

## **Elektropropulzija**

### ***Electrical propulsion***

Monika Černe

Veleučilište u Rijeci, Trpimirova 2/V, Rijeka

e-mail: monika.cerne@veleri.hr

**Sažetak:** *Električna propulzija pomoću parne turbine ili dizel motora, kao glavnog pogona, korištena je na brodovima još od početka 1900. godine. Međutim, tek s mogućnošću kontrole električnih motora promjenjivom brzinom u velikom rasponu snage s kompaktnim, pouzdanim te ekonomičnim rješenjima, električna propulzija postaje šire primjenjiva u novim područjima tijekom 80-ih i 90-ih godina. Dizel-električni pogon danas je gotovo univerzalno rješenje za srednja i velika DP (engl. Dynamic Positioning) plovila, iako se izravni i hidraulički pogoni i dalje koriste. Električna propulzija se danas koristi u stotinama brodova različitih namjena: na cruiserima, trajektima, brodovima za bušenje, polagačima kabela i cijevima, ledolomcima, opskrbnim brodovima, ratnim brodovima. U ovome radu prikazane su osnove elektropropulzije njene prednosti i mane.*

**Ključne riječi:** *električna propulzija, DP, brod, električni motori*

**Abstract:** *Electric propulsion using steam turbines or diesel engines as the prime mover has been used in ships since the early 1900s.. However, with the possibility to control electrical motors with variable speed in a large power range with compact, reliable and costcompetitive solutions, the use of electrical propulsion has emerged in new application areas during the 80's and 90's. Diesel electric propulsion is now almost universal amongst medium and large DP (Dynamic Positioning) vessels but direct driven and hydraulically driven thrusters are still used in certain applications. At present, electric propulsion is applied mainly in following type of ships: cruise vessels, ferries, DP drilling vessels, cable*

layers, pipe layers, icebreakers, supply vessels, and war ships. This paper shows the bases of electric propulsion and its advantages and disadvantages.

**Keywords:** *Electrical propulsion, DP, ship, electrical motors*

## 1. Uvod

### 1.1. Električna propulzija

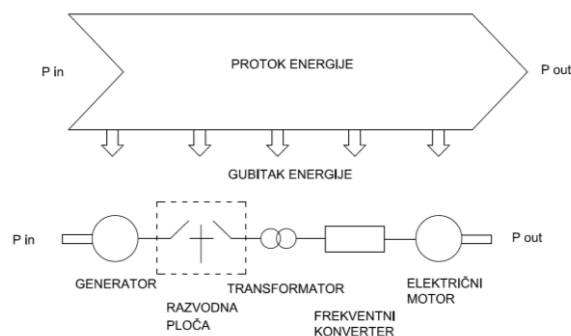
Električna propulzija sastoji se od električnog generatora kojeg pogoni dizel motor, dok je generator spojen električnim kabelima na elektromotor koji izravno pogoni propeler ili potisnik (engl. *Thruster*). Generator i motor mogu biti izmjenični AC (engl. *Alternating current*) ili istosmjerni DC (engl. *Direct current*). Potisak razvijen od strane propelera može biti kontroliran promjenom brzine dizel motora, promjenom brzine elektromotora ili promjenom nagiba (engl. *Pitch*) lopatica propelera. Ovakvi jednostavni sustavi još se uvijek mogu naći u određenim primjenama, ali velika većina srednjih i velikih DP plovila imaju dizel-električnu propulziju temeljenu na konceptu elektroenergetskog sustava.

### 1.2. Osnovni koncept

Osnovni koncept pretvorbe električne energije u mehaničku i obrnuto, na kojem se temelji brodska električna propulzija objašnjen je u nastavku.

U svakom izdvojenom elektroenergetskom sustavu, količina proizvedene energije mora biti jednaka količini potrošene energije, uključujući i gubitke. Za električni sustav koji se sastoji od izvora električne energije, distribucijskog sustava (uključujući i distribucijske transformatore) i pogona promjenjive brzine, protok energije može se ilustrirati kao na slici 1.:

**Slika 1.** Protok energije osnovnoga elektroenergetskoga sustava



Izvor: Autorska slika

Glavni pokretači, npr. dizel motori ili plinske turbine, dovode snagu na osovinu električnoga generatora. Elektromotor, koji može biti i propulzijski motor, opterećen je snagom svoga tereta. Mehanička energija se najprije pretvara u električnu u samome generatoru, zatim se električna energija putem distribucije dovodi do elektropogona promjenjive brzine (po potrebi se i transformira na nižu naponsku razinu) koji ponovno električnu energiju pretvara u mehaničku. Snaga izgubljena u komponentama između osovine dizel motora i osovine elektromotora jednaka je mehaničkim i električnim gubitcima koji čine povećanje temperature u opremi i okolini.

Glavna razlika između kopnenih i brodskih elektroenergetskih sustava leži u činjenici da su brodski sustavi izolirani sustavi s kratkim udaljenostima između izvora snage i potrošača, što je obrnuto od kopnenih sustava gdje je prirodno da su takve udaljenosti i više stotina kilometara i s nekoliko naponskih transformacija između njih.

Količina instalirane snage na plovilima može biti prilično visoka što predstavlja posebne izazove u razvoju takvih sustava. Visoka struje kratkog spoja i visoke strujne zaštite moraju biti riješene na sigurni način. Kontrolni i zaštitni sustavi u kopnenim elektroenergetskim sustavima podijeljeni su u nekoliko posebnih podsustava, dok je na brodovima puno više zastupljeniji integrirani oblik kontrole i zaštite. Tako se na brodovima u elektroenergetskom sustavu, električna energija dobiva iz nekoliko sinkronih izmjeničnih generatora koji rade u paraleli. Generatori su spojeni kabelima na glavnu razvodnu ploču (engl. *Main Switchboard*) preko zaštitnih prekidača (engl. *Circuit breakers*) koji omogućavaju po potrebi uklop i isklop generatora, ali i ostalih potrošača spojenih na razvodnu ploču kao što su potisnici, servisni transformatori i razni ostali potrošači. Tipični elektroenergetski sustavi imaju četiri, šest ili osam generatora spojenih na dvije ili više sabirnica razvodnih ploča.

Prednosti ovakvog sustava su sljedeće :

- veća sloboda prilikom smještaja dizel motora i potisnika
- više snage za ostalu potrošnju koja ne uključuje propulziju
- jednostavnija distribucija snage za pomoćne sustave
- jednostavnija kontrola potiska za sustave sa više propelera
- modularni dizajn koji omogućuje održavanje za vrijeme korištenja
- fleksibilnija namjena dizel motora
- dobra iskoristivost cijelog elektroenergetskog sustava

Nedostaci ovakvog sustava su sljedeći:

- visoka početna cijena
- složenost cijelog sustava
- potreba za specijalistima za održavanje

Dizajn energetske sustava na plovilima doživio je značajne pozitivne promjene u zadnje vrijeme. Naglim napretkom računalnih i komunikacijskih mreža, te integracijom sustava koji su tradicionalno bili odvojeni samostojeći sustavi elektropropulzije na plovilima danas postaju industrijski standard. Također, sve veća potražnja za redundantnom propulzijom i plovilima DP klase 2 i 3, zahtijevaju sustave s fizičkom podjelom. Povezivanje različitih sustava na plovilima tako postaje sve kompleksnije, čineći pritom dizajn, inženjering, pa i samu izgradnju broda težom te zahtjeva ulaganje mnogo više truda.

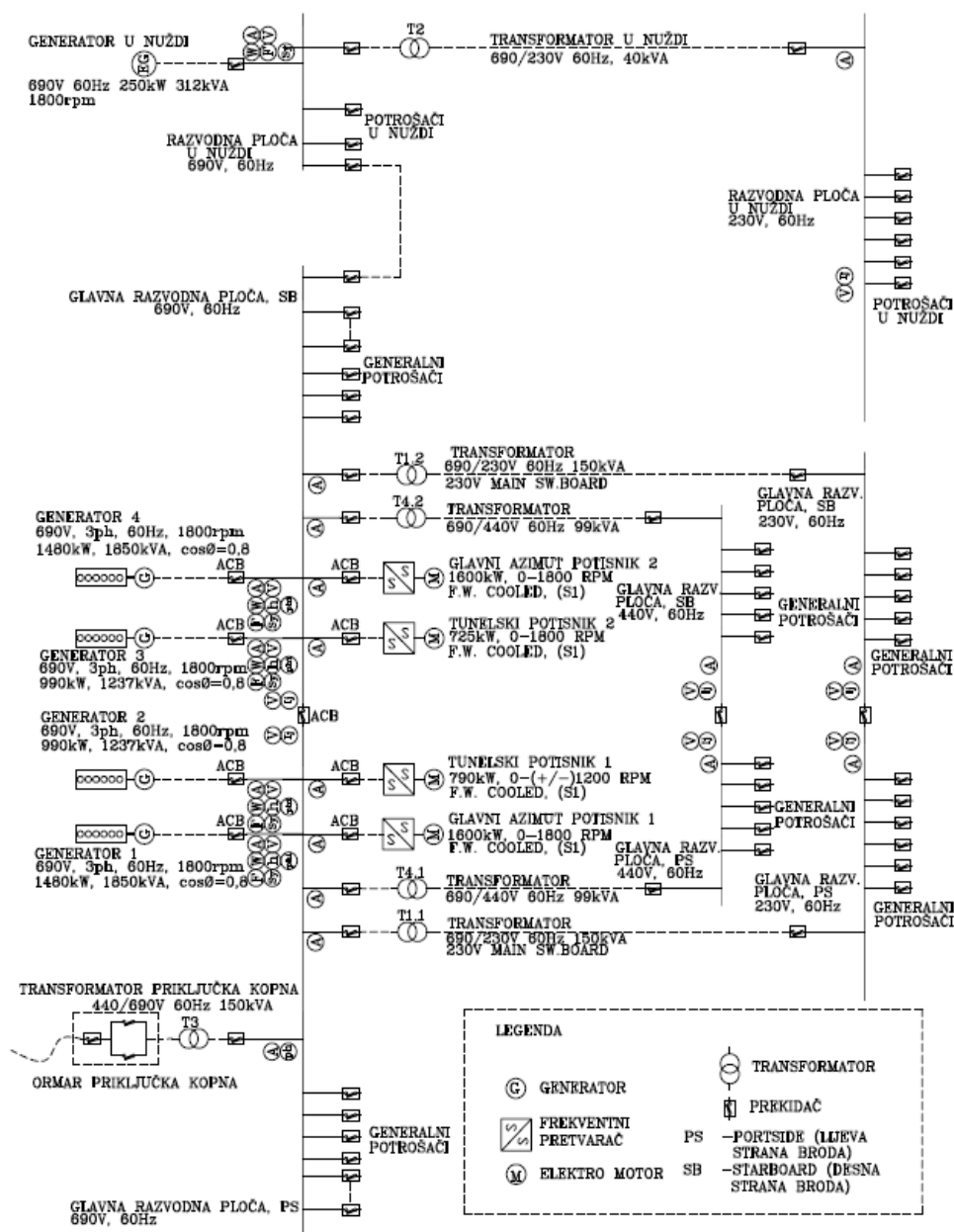
## **2. Pregled brodskog elektroenergetskog sustava s električnom propulzijom**

Na slici 2. prikazana je jednopolna shema brodskog elektroenergetskog sustava.

Glavne komponente koje čine taj sustav su sljedeće:

- generatori električne energije
- distributeri električne energije
- elektromotorni pogoni
- propulzori / potisnici

Slika 2. Jednopolna shema brodskog elektroenergetskog sustava



Izvor: Autorska slika

## 2.1. Power Management System

Glavna svrha PMS-a (engl. *Power Management System*) je osiguranje dovoljne snage za prvenstveno sve esencijalne potrošače u svim operacijskim uvjetima. To se ostvaruje tako da PMS prati trenutačno opterećenje i status generatora i cjelokupnog energetskeg sustava. Ukoliko dostupna snaga u sustavu postane premala zbog povećanog opterećenja ili zbog kvara u određenom generatoru, PMS će automatski pokrenuti sljedeći dostupni generator u određenoj startnoj sekvenci. Vrijedi i obrnuto, ukoliko je trenutna dostupna snaga u sustavu

prevelika u odnosu na potrošnju potrošača, PMS će automatski najprije rasteretiti te potom isključiti određeni generator prema zadanoj sekvenci. Također PMS obavlja i paralelni rad generatora te funkciju sinkronizacije dvaju ili više generatora kako bi mogli zajedno biti spojeni na mrežu, a može se koristiti i za preko strujnu zaštitu generatora ili zaštitu od kratkog spoja. U slučaju neispunjavanja ovih uvjeta, PMS također može biti programiran tako automatski vrati energiju u sustav nakon potpunog nestanka električne energije (engl. *Restart After Blackout*).

## **2.2. Generatori električne energije**

### **2.2.1. Dizel motori**

U dizel-električnoj propulziji koriste se uglavnom srednjekretni do brzokretni dizel motori, koji su lakši i jeftiniji u usporedbi sa sličnim sporokretnim dizel motorima koji se koriste za izravnu mehaničku propulziju. Dostupnost tih motora elektroenergetskoj mreži je od velike važnosti i u dizel-električnom sustavu s većim brojem dizel motora koji čine redundantnu mrežu. To pruža veliku pouzdanost, ali i sofisticiranu dijagnozu te kraće vrijeme popravka.

### **2.2.2. Izvori napajanja, generatori**

Generatori pretvaraju mehaničku energiju iz dizel motora u električnu energiju na nominalnom konstantnom naponu i frekvenciji. Frekvencija i napon proizvedeni u generatoru definirani su parametrima, ali u konkretnoj primjeni frekvencija varira ovisno o brzini vrtnje dizel motora, a napon ovisi o promjeni struje rotorskog namotaja, odnosno struji uzbude (engl. *Excitation*).

Struja uzbude se kontrolira pomoću automatskog regulatora napona (AVR – engl. *Automatic voltage regulator*), koji mjeri napon na stezaljkama generatora i uspoređuje ih s referentnom zadanom vrijednošću napona. Kontroler ima PID (engl. *Proportional–integral–derivative*) karakteristike koji mjeri pad napona (engl. *Voltage drop*), ovisno o opterećenju generatora i time omogućava ravnomjerno raspodjelu reaktivne snage u paralelno spojenim generatorima. Najčešće napon na stezaljkama generatora ne smije prijeći vrijednost od  $\pm 2.5\%$  nominalnog napona.

U brodskim sustavima koriste se i generatori spojeni na osovinu glavnog dizel motora privješeni generatori (engl. *Shaft Generator*). Isto tako, u nekim sustavima koriste se i generatori koji mogu raditi i kao generatori i kao motori (engl. *Hybrid Shaft Generator*) i rade na principu PTI- PTO(engl. *Power take in-power take out*).

Plovila koja spadaju pod SOLAS (engl. *International Convention for the Safety of Life at Sea*) propise moraju imati i generatore za upotrebu u nuždi (engl. *Emergency Generators*) koji moraju napajati određene esencijalne brodske potrošače ukoliko nestane glavnog napajanja. Izvori napajanja u nuždi uglavnom su generatori na većim plovilima, dok na manjim plovilima to može biti i baterijski sustav istosmjernog napona.

Mnogi brodski distribucijski sustavi sadrže i priključak s kopna, koji se koristi u lukama tako da se glavna razvodna ploča spoji na izvor napona na kopnu i tako napaja tzv. hotelske potrošače, rasvjetu te ostalu manje važnu opremu na plovilu.

## **2.3. Distributeri električne energije**

### **2.3.1. Glavne razvodne ploče**

Glavne razvodne ploče (engl. *Main Switchboards*) u brodskim sustavima uglavnom se definiraju kao visokonaponske – HV (engl. *high voltage*) ili kao niskonaponske – LV (engl. *low voltage*). Razvodne ploče definirane su vrijednošću napona te vrijednošću struje kratkog spoja, koja određuje maksimalnu vrijednost struje koja može nastati pri kratkom spoju, a koju ploča može izdržati bez trajne štete. U nekim sustavima, zbog limitiranja struje kratkog spoja određuje se koliko maksimalno generatora može biti spojeno istovremeno na ploču.

Razvodne ploče su uglavnom podijeljene u dvije, tri ili četiri sekcije da bi osigurale redundantnost koju traži određeni tip plovila. One mogu biti fizički podijeljene u više samostojećih jedinica ili mogu tvoriti jednu fizičku jedinicu u kojoj su sabirnice međusobno povezane jednim ili s više prekidača koji povezuje sabirnice (engl. *Bustie Breaker*). Prema pravilima klasifikacijskih društava, jedna ploča ili jedan dio ploče ne smije osjećati posljedice kvara (uslijed kratkog spoja) druge ploče ili drugog dijela iste ploče.

Postoji nekoliko naponskih nivoa u distribucijskom sustavu ovisno o snazi i tipu potrošača spojenih na razvodne ploče. U tablici 1. prikazani su tipični naponski nivoi prema tipovima potrošača jednog većeg broskog distribucijskog sustava.

**Tablica 1.** Naponski nivoi u distribucijskom sustavu

Naponski nivoi	Vrijednosti napona	Primjena
HV	11kV 6.6kV	Generatori, potisnici, servisni transformatori,
LV	690V 480V 440V 380V	Pumpe, klimakomore, servisni transformatori, oprema za uporabu u nuždi
Rasvjeta i mala snaga	220V 208V 110V	Rasvjeta, jednofazni motori
Baterijski sustav	110Vdc 24Vdc	Sustav navigacije, DP sustav, upravljanje potisnicima

Izvor: Autor

Odabir naponskih nivoa brodskih distribucijskih sustava uglavnom ovisi o količini ukupne instalirane snage dobivene iz generatora. Za snagu veću od 10MW počinje se koristiti visoko - naponski sustav, dok za snagu manju od 10MW se koriste niskonaponski sustavi. Relativno viša cijena visokonaponske opreme može se kompenzirati upotrebom kabela manjih presjeka zbog niže struje uslijed višeg napona te opremom s nižim rangom struje kratkog spoja nego u niskonaponskim sustavima. Jedan od najvećih izazova u niskonaponskim sustavima s većom ukupnom instaliranom snagom je upravo određivanje opreme koja može podnijeti visoke vrijednosti struje kratkog spoja i nemogućnost korištenja svih generatora istovremeno.

Generatori su spojeni na razvodne ploče pomoću prekidača (engl. *Circuit breakers*) i omogućuju uključivanje i isključivanje generatora s mreže. Postoje više vrsta prekidača, a najviše su korišteni zračni prekidači (engl. *ACB- Air Circuit Breakers*) koji se koriste za spajanje generatora i potrošača veće snage, te prekidači s lijevanom jezgrom (engl. *MCCB – moulded case circuit breakers*) koji se više koriste za manje potrošače. Prekidači su unutar ploče spojeni tako da se mogu daljinski upravljati ili su kontrolirani od strane PMS-a.

Razvodna ploča za nuždu (engl. *Emergency switchboard*) koristi se kada na plovilu postoji generator za nuždu te se preko nje vrši napajanje potrošača koji moraju imati napajanje u nuždi. U standardnom radu, ova se ploča napaja s glavne, a u slučaju nestanka napona na glavnoj ploči, automatski pokrene generator za nuždu.



### 2.3.2. Transformatori

Transformatori omogućavaju podjelu elektrosustava na različite naponske razine, koji su pritom i međusobno izolirani. Uglavnom se preko transformatora spajaju međusobno glavne razvodne ploče ili razvodne ploče za nuždu viših napona s nižim, a koriste se i za transformaciju napona kod velikih potrošača koji se napajaju preko razvodnih ploča. Tipično se koriste trofazni transformatori s trokut / trokut ili zvijezda / trokut spojem s ili bez uzemljene nulte točke.

### 2.4. Elektromotorni pogoni

Električni motori su najčešće korišteni uređaji za pretvaranje električne energije u mehaničku, a u brodskim sustavima koriste se za pogon potisnika kao dijela elektro-propulzije.

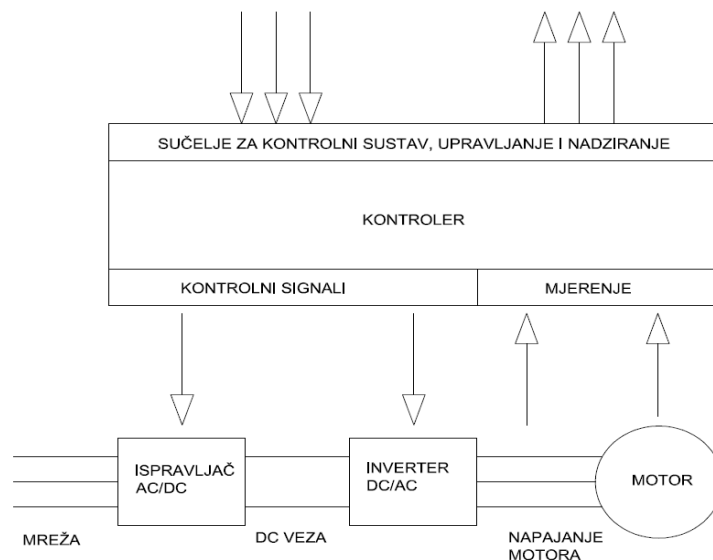
Najčešće korišteni tipovi motora su sljedeći :

- DC motori – koriste istosmjerno napajanje preko tiristorskog ispravljača da bi se spojili na 3-fazni izmjenični sustav na brodu, a time se može ujedno i upravljati brzinom motora.
- Asinkroni motori – najčešće korišteni motori općenito u industriji. Zbog jednostavnog dizajna imaju najduže vrijeme trajanja s minimalnim brojem kvara. Ovi se motori koriste u gotovo svim sustavima ili kao motori konstantne brzine izravno spojene na mrežu ili kao pogoni promjenjive brzine napajani preko frekventnog pretvarača.
- Sinkroni motori – uglavnom se ne koriste kao pogoni u brodskim sustavima, a jedina iznimka su veliki pogoni, tipično preko 5MW direktno spojenih na osovину propelera ili preko 8MW spojenih preko kvačila.
- Sinkroni motori s permanentnim magnetom – sve više korišteni u današnjici i za veće pogone, te uglavnom, za POD propulzore. Prednost je visoka iskoristivost s kompaktnim dizajnom, posebno korisnim u izvedbama gdje vanjske dimenzije propulzora moraju biti što manje te imaju mogućnost izravnog vodenog hlađenja bez dodatne potrebe za instalacijom vodenog ili zračnog hlađenja.

Na brodovima, najčešće korišteni pogoni su s AC motorima koji je prikazan na slici 3. Ti se pogoni sastoje od ispravljača AC/DC i invertera DC/AC te sučelja prema kontrolom sustavu koji prima signale mjerenja iz senzora u pogonu i motoru (tipično struja motora,

brzina motora, temperaturu i napon). Svrha frekvencijskih pretvarača jest kontrola brzine i momenta motora pretvarajući konstantnu frekvenciju u promjenjivu (varijabilnu).

**Slika 3.** Brodski pogon s AC motorima



Izvor: Autorska slika

## 2.5. Propulzori / potisnici

### 2.5.1. Propulzija s propelerom na osovini

U dizel-električnoj propulziji s propelerom na osovini (engl. *Shaft propeller*), koja je prikazana na slici 4., propeleri su prirodno pogonjeni električnim motorima promjenjive brzine, a koriste se uglavnom kad je snaga propulzije veća od mogućih azimut potisnika za istu namjenu ili na plovilima u kojima nema potrebe za bočnim potiskom i u kojima održavanje pozicije na jednom mjestu nije potrebno. Osovinska propulzija uvijek se koristi u kombinaciji s kormilom, tako da svaki propeler ima jedno kormilo. Propeleri su uglavnom FFP tipa (engl. *Fixed Pitch Propeller*) što omogućuje jednostavniji i robusniji dizajn propelera. U nekim sustavim koristi se i CPP pokretni propeler (engl. *Controllable Pitch Propeller*) kod kojeg se može kontrolirati i nagib lopatica propelera za veći potisak. Kombinacijom brzine vrtnje elektromotora i određenim kutom nagiba propelera može se dobiti viša i bolja efikasnost nego kontrolom samo jednog od ta dva parametra.

**Slika 4.** Propulzija s propelerom na osovini



Izvor: Rolls-Royce propellers, Fact Sheet , PDF

### 2.5.2. Azimut potisnici

Azimut potisnici su potisnici koji se mogu rotirati i tako proizvesti potisak u bilo kojem smjeru. Potisak se kontrolira pomoću FPP-a ili CPP-a u kod nekih i kombinacijom ove dvije kontrole. FPP potisnici imaju puno jednostavniju podvodnu mehaničku konstrukciju nego CPP potisnici. Konvencionalni azimut potisnici su u početku bili uglavnom korišteni kao sporedni potisnici za održavanje pozicije, ali kasnije su se počeli koristiti i kao potisnici za glavnu propulziju plovila s električnom propulzijom. Da bi zadovoljili hidrodinamičke i upravljačke zahtjeve propulzije, oblik ovih potisnika je unaprijeđen u tzv. mehaničke čahure (engl. *Mechanical pod*). To su potisnici čiji se elektromotori za pogon nalaze unutar trupa plovila (slika 5.) i mehanička snaga se prenosi s motora do propelera preko tzv. Z oblika prijenosnog sustava.

**Slika 5.** Azimut potisnik

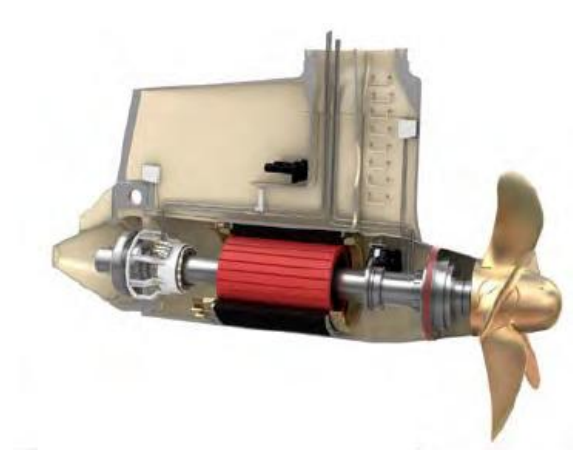


Izvor: Rolls-Royce azimuth thrusters, Fact Sheet , PDF

### 2.5.3. POD potisnici

POD potisnik (slika 6.) je pogonjen elektromotorom koji je ugrađen u podvodno, strujno dobro izolirano tijelo koje podsjeća na čahuru (engl. *Pod*). Kao i kod azimut potisnika i POD potisnik može proizvesti potisak u bilo kojem smjeru. Glavna razlika u odnosu na azimut potisnik je integracija elektromotora izravno na osovinu propelera unutar podvodne čahure koja se nalazi ispod trupa plovila. POD može biti dizajniran za guranje (engl. *Pushing operation*) ili povlačenje (engl. *Pulling operation*). Povlačenje daje propeleru optimalnu efikasnost koja povećava hidrodinamička svojstva te smanjuje vibracije i buku. POD potisnici imaju mogućnost rotacije propelera u oba smjera što im daje dodatne mogućnosti za upravljanje plovilima.

Slika 6. POD potisnik



Izvor: Rolls-Royce podded propulsors, PDF

### 3. Zaključak

Sustavi električne propulzije eksploatacijski gledano daleko su kvalitetnije rješenje od klasične dizel-mehaničke propulzije.

Glavne prednosti električne propulzije u odnosu na mehaničku su sljedeće:

- reducirana potrošnja goriva i održavanja uporabom manjih / srednjohodnih dizel motora.
- mnogo veća sigurnost i manja emisija štetnih plinova.
- veća iskoristivost brodskeg prostora uslijed fleksibilnosti elektroopreme.

- manja opasnost od potpunog kvara zbog redundantnih elektrosustava te veći stupanj raspoloživosti pogona broda.
- poboljšane manevarske sposobnosti plovila korištenjem azimut i POD potisnika sa elektromotorima.
- manje vibracije te rad motora sa konstantnim brojem okretaja čine vitalne dijelove pogonskih strojeva te samu konstrukciju broda trajnijom nego kod dizel mehaničkog pogona.

Postoje i određene mane elektropropulzije koje se s vremenom sve manje osjete, a to su:

- veći investicijski troškovi za izgradnju plovila koji upotrebom suvremenije opreme se sve više gube utjecaj.
- veći broj dodatne opreme, uglavnom elektroopreme kao što su generatori, ormari distribucije, transformatori, elektromotorni pogoni.
- potreba za kvalificiranim stručnjacima prilikom korištenja i održavanja elektrosustava propulzije.

Zbog gore navedenih prednosti, aktualnih trendova u zaštiti okoliša, cijene goriva te smanjenja investicijskih troškova te zbog sve veće konkurencije proizvođača električne opreme, može se s velikom sigurnošću očekivati daljnja ekspanzija električne propulzije, ne samo kod plovila koja se zbog specifičnog eksploatacijskog profila, već tradicionalno opremaju električnom propulzijom, već i kod gotovo svih tipova plovila.

## **Literatura**

1. Alf Kåre Ådnanes ABB AS Marine, Maritime Electrical Installations And Diesel Electric Propulsion, April 2003.
2. IMCA M 206, A Guide to DP Electrical Power and Control Systems, November 2010.
3. Rolls-Royce, Marine products and systems, <http://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/customers/marine/marine-products-systems-catalogue.pdf> (20.3.2016.)