
P_{AEeff}	kW	redukcija snage za pomoćne strojeve
P_{eff}	kW	snaga inovativnih tehnologija
$P_{AEeffAL}$	kW	dodatna snaga potrebna za rad sustava za upuhivanja zraka
P_{ME}	kW	snaga motora pri 75% MCR_{ME}
P_{PTI}	kW	snaga vratilnih motora
P_{PTO}	kW	snaga vratilnih generatora

$P_{SM,max}$	kW	snaga pojedinog vratilnog motora
R_T	N	sila otpora broda
S	m^2	površina uronjenog dijela trupa broda
SFC_{AE}	g/kWh	specifična potrošnja goriva pomoćnih strojeva
SFC_{ME}	g/kWh	specifična potrošnja goriva glavnog stroja
V_{ref}	čv	referentna brzina broda
W_e	kW	električna snaga proizvedena u sustavu za korištenje toplinske energije
X	-	redukcijski faktor
η_{GEN}	-	stupanj djelovanja generatora
η_P	-	stupanj djelovanja propulzije
η_{PTI}	-	stupanj djelovanja pojedinog vratilnog motora
ρ	kg/m^3	gustoća fluida

SAŽETAK

U novije vrijeme, povećanje osviještenosti po pitanju zaštite okoliša i interes za razvoj tehnoloških rješenja koja bi doprinijela smanjenju ispuštanja štetnih plinova nije zaobišao ni brodograđevnu industriju. U fazi osnivanja broda potrebno je obratiti posebnu pozornost na energetsku učinkovitost broda. Veličina kojom se izražava takva učinkovitost naziva se projektni indeks energetske učinkovitosti (EEDI). Od 1. siječnja 2013. godine, novi brodovi moraju zadovoljiti referentnu razinu EEDI-a za određeni tip broda. Razina emisije CO_2 mora se pooštriti svakih pet godina. Zbog toga se očekuje da će EEDI potaknuti nastavak inovacija i tehnički razvoj svih komponenata koje utječu na energetsku učinkovitost broda. EEDI je izražen u gramima ugljičnog dioksida (CO_2) po prevezenoj toni i milji (što je manji EEDI brod je energetski učinkovitiji) i računa se pomoću izraza koji se temelji na tehničkim projektnim parametrima za određeni brod. U ovom radu analiziran je EEDI na primjeru broda za prijevoz rasutog tereta „Stoja“ koji je izgrađen u pulskom brodogradilištu Uljanik. Uz analizu dostupne literature, koja se prvenstveno odnosi na regulatorni okvir u području energetske učinkovitosti brodova, proveden je proračun EEDI-a za gore navedeni brod, kao i njegova usporedba sa zahtijevanom vrijednošću, oslanjajući se na proračunske veličine dobivene od brodogradilišta. Analiziran je utjecaj pojedinih proračunskih veličina na vrijednost EEDI-a, te općenito mogućnosti poboljšanja projekta s aspekta energetske učinkovitosti.

Ključne riječi: brod za prijevoz rasutog tereta; projektni indeks energetske učinkovitosti; EEDI; emisija CO_2.

SUMMARY

Recently, the increase of awareness of environmental protection and interest in the development of technological solutions to reduce the release of harmful gases has not escaped the shipbuilding industry either. Special attention has to be paid to the ship's energy efficiency during the ship's design phase. The quantity to express ship's efficiency is called the Energy Efficiency Design Index (EEDI). As of January first 2013, new ships must meet the EEDI reference level, defined for a certain type of ship. The level of CO_2 emitted must be sharpened every five years. Therefore, it is expected that EEDI will stimulate the continuos innovation and technical development of all components that will affect the energy efficiency of the ship. EEDI is expressed in grams of carbon dioxide (CO_2) per ton and mile transported (the smaller the EEDI the more energy efficient the ship is) and is calculated using a formula based on technical design parameters for a particular vessel. In this thesis, EEDI was analyzed on the example of the „Stoja“ bulk carrier that was built at the Uljanik shipyard in Pula. Along with the analysis of available literature, which is primarily concerned with the regulatory framework in the field of energy efficiency of ships, an EEDI calculation for the above-mentioned vessel was made, as well as its comparison with the required value, relying on the input data obtained from the shipyard. The impact of calculation parameters on the value of EEDI and the general improvement of the project's energy efficiency were analyzed.

Key words: bulk carrier; energy efficiency design index; EEDI; CO_2 emission.

1. UVOD

Općenito, pomorski promet danas zauzima prvo mjesto za globalni prijevoz dobara. O tome govori i činjenica da je 90% svjetske trgovine oslonjeno upravo na gospodarskom učinu pomorskog prometa kao jednog od najučinkovitijih, a ujedno i najjeftinijeg načina transporta robe i dobara. Današnji brodovi su znatno energetski učinkovitiji u odnosu na brodove građene prije, ali pomorski promet svejedno snosi veliki dio odgovornosti za narušavanje okoliša u smislu onečišćenja atmosfere ispuštanjem štetnih plinova izgaranja iz brodskih motora. Donedavno su emisije bile ograničene Međunarodnom konvencijom o sprječavanju onečišćenja s brodova (MARPOL). Međutim, Odbor za zaštitu pomorskog okoliša (MEPC) pri Međunarodnoj pomorskoj organizaciji (IMO) donio je odluku o uključivanju novog Poglavlja 4 u MARPOL-u, Prilog VI, koje se odnosi na „Pravila za energetsku učinkovitost brodova“ i kojim se uvodi Projektni indeks energetske učinkovitosti (eng. *Energy Efficiency Design Index*, EEDI) [1].

U ovom radu provedena je preliminarna analiza EEDI-a broda za prijevoz rasutog tereta „Stoja“, koji je izgrađen u pulskom brodogradilištu Uljanik, Slika 1, na temelju podataka dobivenih od samog brodogradilišta.

Općenito brodovi za rasuti teret su brodovi kojima se prevoze sipki tereti u rasutom stanju. Oni su obično izgrađeni s jednostrukom ili dvostrukom oplatom namijenjeni prvenstveno za prijevoz suhog rasutog tereta. Obično su s jednom palubom, dvodnom, uzvojnim i potpalubnim bočnim tankovima u skladištima tereta [2].

Prvi brod specijaliziran za prijevoz rasutog tereta izgrađen je 1852. godine. Sadašnja flota brodova za prijevoz rasutog tereta, koja broji 6225 brodova preko 10000 DWT, čini 40% svjetske trgovačke flote s 1,7 milijardi tona prevezenog tereta i to uglavnom ugljena, željezne rudače, žitarica i fosfata. Prosječna starost tih brodova je 13 godina, od čega su 41% brodovi mlađi od 10 godina [3]. Prema veličini brodovi za prijevoz rasutih tereta mogu se podijeliti u 6 kategorija:

1.) Mali bulk carrieri – ispod 10000 DWT,
2.) Handysize – 10000-35000 DWT,
3.) Handymax – 35000- 59000 DWT,

4.) Panamax – 60000-80000 DWT,

5.) Capesize – 80000-150000 DWT,

6.) Very large – preko 200000 DWT.



Slika 1. Brod za prijevoz rasutog tereta „Stoja“

2. REGULATORNI OKVIR U PODRUČJU ENERGETSKE UČINKOVITOSTI BRODOVA

2.1. Izmjena MARPOL-a

Unazad nekoliko godina, glavna tema rasprava Odbora za zaštitu pomorskog okoliša (MEPC) bilo je pitanje reguliranja emisije CO_2 s brodova, odnosno energetske učinkovitosti brodova kroz uvođenje projektnog indeksa energetske učinkovitosti (EEDI) brodova. Povijesno gledano, cijena goriva bila je glavni pokretač poboljšanja učinkovitosti i smanjene potrošnje goriva na trgovačkim brodovima. Kako bi se poboljšala energetska učinkovitost brodova, MEPC uvodi EEDI koji se izražava kao emisija CO_2 po prevezenoj toni i milji. Najnovije izmjene i dopune MARPOL-a Prilog VI [4], uvele su nove propise kojima se želi poboljšati energetska učinkovitost brodova kroz niz tehničkih standarda. Izmjene i dopune dio su 4. poglavlja i zahtijevaju da od 1. siječnja 2013. svaki brod posjeduje Međunarodni certifikat energetske učinkovitosti (eng. *International Energy Efficiency (IEE) Certificate*). Kako bi mogao steći IEE certifikat, brod mora udovoljavati EEDI-u i mora imati Brodski plan upravljanja energetskom učinkovitošću (eng. *Ship Energy Efficiency Management Plan*, SEEMP). SEEMP je operativna mjera za poboljšanje energetske učinkovitosti brodova i primjenjiva je na sve brodove koji imaju kapacitet GT=400, a sudjeluju u međunarodnoj plovidbi. Prema MEPC.203(62):

1.) Usvajaju se izmjene i dopune Priloga VI,
2.) Određuje se da će se izmjene i dopune smatrati prihvaćenima 1. srpnja 2012. godine, osim ako prije tog datuma se ne podnese prigovor,
3.) Poziva se relevantne administrativne organe da imaju na umu da izmjene stupaju na snagu 1. siječnja 2013.,
4.) Zahtijeva se od tajnika da distribuira primjerke rezolucije svim članicama,
5.) Poziva se sve članice da obavijeste brodovlasnike, kapetane, brodogradilišta, projektne urede, proizvođače brodskih motora, proizvođače brodske opreme o izmjenama i dopunama MARPOL-a Priloga VI.

2.2. Pravno administrativni okvir

U okviru Rezolucije MEPC.203(62) koja se odnosi na izmjene i dopune MARPOL-a Priloga VI, usvojene 15. srpnja 2011. godine, spomenuto je nekoliko relevantnih pravila koja su

neophodna za jasan uvid i pravilnu interpretaciju izmjena potrebnih za proračun EEDI-a, [4]. Navedene odredbe trebaju biti primijenjene na sve brodove (ne samo za brodove za prijevoz rasutog tereta), osim onih koji su izričito izuzeti po drugim odredbama spomenutog Priloga VI. Ostale relevantne rezolucije Odbora za zaštitu pomorskog okoliša:

- MEPC.212(63): Smjernice za metodu proračuna postignutog projektnog indeksa energetske učinkovitosti (EEDI) za nove brodove.
  - U okviru ove rezolucije opisan je postupak proračuna postignutog EEDI- a za sve tipove brodova te su navedeni izrazi prema kojima se računaju svi relevantni proračunski parametri.
- MEPC.213(63): Smjernice za razvijanje Brodskog plana upravljanja energetskom učinkovitošću broda (*Ship Energy Efficiency Management Plan* – SEEMP), [5].
  - Pravilno provođenje plana upravljanja energetskom učinkovitošću broda može znatno utjecati na energetsku učinkovitost, te su u ovoj rezoluciji opisane smjernice prema kojima se plan razvija.
- MEPC.214(63): Smjernice za nadzor i certificiranje projektnog indeksa energetske učinkovitosti (EEDI), [6].
  - U smjernicama za nadzor i certificiranje projektnog indeksa energetske učinkovitosti, opisan je, prije svega, postupak verifikacije EEDI-a u svrhu dobivanja međunarodnog certifikata energetske učinkovitosti (IEEC).
- MEPC.224(64): Izmjene i dopune za metodu proračuna postignutog projektnog indeksa energetske učinkovitosti (EEDI) za nove brodove, [7].
  - Novija rezolucija koja uključuje izmjene i dopune već postojećih smjernica za metodu proračuna EEDI-a.
- MEPC.245(66): Smjernice za metodu proračuna postignutog projektnog indeksa energetske učinkovitosti (EEDI) za nove brodove, [8].
  - Rezolucija objavljena 2014. godine, koja se odnosi na metodu proračuna postignutog projektnog indeksa, a zapravo predstavlja dorađenu verziju rezolucije MEPC.212(63).
- MEPC.251(66): Izmjene i dopune priloga VI te tehničkog koda NOX iz 2008., [9].
- MEPC.215(63): Smjernice za izračun referentne linije indeksa energetske učinkovitosti (EEDI) [10].

2.3. Pravila za proračun EEDI-a

Kod proračuna EEDI-a, računamo dvije vrijednosti: postignuti i zahtijevani EEDI.

Postignuti EEDI potrebno je proračunati za:

- svaki novi brod,
- svaki novi brod koji je bio podvrgnut značajnim preinakama,
- svaki novi ili postojeći brod koji je podvrgnut većim preinakama, da se može smatrati novim brodom.

Veće preinake su preinake kojom se:

- bitno mijenjaju dimenzije broda, nosivost ili snaga motora; ili
- mijenja tip broda; ili
- prema mišljenju verifikatora bitno produljuje životni vijek broda; ili
- brod mijenja na takav način da bi, da je brod novi, podlijegao trenutnim pravilima; ili
- bitno mijenja energetska učinkovitost broda.

Tipovi brodova koji za koje se računa postignuti EEDI:

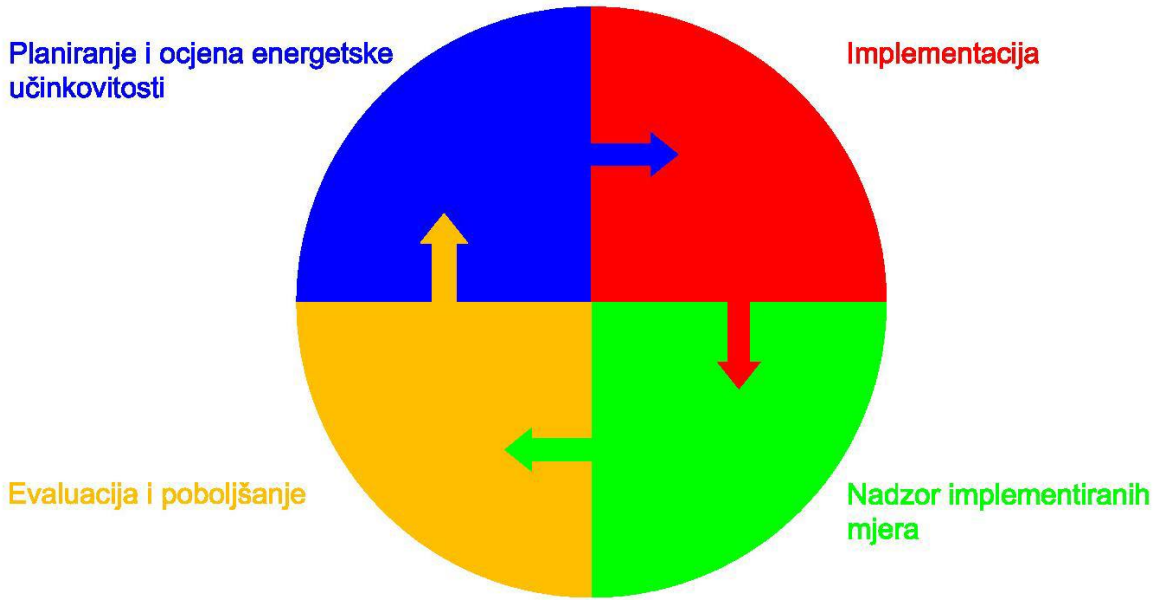
- brod za rasuti teret,
- brod za ukapljene plinove,
- tanker,
- kontejnerski brod,
- brod za opći teret,
- brod za rashlađeni teret,
- brod za mješoviti teret,
- putnički brod,
- ro-ro brod.

Postignuti EEDI se računa za svaki brod posebno. Pokazatelj je predviđene energetske učinkovitosti broda u plovidbi, i popraćen je EEDI tehničkim dokumentom koji sadrži podatke potrebne za izračun postignutog EEDI-a i uključuje postupak proračuna. Administracija ili ovlaštena organizacija provjerava postignuti EEDI prema EEDI tehničkom dokumentu.

Zahtijevani projektni indeks energetske učinkovitosti treba se proračunati za svaki brod od 400 tona bruto tonaže i više, te za svaku fiksnu i plutajuću platformu. Inače, ova pravila se ne primjenjuju na brodove koji imaju dizel-električnu propulziju, turbinsku propulziju ili hibridni energetski sustav.

2.4. Brodski plan upravljanja energetskom učinkovitošću (SEEMP)

Svaki brod mora imati na brodu plan upravljanja energetskom učinkovitošću (SEEMP). Plan upravljanja energetskom učinkovitošću broda (SEEMP) je operativna mjera kojom se uspostavlja mehanizam za poboljšanje energetske učinkovitosti broda. SEEMP također pruža pristup brodarskim tvrtkama za upravljanje učinkovitošću korištenja (potrošnje) goriva: brodova i flote tijekom plovidbe, na primjer, pomoću indikatora operativne energetske učinkovitosti (EEOI) broda kao alata za praćenje. Smjernice za razvoj SEEMP-a za nove i postojeće brodove uključuju smjernice s učinkovitom potrošnjom goriva broda, kao i smjernice za dobrovoljno korištenje EEOI-a za nove i postojeće brodove. EEOI omogućuje korisnicima mjerenje učinka svih promjena u radu, npr. poboljšano planiranje putovanja ili češće čišćenje brodskog vijka, ili uvođenje tehničkih mjera kao što su sustavi za povrat otpadne topline ili novi propeler [11]. Struktura SEEMP-a prikazana je na Slici 2.



Slika 2. Struktura SEEMP-a

Najvažnija faza u strukturi SEEMP-a je planiranje. Ona uključuje analizu trenutnog stanja upravljanja energetskom učinkovitošću na brodu i očekivana poboljšanja, pri čemu je za njegovu provedbu od velike važnosti osigurati dovoljno vremena. Nažalost, ne mogu se sve mjere primijeniti na sve brodove, čak neke mogu biti i kontradiktorne. Stoga, treba voditi računa o smjernicama "dobre prakse", o usklađenosti mjera s radom ostalih subjekata u transportnom sustavu, kao i važnosti da se posada dodatno ne opterećuje. Faza implementacije podrazumijeva izradu samog sustava implementacije prethodno planiranih mjera. Također uključuje detaljan opis načina implementacije, identifikaciju odgovorne osobe, period implementacije i čuvanje zabilješki vezanih za pojedine mjere i razloge zašto se

određene mjere ne mogu implementirati. Potrebno je pratiti spomenute mjere, pri čemu treba formirati metodu (međunarodni standard, EEOI). Konzistentno prikupljanje podataka predstavlja osnovu III. faze. Potrebno je nastojati organizirati praćenje s kopna i osigurati mogućnost odvojenog praćenja u posebnim slučajevima eksploatacije broda (potraga, spašavanje, itd.). Završne faze su vrednovanje i poboljšanje pojedine iteracije koje osiguravaju povratne informacije za sljedeći ciklus planiranja. Mogu se provoditi periodički, u tijeku nadzora [12].

3. PROJEKTNI INDEKS ENERGETSKE UČINKOVITOSTI (EEDI) I MEĐUNARODNI CERTIFIKAT ENERGETSKE UČINKOVITOSTI (IEE CERTIFIKAT)

Projektni indeks energetske učinkovitosti (EEDI) je mjera za energetsku učinkovitost brodova. Definiran je kao omjer emisije ugljičnog dioksida (CO_2) i koristi za društvo, izražene u tonama i nautičkim miljama prevezenog tereta. Ovaj indeks je razvijen kako bi omogućio ocjenu energetske učinkovitosti novih brodova. Uvođenje EEDI-a ima za cilj poboljšati energetsku učinkovitost, tj. optimizaciju potrošnje goriva pomoću projektnih i operativnih mjera koje bi rezultirale smanjenjem emisija CO_2 nastalih iz goriva procesom izgaranja.

3.1. Zahtijevani EEDI

Za svaki novi brod u međunarodnoj plovidbi kapaciteta GT=400 i veći potrebno je izračunati Postignuti EEDI koji ne smije biti veći od Zahtijevanog EEDI-a. Zahtijevani EEDI računa se za svaki novi brod ili postojeći brod na kojemu su izvršene značajne preinake ovisno o vrijednosti EEDI referentne krivulje i faktoru smanjenja *X* te se razlikuje za svaki brod na osnovi njegovoga tipa i nosivosti.

Procijenjena vrijednost indeksa u Smjernicama za proračun referentne linije računa se prema izrazu [10]:

$$EEDI_{procijenjeni} = 3{,}1144 \times \frac{190 \times \sum_{i=1}^{NME} P_{MEi} + 215 \times P_{AE}}{DWT \times V_{ref}} \qquad (1)$$

P_{MEi} – snaga pogonskog(ih) stroja pri 75% MCR (maksimalne trajne snage)

P_{AE} – snaga pomoćnih strojeva

DWT – nosivost

V_{ref} – referentna brzina.

Vrijednost EEDI referente krivulje se računa prema izrazu (4), danom niže, pri čemu su parametri *a, b* i *c* definirani u [13], Tablica 1.

$$Postignuti\ EEDI \leq Zahtijevani\ EEDI \qquad (2)$$

$$Zahtijevani\ EEDI = (1 - X\ /100) \times Vrijednost\ EEDI\ referentne\ krivulje \quad (3)$$

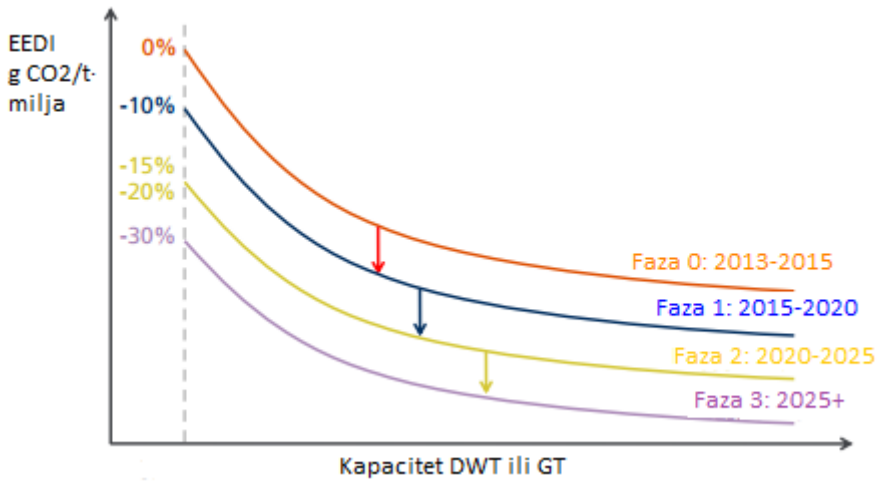
$$Vrijednost\ EEDI\ referentne\ krivulje = a \times b^{-c} \quad (4)$$

Tablica 1.Vrijednosti parametara za određivanje EEDI referentne krivulje za različite tipove brodova

TIP BRODA	***a***	***b***	***c***
Brod za rasuti teret	961,79	DWT broda	0,477
Brod za ukapljene plinove	1120,00	DWT broda	0,456
Tanker	1218,80	DWT broda	0,488
Kontejnerski brod	147,22	DWT broda	0,201
Brod za opći teret	107,48	DWT broda	0,216
Brod za rashlađeni teret	227,01	DWT broda	0,244
Brod za mješoviti teret	1219,00	DWT broda	0,488

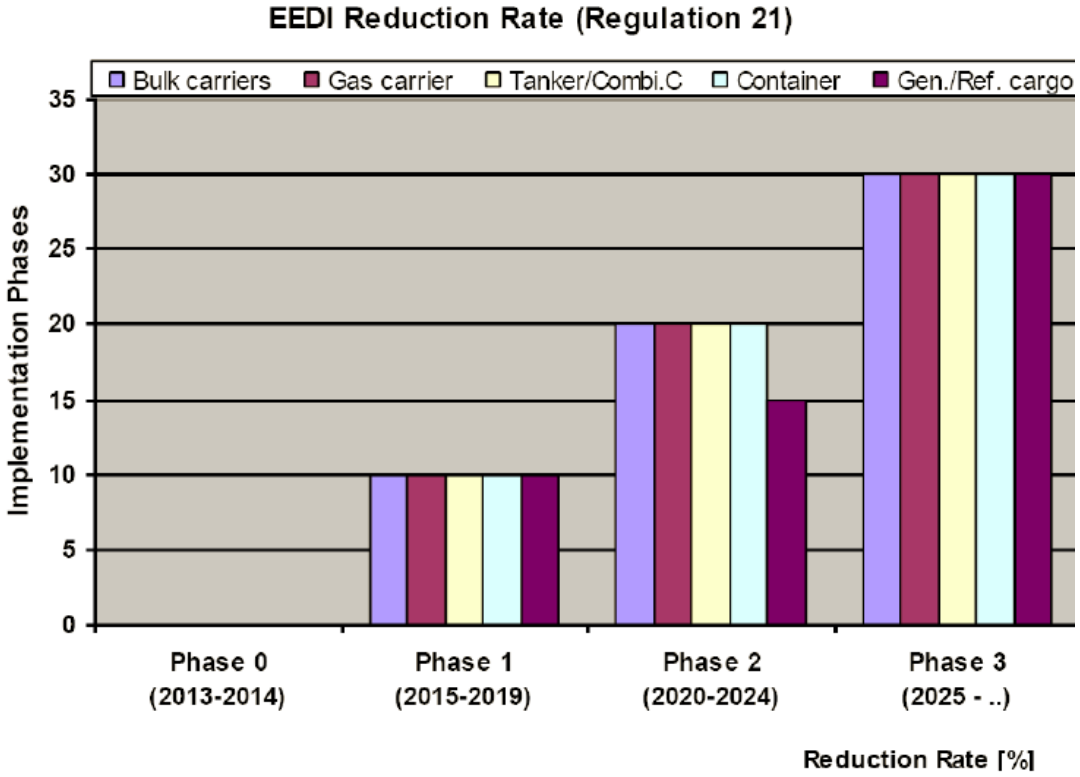
Ukoliko se brod može svrstati u više od gore navedenih tipova, u proračun zahtijevanog EEDI-atreba uvrstiti podatke koji rezultiraju manjim indeksom.

Na Slici 3 prikazane su referentne krivulje za proračun zahtijevanog EEDI-a za brodove za prijevoz rasutog tereta na osnovu nosivosti uz faktor smanjenja za svaku pojedinu fazu.



Slika 3. Referentna krivulja za pojedinu fazu redukcije

Faktor smanjenja X predstavlja smanjenje vrijednosti referentne krivulje u određenim vremenskim intervalima, Slika 4, naveden u Tablici 2.



Slika 4. Faze primjene smanjenja referentnog EEDI-a

Tablica 2. Vrijednosti faktora smanjenja *X* (u postotcima) EEDI referentne krivulje u vremenskim intervalima za različite tipove brodova

TIP BRODA	**VELIČINA**	**FAZA 0: 1.1.2013. – 31.12.2014.**	**FAZA 1: 1.1.2015. – 31.12.2019.**	**FAZA 2: 1.1.2020. – 31.12.2024.**	**FAZA 3: OD 1.1.2025.**
Brod za rasuti teret	≥20000 DWT	0	10	20	30
	10000 -20000 DWT	n/p	0-10	0-20	0-30
Brod za ukapljene plinove	≥10000 DWT	0	10	20	30
	2000 – 10000 DWT	n/p	0-10	0-20	0-30
Tanker	≥20000 DWT	0	10	20	30
	4000 – 20000 DWT	n/p	0-10	0-20	0-30
Kontejnerski brod	≥15000 DWT	0	10	20	30
	10000 – 15000 DWT	n/p	0-10	0-20	0-30
Brod za opći teret	≥15000 DWT	0	10	20	30
	3000 – 15000 DWT	n/p	0-10	0-20	0-30
Brod za rashlađeni teret	≥5000 DWT	0	10	20	30
	3000 – 5000 DWT	n/p	0-10	0-20	0-30

Potrebno je naglasiti da se faktor smanjenja određuje linearno u ovisnosti o veličini broda. Manja vrijednost se primjenjuje na manje brodove.

3.2. Postignuti EEDI

EEDI je prvi put prikazan kao CO_2 indeks u MEPC-u od strane predstavnika Japana [14]. Vrijednost indeksa emisija CO_2 bila je prikazana u gramima ugljičnog dioksida po prevezenoj toni i milji ($g\,CO_2/t{\cdot}nm$). Ovaj izraz je prikladan za široku uporabu i razvijen je kako bi omogućio preliminarnu procjenu izvedbe broda u fazi projektiranja. Japanski članovi radne grupe ponudili su sljedeću formulaciju:

$$Postignuti\ projektni\ CO_2\ indeks = \frac{C_F \times SFC \times P}{Kapacitet \times V_{ref}} \tag{5}$$

Danski članovi proširili su japanske ideje, te su razložili količinu ispuštenog ugljičnog dioksida na dio koji je emitiran radom strojeva porivnog sustava broda, te na dio koji se odnosi na pomoćne strojeve [14].

$$Postignuti\ projektni\ CO_2\ indeks = \frac{\prod_{j=1}^{M} f_i \sum_{i=1}^{NME} C_{FMEi} \times P_{MEi} + \prod_{k=1}^{L} f_k \sum_{i=1}^{NME} C_{FAEi} \times SFC_{FAEi} \times P_{AEi}}{Kapacitet \times V_{ref}} \tag{6}$$

Sagledavanjem ovih dviju formulacija, Odbor za zaštitu pomorskog okoliša usvaja novi izraz za proračun CO_2 indeksa, koji se temelji na predloženom izrazu danskih članova radne grupe, uz uvođenje korekcijskog faktora f_w koji se odnosi na vremenske uvjete.

$$Projektni\ CO_2\ indeks\ novog\ broda = \frac{\left(\prod_{j=1}^{M} f_j\right)\left(\sum_{j=1}^{NME} C_{FMEi} \times SCF_{FMEi} \times P_{MEi}\right)}{Kapacitet \times V_{ref} \times f_w} + \frac{\left(\prod_{k=1}^{L} f_k\right)\left(\sum_{j=1}^{NAE} C_{FAEi} \times SFC_{FAEi} \times P_{AEi}\right)}{Kapacitet \times V_{ref} \times f_w} \tag{7}$$

Nakon usvajanja gore navedenog izraza, MEPC odlučuje preciznije definirati svaku od varijabli i njihovu primjenu na različitim vrstama brodova.

$$Projektni\,CO_2\,indeks\,novog\,broda = \frac{\left(\sum_{j=1}^{NME} C_{FMEi} \times SCF_{FMEi} \times P_{MEi}\right) + \left(\sum_{j=1}^{NAE} C_{FAEi} \times SFC_{FAEi} \times P_{AEi}\right)}{Kapacitet \times V_{ref} \times f_w} - \frac{\left(\sum_{i=1}^{NAE} \times f_{eff} \times C_{FAEi} \times SFC_{FAEi} \times P_{AEi}\right)}{Kapacitet \times V_{ref} \times f_w} \tag{8}$$

Zaključkom na 58. sjednici MEPC-a, CO_2 indeks postaje Projektni indeks energetske učinkovitosti (EEDI). U proračunu je uzeto u obzir dodavanje i/ili oduzimanje snage na vratilu, koja se temelji na tehnologiji utilizacije otpadne topline. Faktor f_i dodan je u nazivniku radi posebnih konstrukcijskih značajki pojedinih brodova, [14].

$$EEDI = \frac{\left(\prod_{j=1}^{M} f_j\right)\left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \times C_{FME(i)} \times SFC_{ME(i)}\right) + \left(P_{AE} \times C_{FAE} \times SFC_{AE}\right)}{f_i \times f_c \times f_i \times Kapacitet \times V_{ref} \times f_w} + \frac{\left(\left(\prod_{j=1}^{M} f_j \times \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \times P_{AEeff(i)}\right) \times C_{FAE} \times SFC_{AE}\right)}{f_i \times f_c \times f_i \times Kapacitet \times V_{ref} \times f_w} - \frac{\left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \times P_{eff(i)} \times C_{FME} \times SFC_{FME}\right)}{f_i \times f_c \times f_i \times Kapacitet \times V_{ref} \times f_w} \tag{9}$$

gdje su:

- P_{ME} – 75% MCR (maksimalna trajna snaga) instaliranih glavnih strojeva nakon oduzimanja snage vratilnih generatora, kW;

$$P_{ME} = 0,75\% P_{MCR}$$

U slučaju postavljanja generatora na vratilu, $P_{PTO(i)}$ iznosi 75% predviđene izlazne električne snage pojedinog generatora. U slučaju da je generator spojen na parnu turbinu faktor 0,75 zamjenjuje se faktorom 0,83. Za proračun učinka vratilnog generatora postoje dvije opcije:

1) Najveći mogući odbitak od sume $P_{ME(i)}$ ne smije biti veći od P_{AE}.

$$\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} = 0,75 \times \left(\sum MCR_{ME(i)} - \sum P_{PTO(i)} \right) \tag{10}$$

$$0,75 \times \sum P_{PTO(i)} \leq P_{AE} \tag{11}$$

2) Ukoliko je izlazna snaga postavljenog glavnog stroja veća od propulzijske snage ograničene tehničkim mjerama, vrijednost $\sum P_{ME(i)}$ tada treba iznositi 75% snage potrebne za održavanje referentne brzine.

- P_{AE} – snaga pomoćnih motora potrebna isključivo za podmirenje energetskih potreba sustava propulzije i potrebe smještaja pri normalnom stanju plovidbe, kW;

Za brodove, čija je ukupna snaga porivnog sustava iznad 10 MW, snaga pomoćnih motora računa se prema izrazu (12), a za brodove čija je ukupna snaga porivnog sustava manja, računa se prema izrazu (13):

$$P_{AE_{(\sum MCR \geq 10000\,kW)}} = \left(0,025 \times \left(\sum_{i=1}^{nME} MCR_{ME(i)} + \frac{\sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)}}{0,75} \right) \right) + 250 \tag{12}$$

$$P_{AE_{(\sum MCR \leq 10000\,kW)}} = \left(0,05 \times \left(\sum_{i=1}^{nME} MCR_{ME(i)} + \frac{\sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)}}{0,75} \right) \right) \tag{13}$$

- P_{PTI} – 75% nominalne snage instaliranih vratilnih motora podijeljene s prosječnim stupnjem korisnosti dizel-električnih agregata, kW;

U slučaju postavljanja vratilnog motora P_{PTI} iznosi 75% predviđene snage svakog pojedinog vratilnog motora podijeljen sa odgovarajućim stupnjem djelovanja generatora, kako je navedeno u sljedećem izrazu:

$$\sum P_{PTI(i)} = \frac{\sum 0,75 \times P_{SM,\max(i)}}{\eta_{Gen}} \tag{14}$$

gdje je:

$P_{SM;\max(i)}$ – snaga pojedinog vratilnog motora

η_{Gen} – srednja vrijednost faktora korisnosti generatora

Snaga propulzije pri kojoj je mjerena referentna brzina iznosi:

$$\sum P_{ME(i)} + \sum P_{PTI(i),Shaft} \tag{15}$$

gdje je:

$$\sum P_{PTI(i),Shaft} = \sum \left(0,75 \times P_{SM,\max(i)} \times \eta_{PTI(i)}\right) - \eta_{PTI(i)} \tag{16}$$

$\eta_{PTI(i)}$ – faktor korisnosti pojedinog vratilnog motora.

Obnovljena mehanička energija vratilnog voda ne uzima se u obzir pri proračunu EEDI-a, osim ako je učinak takve tehnologije izravno vezan uz referentnu brzinu.

- P_{AEeff} – smanjenje snage pomoćnih motora zbog inovativnih energetski učinkovitih električnih tehnologija, kW;

- P_{eff} – doprinos inovativnih energetski učinkovitih mehaničkih tehnologija pri 75% PMCR glavnog stroja, kW;

- C_F – koeficijent pretvorbe goriva u CO_2, kg CO_2/kg goriva. Koeficijenti su prikazani u Tablici 3.

Tablica 3.Koeficijent pretvorbe goriva u CO_2

Vrsta goriva	Referenca	Sadržaj ugljika	C_F (t CO_2 / t gorivo)
Plavi dizel (eng.*Eurodiesel Blue*)	ISO 8217 gradacija DMX do DMB	0,8744	3,206
Lako dizelsko gorivo (eng. *Light Fuel Oil*, LFO)	ISO 8217 gradacija RMA do RMD	0,8594	3,151
Teško dizelsko gorivo (eng. *Heavy Fuel Oil*, HFO)	ISO 8217 gradacija RME do RMK	0,8493	3,1114
Ukapljeni naftni plin – UNP (eng. *Liquefied Petroleum Gas*, LPG)	Propan	0,8128	3,000
	Butan	0,8264	3,030
Ukapljeni prirodni plin – UPP (eng. *Liquefied Natural Gas*, LNG)	Metan	0,7500	2,750

- SFC – specifična potrošnja goriva, g/kWh – koristi se podatak iz NOx tehničkog dokumenta korigiran na standardne uvjete;

Ukoliko je brod opremljen sa više od jednog pogonskog stroja, C_F i SFC se računaju kao osrednjene vrijednosti u odnosu na sve pogonske strojeve.

- f_j – korekcijski faktor zbog posebnih konstrukcijskih značajki broda,
- f_i – faktor smanjene nosivosti zbog tehničkih ili regulatornih ograničenja,
- f_c – korekcijski faktor smanjenog volumena,
- f_l – faktor smanjene nosivosti zbog opreme za teret,

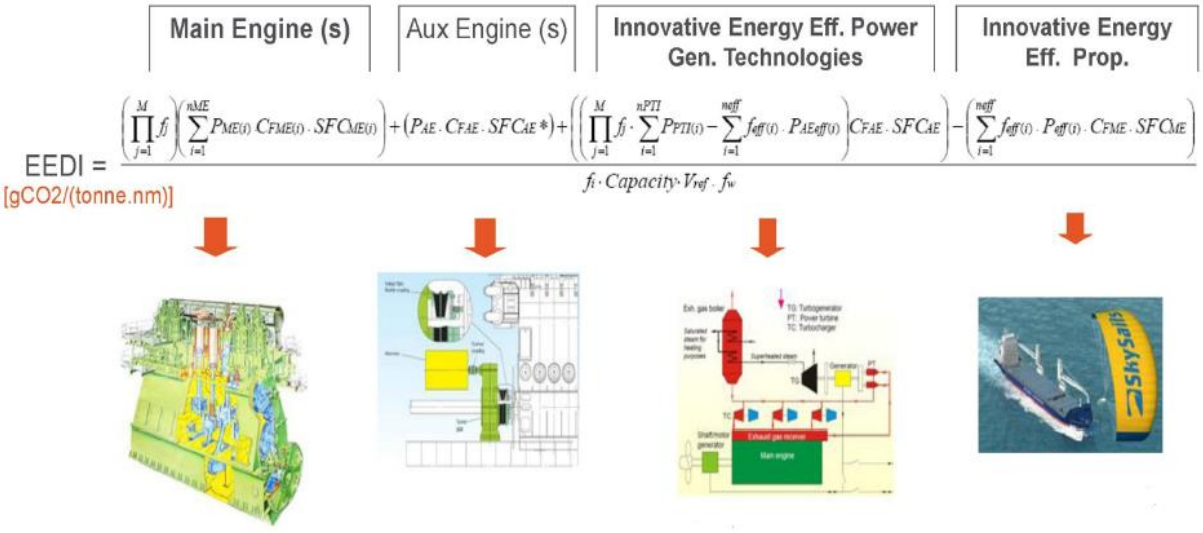
- f_w – faktor stanja mora,;
- f_{eff} – faktor dostupnosti inovativnih energetski učinkovitih tehnologija,
- Kapacitet
  - *DWT* – za brodove za sipki teret, tankere, brodove za ukapljene plinove, ro-ro teretne brodove, ro-ro putničke brodove, brodove za opći teret, brodove za rashlađeni teret i brodove za mješoviti teret,
  - *GT* za putničke brodove,70% DWT za kontejnerske brodove,
- V_{ref} – brzina koja se može postići u referentnim uvjetima, tj. pri P_{ME} i punom kapacitetu uz pretpostavku mirnog mora i bez vjetra, čv.

Potrebno je napomenuti da ovaj izraz nije primjenjiv za brodove koji imaju dizel-električnu propulziju, turbinsku propulziju i hibridne propulzijske sustave, izuzev putničkih brodova i brodova za prijevoz prirodnog ukapljenog plina (LNG carrier). Također treba naglasiti da mehanička energija dobivena utilizacijom otpadne toplinske energije koja se direktno prenosi na pogonsko vratilo se ne uzima u proračunu.

Izraz za EEDI može se razložiti u četiri zasebne cjeline, kao što je prikazano na Slici 5.

Ti članovi odnose se redom na:

1.) Glavni stroj – često najveći potrošač energije na brodu.
2.) Pomoćne strojeve – snaga pomoćnih strojeva odnosi se isključivo na snagu potrebnu za podmirenje energetskih potreba pogonskog stroja, propulzijskog sustava i života (boravka) na brodu.
3.) Inovativne energetski učinkovite tehnologije – uzima se u obzir snaga vratilnog motora te smanjenje pomoćne snage (snage pomoćnih strojeva) kao rezultat primjene inovativnih, energetski učinkovitih tehnologija.
4.) Doprinos mehaničkih inovativnih energetski učinkovitih tehnologija - efektivno smanjenje snage propulzije kao rezultat primjene inovativnih energetski učinkovitih tehnologija za proizvodnju mehaničke energije (kod 75% MCR).



Slika 5. Članovi izraza za proračun postignutog EEDI-a

3.3. Postupak izdavanja međunarodnog certifikata energetske učinkovitosti IEEC

Pregled i certificiranje EEDI-ja [15] potrebno je provesti u dvije faze:

- preliminarna certifikacija u fazi projektiranja,

- završna certifikacija na pokusnoj plovidbi.

3.3.1. Preliminarna certifikacija EEDI-a u fazi osnivanja

Za preliminarnu verifikaciju u fazi projektiranja podnositelj zahtijeva verifikatoru treba dostaviti EEDI tehnički dokument koji sadrži sve informacije potrebne za verifikaciju (i druge relevantne dokumente). Tehnička dokumentacija EEDI-a mora biti napisana barem na engleskom jeziku. EEDI tehnički dokument treba sadržavati:

- Nosivost (DWT) ili bruto tonažu (GT) za putničke i ro-ro brodove, maksimalnu trajnu snagu (MCR) porivnih i pomoćnih motora, referentnu brzinu broda (*Vref)* , tip goriva, specifičnu potrošnju goriva (SFC) porivnih (75% MCR) i pomoćnih strojeva (50% MCR), tablicu potrošnje električne energije.
- Procijenjene krivulje snage porivnog motora i brzine broda za najveće stanje krcanja i za uvjete pokusne plovidbe.

- Osnovne podatke o brodu, vrstu broda i ostale relevantne informacije za klasificiranje broda u određeni tip, oznaku klase i opis porivnog sustava i sustava proizvodnje i distribucije električne energije na brodu.
- Krivulje snage otpora u fazi projektiranja.
- Opis opreme za uštedu energije.
- Izračunatu vrijednost postignutog EEDI-a uključujući sažetak izračuna, koja bi trebala sadržavati najmanje svaku vrijednost izračunatog parametra i proces izračuna koji se koristi za određivanje postignutog EEDI-a.
- Izračunatu vrijednost postignutog $EEDI_{weather}$ i f_w vrijednosti (ne jednake 1,0), ako su te vrijednosti izračunate na temelju smjernica.

Ako su na brodu ugrađeni motori s dvostrukim spremnikom goriva pogonjeni na plin, treba koristiti C_F koeficijent i specifičnu potrošnju plinskog goriva. Kako bi to potvrdili, potrebno je verifikatoru dostaviti sljedeće informacije:

- Upotrebu isparenog plina ili kapacitet spremnika za plinsko gorivo i kapacitet spremnika za skladištenje loživog ulja.
- Podatke o uređajima za opskrbu gorivom za gorivo koje je namijenjeno za pogon broda.
- Specifičnu potrošnju goriva glavnog i pomoćnog motora treba odabrati iz odobrene tehničke datoteke NOx i ispraviti na vrijednost koja odgovara standardnim referentnim uvjetima ISO-a koristeći standardnu donju kaloričnu vrijednost loživog ulja (42,700 kJ / kg).

Za brodove na koje se primjenjuje propis 21 MARPOL-a Prilog VI [4] krivulje snage koje se koriste za prethodnu provjeru u fazi projektiranja trebaju se temeljiti na pouzdanim rezultatima modelskih ispitivanja.

Dodatne informacije koje verifikator može zahtijevati od podnositelja:

- Opis opreme za modelska ispitivanja. To uključuje ime institucije, dimenzije bazena, zapise s modelskih ispitivanja,
- Nacrt rebara i uzdužne presjeke modela i broda za ocjenu sličnosti i verifikaciju prikladnosti opreme za provedbu ispitivanja,
- Masu lakog broda i tablicu masa tereta,
- Detaljan izvještaj o metodi i rezultatima modelskog ispitivanja,

- Detaljan proračun brzine broda, koji bi trebao uključivati procjenu na temelju iskustvenih parametara kao što su koeficijent hrapavosti i koeficijent sustrujanja.

3.3.2. Završna certifikacija EEDI-a na pokusnoj plovidbi

Prije ispitivanja na pokusnoj plovidbi, verifikatoru treba dostaviti sljedeće dokumente: opis postupka ispitivanja koji će se koristiti za ispitivanje brzine, konačnu tablica mase tereta i izmjerenu masu lakog broda, presliku NOx tehničkog doumenta, prema potrebi.

Verifikator treba biti prisutan na pokusnoj plovidbi i potvrditi:

- Porivni sustav i sustav opskrbe energijom, pojedinosti o motorima i druge relevantne stavke opisane u tehničkoj dokumentaciji EEDI-a,
- Gaz i trim broda,
- Stanje mora,
- Snagu na vratilu i broj okretaja glavnog stroja.

Trim i gaz broda moraju se potvrditi mjerenjima prije pokusne plovidbe. Brzinu broda i morske uvjete treba mjeriti u skladu s ISO 15016: 2002 [16].

Snagu porivnog stroja treba mjeriti mjeračem snage na vratilu ili metodom koju proizvođač motora preporučuje, a verifikator odobrava. Druge metode mogu biti prihvatljive uz suglasnost brodovlasnika i brodograditelja i uz odobrenje verifikatora. Podnositelj bi trebao razviti krivulje snage na temelju izmjerene brzine broda i izmjerene snaga glavnog porivnog stroja. Podnositelj bi trebao usporediti krivulje snage dobivene na temelju rezultata pokusne plovidbe i procijenjene krivulje snage u fazi projektiranja. U slučaju odstupanja, EEDI treba ponovno izračunati.

3.3.3. Certifikacija EEDI-a u slučaju veće preinake

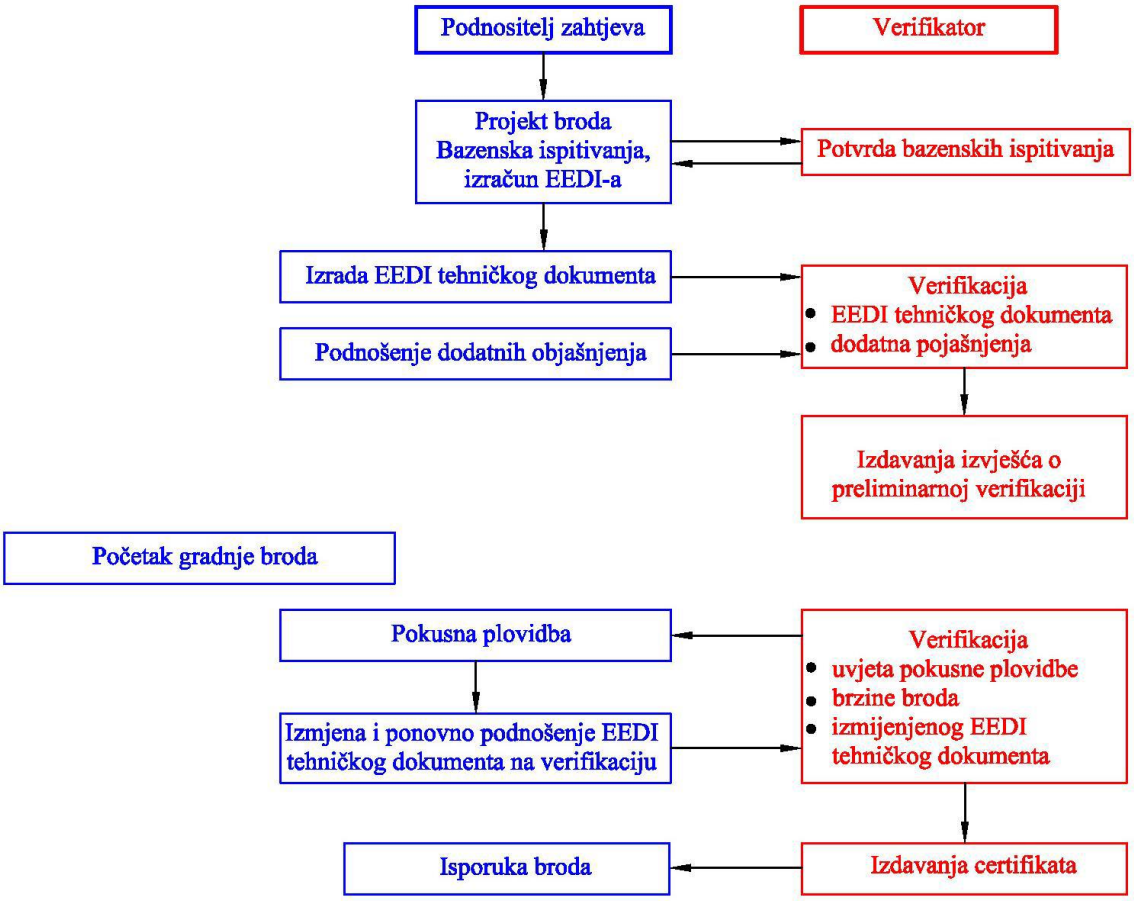
U slučajevima kada se na brodu izvrši veća preinaka, brodovlasnik treba dostaviti verifikatoru zahtjev za dodatni nadzor s tehničkom dokumentacijom EEDI-a na temelju preinake i drugih relevantnih dokumenata.

Ti dokumenti trebaju sadržavati:

- dokumente koji objašnjavaju pojedinosti preinake,
- EEDI parametre koji su se promijenili nakon preinake,
- razloge za druge promjene u tehničkoj dokumentaciji EEDI-a, ako postoje,
- izračunatu vrijednost postignutog EEDI-a sa sažetkom izračuna,

Verifikator treba pregledati novu tehničku dokumentaciju EEDI-a i provjeriti postupak izračuna postignutog EEDI-a kako bi se potvrdilo da je ona tehnički ispravna i razumna te da slijedi pravilo 20 Priloga VI MARPOL-a i Smjernice za izračun EEDI-a.

Postupak izdavanja IEEC certifikata može se prikazati dijagramom toka, kao što je prikazano na Slici 6:



Slika 6. Dijagram toka u postupku izdavanja IEEC-a

4. TEHNIČKE ZNAČAJKE ANALIZIRANOG BRODA

Analizirani motorni brod „Stoja“ ima nosivost 51888 t .Važno je napomenuti da je nosivost parametar koji ulazi u proračun EEDI-a, te je poželjno imati što veću nosivost jer će brod kao cjelina biti učinkovitiji ukoliko može uz određenu snagu pogonskoga stroja (koji je glavni potrošač energije na brodu) prevesti što više tereta.

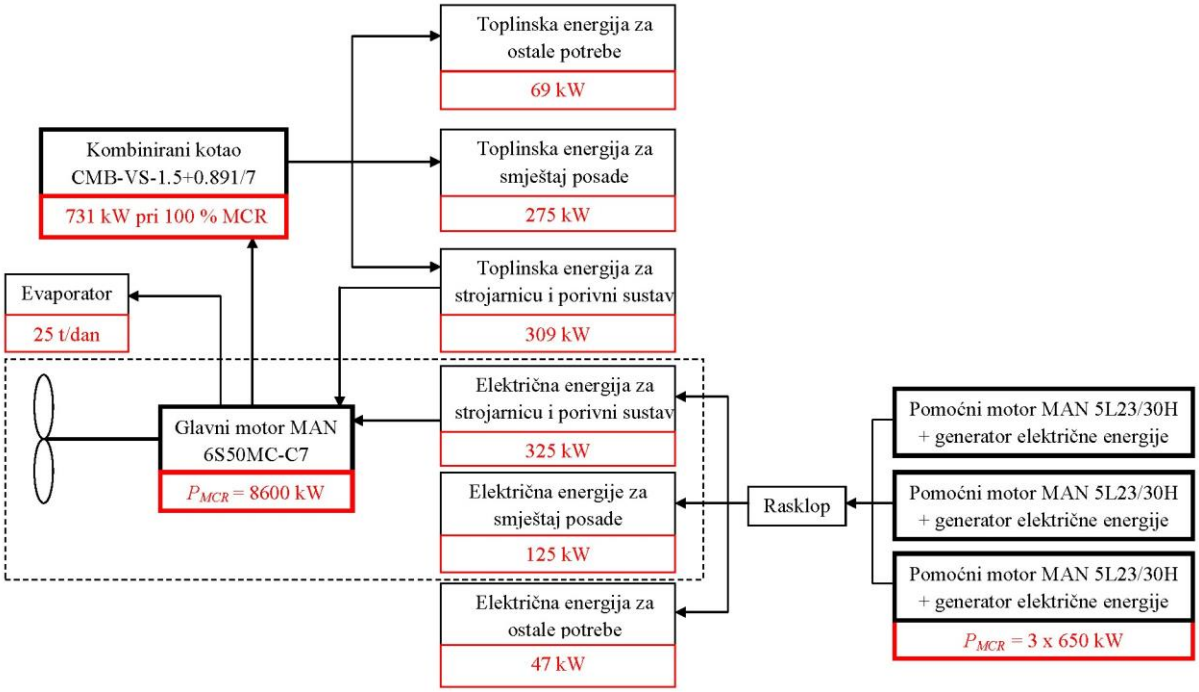
4.1 Opći podaci i osnovne dimenzije broda

Tablica 4.Opći podaci broda

BRODOGRADILIŠTE	**BRODOGRADILIŠTE ULJANIK, REPUBLIKA HRVATSKA**
Tip broda	Brod za rasuti teret
Duljina preko svega, L_{OA}	189,90 m
Duljina između okomica, L_{PP}	182,00 m
Širina, konstruktivna, B	32,24 m
Visina, konstruktivna, H	17,10 m
Gaz na ljetnoj vodnoj liniji, najveći, T_{max}	12,35 m
Nosivost pri tom gazu (DWT)	51888 t
Masa broda (LWT)	10236 t
Bruto tonaža	30092 GT

4.2 Brodski energetski sustav

Pri proračunu EEDI-a jako je važno poznavati brodski energetski sustav broda. To je skup strojeva i uređaja za proizvodnju, pretvorbu i prijenos energije na brodu, koji se sastoji od niza elemenata kao što su: motori s unutarnjim izgaranjem, parni kotao, elektromotori itd. U proračunu je potrebno uzeti u obzir sve relevantne potrošače energije, te eventualni doprinos snaga dobivenih inovativnim energetski učinkovitim tehnologijama. Na Slici 7 prikazana je pojednostavljena generička shema brodskog energetskog sustava, u kojoj su crtkanim okvirom odvojeni elementi koji ulaze u proračun EEDI-a.



Slika 7. Principijelna shema energetskog sustava broda „Stoja“

4.2.1. Glavni (pogonski) stroj

U brod je ugrađen jedan dizelski motor MAN B&W tip 6S50MC-C7 proizveden u tvornici dizelskih motora „Uljanik Strojogradnja“. Pogonski motor je brodski, dizelski, sporokretni, prekretni, dvotaktni motor s križnom glavom. Trajna eksploatacijska snaga motora (eng. *Continuous service rating*, CSR) iznosi 85% MCR, tj. 7300 kW. Motor je predviđen da koristi teško dizelsko gorivo viskoznosti do 700 cSt pri 50 °C (RMK 700) u svim uvjetima, tj. pri pokretanju, zaustavljanju, manevrima, kao i pri plovidbi otvorenim morem. Garantirana specifična potrošnja goriva na probnom stolu pri 100 % MCR iznosi 181,56 g/kWh u uvjetima prema ISO 3046/3-2006 (1000 mbar okolišni tlak, 25 °C temperatura okoliša) za gorivo donje ogrjevne vrijednosti 42700 kJ/kg.

Tablica 5. Značajke pogonskog (glavnog) dizelskog motora

PROIZVOĐAČ	**ULJANIK STROJOGRADNJA**
Tip	MAN B&W 6S50MC-C7
Maksimalna trajna snaga (P_{MCR})/broj okretaja	8600 kW pri 121 o/min
Broj cilindara	6
Promjer cilindra	500 mm
Hod stapa	2000 mm
Testni ciklus	E3
SFC pri 75 % P_{MCR}, nekorigirano	178,2 g/kWh
SFC pri 75 % P_{MCR}, korigirano na ISO uvjete	179,3 g/kWh
Komada	1
Vrsta goriva (na probnom stolu proizvođača)	brodsko lako dizelsko gorivo (MDO)

4.2.2. Pomoćni stroj

Tablica 6. Značajke pomoćnog stroja

PROIZVOĐAČ	ADRIADIESEL
Tip	MAN 5L23/30H
Maksimalna trajna snaga (P_{MCR})/broj okretaja	650 kW pri 720 o/min
Testni ciklus	D2
SFC pri 50 % P_{MCR}, nekorigirano	208,7 g/kWh
SFC pri 50 % P_{MCR}, korigirano na ISO uvjete	206,9 g/kWh
Broj komada	3
Vrsta goriva	brodsko lako dizelsko gorivo (MDO)

4.2.3. Kompozitni kotao

Predviđeno je da se ukupno potrebna količina pare proizvodi u kombiniranom, brodskom, pomoćnom kotlu kod kojega se u istom kućištu para proizvodi korištenjem toplinske energije ispušnih plinova glavnog brodskog motora i/ili izgaranjem goriva u ložištu kotla.

Proizvođač ugrađenog kotla je TPK-NOVA. Oznaka kotla je CMB-VS-1.5+0,891/7. Kotao je kompozitni, cilindrični, vertikalni.

Projektom predviđeni ukupni toplinski učin kotla iznosi 2391 kg/h suhozasićene pare 7 bar pri 85 % P_{MCR} (Tablica 7).

Tablica 7. Značajke kombiniranog kotla

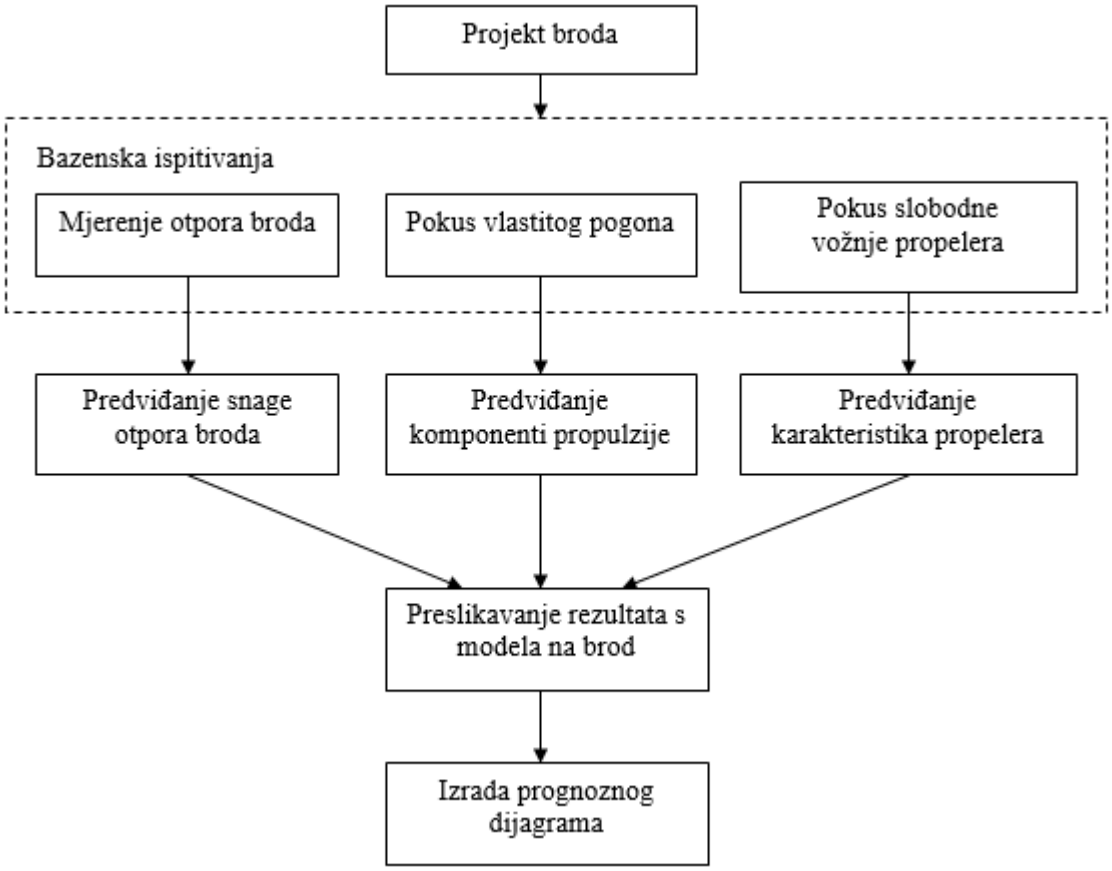
Opći podaci	Radni TLAK		7 bar	
	Temperatura suhozasićene pare		170,4 °C	
	Maksimalni tlak		9 bar	
Loženi dio	Učin kotla		1500 kg/h	
	Površina za izmjenu topline		19 m^2	
	Temperatura dimnih plinova na izlazu		350 °C	
Utilizacijski dio	Površina za izmjenu topline		228,2 m^2	
	P_{MCR}	100 %	85 %	75 %
	Učin kotla	1275 kg/h	891 kg/h	686 kg/h
	Protok dimnih plinova	77100 kg/h	69000 kg/h	63600 kg/h
	Temperatura dimnih plinova na ulazu u kotao	241,4 °C	225 °C	220 °C
	Temperatura dimnih plinova na izlazu iz kotla	202,7 °C	194,7 °C	194,7 °C

5. EEDI ANALIZIRANOG BRODA I NJEGOVA USPOREDBA SA ZAHTIJEVANOM VRIJEDNOŠĆU

5.1. Proces predviđanja krivulja snage u projektnoj fazi

Modelska ispitivanja su provedena za sličan brod (nov. 466 i 467 „Brodosplit“). Provedena su sljedeća modelska ispitivanja, kao što je prikazano na Slici 8:

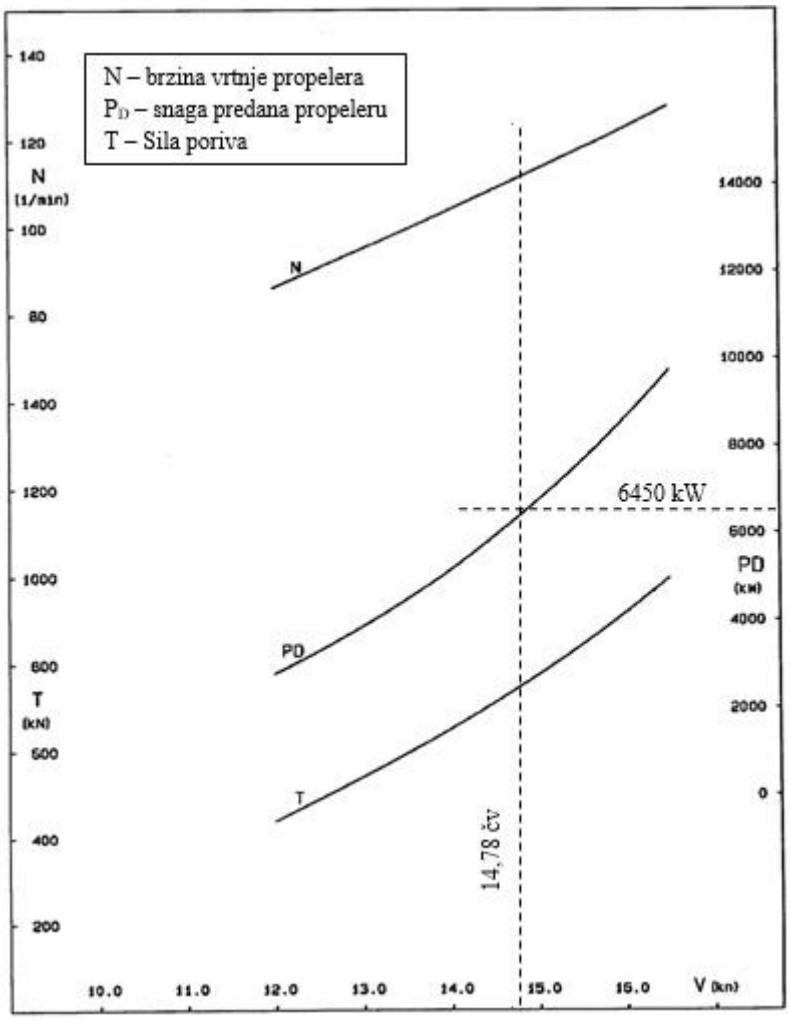
- pokus slobodne vožnje vijka,
- mjerenje otpora broda (pri projektnom gazu, teškom balastu, lakom balastu i pri najvećem gazu),
- pokus vlastitog pogona (pri projektnom gazu, teškom balastu, lakom balastu i pri najvećem gazu),



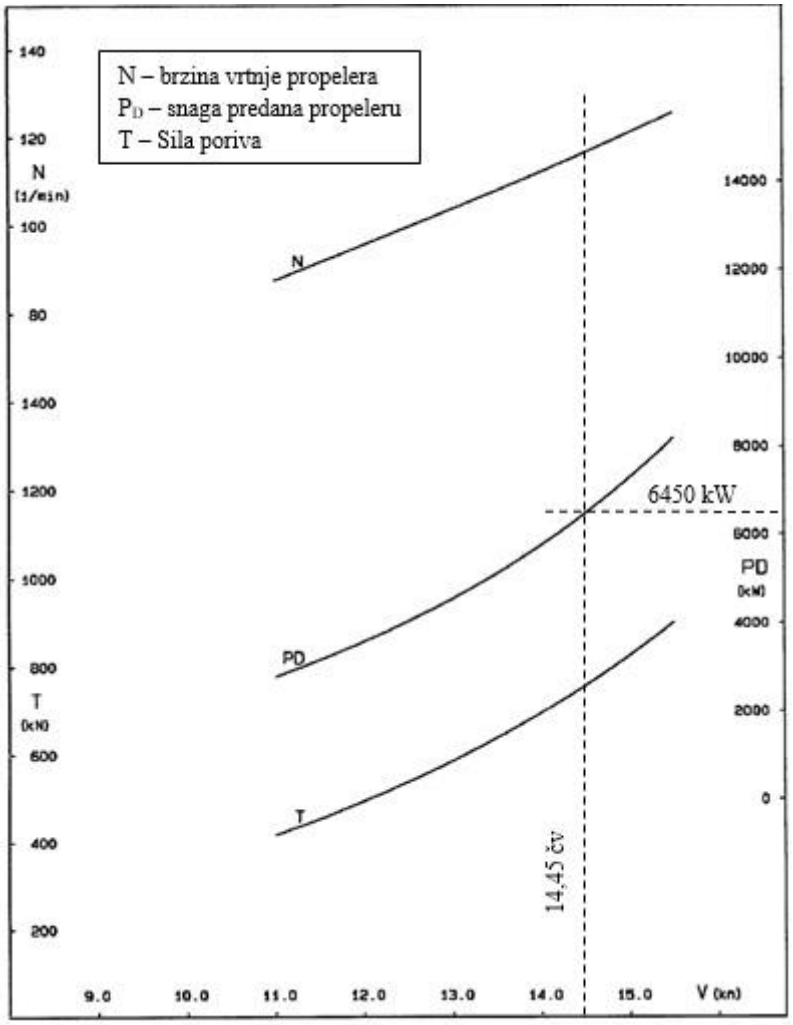
Slika 8. Dijagram toka predviđanja krivulja snage

5.2. Prognozni dijagrami

Na temelju podataka modelskih ispitivanja izrađen je prognozni dijagram broda pri projektnom gazu, teškom balastu, lakom balastu i pri najvećem gazu. Predviđena brzina broda pri 75 % P_{MCR} pri gazu u teškom balastu T=7,72 m iznosi 14,78 čv, a pri najvećem gazu T=12,35 m 14,45 čv. (Slike 9. i 10.)



Slika 9. Prognozni dijagram pri teškom balastu (modelska ispitivanja)

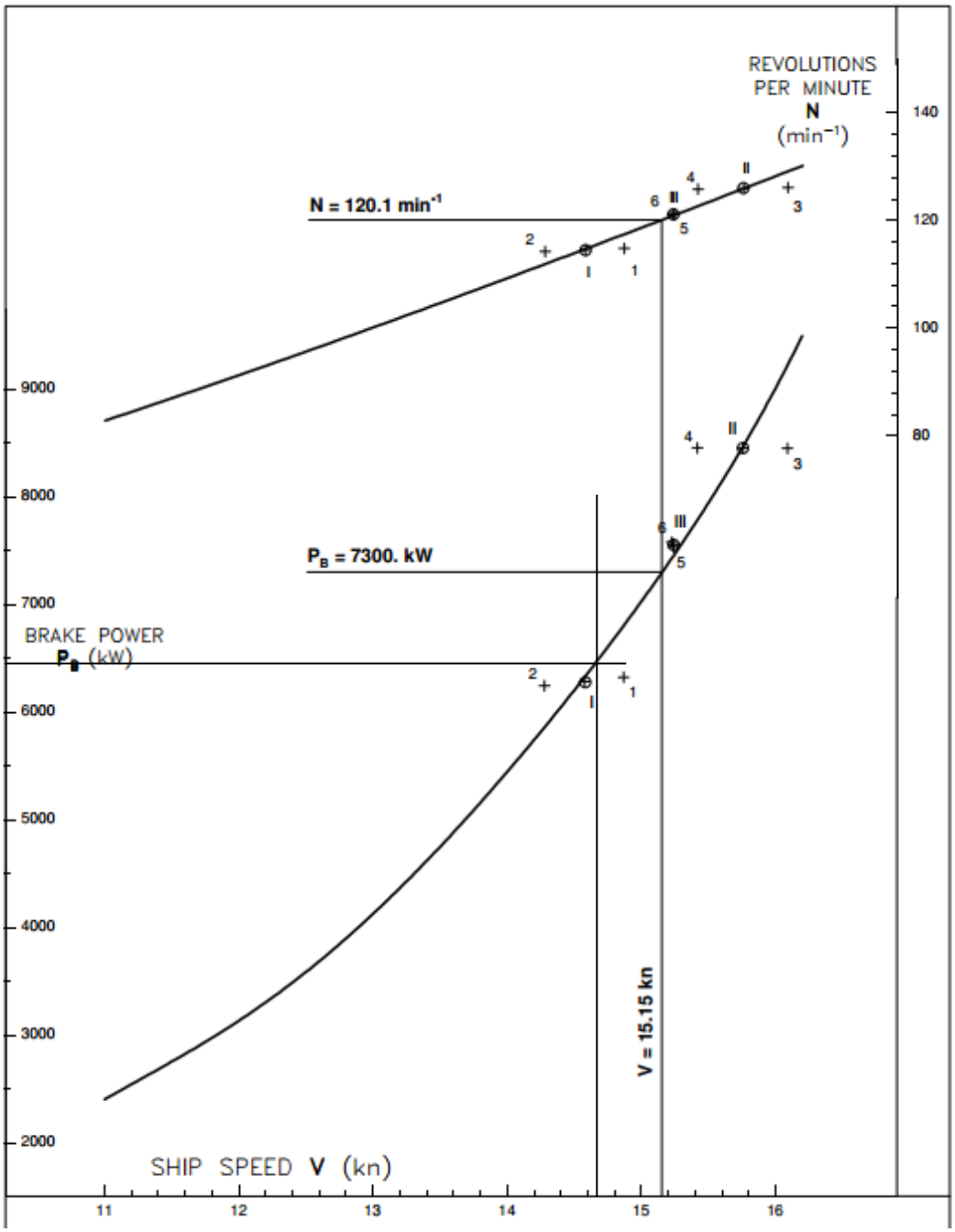


Slika 10. Prognozni dijagram pri najvećem gazu (modelska ispitivanja)

Na pokusnoj plovidbi 21. prosinca 2011. godine su u „teškom balastu“ pri gazu *T*=7,72 m i istisnini *D*=36870 t izmjereni sljedeći podaci:

Tablica 8. Izmjereni podaci iz prognoznog dijagrama

Snaga P_B (kW)	**Brzina vrtnje motora (o/min)**	**Brzina broda *v* (čv)**
6283	114,5	14,58
8452	126,0	15,76
7556	121,2	15,24



Slika 11. Prognozni dijagram pri teškom balastu (pokusna plovidba)

Iz dijagrama na Slici 10. može se očitati da je pri najvećem gazu pri P_{ME} =6450 kW moguće postići brzinu 14,45 čv.

Iz prognoznog dijagrama uzeta je brzina izmjerena na pokusnoj plovidbi V_{ref} **= 14,45 čv**.

5.3. Izračun EEDI-a

Za proračunati postignuti indeks energetske učinkovitosti potrebno je izvršiti usporedbu sa zahtijevanom vrijednošću EEDI-a kako bi provjerili zadovoljava li brod propisane norme, u svrhu izdavanja međunarodnog certifikata energetske učinkovitosti. U proračunu su korišteni podaci iz brodogradilišta. Provedbom ove analize dobiva se uvid u projektni indeks energetske učinkovitosti bez implementacije inovativnih, energetski učinkovitih tehnologija generiranja snage, što predstavlja dovoljno pouzdan temelj za ocjenu zadovoljavanja kriterija energetske učinkovitosti.

Podaci potrebni za proračun:

Opći podaci:

- Nosivost: DWT= 51888 t
- Brzina: V_{ref} = 14,45 čv
- Vrsta broda: brod za rasuti teret

Glavni stroj:

- Snaga glavnog stroja: P_{MCR} =8600 kW
- $P_{ME} = 0,75\% P_{MCR} = 6450\,\text{kW}$
- Vrsta goriva: MDO
- C_{FME} = 3,151
- SCF_{ME} = 179,3 g/kWh

Pomoćni strojevi:

- Snaga pomoćnih strojeva prema izrazu (13): P_{AE} =430 kw
- Vrsta goriva: MDO
- C_{FME} = 3,151
- SCF_{ME} = 206,9 g/kWh

- Vratilni motor - ne postoji,

  P_{PTI} = 0
- Vratilni generator - ne postoji,

  P_{PTO} = 0

- Energetski učinkoviti izvori električne energije - ne postoje,

  $P_{Aeff} = 0$

- Energetski učinkoviti izvori mehaničke energije - ne postoje,

  $P_{eff} = 0$

- Korekcijski faktor smanjenog volumena,

  $f_c = 1$

- Korekcijski faktor zbog posebnih konstrukcijskih značajki broda,

  $f_j = 1$

- Faktor smanjene nosivosti.

Brod je napravljen u skladu sa Common Structural Rules (CSR) te mu je dodijeljena oznaka klase CSR tako da se primjenjuje sljedeći faktor smanjene nosivosti:

$$f_{iCSR} = 1 + \left(0,08 \cdot LWT_{CSR} / DWT_{CSR}\right) = 1 + \left(0,08 \cdot 10236 / 51888\right) = 1,016$$

Postignuta vrijednost EEDI-a:

$$EEDI = \frac{\left(\prod_{j=1}^{M} f_j\right)\left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \times C_{FME(i)} \times SFC_{ME(i)}\right) + \left(P_{AE} \times C_{FAE} \times SFC_{AE*}\right)}{f_i \times f_c \times Kapacitet \times f_w \times V_{ref}} +$$

$$+ \frac{\left(\left(\prod_{j=1}^{M} f_j \times \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \times P_{AEeff(i)}\right) C_{FAE} \times SFC_{AE}\right) - \left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \times P_{eff(i)} \times C_{FME} \times SFC_{ME**}\right)}{f_i \times f_c \times Kapacitet \times f_w \times V_{ref}} =$$

$$= \frac{1 \times 6450 \times 3,151 \times 179,3 + 430 \times 3,151 \times 206,9 + 0 - 0}{1,016 \times 1 \times 51888 \times 1 \times 14,45} = 5,157\,\mathrm{g \cdot CO_2/t \cdot milja}$$

Zahtijevana vrijednost EEDI-a:

Ulazni podaci za brodove za rasuti teret:

- a=961,79,
- b=DWT broda,
- c=0,477.

Iz toga slijedi da zahtijevani EEDI iznosi:

$$Zahtijevani\ EEDI = (1 - X\ /100) \times a \times b^{-c}$$

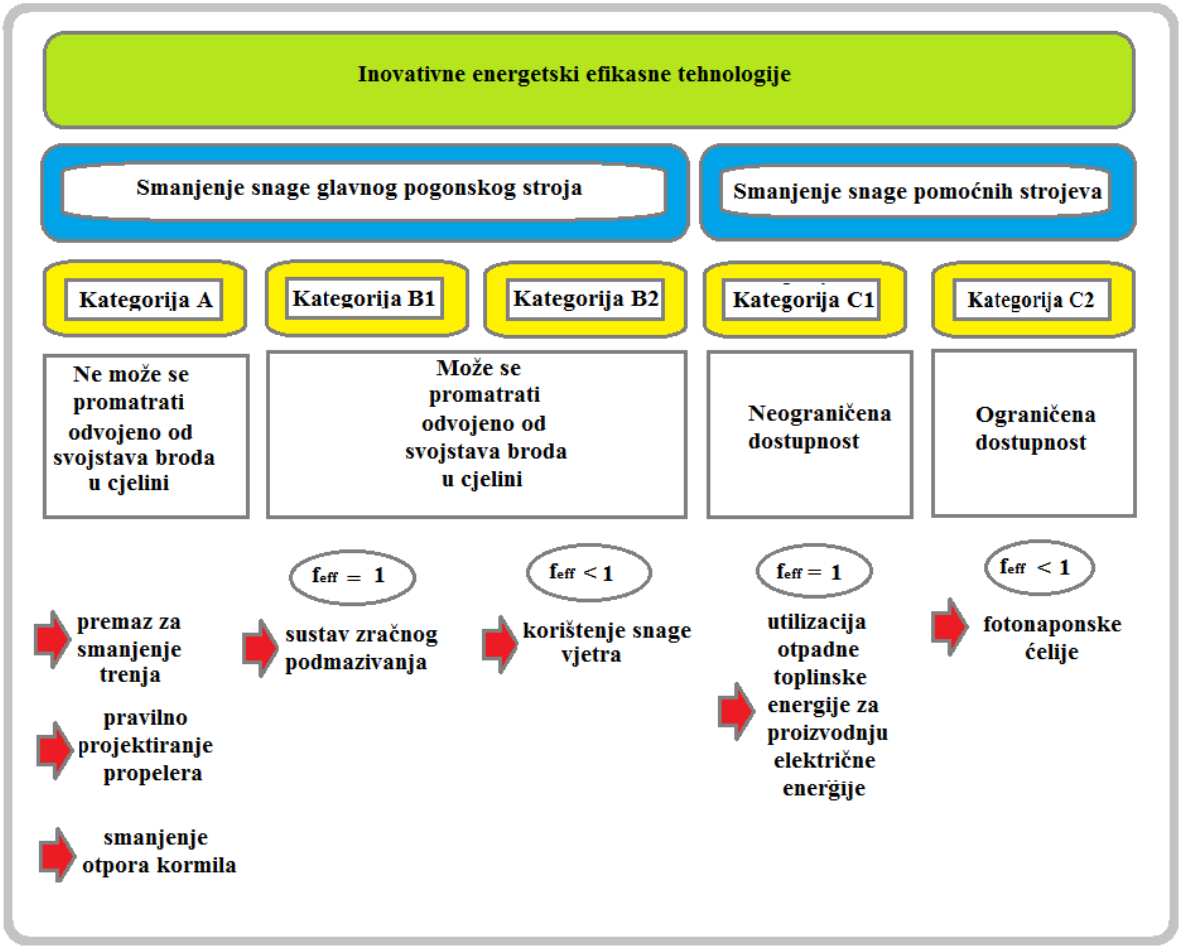
$$Zahtijevani\ EEDI = (1 - 0\ /100) \times 961,79 \times 51888^{-0,477}$$

$$Zahtijevani\ EEDI = 5,420\ g \cdot CO_2/\text{t} \cdot \text{milja}$$

Zahtijevani EEDI analiziranog broda iznosi 5,420 $g\,CO_2/\text{t}\cdot\text{milja}$ te je veći od iznosa postignutog EEDI-a koja iznosi 5,157 $g\,CO_2/\text{t}\cdot\text{milja}$. Iz dobivenih preliminarnih rezultata evidentno je da brod udovoljava kriterijima energetske učinkovitosti.

6. MOGUĆNOST POBOLJŠANJA PROJEKTA S ASPEKTA ENERGETSKE UČINKOVITOSTI

Energetsku učinkovitost analiziranog broda „Stoja“ možemo još poboljšati primjenom inovativnih, energetskih, učinkovitih tehnologija. Postoje tri kategorije takvih tehnologija. Kategorije A i B temelje se na principu smanjenja snage (rasterećenja) glavnog pogonskog stroja, dok kategorija C predstavlja smanjenje snage pomoćnih strojeva. Na Slici 12 navedene su vrste inovativnih tehnologija po kategorijama.



Slika 12. Kategorije inovativnih energetski učinkovitih tehnologija

6.1 Sustav zračnog podmazivanja

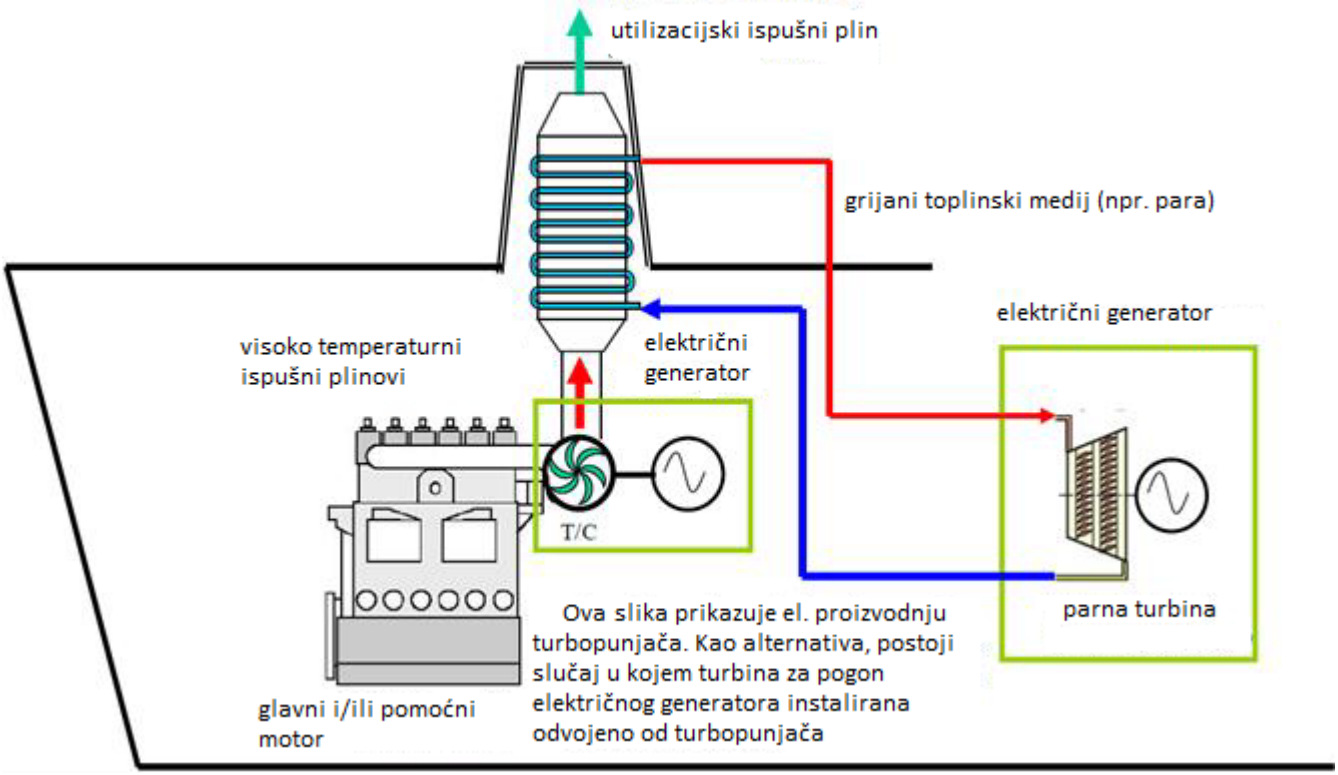
Sustav zračnog podmazivanja je metoda smanjenja otpora trenja broda korištenjem mjehurića zraka koji su slojevito distribuirani po oplakanoj površini trupa broda. Ova metoda daje mogućnost smanjenja trenja bez ikakvih promjena u obliku trupa broda. Sustavi upuhivanja zraka nalaze se na samom dnu broda, kao što je prikazno na Slici 13 i simetrično su raspoređeni s obje strane broda. Zrak se upuhuje ujednačenim protokom za kontinuirano održavanje jednolikog sloja zračnih mjehurića. Primjena ove metode smanjuje površinsko trenje varijacijom viskoznosti fluida oko broda i modificira strukturu turbulentnog graničnog sloja [17].



Slika 13. Skica sustava zračnog podmazivanja

6.2 Utilizacija otpadne toplinske energije za proizvodnju električne energije

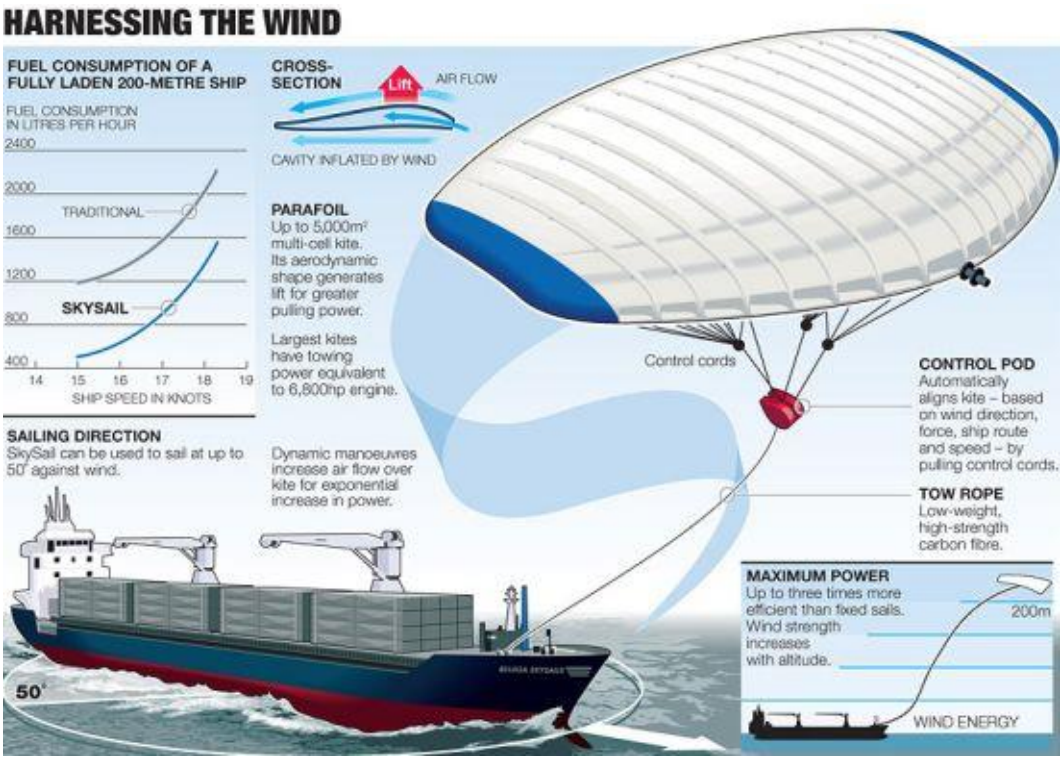
Sustavi za utilizaciju otpadne topline vraćaju toplinsku energiju iz ispušnih plinova i pretvaraju je u električnu energiju, dok se preostala toplina može koristiti za brodske potrebe kao što su topla voda i para. Iskoristivost otpadne topline može varirati ovisno o veličini, broju, uporabi i učinkovitosti motora na plovilu. Ova tehnologija se može primijeniti na sve brodove bez obzira na veličinu, starost i tip, iako se čini da je sada praktična donja granica veličine motora od 10 MW [18]. Potrebno je napomenuti da analizirani brod „Stoja“ ima mogućnost utilizacije otpadne toplinske energije. Naime, u brod je ugrađen kompozitni kotao te on radi kao utilizacijski dok radi glavni motor, a kao loženi dok je motor ugašen. Također je na brodu predviđen sustav utilizacije topline visokotemperaturnog kruga slatke vode pomoću niskotlačnog evaporatora kapaciteta 25 t/dan slatke vode. Oba ova sustava korištenja utilizacije toplinskog otpada doprinose ukupnoj energetskoj učinkovitosti energetskog sustava broda. Na Slici 14 prikazana je utilizacija otpadne toplinske energije za proizvodnju električne energije.



Slika 14. Utilizacija otpadne toplinske energije za proizvodnju električne energije

6.3 Korištenje snage vjetra

Jedan od načina poboljšanja projekta s aspekta energetske učinkovitosti je korištenje snage vjetra. Prema rezultatima ispitivanja jednog od koncepata, vjeruje se da, ako se energija vjetra koristi na pravi način, moguće je uštedjeti do 50% goriva, posebno na vjetrovitim rutama [19]. Jedno od rješenja su leteća jedra (engl. *Skysails*). Ova metoda uključuje korištenje vučnih zmajeva kako bi se brod pomicao naprijed umjesto tradicionalnog koncepta jedara ili dizelskog ili parnog pogona. Budući da tehnologija Skysails dopušta vučnom zmaju dosezanje visine od 100 do 300 metara, gdje prevladavaju jači vjetrovi. Skysails je dobar koncept u smislu njegove inovacije i budući da je zahtjev za što učinkovitijim brodom ono što je potrebno u današnjim vremenima, koncept skysail-a treba biti se nameže kao vrlo zanimljiv. Inovacije poput ovih pomažu smanjiti emisije štetnih plinova.



Slika 15. Korištenje snage vjetra

7. ZAKLJUČAK

U novije vrijeme energetska učinkovitost i ekološka prihvatljivost postaju sve važniji kriteriji u brodogradnji. Ti kriteriji moraju se uzeti u obzir u ranim fazama osnivanja broda, tijekom njegove gradnje i tijekom cijelog njegovog eksploatacijskog vijeka. Jedan od načina ocjenjivanja energetske učinkovitosti broda je primjenom projektnog indeksa energetske učinkovitosti EEDI-a, čija je primjena u ovom radu ilustrirana na primjeru broda za prijevoz rasutog tereta „Stoja“. Uz opis zakonske regulative na području energetske učinkovitosti brodova, i analizu EEDI-a spomenutog broda oslanjajući se na podatke ustupljene od brodogradilišta Uljanik, u radu je napravljeni osvrt na mogućnosti poboljšanja projekta iz perspektive energetske učinkovitosti, koji bi još dodatno smanjili vrijednost EEDI-a. Izračunata preliminarna vrijednost postignutog projektnog indeksa energetske učinkovitosti analiziranog broda iznosi 5,157 ($g\,CO_2/t\cdot milja$), što je manje od zahtijevane vrijednosti koja iznosi 5,420 ($g\,CO_2/t\cdot milja$). Time ovaj brod zadovoljava kriterije koje propisuje Međunarodna pomorska organizacija kroz svoje rezolucije. Izračunata veličina EEDI-a ukazuje na relativno dobra svojstva broda sa stajališta energetske učinkovitosti. U ovom radu provedena je detaljna analiza proračuna kao što je analiza prognoznog dijagrama, određivanje referente brzine i razmatranje mogućnosti primjene inovativnih energetski učinkovitih tehnologija.

LITERATURA

[1] Mia Mahmudur Rahim, Md. Tarikul Islam, Sanjaya Kuruppu: Regulating global shipping corporations' accountability for reducing greenhouse gas emissions in the seas, 2016.

[2] http://www.ss-aharacica-malilosinj.com.hr/wp-content/uploads/2011/03/1.-Tekst-Osnove-brodogradnje-1.-dio.doc, pristup 22. veljače 2019.

[3] http://www.unizd.hr/Portals/1/nastmat/Rukovanje%20teretom/PRIJEVOZ%20RASUTOG%20TERETA

[4] MEPC.203(62): Amendments to the Annex of Protocol of 1997 to amend the International convention for the prevention of pollution from ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto (Inclusion of regulations on energy efficiency for ships in MARPOL Annex VI), 2011.

[5] MEPC.213(63): Guidelines for the development of a ship energy efficiency management plan, 2012.

[6] MEPC.214(63): Guidelines on the survey and certification of energy efficiency design index (EEDI), 2012.

[7] MEPC.224(64): Amendments to the 2012 guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships, 2014.

[8] MEPC.245(66): Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships, London, UK, 2014.

[9] MEPC.251(66): Amendments to MARPOL Annex VI and the 2008 NOX Technical Code, 2014.

[10] MEPC.215(63): Guidelines for calculation of reference lines for use with the energy efficiency design index (EEDI), 2012.

[11] https://www.marpol-annex-vi.com/eedi-seemp/, pristup 27. siječnja 2019.

[12] Rezolucija MEPC.213(63): 2012 guidelines for the development of a ship energy efficiency management plan (SEEMP), 2012.

[13] Rezolucija MEPC.203(62): Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 to Amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto (Inclusion of regulations on energy efficiency for ships in MARPOL Annex VI), IMO, 2011.

[14] Ozaki, Y., Larkin, J, Tikka, K., Michel, K.: An evaluation of the Energy Efficiency Design Index (EEDI) baseline for tankers, containerships and LNG carriers, Climate Change and Ships: Increasing Energy Efficiency – a SNAME & Marine Board Symposium, New Jersey, USA, 2010.

[15] Rezolucija MEPC.214(63): 2012 Guidelines on Surveyy and Certification of the Energy Efficiency Design Index (EEDI), IMO, 2012.

[16] https://www.iso.org/standard/61902.html , pristup 27. siječnja.2019.

[17] Azlina Hashima, O. B. Yaakoba, K. K. Koha, Nasrudin Ismaila, Yasser M. Ahmeda: Review of Micro-bubble Ship Resistance Reduction Methods and the Mechanisms that Affect the Skin Friction on Drag Reduction from 1999 to 2015, svibanj 2015.

[18] https://glomeep.imo.org/technology/waste-heat-recovery-systems/.

[19] https://www.marineinsight.com/green-shipping/skysails-pioneering-green-ship-uniquely/, pristup 27. siječnja 2019.