

Obilježja novih generacija kontejnerskih brodova na LNG pogon

Majetić, Dominik

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:278442>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-11**



Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET

DOMINIK MAJETIĆ

**OBILJEŽJA NOVIH GENERACIJA KONTEJNERSKIH
BRODOVA NA LNG POGON**

ZAVRŠNI RAD

Rijeka, 2021.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET

**OBILJEŽJA NOVIH GENERACIJA KONTEJNERSKIH
BRODOVA NA LNG POGON**
**FEATURES OF NEW GENERATIONS OF LNG POWERED
CONTAINER SHIPS**

ZAVRŠNI RAD

Kolegij: Sredstva pomorskog prometa 1

Mentor: Izv.prof.dr.sc. Igor Rudan

Student: Dominik Majetić

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112071629

Rijeka, lipanj 2021.

Student/studentica: Dominik Majetić

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112071629

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom „Obilježja novih generacija kontejnerskih brodova na LNG pogon“ izradio samostalno pod mentorstvom izv.prof.dr.sc. Igora Rudana.

U radu sam primijenio metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u završnom radu na uobičajen, standardan način citirao sam i povezao s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Suglasan sam s trajnom pohranom završnog rada u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci te Nacionalnom repozitoriju Nacionalne i sveučilišne knjižnice.

Za navedeni rad dozvoljavam sljedeće pravo i razinu pristupa mrežnog objavljivanja:

- a) **rad u otvorenom pristupu**
- b) pristup svim korisnicima sustava znanosti i visokog obrazovanja RH
- c) pristup korisnicima matične ustanove
- d) rad nije dostupan

Student/studentica



(potpis)

Ime i prezime studenta/studentice: Dominik Majetić

SAŽETAK

Kontejnarski transport u kojem najvažniju ulogu imaju kontejnarski brodovi, ključna su stavka u svjetskoj trgovinskoj razmjeni. 70% svjetskog i 90% generalnog tereta prevozi se kontejnerima. Svijet kakav danas znamo nezamisliv je bez kontejnarskog transporta, a nova tehnologija koja bi u budućnosti zamijenila kontejnere nije na vidiku. Nove generacije kontejnarskih brodova su sve veće u svojim dimenzijama i kapacitetu, a mjere za ispuštanje ispušnih plinova su sve strožije. Brodari su pronašli rješenje kako graditi kontejnerske brodove enormnih veličina, a pritom smanjiti udio ispušnih plinova na minimum. Rješenje je korištenje prirodnog ukapljenog plina kao gorivo umjesto dizela i teškog goriva. U ovom radu opisane su nove generacije kontejnarskih brodova na LNG pogon u smislu konstrukcijske izvedbe, izvedbe samog pogona, te prirodnog ukapljenog plina kao gorivo.

Ključne riječi: konstrukcija, kontejnarski brodovi, LNG pogon, nove generacije

SUMMARY

Container transport, in which container ships play the most important role, is a key item in world trade. 70% of world and 90% of general cargo is transported by containers. The world as we know it today is inconceivable without container transport, and new technology that would replace containers in the future is not at sight. New generations of container ships are increasing in size and capacity, and exhaust measures are becoming more stringent. Shipowners have found a solution on how to build container ships of enormous sizes, while reducing the share of exhaust gases to minimum. The solution is to use natural liquefied gas as a fuel instead of diesel and heavy fuel. In this paper, are described new generations of LNG powered container ships in terms of construction, performance of the plant itself and natural liquefied gas as a fuel.

Keywords: construction, container ships, LNG plant, new generations

SADRŽAJ

SAŽETAK	I
SUMMARY	I
SADRŽAJ	II
1. UVOD	1
2. POVIJESNI RAZVOJ KONTEJNERSKIH BRODOVA	2
3. GENERACIJE I VRSTE KONTEJNERSKIH BRODOVA	4
4. STRUKTURNE KARAKTERISTIKE NOVIH GENERACIJA BRODOVA	6
4.1 STRUKTURA PALUBE	6
4.2 UGLOVI GROTLA	7
4.3 POZICIONIRANJE NADGRAĐA I STROJARNICE	8
4.4 PRAMČANA KONSTRUKCIJA.....	9
4.5 KRMENA KONSTRUKCIJA	11
4.6 VIBRACIJE	12
5. AUTOMATSKI PROTUNAGIBNI SUSTAV	13
6. LNG POGON NA KONTEJNERSKIM BRODOVIMA	15
6.1 LNG KAO GORIVO	15
6.2 IZVEDBE POGONA.....	16
6.3 LNG SPREMNICI I SUSTAV OPSKRBE PLINOM.....	22
6.4 UTJECAJ SLOBODNIH POVRŠINA	25
7. PROPULZIJSKI HIDRODINAMIČKI ASPEKTI	29
7.1 KAVITACIJA PROPULZORA	29
7.2 KAVITACIJA KORMILA	31
8. PRIMJERI BRODOVA I SPECIFIKACIJE	33
9. ZAKLJUČAK	35
LITERATURA	36
POPIS SLIKA	38

1. UVOD

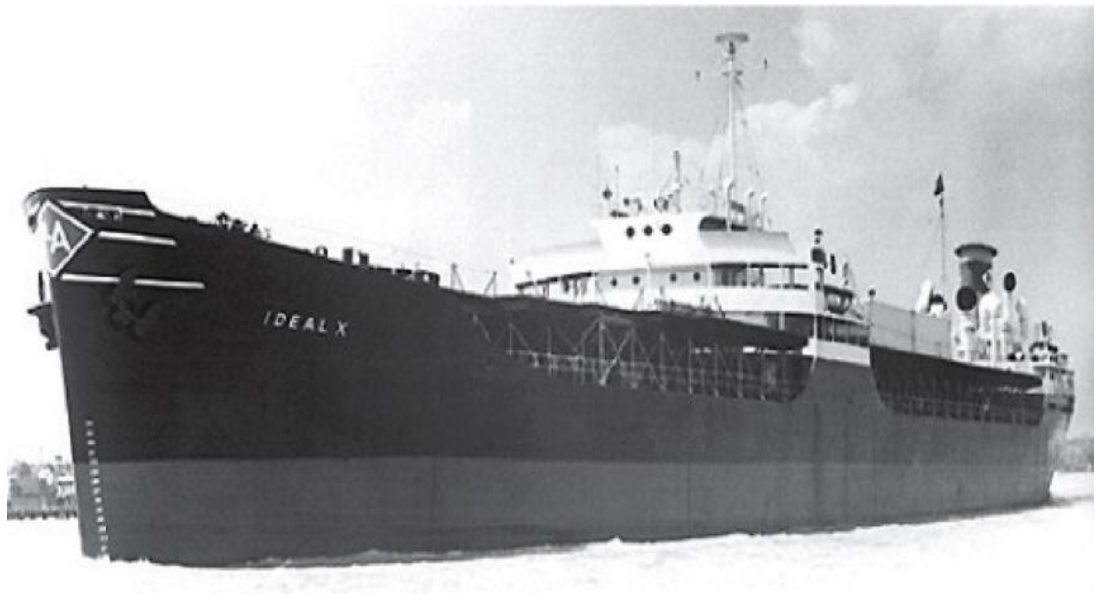
Nove generacije kontejnerskih brodova nastale su na temelju želje i potrebe brodarka da povećaju ekonomičnost. Pokazalo se da brodovi kapaciteta 20,000 TEU (twenty foot equivalent unit) i više proizvode skoro pa iste troškove kao i brod kapaciteta 10,000 TEU. Istovremeno s većim kapacitetom broda mogu smanjiti vozarinu po prevezenoj jedinici što ih čini konkurentnijim i privlačnijim na svjetskom tržištu. Međutim da bi se to postignulo, brodovi moraju biti izrazito velikih dimenzija koje dovode do različitih problema u samoj konstrukcijskoj izvedbi. U ovom završnom radu opisane su kritične točke strukture ovakvih brodova kao što su: paluba, pramac, krma i uglovi grotla. Također opisano je na koji način se pozicionira nadgrađe i strojarnica s obzirom na razne uvjete i propise koje vrijede za kontejnerske brodove, te kako vibracije utječu na cijelokupnost ovakve enormne strukture broda.

U ovom radu opisan je i automatski protunagibni sustav bez kojeg ne bi bilo moguće prekrcavati kontejnere i koji je od presudne važnosti za pozitivnu stabilnost broda. Druga stvar koja pritišće kontejnerske brodare jest emisija ispušnih plinova za koje su mjere sve strožije. LNG (Liquefied natural gas) je već dokazana tehnologija i gorivo koje već duže vrijeme koriste brodovi za prijevoz ukapljenog plina. Iz toga razloga kontejnerski brodari su uvidjeli priliku da riješe problem ispušnih plinova na način da implementiraju LNG sustav na svojim brodovima. U ovom završnom radu opisan je LNG pogon na novim generacijama kontejnerskih brodova u pogledu LNG-a kao gorivo, izvedbe samog pogona, vrste LNG spremnika i sustava opskrbe plinom kakvi se koriste, te kakav utjecaj imaju slobodne površine u spremnicima. Nakon LNG-a opisana je također bitna stavka kod novih generacija kontejnerskih brodova, a to su hidrodinamički aspekti u pogledu kavitacije vijka i kormila. Ovo su jako kritična pitanja bez kojih takav tip broda ne može učinkovito obavljati svoje operacije. Za sam kraj prikazani su primjeri i specifikacije novih generacija kontejnerskih brodova na LNG pogon.

2. POVIJESNI RAZVOJ KONTEJNERSKIH BRODOVA

Početak kontejnerskih brodova i kontejnerskog prijevoza počinje 26. travnja 1956. godine, idejom kamionskog transportnog poduzetnika Malcoma McLeana. [1] Pitanje zašto ne bismo stavili kamionsku prikolicu odmah na brod, umjesto da prekrcavamo teret iz kamionske prikolice u teretni prostor broda, promjenio je i pojednostavio način prijevoza tereta.

Na pregrađeni tanker „Ideal X“, ukrcao je 58 kontejnera koji su se prevozili između Newarka i Hustona. [1] Novitet u McLeanovom konceptu bila je zamisao upotrebe velikih kontejnera koji se ne otvaraju za vrijeme prijevoza između pošiljaoca i primaoca, s mogućnošću prekrcaja na intermodalnoj bazi između kamiona, vlakova i brodova. McLean je isprva preferirao izgradnju "brodova za prikolice", za prijevoz prikolica tegljača, ali ta metoda vuče, poznata kao RO – RO (roll on – roll off) nije prihvaćena radi velikog gubitka potencijalnog prostora za teret (broken stowage - "loše slaganje"). Umjesto toga, izveo je brod koji je isključivo napravljen za prijevoz kontejnera, bez prikolica. Kompanija “Sea land services”, u početku poduzeće za kamionski prijevoz, 1956. godine je uspostavila prvu kontejnersku vezu između istočne obale SAD-a (Sjedinjenih Američkih Država) i Portorika.



Slika 1. Brod „Ideal X“ na prvom svjetskom kontejnerskom terminalu [18]

Radi jasnih prednosti u odnosu na klasične brodove za generalni teret 1960. godine, javlja se zamisao o gradnji brodova isključivih za prijevoz kontejnera. Prvi od njih, Fairland, 1966. godine doplovio je iz New Jerseya u Bremen s teretom isključivo transportiranim u kontejnerima, te je Sea land u službu uskoro uveo još tri kontejnerska broda na linijama za Bremen, Rotterdam i Grangemouth. Uskoro su i druge američke (CML, U.S. Lines, American Export Isbrandtsen Lines i Moore McCormick Lines) i zapadnoeuropske kompanije uspostavile kontejnerske linije, te se dogodio nagli razvoj pomorskog kontejnerskog prometa, dijelom uvjetovan i standardizacijom dimenzija kontejnera krajem 1960. godine, koji je do 1969. dosegao 40% ukupnog linijskog prometa preko sjevernog Atlantika. [1] Uvedeni su u promet na linijama preko sjevernog Atlantika 1968. godine, u velikom broju isključivo kontejnerski brodovi od 22 000 dwt, s kapacitetom od 1200 standardnih kontejnera koji postižu brzinu od 20 čvorova.

Od 1969. godine započinje razvoj potpuno kontejnerskih brodova prema generacijama. Brodovi su iz svake generacije sve veći u svim dimenzijama i kapacitetu. U skoro 7 desetljeća kapacitet brodova za prijevoz kontejnera s 58 prerastao je na čak 23 tisuće TEU. Kontejnerski brodovi postali su jedni od najvećih brodova na svijetu po dimenzijama, a kontejnersko brodarstvo zasebna cjelina u pomorskom sektoru i transportu.



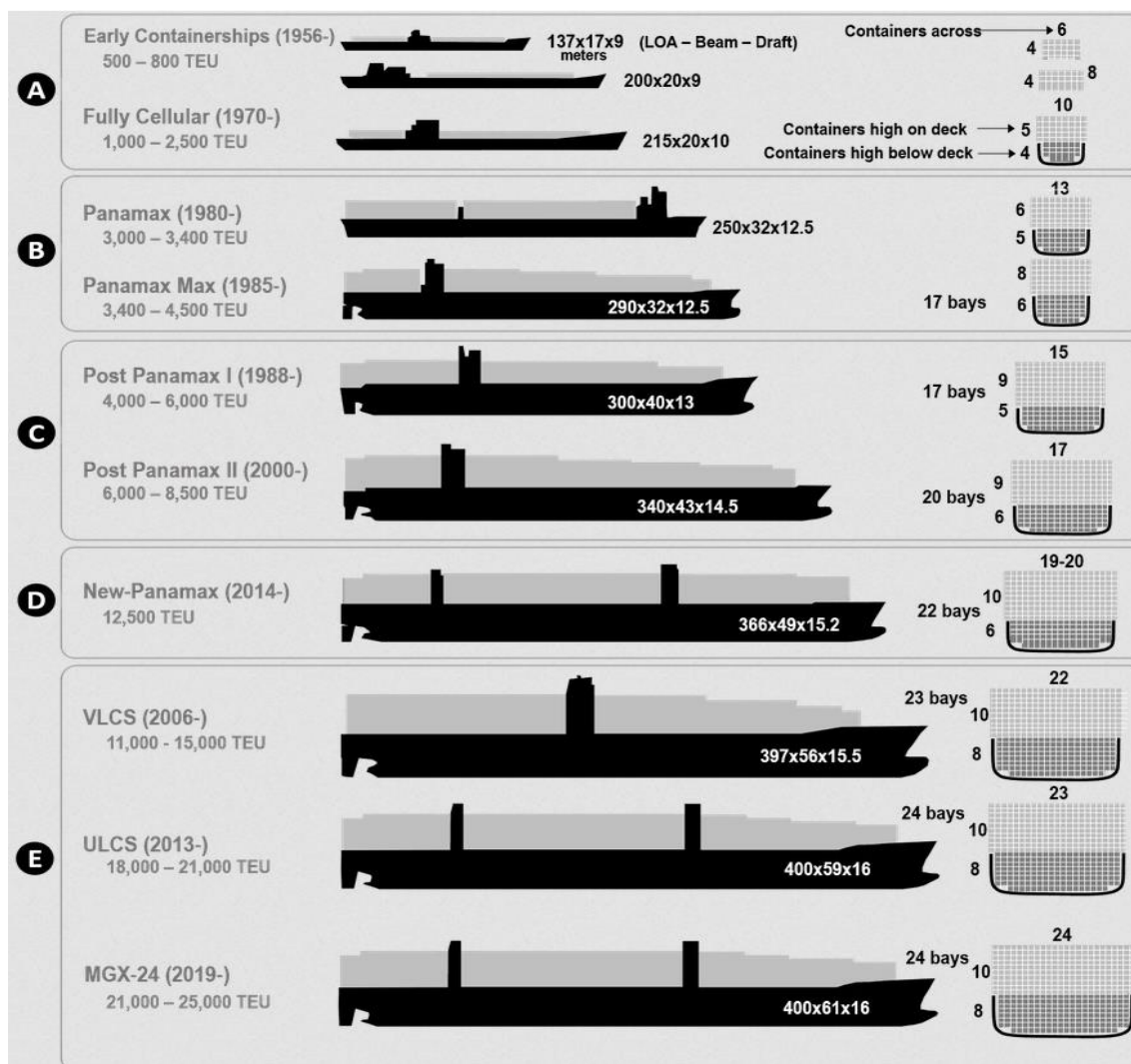
Slika 2. Kontejnerski brod „Majestic Maersk“ [17]

3. GENERACIJE I VRSTE KONTEJNERSKIH BRODOVA

Kontejnerski brodovi mogu se podijeliti na 4 načina: prema načinu prekrcaja kontejnera, specijaliziranosti s obzirom na teret, vrsti servisa koju obavlja i pruža, te prema generacijama. [3] Prema načinu prekrcaja, kontejnerski brodovi se dijele na LO – LO (lift on – lift off) i RO – RO (roll on – roll off). Gotovo svi kontejnerski brodovi su tehnologije LO – LO zbog bolje iskoristivosti kapaciteta, odnosno zbog manjeg neiskorištenog prostora. LO – LO brodovi u manjem broju imaju vlastite brodske dizalice, dok većina prekrcava teret pomoću prekrcajnih mostova na obali.

S obzirom na vrstu tereta koja se prevozi, kontejnerski brodovi se dijele na brodove koji istovremeno mogu prevoziti generalni teret i kontejnerizirani teret, te na isključivo kontejnerske brodove koji su dizajnirani isključivo za prijevoz kontejnera. Prema vrsti servisa koju obavljaju postoje brodovi matice i „feeder“ brodovi. Brodovi matice povezuju glavne svjetske luke i plove gotovo preko cijelog svijeta. Takve vrste brodova su i najveće, te im kapacitet doseže i do 24 tisuće TEU (twenty feet equivalent unit). Feeder brodovi služe za prekcavanje tereta iz manjih luka u glavne luke gdje brodovi matice onda preuzmu taj teret i obrnuto. Kapacitet takvih brodova je uobičajeno do 3000 TEU, a danas se ta brojka penje do 5000 TEU.

Podjela kontejnerskih brodova prema generacijama gleda se po veličini brodova u smislu njihovih dimenzija i kapacitetu. Na slici 3. prikazane su sve generacije brodova i godine od kada su se počeli graditi. Prva generacija kontejnerskih brodova sastojala se od preuređenih brodova za prijevoz rasutog tereta ili tankera koji su mogli prevesti do 1.000 TEU. Prvi kontejnerski brod, "Ideal-X", bio je preuređeni tanker T2 iz Drugog svjetskog rata. [2] Ti su brodovi imali brodske dizalice jer većina lučkih terminala nije bila opremljena vlastitim dizalicama za rukovanje kontejnerima. Postizali su brzine od oko 18 do 20 čvorova i mogli su slagati kontejnere samo na preuređenim palubama.



Slika 3. Generacije kontejnerskih brodova [2]

Tijekom 1980-ih, ekonomija razmjera brzo je potaknula na izgradnju većih brodova. Što je veći broj kontejnera koji se prevoze to su niži troškovi po TEU jedinici. Proces je postao začarani krug, kombinirajući veće kapacitete i niže troškove. Ograničenje veličine Panamskog kanala, koji je poznat kao Panamax standard, postignut je 1985. godine s kapacitetom brodova od oko 4.000 TEU. [2] Ići dalje od Panamaxa shvaćen je kao rizik u smislu konfiguracije brodskih mreža, dodatne infrastrukture za rukovanje, kao i infrastrukturnih ograničenja u lukama. Do 2006. godine, treća generacija kontejnerskih brodova nakon Panamaxa pojavila se kada je brodar Maersk uvelo klasu brodova s kapacitetom u rasponu od 11.000 do 14.500 TEU; Emma Maersk (E klasa). Ova generacija brodova je prekretnica u kontejnerskom transportu, gdje sve daljnje nove generacije brodova usavršavaju ovakav tip broda na način da im se kapaciteti dižu do samog maksimuma.

4. STRUKTURNE KARAKTERISTIKE NOVIH GENERACIJA BRODOVA

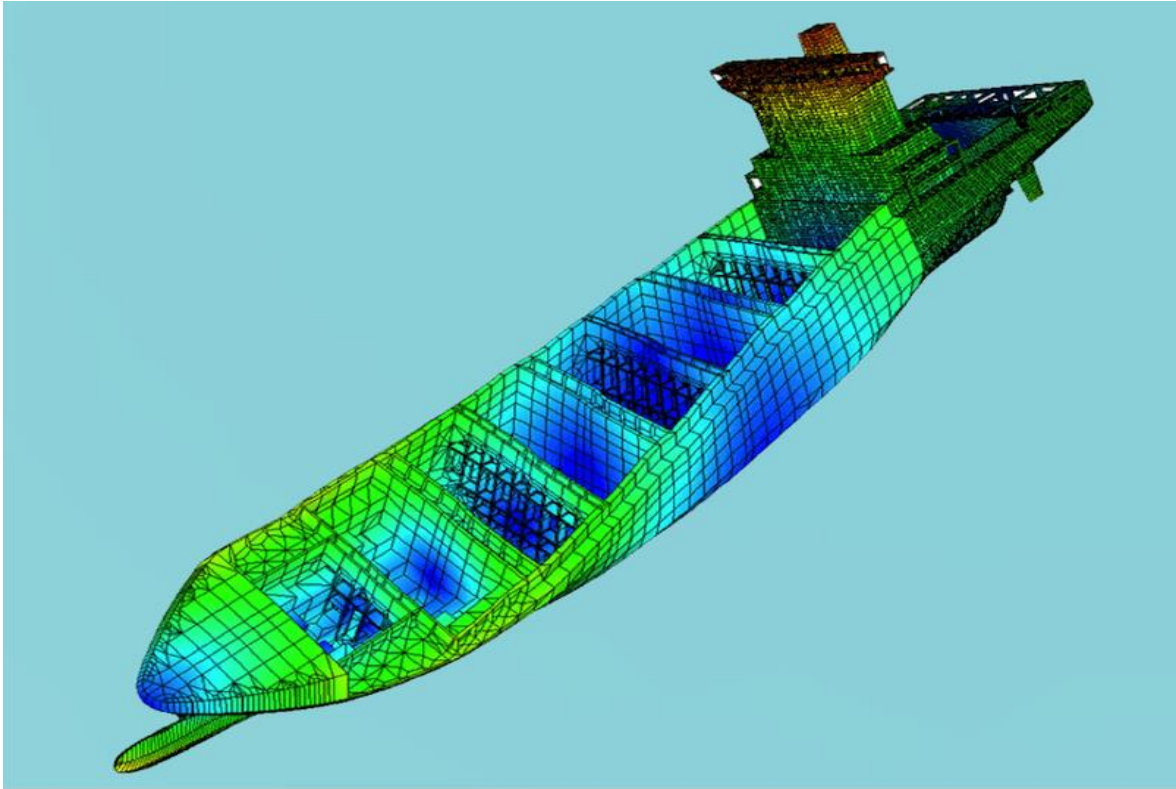
Konstantni rast dimenzija kontejnerskih brodova iziskuje probleme u strukturnom pogledu. Gradnja brodova kapaciteta do ili preko 20.000 TEU dovodi samu izradu i kreiranje ovakvih tipova brodova do razine gdje dosadašnja iskustva nisu dovoljna. Iz tog razloga se pri kreiranju novih generacija kontejnerskih brodova pristupa sa visoke znanstvene razine s ciljem da struktura brodova bude izrađena sigurno i pouzdano za njihove buduće brodske operacije. U ovom poglavlju opisani su posebno rizični dijelovi strukture broda na koje se obraća posebna pozornost prilikom gradnje ovakvih brodova.

4.1 STRUKTURA PALUBE

Kontejnerski brodovi izloženi su snažnim torzijskim momentima zbog svojih vrlo velikih otvora na palubi. To dovodi do još većih opterećenja na uglovima grotla zbog nedostatka torzijske krutosti. Gornji dio dvostrukog trupa takvih brodova opremljen je torzijskom kutijom. Međutim, nije uvijek moguće imati veliku površinu presjeka, pa brodski arhitekti povećavaju debljinu ploče kako bi osigurali torzijsku krutost.

Granična udaljenost između kraja otvora i bočne oplata iznosi približno 45 cm. [4] To je učinjeno da se maksimizira prostor za skladištenje kontejnera. Često se može primijetiti da je glavna paluba koja je izložena velikim torzijskim momentima i efektima nosača vrlo uska između grotla i vanjske oplata. Kao rezultat, koncentracija naprezanja može dovesti do pucanja na uglovima grotla ili pucanja same palube. Kako bi se spriječili takvi konstrukcijski lomovi, torzijske kutije opremljene su zavarenim spojevima na bočnoj ovojnici, koji sprečavaju torziju nastalu momentom savijanja.

Istraživanje i analiza metode konačnih elemenata (Slika 4), uzimajući u obzir učinke smicanja i savijanja, primjenjuju se za izračunavanje karakteristika torzije, savijanja i vibracija brodova s velikim otvorima na palubi.

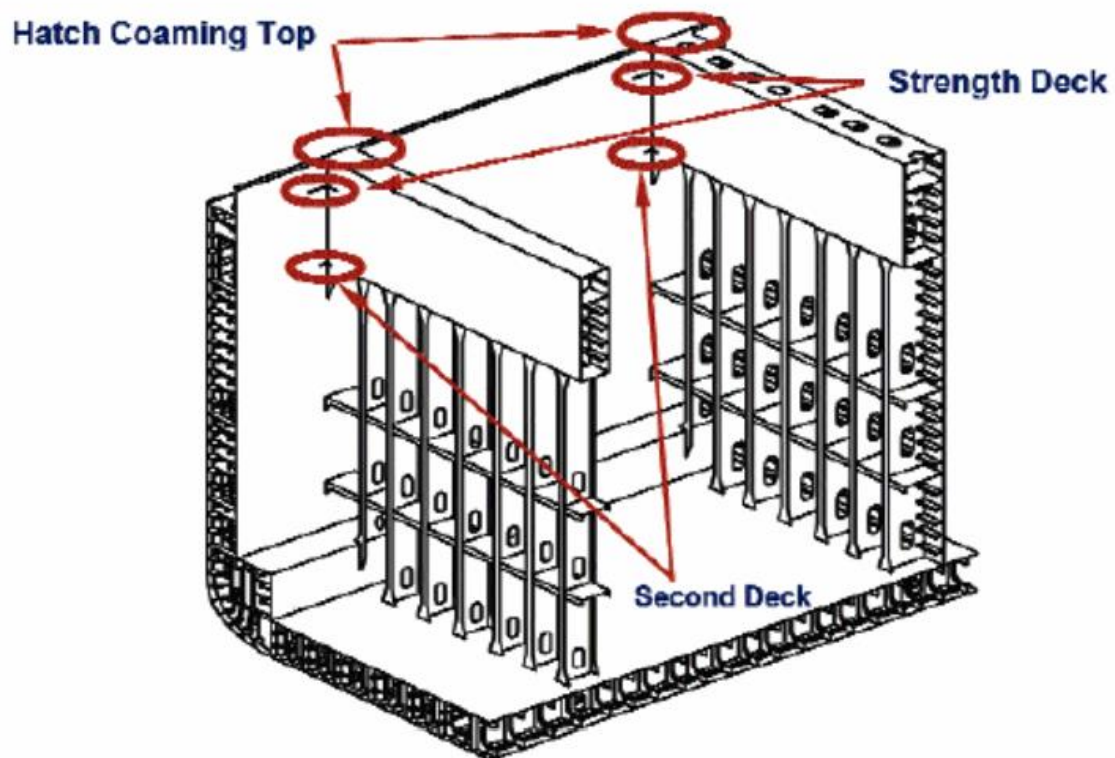


Slika 4. Analiza metode konačnih elemenata (FEA) [4]

4.2 UGLOVI GROTLA

Uglovi grotla na svim vrstama plovila, a posebno na novim generacijama kontejnerskih brodova, vrlo su kritična područja kojima se posvećuje posebna pažnja. U toj točki se susreću transverzalne i longitudinalne strukture. Ovo je vrlo dinamička točka koja je pod utjecajima momenta savijanja, poprečnih sila i induciranih torzijskih naprezanja.

Što se tiče novih generacija kontejnerskih brodova, otvori grotla su iznimno velikih dimenzija, zbog čega se pomorski arhitekti suočavaju s velikim brojem problema na ovom području. Za određivanje debljine lima koja je potrebna i koja se može implementirati na određenom mjestu i koja će pojačati strukturu broda, koristi se Analiza konačnih elemenata (FEA). [6] Slika 5. prikazuje glavna područja razmatranja uglova grotla. Ta područja uključuju izobličenje gornjeg dijela otvora grotla, uglove grotla na razini pojačane palube i na razini druge palube.



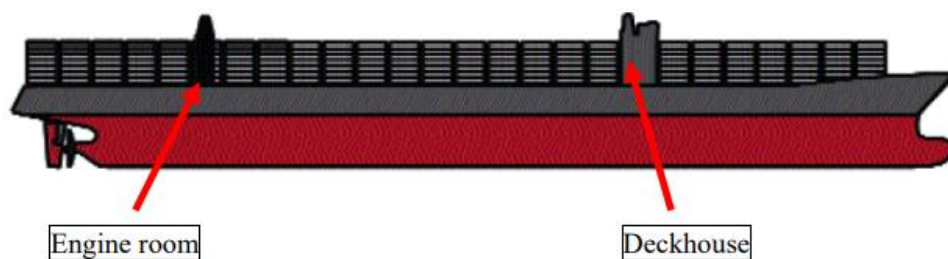
Slika 5. Glavna područja uglova grotla [6]

4.3 POZICIONIRANJE NADGRAĐA I STROJARNICE

Sljedeće vrlo ozbiljno strukturno razmatranje novih generacija kontejnerskih brodova je pozicioniranje nadgrađa i strojarnice. Do sada, na svim kontejnerskim brodovima (posljednji najveći kapaciteta 9600 TEU), nadgrađe je smješteno točno na vrh prostora strojarnice. Projektiranje kontejnerskih brodova većih od 10.000 TEU, otvoreni dijelovi palube se također povećavaju. Stavke i ograničenja po kojima se određuje točna pozicija nadgrađa, pomicanjem prema pramcu kontejnerskog broda su: [6]

1. Najvažnija i osnovna stvar je kriterij vidljivosti definiran prema IMO (International Maritime Organization) koji zahtijeva da mora biti vidljiva površina vode 500 metara ispred pramca gledajući sa zapovjedničkog mosta. Nema zahtjeva za vidljivost prema krmi.
2. Kapacitet TEU. Kako se nadgrađe pomiče prema pramcu da se zadovolji uvjet vidljivosti, kapacitet broda je povećan iz razloga što je dio sredine broda slobodan, koji je najprostorniji i najpraktičniji za skladištenje kontejnera.

3. Udobnost posade. Ovo je ograničavajući čimbenik da nadgrađe bude pozicionirano prema pramcu. Sve sile koje se odupiru i udaraju u brod pri plovidbi prvo udaraju u pramac. S obzirom da je nadgrađe postavljeno prema pramcu te sile se osjete više i može doći do neželjene neudobnosti posade broda. Međutim sve vibracije i zvukovi koji dolaze iz strojarnice gotovo su eliminirani.
4. Vodi se računa da nadgrađe bude pozicionirano na mjestu gdje može pripomoći kod iskrivljenja i opterećenja zbog velikih otvora grotla. Nadgrađe je postavljeno na mjesto gdje je osiguran kontinuitet i cjelovitost konstrukcije.
5. Posljednja stavka koja se uzima u obzir kod točnog pozicioniranja nadgrađa prema pramcu jest vibracijsko opterećenje konstrukcije broda zbog utjecaja vijka. Vibracije su veliki problem pri projektiranju svakog broda, prema tome nadgrađe se pozicionira gdje neće biti previše izloženo sveukupnim vibracijama broda.



Slika 6. Pozicija nadgrađa i strojarnice [6]

4.4 PRAMČANA KONSTRUKCIJA

Pramčana struktura kontejnerskih brodova vrlo je kritičan dio projektiranja od samog početka njihovog nastanka. Gradnjom novih generacija kontejnerskih brodova, pramčana struktura postala je još problematičnija zbog njihovih velikih dimenzija. Jedan od glavnih problema su dinamička opterećenja od udara valova i prelijevanja vode preko pramca.

Kontejnerski brodovi su plovila za koja se smatra da imaju vrlo profinjeni oblik pramca za postizanje velikih brzina (u rasponu od 25 čvorova). [6] Izvođači novih generacija kontejnerskih brodova posvećuju posebnu pozornost da kut pramčane pregrade bude točno određen. Kutevi veći od 40° posebno su izazovni, a mogli bi rezultirati strukturnim nedostacima u vrlo ranim fazama brodskih operacija. Iz tog razloga koristi se analiza konačnih elemenata (FEA), kako bi se istražilo gdje se nalaze područja visoke koncentracije stresa. Takvom metodom, testiraju se za različite uvjete mora prilikom prekrcanja i ostalih operacija, a osim toga, u smislu loših uvjeta okoline, koristi se za utvrđivanje norma i standarda u pogledu čvrstoće samog broda.

Još jedno vrlo važno pitanje za izvedbu pramčanog dijela novih generacija kontejnerskih brodova je ukrcaj mora na palubu tijekom nevremena (eng. Green sea effect). [6] Zbog činjenice da većinu vremena ukrcajne vode imaju jake dinamike, mogu dovesti do popuštanja na učvršćenjima kontejnera. Ovo rezultira ispadanjem kontejnera s palube broda. Iz tog razloga se ispred prvog reda kontejnera postavlja lukobran koji mora biti odgovarajućih dimenzija i izvedbe na način da je cjelovit s brodskom konstrukcijom. Pored zaštite tereta, lukobran štiti i posadu broda koja radi na palubi.

U današnje vrijeme nove generacije kontejnerskih brodova sve se više grade sa takozvanim „X bow hull“, odnosno obrnuto padajućom pramčanom konstrukcijom umjesto standardne, konvencionalne pramčane konstrukcije. Razlog tome je što X pramčana konstrukcija smanjuje potrošnju goriva i nosi se bolje sa valovima. [7] Kao što i samo ime govori, obrnuti pramac prostire se od krajnje, ekstremne točke broda prema vodenoj liniji, što daje kontinuirani oštri oblik pramčanom dijelu trupa. Prema usporednim testovima koje je proveo Ulstein, pramac X svojim oštrim oblikom ne stvara prskanje jer presijeca valove. [7] Kako brod učinkovito dijeli valove, prijenos energije valova je manji, a gubici brzine plovila su zanemarivi. Štoviše, kako pramac X presijeca valove umjesto da prelazi preko njih, na palubi broda se pojavljuju znatno manje količine ukrcane vode u usporedbi s brodovima koji imaju konvencionalni trup.



Slika 7. X bow pramac broda „CMA CGM Concorde “ [19]

4.5 KRMENA KONSTRUKCIJA

S razvojem novih generacija kontejnerskih brodova, mijenja se i krmena strukturalna konfiguracija. Brodovi su ekstremno velikih dimenzija u dužini i širini, što povećava sile i stresove od udaranja mora. Ovakvi stresovi se posebno javljaju na krmi zbog toga što kod ovakvih brodova ona nije previše zaobljena, pogotovo kad je u pitanju izvedba sa dva vijka. To je stvorilo puno strukturalnih problema otkako je tamošnji pritisak kod tih područja na vrlo visokim razinama.

U sveobuhvatnom smislu ovaj fenomen stvara povećan progib koji se pokušava izbjeći. Opterećenja od udaranja mora u krmu su vrlo koncentrirana i dešavaju se u vrlo kratkom razdoblju. Kao što je već spomenuto, ove udarne sile mogu rezultirati oštećenjem lokalne strukture i naglasiti strukturalne vibracije na cijelom brodu. Iz tog razloga tijekom faze projektiranja, na bilo kojem presjeku plovila, cjelovita analiza trupa zahtijeva predviđanje utjecaja udarnih sila od mora. Sofisticirano softverska oprema računala, kao i ispitivanje pomoću različitih modela, pomažu u definiranju opterećenja krmene strukture broda.



Slika 8. Krmena struktura novih generacija kontejnerskih brodova [20]

4.6 VIBRACIJE

Završno područje koje je vrlo važno i izravno povezano sa strukturnim uređenjem novih generacija kontejnerskih brodova su vibracije. Problem s vibracijama jest da imaju više izvora. Neki od njih su: [6]

- Djelovanje valova
- Oscilacije tlaka izazvane propulzorom
- Rad glavnog motora
- Rad pomoćnih strojeva u strojarnici

Kontejnerski brodovi duljine preko 300 metara imaju agilnu strukturu. Ova agilnost se prevodi u niže frekvencije nosača trupa i ovisno o prirodi dinamičkog opterećenja, ovakvi brodovi bi mogli doživjeti visoku razinu vibracija tijekom svojih operacija. Zbog toga se ispituju karakteristike vibracija plovila prije početka njihove gradnje, jer takvi problemi su izuzetno nepoželjni i skupi za ispravljanje nakon gradnje. Da bi se takve komplikacije izbjegle, koriste se suvremeni analitički alati. U okviru ove funkcije, postignuto je modeliranje dinamičkih sila na način da se koriste simulacije i simulacijski modeli brodova.

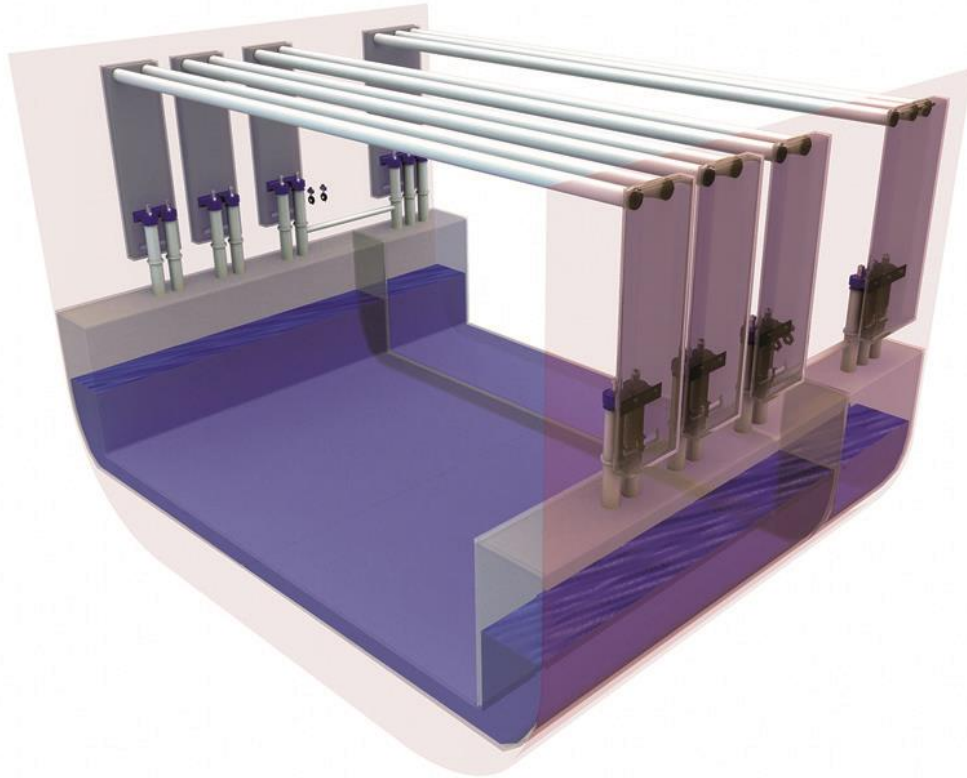
5. AUTOMATSKI PROTUNAGIBNI SUSTAV

Automatski protunagibni sustavi dizajnirani su da drže bilo koju vrstu plovila ili strukturu na moru uspravno s obzirom na dopuštenu granicu nagiba. [9] Bez ovog sustava gotovo je nemoguće ukrcavati kontejnere u skladišta. Moment koji uzrokuje kut nagiba ispravlja se pomicanjem balastne vode između parova tankova smještenih na lijevom i desnom boku broda. Prijenos vode postiže se korištenjem centrifugalne sile, reverzibilnih propelera, vijčanih pumpi, pa čak i uređaja za propuhivanje zraka.

Standardni upravljački sustav nudi ručni, automatski ili balastni način rada putem dotirnog zaslona PLC (programmable logic controller) jedinice ili središnje računalne stanice, kao i povezanost na sustav alarma i nadzora IAS (Integrated automation system) / AMS (Alarm and monitoring system). U automatskom načinu rada sustav započinje kompenzirati kut nagiba kada vrijednost praga prelazi $\pm 0,5$ stupnjeva. [9] Sofisticirani sustavi, koji se koriste na novim generacijama kontejnerskih brodova, kontroliraju se mjerenjem stvarnog generiranog momenta nagiba i podešavanjem pojedinačnih brzina protoka. Tada upravljački softver nudi dodatne načine rada poput: nulti protok, kontroliranje protoka, kontroliranje momenta prilikom prekrcaja. Kombinira se kompenzacija nagiba s funkcijama prigušenja rotacija u istom tanku balastnih voda.

Reverzibilne aksijalne pumpe propelera, posebno su pogodne za dvosmjerno prebacivanje vode prema zahtjevima sustava za kontrolu nagiba. Dostupno je nekoliko različitih veličina crpki za vertikalnu i vodoravnu ugradnju kao i eksponirano rješenje. Izvedba crpke odabire se za svaku pojedinačnu primjenu mijenjanjem stupnja prijenosa i tipa motora. Mogu se osigurati protoci do $2.500 \text{ m}^3 / \text{h}$ po jedinici. [9]

Zatvoreni sustav sastoji se od jednog ili više parova tankova balastnih voda, koji su povezani zračnim cijevima na vrhu i vodovodnim cijevima blizu dna. Komprimirani zrak iz uređaja za propuhivanje koristi se za pomicanje balasta između parova tankova kako bi se stvorio kompenzacijski moment. Smjer protoka zraka kontrolira se pomoću skupine ventila prema tanku i atmosferi pomoću prigušivača. Sustav ima izuzetno kratko vrijeme odziva u kombinaciji s visokim stopama kompenzacije. Sustavi za kontrolu nagiba pomoću propuhivanja mogu se kombinirati sa sustavima za prigušivanje U-spremnika (Slika 9), a kao dodatna opcija mogu se osigurati i načini rada zamrzivanjem. Kapacitet ovakvog sustava može ići do 5000 tm/min . [10]



Slika 9. Automatski protunagibni sustav [10]

6. LNG POGON NA KONTEJNERSKIM BRODOVIMA

LNG (Liquefied natural gas) kao gorivo sada je provjereno i dostupno rješenje. Iako će konvencionalna goriva na bazi nafte za većinu postojećih kontejnerskih brodova ostati glavna opcija, za buduće novogradnje ili određene postojeće brodove, LNG je ono što će se tražiti. No, prebacivanje na LNG može se izvršiti samo na temelju najbolje moguće informacije i temeljite analize današnjih i budućih potreba. Istodobno, LNG je komercijalno vrlo atraktivan i dostupan širom svijeta u količinama koje će zadovoljiti buduće potrebe.

Kao i komercijalni aspekti, glavni argument za vjerovanje u LNG kao brodsko gorivo koje zamjenjuje konvencionalna goriva na bazi ulja (teško loživo ulje, brodsko plinsko ulje ili destilatna goriva), je to da LNG značajno smanjuje lokalna onečišćenja zraka u rasponu od emisije SOX (sulfur oxide) i NOX (nitrogen oxides) do ugljičnog dioksida, čestica PM (Particulate matter) i crnog ugljika. [12] Potpuno uklanjanje SOX-a, čestica PM i smanjenje NOX emisija do 85%, stvara snažne argumente za korištenje LNG goriva, posebno u obalnom području i osjetljivim ekosustavima. Uz to, LNG također smanjuje CO₂ (carbon dioxide) emisije za najmanje 20%. Kao opcija za gorivo, LNG nudi višestruke prednosti za ljudsko zdravlje i okoliš. Također, kopnena infrastruktura za LNG je u punom razvoju. Pokazalo se da je izrazito skuplje prebacivati već postojeće brodove pogonjene konvencionalnim gorivima na LNG, nego graditi potpuno novi brod. Iz tog razloga broj narudžbi kontejnerskih brodova pogonjenih prirodnim ukapljenim plinom konstantno raste. Vodeće kompanije u kontejnerskoj industriji kao što su CMA CGM i Hapag Lloyd, imaju velike narudžbe novogradnji novih generacija kontejnerskih brodova na LNG pogon.

6.1 LNG KAO GORIVO

Danas je LNG kao brodsko gorivo dostupno i potencijalno rješenje za usklađivanje s nadolazećim zahtjevima za zagađenje zraka. Štoviše, primjena LNG-a za opskrbu brodskih motora atraktivno je rješenje za nove i već postojeće brodove. Tri su glavna pokretača koji čine LNG izvedivom alternativom. Prvo i najvažnije, LNG kao brodsko gorivo u potpunosti uklanja SOX emisije i PM, smanjuje emisiju NOX do 90%, a ujedno smanjuje emisiju CO₂ za oko 20%. [11] Drugo, u brodarskoj industriji postoji veliki broj plovila koji koriste LNG kao gorivo, tipa brodovi specijalizirani za prijevoz prirodnog ukapljenog plina ga koriste već nekoliko godina. LNG tankeri koriste se prirodnim vrenjem LNG-a uskladištenog u svojim teretnim prostorima kako bi opskrbljivali svoje motore. I treće, LNG kao pomorsko gorivo

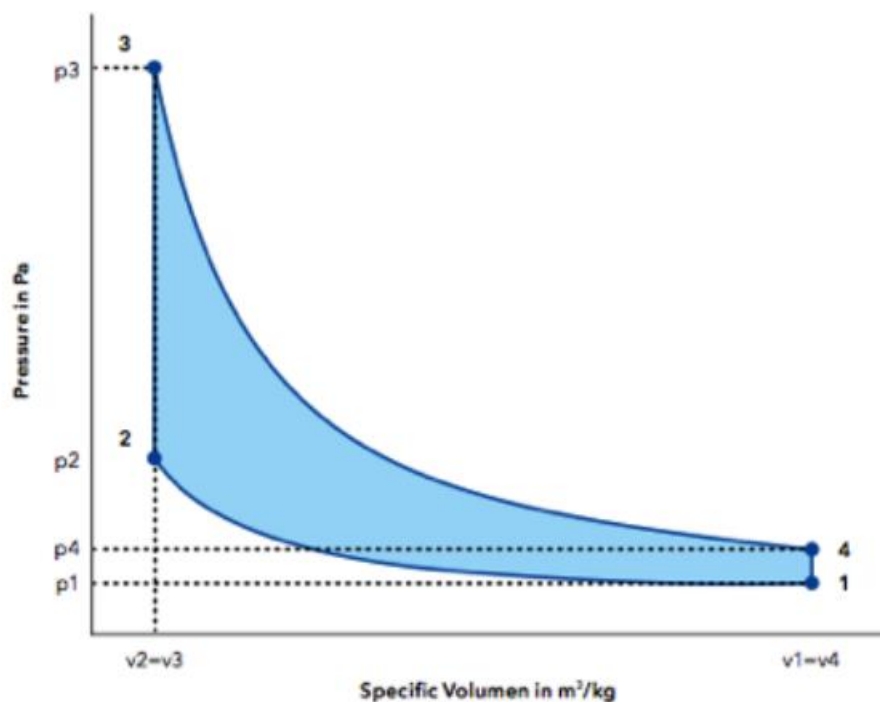
komercijalno je atraktivan zbog svoje svjetske dostupnosti, jer će rezerve LNG-a moći ispuniti potražnju za njime u pomorskoj industriji u narednim godinama, a niska cijena konkurirala je glavnim brodskim loživim uljima koja se koriste na konvencionalnim brodovima.

Niska cijena prirodnog plina i LNG-a u usporedbi s brodskim gorivima s visokim udjelom sumpora, uključujući HFO (Heavy fuel oil) ili IFO (Intermediate fuel oil), i destilate s niskim udjelom sumpora MDO (Marine diesel oil) i MGO (Marine gasoil) na određenim tržištima, čine LNG atraktivnim za brodsko gorivo. Do danas je cijena prirodnog plina u Sjedinjenim Državama (SAD) i Europi (EU) znatno niža od loživih ulja s visokim udjelom sumpora i destilata s malo sumpora, dok je u Aziji cijena LNG-a viša od loživih ulja s visokim sadržajem sumpora, ali niža od destilata s niskim sadržajem sumpora. [11] Treba uzeti u obzir da prirodni plin zahtijeva infrastrukturu iz razloga jer mora biti ukapljen, skladišten i spreman za učinkovito opskrbljivanje broda. LNG kao brodsko gorivo suočava se s izazovima razvojem motora za LNG, upravljanjem i opremanjem za skladištenje LNG-a na brodu i infrastrukture za skladištenje LNG-a. Motori pogonjeni na LNG već se koriste na LNG tankerima, ali ne i na drugim vrstama plovila, tipa na kontejnerskim brodovima. Kao rezultat toga, proizvođači motora počeli su razvijati DF motore koji mogu sagorijevati i LNG i dizel. LNG se zbog toga mora čuvati na vrlo niskoj temperaturi tijekom putovanja zbog čega spremnici za gorivo, cijevi i sustavi za rukovanje moraju biti opremljeni izolacijskim legurama koje mogu zadržati LNG na temperaturi od -162°C . Lučka postrojenja za proizvodnju, skladištenje i instalacije za punjenje gorivom ili plovila za bunker, moraju pouzdano i operativno opskrbljivati brodove na LNG.

6.2 IZVEDBE POGONA

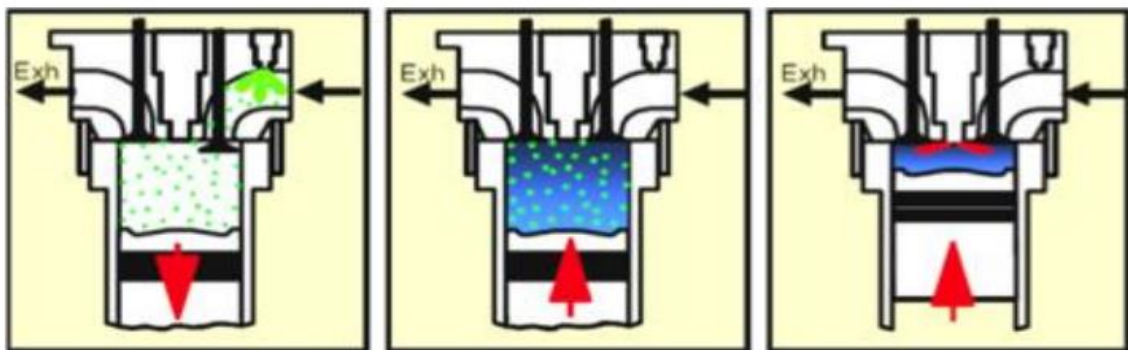
Danas, brodovi na LNG koji su u pogonu u osnovi su opremljeni s dvije vrste motora: štedljivi plinski motori i DF (dual fuel) motori. Štedljivi plinski motori udovoljavaju IMO Tier III propisima, dok DF motori su u skladu s IMO Tier II propisima kada rade u načinu rada s tekućim loživim uljem i IMO Tier III propisima kada rade u plinskom načinu rada. Danas su glavni proizvođači LNG pogona Wärtsilä, Rolls Royce i MAN, koji nude širok spektar dizajna motora u svim rasponima snaga. [11] Štedljivi plinski motori izvedeni su za opskrbu samo LNG-om i rade prema Otto-ovom principu. Takvi motori se opskrbljuju prirodnim plinom kroz plinski ventil (GVU) koji filtrira i kontrolira tlak prirodnog plina.

Cilindri plinskog motora napajaju se pojedinačnim cijevima, koje su spojene na glavnu cijev s dvostrukim zidom koja prolazi duž motora. Plinski motori napajaju se mršavom, prethodno pomiješanom smjesom zrak-plin, koja se u komori za izgaranje pali svjećicom. Mješavina zrak i plin sadrži više zraka nego što je potrebno što dovodi do niže temperature izgaranja i stoga se emisije NOX smanjuju, a učinkovitost povećava zbog većeg stupnja kompresije i optimiziranog vremena ubrizgavanja. Smjesa zrak-plin ubrizgava se pri niskom tlaku (4-5 bara) i stvara se izvan cilindra, iza turbopunjača. [11] Plin se može isporučivati izravno iz spremnika sa LNG - om pod pritiskom, jer su štedljivi plinski motori niskotlačni. Uz to, ovakvi motori imaju visoku energetska učinkovitost pri velikim opterećenjima, generiraju niske emisije NOX i smanjuju stakleničke plinove za približno 20%. Nadalje, pogonski sustavi koji koriste štedljive plinske motore predstavljaju dvije primjene: plinsko-mehaničku primjenu i plinsko - električnu primjenu. U plinsko-mehaničkom rasporedu, ovakvi motori osiguravaju pogonsku snagu propelera kroz reduktore i osovinske vodove. U plinsko-električnoj izvedbi raspored generatorskih setova pokreće štedljivi plinski motor koji opskrbljuje električne motore električnom snagom za pogon propelera.



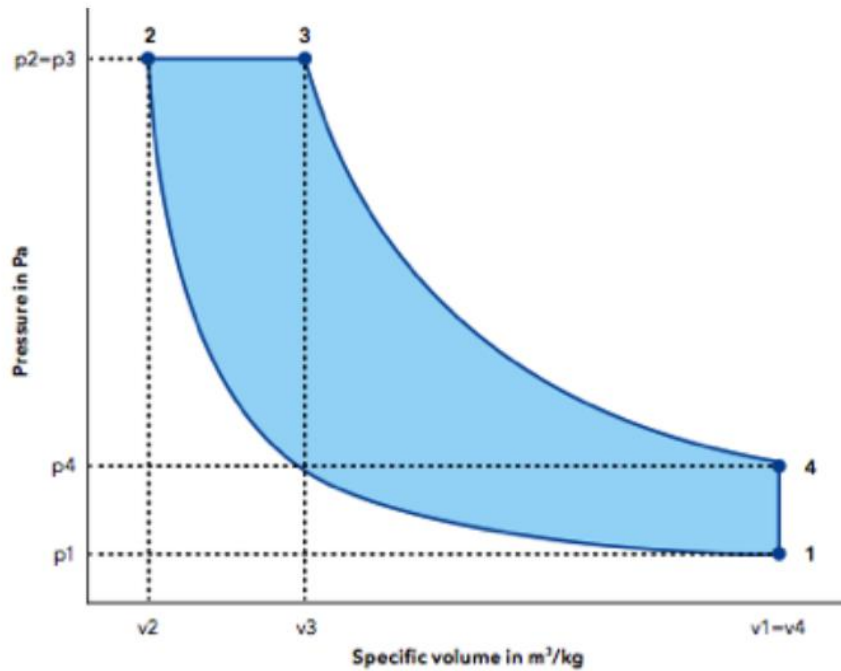
Slika 10. Dijagram volumena i tlaka Ottovog principa rada [11]

DF motori dizajnirani su za opskrbu LNG-om i tekućim gorivima, tipa MDO (marine diesel oil) ili HFO (heavy fuel oil). [11] Ovakav tip pogona se najviše koristi za nove generacije kontejnerskih brodova, pogotovo kada je riječ o novogradnji. DF motori rade prema Otto principu izgaranja u plinskom načinu rada i prema normalnom dizelskom ciklusu u dizel načinu rada. DF motori koji rade u plinskom načinu rada opskrbljuju se prirodnim plinom putem GVU (gas valve unit) koji filtrira i kontrolira tlak prirodnog plina. Cilindri motora napajaju se pojedinačnim cijevima, koje su spojene na glavnu dvostruku zidnu cijev koja prolazi duž motora. Kada rade u plinskom načinu rada, DF motori koriste mješavinu zraka i plina, koja smanjuje vršne temperature izgaranja i emisije NOX iz razloga što smjesa zrak-plin sadrži više zraka nego što je potrebno. Smjesa zrak-plin ulazi u cilindre tijekom hoda usisa i pali se malom količinom dizela ubrizganog u komore za sagorijevanje na kraju takta kompresije, jer je temperatura samozapaljenja smjese zrak-plin previsoka da bi se postigla kompresijom cilindra. U četverotaktnim motorima smjesa zrak-plin ubrizgava se pri niskom tlaku (4-5 bara) i generira se izvan cilindra iza turbopunjača. Pošto su četverotaktni motori niskotlačni, prirodni plin može se dobiti izravno iz tlačnih LNG spremnika za gorivo.



Slika 11. DF motor u plinskom načinu rada [11]

Kako bi se osigurale minimalne emisije NOX, količina ubrizganog dizela na kraju takta kompresije je vrlo mala, obično manja od 1% ukupne potrošnje goriva. DF motori koriste sustav ubrizgavanja mikro pilota, sustav kontrole, nadzora brzine i opterećenja motora kako bi optimizirali izgaranje. Kada DF motori rade u dizelskom načinu rada, dizel se ubrizgava u komoru za izgaranje pod visokim tlakom neposredno prije gornje mrtve točke. Prijem plina je onemogućen, iako je aktiviran mikro pilot tako da osiguravaju pouzdano pilot paljenje kada motor prelazi iz dizelskog u plinski mod.



Slika 12. Dijagram volumena i tlaka dizelskog ciklusa [11]

DF motori mogu se lako mijenjati iz jednog načina u drugi način rada tijekom brodskih operacija. Prelazak sa plinskog na dizelski način traje manje od jedne sekunde i ne utječe na opterećenje i brzinu motora. U slučaju prekida opskrbe prirodnim plinom ili otkaza dijelova motora, prebacivanje s plina na dizel trenutno je i automatski. Prelazak s dizelskog na plinski način postupni je proces. Opskrba dizelom polako se smanjuje, dok se količina osiguranog prirodnog plina povećava. Međutim, prelazak iz dizelskog u plinski način rada ima minimalan učinak na opterećenje i brzinu motora. Iako prelazak s LNG-a na MDO ili obrnuto ne zahtijeva potrebne izmjene motora, prelazak s LNG-a na HFO zahtijeva manje preinake motora. Nadalje, DF motori uglavnom imaju dva rasporeda pogonskog sustava, DF-mehanički motori i DF električni motori. S jedne strane, DF-mehanički motori pružaju pogonsku snagu propulzora reduktorima i osovinskim vodovima. S druge strane, DF-električni motori opskrbljuju električne motore električnom snagom za pogon propulzora.

Wärtsilä je glavni proizvođač DF motora i razvio je široku paletu LNG pogona i pogonskih sustava s rasponom snage od 0,9 do 18,3 MW (megawatt). [13] Wärtsilä DF motori rade velikom brzinom koji oscilira između 500 i 1200 okretaja u minuti, a karakterizira ih fleksibilnost goriva, niska emisija ispušnih plinova i fleksibilnost primjene, budući da DF motori mogu raditi ili konstantnom brzinom kao generatorski setovi ili

promijenjivom brzinom kao mehanički pogoni. Uz to, motori Wärtsilä DF koriste provjerene i pouzdane DF tehnologije kao što su integrirani sustavi automatizacije za prebacivanje načina rada zbog kojih se ostvaruje ušteda goriva pri bilo kojem opterećenju motora. Wärtsilä je razvila četiri serije DF motora, Wärtsilä 20DF, Wärtsilä 34DF, Wärtsilä 46DF i Wärtsilä 50DF. Wärtsilä 20DF je namijenjen tegljačima i manjim teretnim brodovima i trajektima kada radi kao pogonski pokretač, premda je pogodan i za širok raspon plovila kada radi kao generator. Omogućuje izlaznu snagu od 0,9 do 1,6 MW. Wärtsilä 34DF je prikladan za širok spektar plovila ili kao glavni pokretač ili kao generator. Ovakav tip motora nedavno je ugrađen u jednom od najvećih kontejnerskih brodova novih generacija na svijetu CMA CGM JACQUES SAADE. Pruža snagu snaga od 2,8 do 8,0 MW. Wärtsilä 46DF je dizajniran za rad kao DF-mehanički ili DF električni motor i pruža izlaznu snagu od 6,2 do 18,3 MW. Zadnji, Wärtsilä 50DF je namijenjen velikim prijevoznima LNG-a i trajektima kada rade kao glavni pokretači. Omogućuje izlaznu snagu od 5,7 do 17,5 MW. Slika 13. pokazuje sve varijante DF motora od proizvođača Wärtsilä.

Engine Series	Engine Type	Cylinder Configuration	Rated Power
Wärtsilä 20DF	6L20DF	6 cylinders in line	1,110 kW at 1,200 rpm
	8L20DF	8 cylinders in line	1,480 kW at 1,200 rpm
	9L20DF	9 cylinders in line	1,665 kW at 1,200 rpm
Wärtsilä 34DF	6L34DF	6 cylinders in line	3,000 kW at 750 rpm
	8L34DF	8 cylinders in line	4,000 kW at 750 rpm
	9L34DF	9 cylinders in line	4,500 kW at 750 rpm
	12V34DF	12 cylinders in V	6,000 kW at 750 rpm
	16V34DF	16 cylinders in V	8,000 kW at 750 rpm
Wärtsilä 46DF	6L46DF	6 cylinders in line	6,870 kW at 600 rpm
	7L46DF	7 cylinders in line	8,150 kW at 600 rpm
	8L46DF	8 cylinders in line	9,160 kW at 600 rpm
	9L46DF	9 cylinders in line	10,305 kW at 600 rpm
	12V46DF	12 cylinders in V	13,740 kW at 600 rpm
	14V46DF	14 cylinders in V	16,030 kW at 600 rpm
	16V46DF	16 cylinders in V	18,320 kW at 600 rpm
Wärtsilä 50DF	6L50DF	6 cylinders in line	5,850 kW at 514 rpm
	8L50DF	8 cylinders in line	7,800 kW at 514 rpm
	9L50DF	9 cylinders in line	8,775 kW at 514 rpm
	12V50DF	12 cylinders in V	11,700 kW at 514 rpm
	16V50DF	16 cylinders in V	15,600 kW at 514 rpm
	18V50DF	18 cylinders in V	17,550 kW at 514 rpm

Slika 13. Varijante DF motora od proizvođača Wärtsilä [11]

6.3 LNG SPREMNICI I SUSTAV OPSKRBE PLINOM

Zbog povećanih i strožih propisa o onečišćenju zraka, brodari su počeli naručivati nove kontejnerske brodove i nadograđuju svoju trenutnu flotu pogonima na LNG, budući da se kao brodsko gorivo smatra dostupnim i izvedivim rješenjem koje udovoljava međunarodnim ograničenjima emisija za brodove. Za pogon na LNG potreban je sustav za opskrbu plinom i spremnik za LNG, koji pohranjuju potrebnu količinu plina kako bi ih opskrbljivao tijekom cijelog putovanja. Međutim, spremnici za LNG predstavljaju određene izazove. Prvo i prije svega, spremnici za LNG zahtijevaju više prostora u usporedbi sa spremnicima koji se koriste za opskrbu teškim gorivima, oni su oko 2,5 puta veći od HFO spremnika. Nadalje, spremnici za LNG moraju držati plin na vrlo niskoj temperaturi od -162°C i minimizirati vrenje kako bi se izbjegli povišeni tlakovi. [11] Kao posljedica toga, opremljeni su mjerama izolacije, koje također povećavaju veličinu spremnika.

Proizvođači LNG pogona također su počeli razvijati sustave za skladištenje i rukovanje LNG-om na samom brodu koja mogu opskrbiti svoje motore. Nekoliko mogućnosti spremnika za LNG i sustava za opskrbu plinom dostupni su ovisno o veličini broda i vrsti motora. Prema veličini plovila, veliki brodovi mogu biti opremljeni s tri različite vrste spremnika. Spremnici za LNG projektirani su u skladu s Međunarodnim kodeksom IGC. Štoviše, IMO smjernice određuju vrste spremnika u kojima je dopušteno skladištenje LNG-a, a to su vrste A, B i C.

Prizmatski spremnici tipa B i spremnici tipa C najprihvatljivija su opcija za nove generacije kontejnerskih brodova, budući da se i jedan i drugi mogu djelomično napuniti i istovremeno omogućiti rad plovila. Glavne prednosti prizmatičnih spremnika tipa B jesu da se izvedba spremnika može prilagoditi oblicima trupa, a spremnici mogu imati bilo koju veličinu. Govoreći o C-tipu spremnika, dizajn spremnika može se samo djelomično prilagoditi obliku trupa, a maksimalni kapacitet spremnika je oko 20.000 m³. Čak i teški radni pritisak od 5-6 bara, omogućuje im lako upravljanje vrenjem tijekom operacija. Nove generacije kontejnerskih brodova koriste i membranske spremnike Mark III sa Flex membranom koja osigurava 50 posto više vremena da pritisak dosegne prag za GCU (Gas combustion unit). [15] Fleks Mark III membrana ima 400 milimetara izolacije od PU pjene u odnosu na 270 milimetara u standardnom sustavu Mark III.

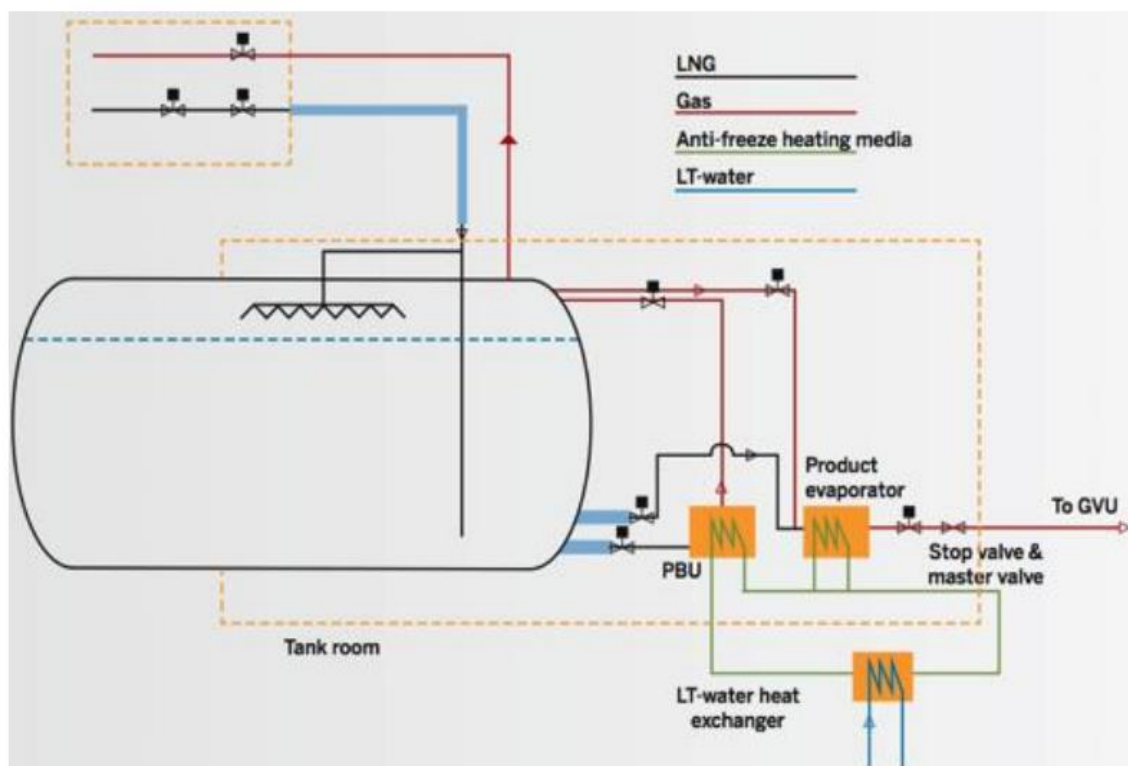


Slika 14. Prizmatični LNG spremnik B i spremnik C [11]

Glavni cilj sustava za opskrbu plinom je rukovanje LNG-om na brodovima na siguran način. Zbog toga čitav lanac opskrbe LNG-om, od punionica na obali do ventila na plinskom pogonu, moraju biti pravilno integrirani. Dizajn sustava za opskrbu plinom razlikuje se ovisno o radnom tlaku pogona. Proizvođači pogona na LNG izveli su dva rasporeda za plinski opskrbni sustavi, jedan za motore s niskim tlakom i drugi za motore s visokim tlakom. Ipak, i jedan i drugi sustav opskrbe plinom imaju prilično sličan način rada.

S jedne strane, sustavi za opskrbu plinom za motore s niskim tlakom sastoje se od jedinice za povišenje tlaka (PBU), isparivača, GVV (gas valve unit) i sustava upravljanja i nadzora. Niskotlačni motori moraju biti opskrbljeni prirodnim plinom na 4-5 bara, te se stoga LNG mora skladištiti pod pravim tlakom. Prije svega, LNG s obalnog terminala ili broda za opskrbu LNG-om, opskrbljuje se putem postaja za opskrbljivanje na brodu koja sadrži jednu liniju za gorivo, jednu povratnu liniju i jednu za pročišćavanje dušika. Svi oni su opremljeni odgovarajućim tlačnim sigurnosnim ventilima. LNG cirkulira uz vakum izolirane linije od stanice za opskrbu plinom do spremnika za LNG, gdje se skladišti pod tlakom od 5 bara. Zatim, LNG ulazi u PBU (jedinica za povećanje tlaka) čiji je cilj povećati tlak u spremniku nakon punjenja i održavati pravi pritisak u spremniku. Niskotlačni motori mogu doseći maksimalnu snagu kada se tlak u spremniku održava na pravoj razini (5 bara). Nadalje, ulazni tlak plina u motoru postiže se zahtjevima za održavanjem odgovarajućeg tlaka u spremniku za LNG, s obzirom da plinski opskrbni sustav nije opremljen kriogenim pumpama ili kompresorima. Štoviše, LNG teče od dna spremnika do PBU zahvaljujući razlici u tlaku između vrha i dna spremnika, a zatim se vraća u spremnik kroz njegov vrh.

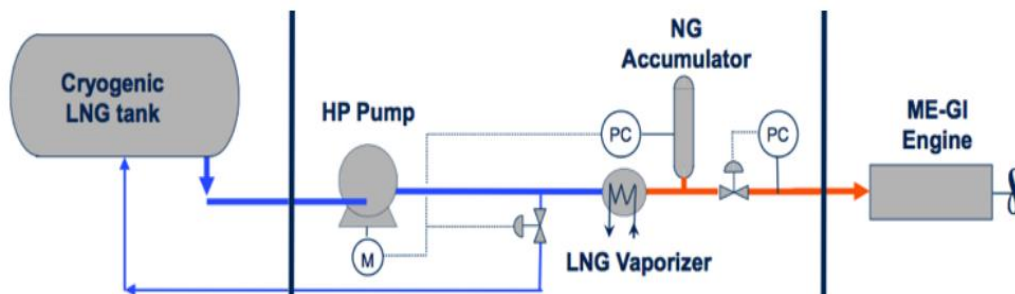
Prirodna cirkulacija LNG-a između spremnika i PBU se zaustavljaju kad se postigne pravi pritisak u spremniku. Nakon toga se LNG dovodi u isparivač, gdje se pretvara u prirodni plin i zagrijava najmanje na 0°C , ovisno o zahtjevima motora. I PBU i isparivač koriste vruću vodu za sustav hlađenja kao izvor topline, tako da povećavaju tlak u spremniku. Prirodni plin tada teče prema GVU, koji regulira tlak prirodnog plina prema opterećenju motora i osigurava sigurno odvajanje sustava za dovod plina. GVU se nalazi između sustava za rukovanje LNG-om i motora koji se postavlja u kućište kako bi se mogao ugraditi u isti prostor strojarnice, a time i smanjiti složenost i troškove instalacije.



Slika 15. Niskotlačni sustav opskrbe plina [11]

S druge strane, sustavi za opskrbu plinom za visokotlačne motore sastoje se od visokotlačne pumpe LNG-a, sustava upravljanja pumpom, izmjenjivača topline i sustava ublaživačkog kapaciteta. Visokotlačni motori moraju biti pogonjeni prirodnim plinom od 250-300 bara, a s time LNG mora biti pod pritiskom i isparen. Visokotlačna pumpa opskrbljena je LNG-om pohranjenim u kriogenom LNG spremniku pomoću pumpe smještene u spremniku, a koristi se za povišenje tlaka LNG-a na 200-300 bara i cirkulaciju LNG-a pod tlakom kroz izmjenjivača topline (isparivač LNG-a). [11] Izmjenjivač topline koristi sustav vruće vode za sustav hlađenja kao izvor topline kako bi se ispario LNG. Zatim

se prirodni plin pod pritiskom prebacuje u sustav ublaživačkog kapaciteta (akumulator prirodnog plina), gdje se skladišti kako bi se napajao motor s konstantnom brzinom protoka prirodnog plina pod tlakom.



Slika 16. Visokotlačni sustav opskrbe plinom [11]

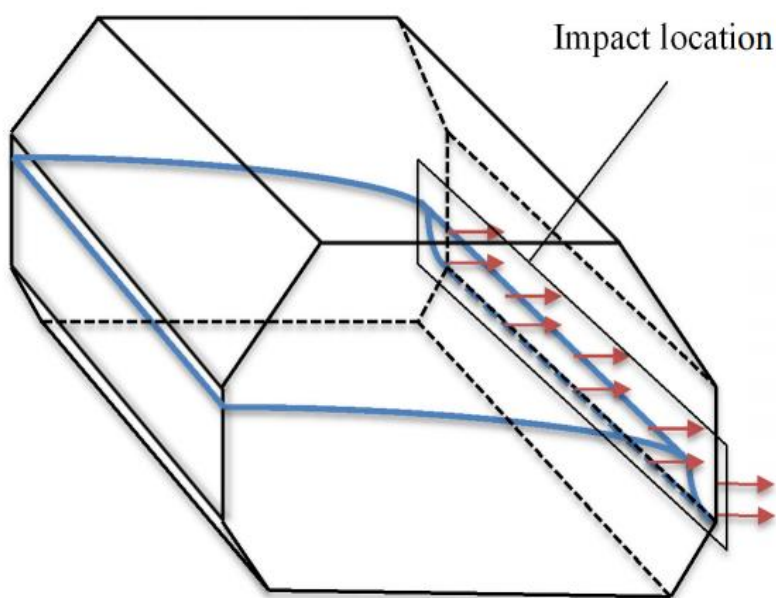
U osnovi, sustav za opskrbu plinom skladišti LNG, pretvara LNG u prirodni plin i opskrbljuje motore prirodnim plinom u savršenim i stabilnim uvjetima, a karakterizira ga njihova povećana sigurnost i pouzdanost. Glavne prednosti kompaktnog sustava za opskrbu plinom su učinkovita upotreba prostora, manje sučelja, smanjeni kapitalni i operativni troškovi i maksimalizirana prostorija za skladištenje LNG-a. Uz to, dizajn sustava za opskrbom plina nudi razne konfiguracije koje omogućuju ugradnju više spremnika i GVU-ova ovisno o zahtjevima plovila.

6.4 UTJECAJ SLOBODNIH POVRŠINA

Zapluskivanje je uobičajena pojava koja se javlja u zatvorenim odjeljcima koji sadrže tekućine kao rezultat relativnih kretanja između slobodne površine tekućina i pripadajućeg spremnika. [14] Postoji nekoliko tipova scenarija zapluskivanja s vrlo različitim karakteristikama opterećenja. Uobičajeni čimbenik za sve vrste zapluskivanja ovisi o razini punoće spremnika zajedno s gibanjima broda. Tlakovi zapluskivanja su dinamička tlačna opterećenja koja proizlaze iz postojećih valova u spremnicima. Ovisno o visini vala ta opterećenja mogu biti tretirana kao više ili manje globalna, što utječe na velike površine spremnika. Period opterećenja je predstavljen periodom postojećeg vala i na taj način upravlja rezonancijskim ponašanjem tekućine. To znači da će djelomično napunjeni spremnik biti neprestano izložen tim opterećenjima. Razdoblje rezonancije ovisi o geometriji spremnika i razini napunjenosti i obično je reda nekoliko sekundi. Pritisci na

sustav zadržavanja približno su jednake magnitude kao hidrostatički tlakovi na temelju trenutne njihove elevacije.

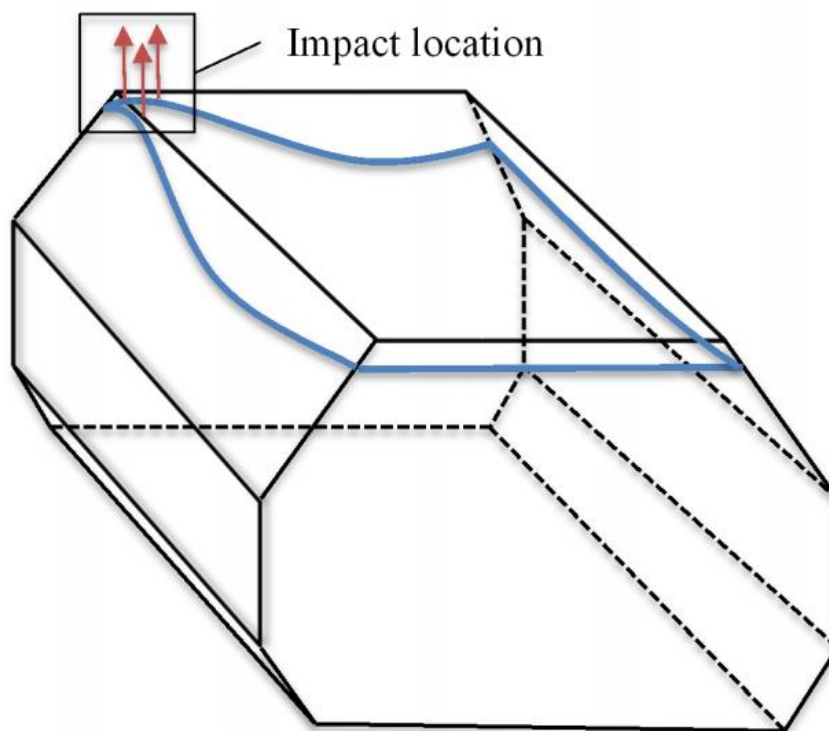
Udarni tlakovi uzrokovani su utjecajem površine tekućine na sadržaj sustava pri velikim brzinama. To znači da je trajanje opterećenja za svako zapljuskivanje vrlo kratko, obično reda nekoliko milisekundi. Suprotno pritiscima koji padaju, udarna opterećenja su također u mnogim slučajevima lokalizirani fenomeni. To znači da je zahvaćeno područje tijekom udara zapljuskivanjem prilično ograničeno u opsegu. Međutim, nasilna zapljuskivanja mogu proizvesti vrhunce vrlo visokih tlakova na dijelovima sustava. Ozbiljnost tih opterećenja ovisi o brojnim čimbenicima, kao što su kut udara, brzina udara, stvaranje plinskih džepova. Stoga za ozbiljna zapljuskivanja se može očekivati da će se takvi utjecaji dogoditi samo povremeno.



Slika 17. Ilustracija zapljuskivanja u bok spremnika pri nižoj napunjenosti [14]

Mogu se pojaviti različite vrste udara, ovisno o razini punjenja i gibanju broda. Nekoliko različitih slučajeva mogu se identificirati kao ozbiljna. Za više razine punjenja u kombinaciji s plovidbom po uzburkanijim morima, krov spremnika će vjerojatno često patiti od udaraca. To se događa zbog dijagonalne rezonancije valova u spremnicima koji utječu na područje oko ugla gdje se susreću poprečna pregrada u gornjem dijelu spremnika i žlijeb,

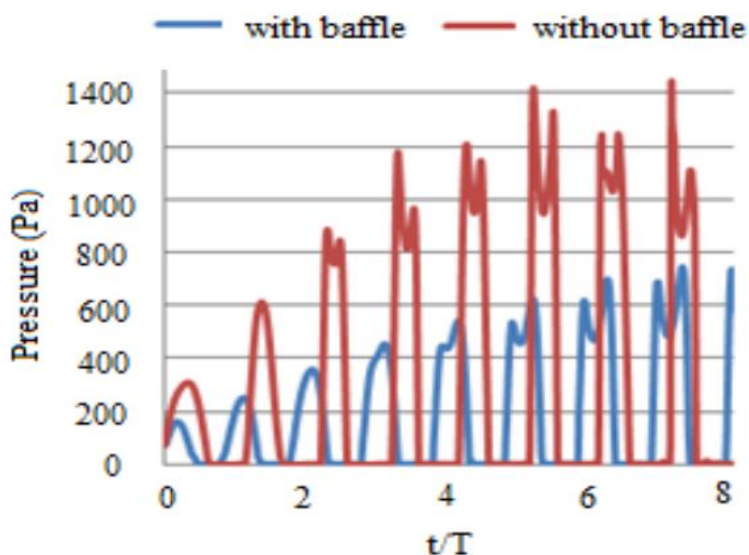
vidi sliku 18. Za razine punjenja ispod 90% do donjeg završetka gornje faze obično će doći do razbijanja područja gdje se gornji žlijeb susreće s krovom i okomitom stranom spremnika. U uvjetima s niskim razinama punjenja utjecaji će se najvjerojatnije dogoditi kao razbijanje valova koji utječu na strukturu. Vrlo težak slučaj ove pojave se naziva hidrauličkim skokom ili putujućim provrtom i može utjecati na velike dijelove spremnika. Ovo je okarakterizirano promjenom razine slobodne površine koja putuje velikom brzinom i udara u uzdužnu ili poprečnu pregradu.



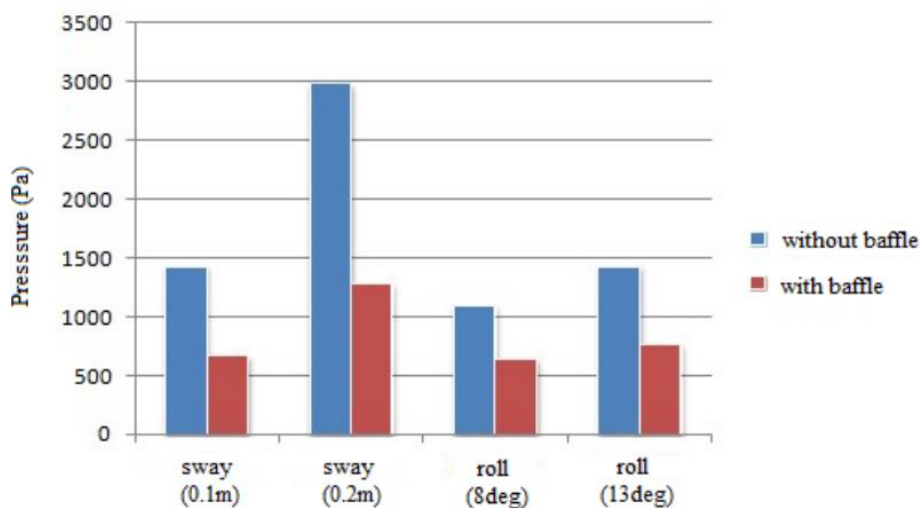
Slika 18. Ilustracija zapljuskivanja spremnika pri visokoj napunjenosti [14]

Način na koji se umanjuje utjecaj slobodnih površina i zapljuskivanja u spremnicima jest postavljanje vertikalne pregrade u sredini na dnu spremnika. Slučajevi bez pregrade pokazuju da će niža razina punjenja tekućinom izazvati veći udarni tlak. [15] Vertikalna pregrada u spremniku smanjuje maksimalni udarni pritisak na stijenku spremnika pri niskoj napunjenosti. Slika 19. uspoređuje udarni pritisak prilikom ljućanja broda s amplitudom kretanja od 13 stupnjeva, gdje se vidi da se udarni pritisak za slućajeve s pregradom znaćajno smanjuje uspoređujući slućaj bez pregrade. Slika 20. prikazuje smanjenje udarnog pritiska za ostale slućajeve. Zakljućuje se da maksimalni udarni pritisak za spremnik s pregradom je

zmanjen za gotovo 50% u usporedbi sa slučajevima bez pregrade na dnu spremnika. Umetanjem pregrade na dno spremnika, prirodna frekvencija membranskog spremnika je pomaknuta. Vrijednost nove prirodne frekvencije gotovo se udvostručila u usporedbi sa stvarnim. Tako se izbjegava rezonancijski fenomen koji se događa na izvornoj pobuđenoj frekvenciji.



Slika 19. Usporedba udarnog pritiska bez i sa pregradom (baffle) u spremniku s 25% nspunjenosti pri amplitudi ljuljanja broda od 13 stupnjeva [15]



Slika 20. Usporedba rezultata najvećeg udarnog pritiska bez i sa pregradom (baffle) u spremniku pri napunjenosti od 25% za ostale slučajeve [15]

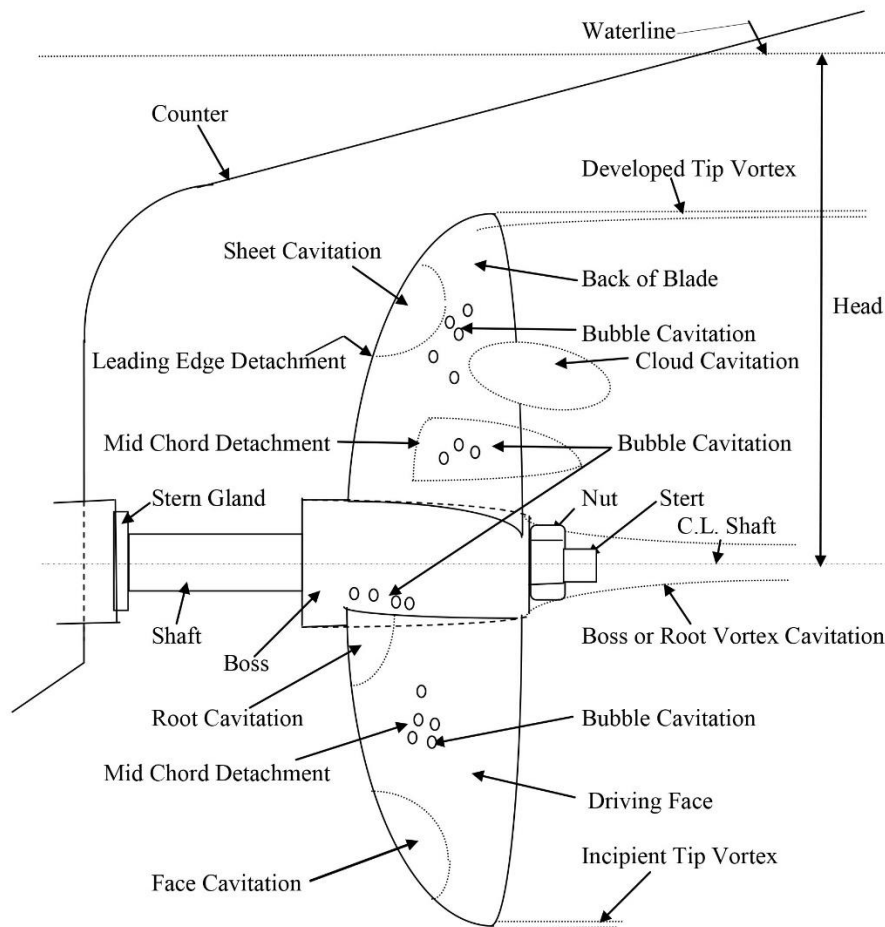
7. PROPULZIJSKI HIDRODINAMIČKI ASPEKTI

U ovom poglavlju će se prikazati hidrodinamički aspekti novih generacija kontejnerskih brodova u pogledu kavitacije kormila i propulzora. Ti se hidrodinamički problemi pojavljuju kao rezultat povećanog opterećenja propulzora, koju imaju alternativni pogonski koncepti za ovu vrstu plovila. Zbog iznimnih veličina brodova dolazi do sljedećih hidrodinamičkih problema: [6]

1. Nove generacije kontejnerskih brodova s konfiguracijom s jednim vijkom ne mogu postići potrebnu brzinu s dostupnim glavnim motorima.
2. Na temelju činjenice da u dizajnu ovakvih brodova postoje ekstremni uvjeti na propulzoru, budući da su enormnih dimenzija i visoko opterećeni zbog utjecaja protoka ogromnih količina vode preko kormila, postoje problemi s kavitacijom propulzora i kormila.
3. Zbog oblika trupa i njegovih ekstremnih dimenzija, parametarsko valjanje je pitanje koje izaziva zabrinutost.

7.1 KAVITACIJA PROPULZORA

Hidrodinamički gledano propulzor je jedno od najproblematičnijih područja za nove generacije kontejnerskih brodova. Razmjeri snage i brzina vrha vijka propulzora je vrlo visoka. Na primjer, za ultra velike kontejnerske brodove kapaciteta 12.000 TEU je oko 45 m/s, a razmjeri snage oko 1240 KW / m². Te su vrijednosti izuzetno visoke i zahtijevaju vrlo pažljivo izvedeni propulzor kao i kormilo koje je smješteno u kliznom toku iza propulzora. Omjer površine lopatica je reda 1,0 i stoga su odabrane lopatice propulzora od 5 do 7, što dovodi do težine propulzora od oko 100 tona i više. Sljedeće ograničenje u vezi s izvedbom propulzora je njegov maksimalni promjer koji mogu imati ovakvi brodovi. Ova vrijednost ovisi o gasu broda. Poznato je da ovakvi brodovi mogu imati gaz u nakrcanom stanju do 16 metara.



Slika 21. Različite vrste kavitacija propulzora [22]

S vrijednošću gaza ne većom od 16 metara, propulzori s promjerom većim od devet metara ne mogu se proizvesti, a čak i ako se mogu to neće biti učinkovito u pogledu njegove težine. Potražnja za visokom učinkovitošću propulzora, prihvatljivim tlačnim impulsima, dobrom interakcijom trupa i propulzora i odsutnost erozivne kavitacije dovode do vrlo sofisticirane izvedbe propulzora sa neobičnim geometrijama. Da bi se mogao konstruirati najučinkovitiji propulzor, koriste se posebni i vrlo sofisticirani softveri. Točnije, takvi računalni programi mogu digitalno simulirati rad vijka i na taj način odrediti sve njegove hidrodinamičke karakteristike kao i njegovu kavitaciju.

7.2 KAVITACIJA KORMILA

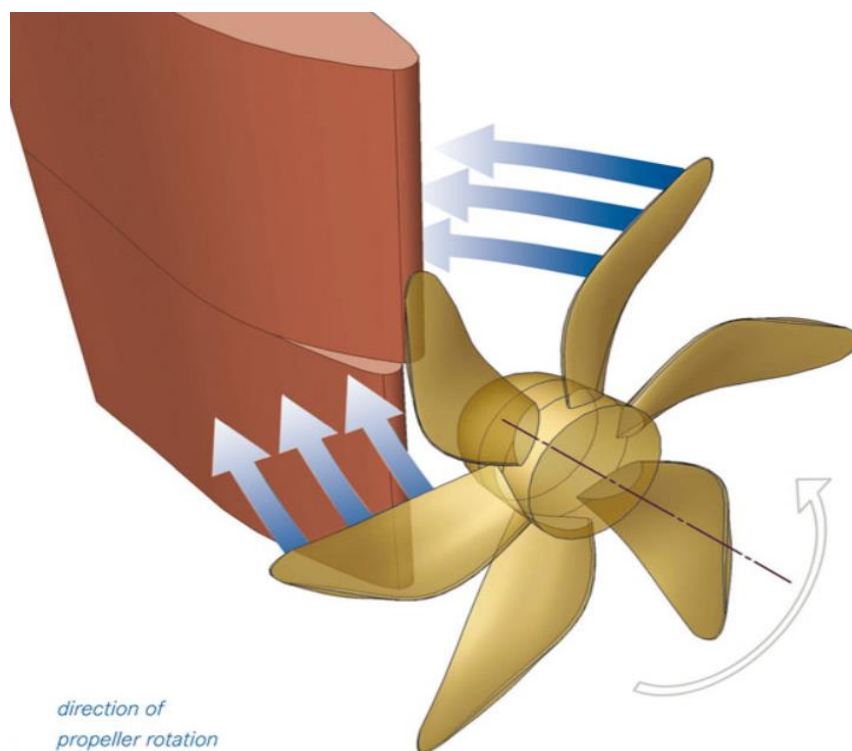
Drugo najproblematičnije područje u pogledu hidrodinamike nakon propulzora je kormilo. To je zbog činjenice da se kormilo nalazi u kliznom toku rada propulzora. Kao rezultat, svaka kavitacija propulzora izravno prolazi kroz kormilo. Dizajn kormila za nove generacije kontejnerskih brodova ne mogu se izraditi jednostavnom ekstrapolacijom veličine iz prethodnih generacija brodova manjih dimenzija. [6] Umjesto toga, pronalaze se principi izvedba i osigurava se da kormilo djeluje učinkovito u odnosu na odabrani propulzor.

Postoje slučajevi gdje se na novogradnjama kavitacija kormila pojavila nakon kratkog vremena rada zbog njegove nepravilne izvedbe. Kavitacija kormila može dovesti do erozije materijala, vibracije i buke. Gubitak voznih karakteristika i potrebni popravci primjetno smanjuju ekonomičnost rada ovakvih tipova brodova. Iz tog razloga koriste se razne tehnike, koje predviđaju uzork kavitacije. Jedna od najčešćih je dobro poznata računska dinamika fluida (CFD). Ovom tehnikom optimizira se izvedba kormila u smislu kavitacije. Stvarna situacija stavlja se u računalni sustav gdje se umanjeni testirani modeli pokreću digitalno. Pomoću umanjenih testnih digitalnih modela, može se predvidjeti izvedba propulzora koja se treba koristiti. Korištenjem CFD računске analize došlo se do određenih izvedbenih rješenja koja se mogu koristiti za spriječavanje stvaranja kavitacije kormila kad brod plovi velikom brzinom i kada se kormilo zakreće pod malim kutem koristeći automatsku pilot funkciju.

Prvo rješenje je uporaba specifične izvedbe kormila nazvanog uvijeno kormilo. Uobičajena kormila su postavljena iza propulzora, gdje je presjek kormila postavljen simetrično sa središnjom crtom propulzora. Unatoč tome, takav aranžman ne uzima u obzir da propulzor inducira rotacijski tok koji je jak i upada u oštricu kormila. Kao rezultat, područja s niskim tlakom stvaraju se na kormilu što rezultira kavitacijom. Uvijeni dizajn kormila izbjegava ovu pojavu koja vodi do boljih kavitacijskih karakteristika. S ovim riješenjem nema roga kormila i nema kavitacijske praznine koja se obično događa kad se vrtlozi glavčine ili vrha propulzora presijeku s prazninama između roga i kormila.

Ovakva situacija može dovesti do erozije u vrlo kritičnim dijelovima kormila, utječući izravno na njegovu operativnu učinkovitost. Nadalje, budući da je kavitacija kormila smanjena, dolazi do veće pogonske učinkovitosti (potrošnja energije smanjena je za

2%), pitanje od velike važnosti za nove generacije kontejnerskih brodova. Osim toga, za konstrukciju kormila, nije potrebno koristiti ploče velikih debljina da prevladaju problem kavitacije. S korištenjem ove vrste kormila, dolazi do smanjenja vibracija, a glavna prednost je što se dolazi do bolje interakcije propulzora i trupa.



Slika 22. Izvedba uvijenog kormila [21]

8. PRIMJERI BRODOVA I SPECIFIKACIJE

Za potrebe ovog završnog rada sagledao sam dva kontejnerska broda novih generacija iz različitih kompanija. Ovi brodovi koriste najnovije tehnologije i rješenja danas dostupna u pogledu strukture i pogona na LNG. U nastavku su prikazane njihove osnovne specifikacije.



Slika 23. Kontejnerski brod CMA CGM Palais Royal [17]

IMO broj: 9839181

Zastava: Francuska

Vlasnik i upravitelj: CMA - CGM

Godina izgradnje: 2020

Dužina: 400 m

Širina: 62 m

Gaz: 16 m

Brzina avg/max: 13.2 / 21.8 kn

Bruto tonaža: 236583

Brodogradilište: Hudong-Zhonghua Shipbuilding - Jiangnan Shipyard

Kapacitet kontejnera: 23,112 TEU

Opis pogona: CMD-WinGD 12X92 DF

Kapacitet i vrsta LNG spremnika za opskrbu: 18,000 m³, Mark III

Najveća inducirana snaga: 63,840 kW



Slika 24. Kontejnerski brod Barzan [17]

IMO broj: 9708851

Zastava: Malta

Vlasnik i upravitelj: UASC, Hapag Lloyd

Godina izgradnje: 2015

Dužina: 397 m

Širina: 56.1 m

Gaz: 14.5 m

Brzina avg/max: 14.4 / 22.9 kn

Bruto tonaža: 199744

Brodogradilište: Hyundai Samho Heavy Industries Co Ltd

Kapacitet kontejnera: 18,691 TEU

Opis pogona: DF MEGI, LNG

Kapacitet i vrsta LNG spremnika za opskrbu: 2x5,500 m³, Mark III

Najveća inducirana snaga: 61,000 kW

9. ZAKLJUČAK

Nove generacije kontejnerskih brodova na LNG pogon su istovremeno umjetničko djelo i iznimno komplicirana i zahtjevna tehnologija. U pogledu same konstrukcije, kritični dijelovi su riješeni raznim tehnološkim i računalnim analizama. Ista stvar se odnosi na hidrodinamičke aspekte kormila i propulzora. Zbog kompliciranosti i velike razine rizika, prostor za pogreške je izuzetno uzak. Male pogreške ili nedostatak uočavanja sitnica mogu dovesti do ozbiljnih posljedica po sigurnost i učinkovitost rada broda u svakodnevnim operacijama. Nove generacije kontejnerskih brodova koriste se najboljim automatskim protunagibnim sustavima koja se trenutno nude na tržištu. Razlog tome je što kod brodova ovakvih dimenzija i masa nema previše prostora za pogreške. Brzina, efikasnost, učinkovitost prekrcaja tereta i stabilnost broda ovise uvelike o ovom sustavu.

LNG kao gorivo je odlično u pogledu smanjenja ispušnih plinova, međutim tehnologija samog pogona i njegove izvedbe je izuzetno komplicirana i skupa. Može se reći da implementacija LNG pogona na kontejnerskim brodovima još uvijek nije dosegla vrhunac i konačna rješenja, bez obzira na razne pogodnosti koje pruža u usporedbi s konvencionalnim gorivima. Može se zaključiti da je trenutno u pogledu zelenijeg poslovanja u kontejnerskom brodarstvu LNG najbolje rješenje. Ono što se vidi jest da će se sve više graditi nove generacije kontejnerskih brodova na LNG pogon, dok će ostali postojeći brodovi ovakvog tipa ostati pogonjeni konvencionalnim gorivima jer je izrazito skuplje i neisplativije prebacivati već postojeći brod na LNG.

LITERATURA

- [1] Cudahy, B.J., *The containership revolution*, TR news 246, Washington, 2006. URL: http://www.worldshipping.org/pdf/container_ship_revolution.pdf
- [2] Rodrigue JP. 2020, *Evolution of container ships*, The Geography of Transport Systems. URL: <https://transportgeography.org/contents/chapter5/maritime-transportation/evolution-containerships-classes/>
- [3] *Container ships*, Vinalogs Container transportation, URL: <https://www.container-transportation.com/container-ships.html>
- [4] Sinha T. 2020, *What is the purpose of "Torsion Box" In ships?*, URL: <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/torsion-box-on-ships/>
- [5] International Group of Authorities, Lamb T. 2004, *Ship Design and Construction*, Vol II, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 601 Pavonia Avenue Jersey City.
- [6] Evangelos F. 2006, *Ultra Large container ships*, World Maritime University, URL: https://commons.wmu.se/cgi/viewcontent.cgi?article=1279&context=all_dissertations
- [7] Raunek, 2019., *X Bow Hull Design vs Conventional Hull Design*, Naval Architecture, URL: <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/x-bow-hull-design-vs-conventional-hull-design/>
- [8] Chakraborty, S., *Understanding Design of Container Ships*, 2015. URL: <http://www.marineinsight.com/naval-architecture/understanding-design-of-container-ships/>
- [9] *Heel Control System overview*, Hoppe Marine, 2021, URL: <https://www.hoppe-marine.com/solutions/heel-control>
- [10] *Intering Anti – Heeling Systems*, Wärtsilä Encyclopedia of Marine Tehnology, 2021, URL: <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/intering-anti-heeling-systems>
- [11] Sastre Buades L., 2017., *Implementation of LNG as marine fuel in current vessels. Prospectives and improvements on their environmental efficiency*, Facultat de Nàutica de Barcelona Universitat Politècnica de Catalunya, URL: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/106327/125548_Implementation%20of%20LNG%20as%20marine%20fuel%20in%20current%20vessels,%20perspectives%20and%20improvements%20on%20their%20environmental%20efficiency.pdf
- [12] N Le Fevre C., 2018., *A review of demand prospects for LNG as a marine fuel*, The Oxford Institute for energy studies, URL: <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2018/07/A-review-of-demand-prospects-for-LNG-as-a-marine-fuel-NG-133.pdf>

- [13] *Engines and generating sets*, Wärtsilä 2021., URL:
<https://www.wartsila.com/marine/build/engines-and-generating-sets/dual-fuel-engines>
- [14] Liljegeren A. & Lindahl O., 2015., *Sloshing impact response in LNG Membrane Carriers*, Chalmers University of Technology, URL:
<https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/221568/221568.pdf>
- [15] Cunha A., Caetano E., Ribeiro P. & Müller G., 2014., *Minimising the sloshing impact in membrane LNG tank using a baffle*, EURO DYN, URL:
https://paginas.fe.up.pt/~eurodyn2014/CD/papers/443_MS20_ABS_1519.pdf
- [16] Erhorn T., Schnack P. & Krüger M., 2014., *LNG as a ship fuel*, GNV DL Maritime Communications, URL: https://www.dnv.com/Images/LNG_report_2015-01_web_tcm8-13833.pdf
- [17] Fleet Moon tracking the seven seas, 2021., URL: <https://www.fleetmon.com/>
- [18] Jurkov I., 2021., *Kontejner proslavio 65. rođendan*, Burza Nautike, URL:
https://www.burzanautike.com/hr/kontejner_proslavio_65_rodendan/6730/5
- [19] Duran M., 2020., *CMA CGM's 2nd LNG – powered giant nearing completion*, Offshore Energy, URL: <https://www.offshore-energy.biz/cma-cgms-2nd-lng-powered-giant-nearing-completion/>
- [20] *Maersk Kinney Moller Model – stern view*, Savy Boat, URL:
https://savyboat.com/?attachment_id=19752
- [21] *Twisted Leading Edge Rudder*, Becker Marine System, URL:
http://emita.info/03_products/products_twisted_full_spade.html
- [22] Casciani – Wood J., 2015., *An Introduction of propeller cavitation*, International Institute of Marine Surveying, URL: <https://www.iims.org.uk/introduction-propeller-cavitation/>

POPIS SLIKA

Slika 1. Brod „Ideal X“ na prvom svjetskom kontejnerskom terminalu	2
Slika 2. Kontejnerski brod „Majestic Maersk“	3
Slika 3. Generacije kontejnerskih brodova.....	5
Slika 4. Analiza metode konačnih elemenata (FEA).....	7
Slika 5. Glavna područja uglova grotla	8
Slika 6. Pozicija nadgrađa i strojarnice	9
Slika 7. X bow pramac broda „CMA CGM Concorde “	11
Slika 8. Krmena struktura novih generacija kontejnerskih brodova	12
Slika 9. Automatski protunagibni sustav	14
Slika 10. Dijagram volumena i tlaka Ottovog principa rada	17
Slika 11. DF motor u plinskom načinu rada.....	18
Slika 12. Dijagram volumena i tlaka dizelskog ciklusa.....	19
Slika 13. Varijante DF motora od proizvođača Wärtsilä.....	21
Slika 14. Prizmatični LNG spremnik B i spremnik C	23
Slika 15. Niskotlačni sustav opskrbe plina	24
Slika 16. Visokotlačni sustav opskrbe plinom	25
Slika 17. Ilustracija zapljuskivanja u bok spremnika pri nižoj napunjenosti	26
Slika 18. Ilustracija zapljuskivanja spremnika pri visokoj napunjenosti	27
Slika 19. Usporedba udarnog pritiska bez i sa pregradom (baffle) u spremniku s 25% napunjenosti pri amplitudi ljuľjanja broda od 13 stupnjeva.....	28
Slika 20. Usporedba rezultata najvećeg udarnog pritiska bez i sa pregradom (baffle) u spremniku pri napunjenosti od 25% za ostale slućajeve	28
Slika 21. Razlićite vrste kavitacija propelera	30
Slika 22. Izvedba uvijenog kormila	32
Slika 23. Kontejnerski brod CMA CGM Palais Royal.....	33
Slika 24. Kontejnerski brod Barzan.....	34