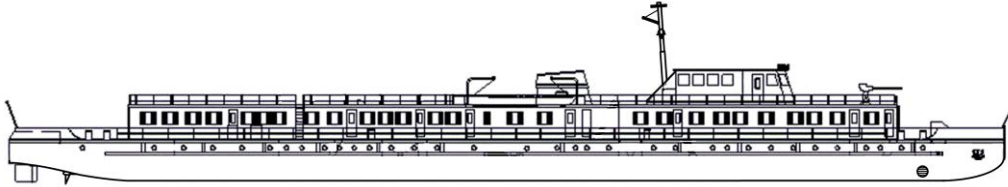


МИНИСТАРСТВО ОДБРАНЕ  
УНИВЕРЗИТЕТ ОДБРАНЕ У БЕОГРАДУ  
ВОЈНА АКАДЕМИЈА



**ДИЗЕЛ ЕЛЕКТРИЧНИ ПОГОН РЕЧНИХ  
РАТНИХ БРОДОВА КАО МЕТОД ПОБОЉШАЊА  
МАНЕВАРСКИХ КАРАКТЕРИСТИКА БРОДА**

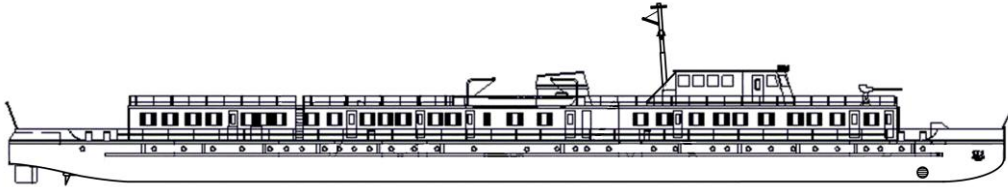
- докторска дисертација -

Ментор:  
научни сарадник  
др Зоран Николић

Кандидат:  
потпуковник  
мр Јово Даутовић

Београд, 2016. године

MINISTRY OF DEFENCE  
UNIVERSITY OF DEFENCE IN BELGRADE  
MILITARY ACADEMY



**DIESEL ELECTRIC DRIVE OF RIVER MILITARY  
SHIPS AS A METHOD OF IMPROVING SHIP  
MANEUVERING CHARACTERISTICS**

- PhD thesis -

Mentor:  
research associates  
Zoran Nikolić, PhD

Candidate:  
lieutenant colonel  
Jovo Dautović, MSc

Belgrade, 2016

*Посвећено покојном оцу – ономе који је  
својом жељом и подстицањем допринео томе  
да се одлучим за израду дисертације*

## **ЗАХВАЛНОСТ**

*Докторска дисертација је настала као моја жеља да своје дугогодишње искуство стечено кроз рад на пловним објектима Југословенске ратне морнарице и Речне флотиле и учешће у реализацији најзначајнијег пројекта у Речној флотили, модернизацији брода БПН-30 „КОЗАРА” као и завршетак стручног усавршавања „крунишем” оваквим радом.*

*Желим да изразим захвалност Управи за одбрамбене технологије СМР МО, која ме је укључила у рад комисије за спровођење пројекта модернизације брода „КОЗАРА” и која је позитивно оценило значај израде ове дисертације за систем одбране.*

*Затим Команди Речне флотиле и посади брода БПН-30 „КОЗАРА” који су ми омогућили потпун увид у бродску документацију и омогућили испитивање брода ради добијања потребних резултата.*

*Поред тога се захваљујем и управи Техничког опитног центра Војске Србије која је подржала израду ове дисертације и омогућила ми да активно радим на самој изради, одобравањем слободног времена неопходног за израду, као и увид у резултате испитивања који су приказани у овој раду.*

*Поред наведених институција, овом приликом желим да се захвалим следећим лицима:*

- ментору др Зорану Николићу који је неуморно пратио и усмеравао мој научноистраживачки рад и својим несебичним залагањем и великом стручном помоћи знатно допринео изради ове дисертације,*
- колеги пк Бранимиру Вујатовић, дипл.инж. руководиоцу пројекта модернизације брода „КОЗАРА” на изузетној сарадњи током реализације пројекта,*
- колеги пп доц. др Драгану Трифковићу, који је својим стручним саветима допринео квалитету рада и*
- колеги мј Војкану Мадићу, дипл.инж. на сарадњи приликом израде дисертације.*

*Београд, март 2016.*

*А у т о р*

**Комисија за оцену и одбрану  
докторске дисертације:**

**Ментор:**

др Зоран Николић, научни сарадник  
Институт техничких наука  
Српска академија науке и уметности

---

**Чланови комисије:**

пуковник  
др Сретен Перић, ванредни професор  
Војна академија, Универзитет Одбране

---

потпуковник  
др Драган Трифковић, доцент  
Војна академија, Универзитет Одбране

---

# ДИЗЕЛ ЕЛЕКТРИЧНИ ПОГОН РЕЧНИХ РАТНИХ БРОДОВА КАО МЕТОД ПОБОЉШАЊА МАНЕВАРСКИХ КАРАКТЕРИСТИКА БРОДА

## Сажетак

Дизел електрични погон брода је погон остварен помоћу електромотора при чему се погонска енергија добија од дизел електричног агрегата. Мада се електрични погон највећих бродова појавио пре једног века, последње две деценије знатно је порасла примена ове врсте погона, посебно на бродовима где је потребна континуална и прецизна регулација брзине кретања брода.

Циљ ове дисертације је развој нове врсте погона војних бродова ради побољшања маневарских карактеристика, у првом реду смањење зауставног пута и пречника круга окрета. У дисертацији је обрађена метода замене постојећег дизел погона са дизел електричним погоном. Метода је показана на примеру модернизације речног брода посебне намене БПН-30 „КОЗАРА”, са освртом на разлоге и начин реализације модернизације.

Након упознавања са историјатом развоја електричног погона на бродовима, као и са историјатом и основним подацима брода „КОЗАРА”, у дисертацији је приказан начин избора опреме дизел електричног погона и њена уградња на брод, као и теоретска анализа изабраног погона брода.

На брод је уграђен дизел електрични погон са два дизел агрегата снаге 400 kW сваки који преко главне разводне табле напајају бродску електричну мрежу из које се са електричном енергијом снабдевају два погонска електромотора снаге 250 kW сваки, прамчани потисник снаге 90 kW и сви остали бродски потрошачи електричне енергије. На брод је уграђен и помоћни агрегат за напајање брода електричном енергијом у везу снаге 64 kW.

У дисертацији је приказана динамика пловидбе брода са посебним освртом на силе и моменте који утичу на пловидбу брода БПН-30 „КОЗАРА” и кинематика пловидбе брода на реци, што доприноси бољем разумевању погонских и маневарских карактеристика брода.

Резултати испитивања брода након извршене модернизације, које је извршено према дефинисаном програму испитивања, показују знатно побољшање маневарских и погонских карактеристика брода у односу на класичан дизел погон са два мотора снаге 294,4 kW сваки. У дисертацији су назначене и друге предности електричног погона брода као што је повећање комфора посаде и могућност низводне економичне пловидбе са једним дизел агрегатом. Показано је да су торзионе осцилације вратилних водова код дизел електричног погона знатно мање изражене у односу на дизел погон.

Након анализе запажања о експлоатацији брода након извршене модернизације у закључним разматрањима је дата оцена дизел електричног погона брода као метода за побољшање маневарских карактеристика брода. На крају су дате препоруке за даља истраживања.

**КЉУЧНЕ РЕЧИ:** дизел електрични погон, пловидба брода, испитивање брода, метод побољшања, маневарске карактеристике, управљивост брода.

# **DIESEL ELECTRIC DRIVE OF RIVER MILITARY SHIPS AS A METHOD OF IMPROVING SHIP MANEUVERING CHARACTERISTICS**

## **Abstract**

Diesel electric drive is drive achieved by an electric motor with the propulsion energy produced by diesel electric aggregate. Although electric propulsion of the biggest ships appeared a century ago, during the last two decades significantly increased use of these types of drives is noticed, especially on ships that require continuous and precise ship speed regulation.

The aim of this paper is the development of military drive new types in order to improve maneuverability of the ship, primarily reducing the stopping-surging distance and the circle turns diameter. The method of replacing the existing diesel engine drive with diesel electric drive is shown in this dissertation. The method is shown on the example of reconstruction special purpose river ship BPN-30 „Kozara”, with reference to the reasons for and the realization of modernization.

After introducing of the history of the ship electric propulsion development, as well as the history and basic data of the ship „Kozara”, in the dissertation is shown the method of diesel electric propulsion equipment selection and its installation on board, as well as theoretical analysis of the selected ship propulsion.

Two diesel electric generators (400 kW each) are installed on the ship, which through the main electric distribution board supply ship's electrical grid from which two drive electric motor (250 kW each), bow thrusters (90 kW) and all other electricity consumers are supplied. Auxiliary power unit for ship electricity supply (64 kW) is also installed on the ship.

The dissertation describes the dynamics of ship trailing with special reference to the forces and torques that affect to the ship BPN-30 „Kozara” trailing and kinematics aspect of ship trailing on the river which contributes to a better understanding of driving and maneuvering characteristics of the ship.

Testing trials show significant improvement maneuvering and propulsion characteristics of the vessel comparing to conventional twin diesel engines drives (294.4 kW each). The dissertation also indicated more advantages of ship electric propulsion such as increasing the comfort of the crew, the possibility of downstream economic trial with one diesel electric generator and less pronounced propeller shaft torsional vibrations.

After analyzing the observations about the ship exploitation after modernization, in the concluding consideration ship diesel electric propulsion assessment as a method for improving the maneuverability of the ship is given. Finally, recommendations for further research are given.

**KEY WORDS:** diesel electric drive, ship navigation, ship testing, improvements method, maneuvering characteristics, maneuverability of the ship.

## ПРЕГЛЕД КОРИШЋЕНИХ СКРАЋЕНИЦА

AIS	Аутоматски идентификациони систем (Automatic Identification System)
AZIPOD	Закретни под погон (Azimuthing Podded Drive)
AC	Наизменична струја (Alternation current)
БПН	Брод посебне намене
ВВПА	Виша војнопоморска академија
ВПА	Војнопоморска академија
ЦЛ	Централна линија
DC	Једносмерна струја (Direct current)
ГМ	Главни мотор
ДЕП	Дизел електрични погон
ДСНО	Државни секретаријат народне одбране
ЕЕС	Европска економска заједница (European Economic Community)
ЕМ	Електромотор
ЕУ	Европска унија
GPS	Глобални позициони систем (Global Position System)
НП	Непропусна преграда
IGBT	Биполарни транзистор са изолованим гејтом
МТС	Морнаричко техничка служба
ПО	Пол окрета
ПП	Против пожарна
ПР	Програм реализације
RO – RO	Рол он – рол оф (Roll on – Roll off)
Р	Ребро
PWM	Ширинска модулација импулса (Pulse width modulation)
РИС	Речни информациони систем
РМ	Ратна морнарица
РРФ	Речна ратна флотила
РФ	Речна флотила
САД	Сједињене Америчке Државе
ТТ	Тактичко технички
УПП	Унутрашњи пловни путеви



## ПРЕГЛЕД КОРИШЋЕНИХ ОЗНАКА

$A$	Површина листа кормила, [m <sup>2</sup> ]
$A_f$	Површина листа кормила испред оси вратила, [m <sup>2</sup> ]
$A_L$	Уздужна пројектована површина надводног дела брода, [m <sup>2</sup> ]
$A_S$	Површина у додиру са водом (оплакана површина), [m <sup>2</sup> ]
$A_T$	Попречна пројектована површина надводног дела брода, [m <sup>2</sup> ]
$A_{\otimes}$	Површина пресека главног ребра у води, [m <sup>2</sup> ]
$A_k$	Површина попречног пресека канала, [m <sup>2</sup> ]
$\vec{a}$	Апсолутно убрзање, [m/s <sup>2</sup> ]
$\vec{a}_p$	Преносно убрзање, [m/s <sup>2</sup> ]
$\vec{a}_r$	Релативно убрзање, [m/s <sup>2</sup> ]
$a$	Растојање силе кормиларења од тежишта брода Т, [m]
$A$	Сила узгона, [N]
$a$ и $b$	Елиптичне осе
$b$	Ширина таласа на врху, [m]
$B$	Ширина једнака ширини брода, [m]
$b$	Растојање силе кормиларења средњег кормила од тежишта Т, [m]
$B$	Потрошња горива, [kg/s]
$B_k$	Ширина канала, [m]
$\Phi_{ob}$	Обртни флуks, [Wb]
$c$	Растојање силе отпора воде од тежишта Т, [m]
$\cos j$	Фактор снаге електромотора
$C_{AAw}$	Коефицијент узужног отпора ваздуха
$C_F$	Коефицијент отпора трења
$C_U$	Коефицијент отпора таласа
$D_1 \overline{MT} \sin \varphi_2$	Статички угао стабилитета
$D_1$	Маса брода са масом повучене воде, [kg]
$D_C$	Пречник круга окрета брода у III фази, [m]
$D_T$	Тактички пречник круга окрета брода, [m]
$d$	Газ брода, [m]
$d$	Растојање силе кормиларења од вратила кормила, [m]
$d$	Растојање прамчаног потисника од тежишта брода Т, [m]
$d$	Пречник вратила на најмањем пресеку, [mm]
$E_{tot}$	Укупна енергија таласа, [J]
$e$	Растојање вратилних водова од уздужне осе брода, [m]
$F_K$	Хидродинамичка сила притиска на кормило, [N]
$F_K \cos \alpha$	Сила кормиларења, [N]
$F_K \sin \alpha$	Сила кочења, [N]
$F_{SV}$	Сила струјања воде, [N]
$F_V$	Сила деловања воде на кормило, [m]
$F_d$	Потисна сила десног пропелера, [N]
$F_l$	Потисна сила левог пропелера, [N]
$F$	Потисна сила пропелера, [N]
$F_0$	Сила потиска коју остварује пропелер у слободној вожњи, [N]
$F_{pp}$	Сила потиска прамчаног потисника, [N]
$F_{KD} \cos \alpha$	Сила кормиларења десног кормила, [N]
$F_{KD} \sin \alpha$	Сила кочења десног кормила, [N]
$F_{KL} \cos \alpha$	Сила кормиларења левог кормила, [N]
$F_{KL} \sin \alpha$	Сила кочења левог кормила, [N]
$F_{KS} \cos \alpha$	Сила кормиларења средњег кормила, [N]

$F_{KS} \sin \alpha$	Сила кочења средњег кормила, [N]
$f$	Фреквенција, [Hz]
$g$	Убрзање земљине теже, [m/s <sup>2</sup> ]
$h_1$ и $h_2$	Различите висине таласа, [m]
$h_v$	Дубина воде, [m]
$H_d$	Доња огревна моћ горива, [kJ/kg]
$h$	Висина резултујућег таласа, [m]
$I_{cont}$	Максимална излазна струја напонско фреквентног претварача, [A]
$J_p$	Поларни момент, [Nm]
$J$	Коефицијент напредовања пропелера са фиксним крилима
$K_Q$	Коефицијент обртног момента
$K_F$	Коефицијент потиска пропелера
$K_1$	Константа која зависи од особина пропелера
$K_{pd}$	Курс преко дна, [°]
$K_{pv}$	Курс преко воде, [°]
$K_s$	Коефицијент који зависи од односа $\nabla / SL$
$k$	Растојање силе додатног отпора на крми од тежишта T, [m]
$l_1$	Прелазна путања, [m]
$l_{1mv}$	Прелазна путања брода на мирној води, [m]
$l_2$	Позитивни бочни помак, [m]
$l_3$	Негативни бочни помак, [m]
$L$	Дужина брода на VL, [m]
$l$	Дужина профила листа кормила, [m]
$M_{Fd}$	Момент силе потиска десног пропелера, [Nm]
$M_{Fl}$	Момент силе потиска левог пропелера, [Nm]
$M_{Fpp}$	Моменат силе прамчаног потисника, [Nm]
$M_{KD}$	Моменат силе кормиларења десног кормила, [Nm]
$M_{KL}$	Моменат силе кормиларења левог кормила, [Nm]
$M_{KS}$	Моменат силе кормиларења средњег кормила, [Nm]
$M_K$	Момент силе кормиларења, [Nm]
$M_Q$	Момент који се доводи пропулзору, [Nm]
$M_W$	Момент отпора воде у окрету, [Nm]
$M'_W$	Момент силе отпора воде W', [Nm]
$M_{st}$	Момент пригушења, [Nm]
$M$	Момент на прирубници коленастог вратила дизел мотора, [Nm]
$n_n$	Прорачунски број обртаја [min <sup>-1</sup> ]
$n$	Брзина обртања, [min <sup>-1</sup> ]
$n$	Број обртаја коленастог вратила погонског мотора, [min <sup>-1</sup> ]
$N$	Нормална сила, [N]
$O$	Непокретна тачка
$O_P$	Покретна тачка
$P_{pp}$	Тачка упорног лежаја прамчаног потисника
$P_n$	Номинална снага дизел мотора, [kW]
$P$	Измерена апсорбована снага пропелера, [kW]
$P_{dov}$	Укупно доведена енергија (снага), [kW]
$P_I$	Индицирана снага, [kW]
$P_B$	Кочена снага, [kW]
$P_D$	Снага доведена пропелеру, [kW]
$P_0$	Снага потиска пропелера у „слободној вожњи”, [kW]

$P_T$	Снага потиска пропелера, [kW]
$P_E$	Ефективна снага, [kW]
$P_R$	Снага отпора, [kW]
$P_V$	Снага предата вратилном воду, [kW]
$P_{DEM}$	Снага доведена пропелеру у систему ДЕП-а, [kW]
$P_{EM}$	Снага електромотора, [kW]
$P_{cont}$	Максимална снага напонско фреквентног претварача, [kW]
$p$	Растојање силе додатног отпора на прамцу од тежишта Т, [m]
$p$	Број пари полова
$ПО$	Устаљени пол окрета
$ПО'$	Променљиви пол окрета
$R_h$	Хидраулични радијус, [m]
$R_{AA}$	Отпор ваздуха, [N]
$R_F$	Отпор трења, [kN]
$R_T$	Укупан отпор, [kN]
$R_U$	Отпор таласа, [N]
$R_m$	Граница развлачења материјала [MPa]
$\vec{r}_p$	Преносни вектор положаја
$\vec{r}_r$	Релативни вектор положаја
$\vec{r}$	Апсолутни вектор положаја
$r'$	Промењиви полупречник круга окрета, [m]
$r$	Полупречник круга окрета, [m]
$s$	Клизање
$s$	Преваљени пут, [m]
$S$	Латерални пресек, (st <sup>2</sup> )
$S_1$	Тачка упорног лежаја левог вратилног вода
$S_2$	Тачка упорног лежаја десног вратилног вода
$s_p$	Преносни преваљени пут, [m]
$s_r$	Релативни преваљени пут, [m]
$T_R$	Тежиште подводног дела трупа
$t_1, t_2$	Неки тренутци времена, [s]
$t_{uk}$	Време пуног окрета за 360°, [s]
$t_0$	Почетни тренутак времена, [s]
$t$	Одређени тренутак времена, [s]
$U_{\otimes}$	Оквашена дужина попречног пресека главног ребра, [m]
$U_k$	Оквашена дужина попречног пресека канала, [m]
$U$	Напон, [V]
$W'$	Хидродинамичка сила отпора воде у окрету, [N]
$W_0$	Поларни отпорни момент [m <sup>3</sup> ]
$W_k$	Додатни отпор воде на крми, [N]
$W_p$	Додатни отпор воде на прамцу, [N]
$W$	Отпор у правцу кретања брода, [N]
$\vec{v}$	Апсолутна брзина, [m/s]
$\vec{v}$	Брзина брода на почетку маневра окрета, [m/s]
$v_0$	Брзина таласа, [m/s]
$v_A$	Брзина напредовања „слободног пропелера”, [m/s]
$v_R$	Релативна брзина ваздуха, [m/s]
$v_g$	Брзина брода у окрету, [m/s]
$v'_k$	Прва критична брзина, [m/s]
$v''_k$	Друга критична брзина, [m/s]

$v_s$	Брзина брода, [m/s]
$v_t$	Тангенцијална брзина кретања тежишта брода, [m/s]
$\overline{v_g}$	Израчуната брзина брода на крају II фазе окрета, [m/s]
$\overline{v_p}$	Преносна брзина, [m]
$\overline{v_{pp}}$	Брзина тачке P <sub>pp</sub> , [m/s]
$\overline{v_r}$	Релативна брзина, [m]
$\overline{v_s}$	Брзина тачака S <sub>1</sub> и S <sub>2</sub> , [m/s]
$V$	Запремина, [m <sup>3</sup> ]
$v$	Брзина брода, [m/s]
$\emptyset$	Пречник, [m]
$\nabla$	Истиснина, [m <sup>3</sup> ]
$xOy$	Непокретни координатни систем
$\xi O_p \eta$	Покретни координатни систем
$\Delta h_v$	Промена дубине воде, [m]
$\Delta t$	Интервал времена, [s]
$\alpha$	Угао отклона кормила, [°]
$\beta$	Угао деловања силе отпора W', [°]
$\beta$	Угао занешења, [°]
$\delta$	Угао завлачења (деријације), [°]
$\zeta_1$	Угао курса, [°]
$\zeta_2$	Угао скретања (девијације), [°]
$\eta_0$	Коефицијент корисности пропелера у „слободној вожњи”
$\eta_M$	Механички коефицијент корисности
$\eta_D$	Коефицијент корисности погона
$\eta_E$	Ефективни коефицијент корисности
$\eta_H$	Коефицијент утицаја форме трупа
$\eta_I$	Индицирани коефицијент корисности
$\eta_R$	Коефицијент корисности редуктора
$\eta_T$	Укупни коефицијент корисности система погона
$\eta_W$	Коефицијент корисности вратилног вода
$\eta_r$	Коефицијент прелаза
$\eta_v$	Коефицијент корисности вратилног вода без редуктора
$\eta_w$	Коефицијент корисности вратилног вода
$\theta$	Апсолутни угао помераја, [°]
$\lambda$	Таласна дужина, [m]
$\rho$	Густина воде, [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{va}$	Густина ваздуха, [kg/m <sup>3</sup> ]
$\zeta_n$	Специфична нормална сила
$\tau_{doz}$	Дозвољено напрезање, [Mpa]
$\tau$	Тангенцијални напон [N/m <sup>2</sup> ]
$\omega_{pp}$	Угаона брзина тачке упорног лежаја прамчаног потисника, [rad/s]
$\omega_s$	Угаона брзина тачака упорних лежаја пропелера, [rad/s]
$\omega$	Угаона брзина тежишта брода, [rad/s]
$\varphi$	Угао нагиба брода, [°]
$\varphi$	Релативни угао помераја, [°]

## САДРЖАЈ

	страна
<b>ЗАХВАЛНОСТ</b>	<b>2</b>
<b>САЖЕТАК</b>	<b>4</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>5</b>
<b>ПРЕГЛЕД КОРИШЋЕНИХ СКРАЋЕНИЦА</b>	<b>6</b>
<b>ПРЕГЛЕД КОРИШЋЕНИХ ОЗНАКА</b>	<b>7</b>
<b>САДРЖАЈ</b>	<b>11</b>
<b>1. УВОД</b>	<b>15</b>
1.1. Предмет истраживања	15
1.2. Циљ истраживања	16
1.2.1. Научни циљ	16
1.2.2. Практични циљ	16
1.3. Методе истраживања	16
1.4. Научна и друштвена оправданост докторске дисертације	17
1.5. Очекивани научни допринос дисертације	17
1.6. Приказ докторске дисертације	18
<b>2. ПОГОНСКИ СИСТЕМИ САВРЕМЕНИХ БРОДОВА СА ДИЗЕЛ ЕЛЕКТРИЧНИМ ПОГОНОМ</b>	<b>19</b>
2.1. Развој дизел електричног погона у свету	19
2.2. Развој дизел електричног погона на рекама	20
2.3. Развој дизел електричног погона на војним бродовима	21
<b>3. КРАТАК ИСТОРИЈАТ И ТЕХНИЧКИ ПОДАЦИ БРОДА „КОЗАРА” ПРЕ МОДЕРНИЗАЦИЈЕ</b>	<b>24</b>
3.1. Историјат брода „КОЗАРА”	24
3.2. Технички опис брода „КОЗАРА” пре модернизације	27
3.2.1. Основни ТТ подаци брода пре модернизације	27
3.2.2. Конструкција брода	27
3.2.3. Погонска група	30
3.2.4. Помоћни агрегати	30
3.2.5. Помоћно системи и уређаји	30
3.3. Неки резултати испитивања погонских особина брода са класичним дизел погоном	32
<b>4. МОДЕРНИЗАЦИЈА БРОДА „КОЗАРА”</b>	<b>35</b>
4.1. Технички захтеви за модернизацију погона брода „КОЗАРА”	35

4.2.	Избор новог погона на броду „КОЗАРА”	36
4.3.	Избор и уградња опреме дизел електричне погонске групе	38
4.3.1.	Избор опреме дизел електричне погонске групе	38
4.3.1.1.	Избор погонских електромотора	38
4.3.1.2.	Избор напонско фреквентних претварача	42
4.3.1.3.	Избор прамчаног потисника	44
4.3.1.4.	Избор дизел генератора	44
4.3.1.5.	Избор система за управљање погоном	48
4.3.1.6.	Избор електричног дистрибуционог система	49
4.3.1.7.	Избор система аутоматизације	50
4.3.2.	Уградња дизел електричне погонске групе	51
4.4.	Избор кормиларског уређаја	53
4.5.	Намена и технички опис брода „КОЗАРА” након модернизације	56
4.5.1.	Намена брода	56
4.5.2.	Опис брода „КОЗАРА” након модернизације	56
4.5.2.1.	Основни ТТ подаци брода након модернизације	56
4.5.2.2.	Труп брода, надграђе и бродске просторије	57
4.5.2.3.	Погонски комплекс и бродски системи	59
<b>5.</b>	<b>АНАЛИЗА ИЗАБРАНОГ ПОГОНА МОДЕРНИЗОВАНОГ БРОДА „КОЗАРА”</b>	<b>63</b>
5.1.	Теоријске претпоставке утицаја нове врсте погона на маневарска и пловна својства брода	63
5.2.	Утицаја нове врсте погона на жилавост брода	64
5.3.	Утицај нове врсте погона на економичност пловидбе	64
5.4.	Осврт на одржавање нове врсте погона	65
<b>6.</b>	<b>ДИНАМИКА И КИНЕМАТИКА ПЛОВИДБЕ БРОДА</b>	<b>67</b>
6.1.	Динамика пловидбе брода	67
6.1.1.	Отпор брода	67
6.1.1.1.	Отпор трења	68
6.1.1.2.	Отпор таласа	68
6.1.1.3.	Утицај дубине воде	71
6.1.1.4.	Отпор ваздуха	73
6.1.1.5.	Утицај ограниченог пресека пловног пута	74
6.1.2.	Снага и коефицијент корисности погона	75
6.1.2.1.	Снага и коефицијент корисности дизел погона	76
6.1.2.2.	Снага и коефицијент корисности дизел електричног погона	78

6.1.2.3.	Избор оптималног пропелера	79
6.1.3.	Маневрисање бродом	82
6.1.3.1.	Понашање брода у хоризонталној равни	83
6.1.3.2.	Анализа деловања сила у појединим фазама	85
6.1.3.3.	Промена брзине у окрету брода	87
6.1.3.4.	Понашање брода у вертикалној равни	88
6.2.	Динамика пловидбе брода „КОЗАРА”	90
6.2.1	Погонске силе и моменти брода „КОЗАРА”	90
6.2.1.1.	Пловидба напред или крмом без промене правца (кормило у средини)	90
6.2.1.2.	Маневар окрета са оба мотора напред уз отклон кормила у лево или десно	90
6.2.1.3.	Маневар окрета са спрегом без употребе кормила	92
6.2.1.4.	Маневар окрета са спрегом и отклоном кормила у једну или другу страну	93
6.2.1.5.	Маневар окрета са спрегом и отклоном кормила у једну или другу страну и употребу прамчаног потисника	94
6.2.1.6.	Маневар окрета са спрегом и употребом прамчаног потисника без употребе кормила	95
6.2.2.	Анализа динамике кретања брода „КОЗАРА”	96
6.3.	Кинематика пловидбе брода на реци	97
6.3.1.	Основне карактеристике пловидбе брода на реци	98
6.3.2.	Кретање брода у окрету са маневром оба погонска мотора напред и отклоном кормила у једну страну	99
6.3.3.	Кретање брода у окрету са маневром спрега погонских мотора, употребом прамчаног потисника и отклоном кормила у једну страну	108
<b>7.</b>	<b>ИСПИТИВАЊЕ БРОДА „КОЗАРА” НАКОН МОДЕРНИЗАЦИЈЕ</b>	<b>112</b>
7.1.	Дефинисање програма испитивања	112
7.1.1.	Испитивање маневарских и погонских карактеристика брода „КОЗАРА”	112
7.1.1.1.	Мерење брзине брода	112
7.1.1.2.	Мерење пречника круга окрета	112
7.1.1.3.	Мерење зауставног пута	113
7.1.1.4.	Мерење убрзања	113
7.1.2.	Мерење обртног момента на вратилном воду и снимање перформанси	113
7.1.3.	Мерење торзионих осцилација вратилних водова	114
7.1.4.	Мерење линеарних вибрација на темељима опреме и на трупку брода	115

7.2.	Испитивање брода „КОЗАРА” у пловидби	116
7.2.1.	Испитивање погонских и маневарских карактеристика брода	117
7.2.1.1.	Мерење брзине брода	117
7.2.1.2.	Мерење пречника окрета брода	118
7.2.1.3.	Мерење зауставног пута	120
7.2.1.4.	Мерење убрзања брода	121
7.2.2.	Мерење обртног момента на вратилном воду и снимање перформанси	122
7.2.3.	Мерење торзионих вибрација вратилних водова	123
7.2.4.	Мерење вибрација на темељима опреме и на лежајима вратилних водова	124
<b>8.</b>	<b>АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА ИСПИТИВАЊА</b>	<b>126</b>
8.1.	Анализа резултата испитивања пловних и маневарских карактеристика брода	126
8.1.1.	Анализа резултата мерења брзине брода	126
8.1.2.	Анализа резултата мерења пречника круга окретања брода	127
8.1.2.1.	Окрет брода у маневру максимални отклон кормила у лево или десно, без промене режима мотор напред	127
8.1.2.2.	Окрет брода у маневру са спрегом без употребе кормила	128
8.1.2.3.	Окрет брода у маневру спрега и отклона кормила у једну или другу страну	128
8.1.2.4.	Окрет брода у маневру спрега и отклона кормил у једну или другу страну и употребу прамчаног потисника	128
8.1.2.5.	Окрет брода у маневру спрега и употребу прамчаног потисника без употребе кормила	129
8.1.2.6.	Општа анализа резултата мерења пречника круга окретања брода	129
8.1.3.	Анализа резултата мерења зауставног пута	130
8.1.4.	Анализа резултата мерења убрзања брода	131
8.2.	Анализа резултата мерења снаге на вратилном воду	131
8.3.	Анализа резултата мерења торзионих осцилација на вратилном воду и линеарних вибрација	132
<b>9.</b>	<b>ЗАПАЖАЊА О ЕКСПЛОАТАЦИЈИ БРОДА НАКОН ИЗВРШЕНЕ МОДЕРНИЗАЦИЈЕ</b>	<b>134</b>
<b>10.</b>	<b>ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА</b>	<b>137</b>
<b>11.</b>	<b>ПРЕПОРУКА ЗА ДАЉА ИСТРАЖИВАЊА</b>	<b>140</b>
	<b>ЛИТЕРАТУРА</b>	<b>142</b>



## 1. УВОД

Ревитализација брода и модернизација бродских система обавља се након вишегодишњег коришћења војних бродова. Модернизација првенствено обухвата систем погонске групе као једног од виталних бродских система.

Један од таквих бродова је и брод посебне намене БПН-30 „КОЗАРА” (у даљем тексту брод „КОЗАРА”) који се налази у саставу Речне флотиле. Брод „КОЗАРА” је саграђен 1939. године у Линцу, а у саставу Речне флотиле се налази од 1961. године.

У току 2011. и 2012. године на броду „КОЗАРА”, извршена је модернизација погонске групе брода, чиме је класични дизел погон замењен дизел електричним погоном (ДЕП). Погонска група дизел мотора је замењена дизел електричном погонском групом. Наведена модернизација погонске групе извршена је по први пут на једном ратном броду Речне флотиле. Основна разлика између наведених врста погона је у томе, што се код класичног дизел погона погон пропелера остварује директно дизел мотором, а код ДЕП-а пропелер се погони електромотором, при чему се напајање електромотора остварује из бродске електричне централе која се напаја помоћу генератора погоњених дизел моторима.

Дизел електрична погонска група се састоји од:

- *дизел агрегата (2 ком),*
- *погонских ЕМ (2 ком),*
- *редуктора (2 ком),*
- *прамчаног потисника,*
- *електричног разводног система (за погон и остале бродске системе),*
- *система контроле погона и*
- *система даљинског управљања погоном.*

Поред погонских електромотора и прамчаног потисника, у склопу нове облика погона, на један од бродова Речне флотиле су по први пут уграђени:

- *систем управљања погоном помоћу напонско фреквентних претварача,*
- *систем за расподелу електричне енергије и*
- *систем аутоматског управљања радом генератора, уз савремени, алармни систем аутоматизације.*

### 1.1. ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА

Предмет истраживања у докторској дисертацији је утицај дизел електричног погона којим је замењен класични дизел погон на једном од бродова Речне флотиле, на маневарске и погонске карактеристике брода.

Проблем истраживања у овоме раду јесте могућност побољшања маневарских и погонских карактеристика ратних бродова који имају застареле концепције погона.

У раду ће се истражити метода побољшања маневарских и погонских карактеристика брода уградњом дизел електричне погонске групе уместо класичне погонске групе дизел мотора.

У раду су приказана теоријска разматрања свих предности и недостатака дизел електричног погона, након чега је обрађен поступак замене новог облика погона на броду „КОЗАРА”.

Затим је дефинисан програм испитивања брода са новим обликом погона и извршено испитивања брода у пловидби. Након завршених испитивања извршена је анализа добијених резултата, који су показали како нови облик погона утиче на маневарске и погонске карактеристике брода, као и на труп брода, услед смањених линеарних вибрација и торзионих осцилација, на економичност пловидбе и на еколошке услове живота и рада посаде.

## 1.2. ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА

Општи циљ истраживања је приказивање позитивних ефеката методе замене погонске групе дизел мотора са дизел електричном погонском групом на маневарске и погонске карактеристике ратног брода.

Парцијални циљ истраживања је анализа оправданости модернизације класичних погонских група ратног брода са савременим облицима погонских група и испитивање позитивних ефеката на услове употребе брода, при чему се мисли на маневарске и погонске карактеристике, економичност употребе, утицај дизел електричног погона на брод као целину и на еколошке услове живота и рада посаде брода.

### 1.2.1. Научни циљ

Научни циљ истраживања јесте да се изврши испитивање брода „КОЗАРА” са уграђеном дизел електричном погонском групом, према унапред дефинисаном програму испитивања и да се на основу резултата испитивања изврши анализа ефикасности замене погонске групе дизел мотора са дизел електричном погонском групом на побољшање маневарских и погонских карактеристика брода као и на остале позитивне ефекте који се том методом добију.

Анализа ефикасности је извршена на основу поређења резултата испитивања новог облика погонске групе са постојећим резултатима испитивања брода пре модернизације.

### 1.2.2. Практични циљ

Практични циљ истраживања јесте да се резултати истраживања примене у пракси у будућим савременим погонским групама бродова, како на ратним бродовима тако и на осталим пловним објектима у Србији.

У истраживању се полази од следећих претпоставки (хипотеза):

- **Х.1 дизел електрични погон у значајној мери побољшава маневарске и погонске карактеристике брода.**
- **Х.2 погонски електромотори у знатно мањој мери изазивају торзионе осцилације вратилног вода.**

## 1.3. МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА

Предложено истраживање се условно може поделити на четири целине, и то:

1. *Теоретско разматрање предности и недостатака дизел електричног погона,*

2. *Практична реализација пројекта замене врсте погонске групе на једном од бродова Речне Флотиле,*
3. *Испитивање погонских и маневарских карактеристика брода са уграђеном дизел електричном погонском групом,*
4. *Анализа резултата испитивања.*

У зависности од поменутих целина истраживања, биће примењиване различите методе:

- **Механичко - математички модел** прорачуна снаге на пропелерима брода, применом методе анализе и синтезе резултата добијених мерењем у досадашњим условима употребе бродова.
- **Компаративни метод анализе** - који ће се користити за поређење успешне реализације једног и више пројеката који су успешно реализовани, односно у овом случају компарација постојећег и новог облика погона.
- **Аналитички метод** - користиће се ради рашчлањивања и разјашњавања одређених појава, понашања и карактеристика.

За испитивање маневарских карактеристика брода, мерење снаге на вратилним водовима брода и мерење вибрација коришћена је опрема коју поседује Технички опитни центар (ТОЦ).

#### 1.4. НАУЧНА И ДРУШТВЕНА ОПРАВДАНОСТ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

Докторска дисертација представља научноистраживачки рад из области машинства и бродоградње и војне опреме и усклађена је са потребама система одбране у целини, као и са могућностима и тенденцијом развоја научне делатности у Министарству одбране и Војсци Србије.

У раду се указало на оправданост замене погонске групе дизел мотора са дизел електричном погонском групом и утицај новог облика погона на маневарске и погонске карактеристике ратног брода.

Друштвена оправданост израде докторске дисертације огледа се у томе што се кроз истраживање показало у којој је мери замена врсте погона оправдана са аспекта побољшања маневарских и погонских карактеристика, смањења трошкова пловидбе брода и повољног еколошког утицаја на живот и рад посаде брода, преко смањења буке и вибрација на броду и концентрације издувних гасова, као и на одржавање брода.

#### 1.5. ОЧЕКИВАНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС ДИСЕРТАЦИЈЕ

Очекивани допринос рада је у томе да се кроз дефинисани програм испитивања брода у вожњи, показало како дизел електрични погон утиче на маневарске карактеристике брода.

Научни допринос рада је у томе што се по први пут у Србији извршило испитивање брода на коме је уграђена дизел електрична погонска група, а анализом резултата испитивања се добио одговор на питање како та врста погона утиче на маневарске карактеристике брода као и на питање економске оправданости замене облика погона. Осим тога, с обзиром на своју комплексност, рад је допринео и мултидисциплинарној анализи и синтези наведених садржаја.

## 1.6. ПРИКАЗ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Глава 1 приказује уводна разматрања, дефинисање проблема истраживања и усмеравање практичног значаја реализације циљева истраживања. Представљене су методе истраживања, научна и друштвена оправданост истраживања и очекивани допринос истраживања.

Глава 2 приказује кратак историјат примене дизел електричног погона на цивилним и војним пловним објектима.

Глава 3 обрађује историјат брода „КОЗАРА”, као и технички опис брода и резултати испитивања брода са старим дизел погоном.

У глави 4 представљена је модернизација брода са освртом на разлоге и начин реализације модернизације. На брод је уграђена дизел електрична погонска група са два дизел агрегата снаге  $400\text{ kW}$  сваки који преко главне разводне табле напајају бродску електричну мрежу из које се са електричном енергијом снабдевају два погонска електромотора снаге  $250\text{ kW}$  сваки, прамчани потисник снаге  $90\text{ kW}$  и сви остали бродски потрошачи електричне енергије. На брод је уграђен и помоћни агрегат за напајање брода електричном енергијом у везу, снагом  $64\text{ kW}$ .

Глава 5 представља приказ очекиваног доприноса новог облика погона на основу извршене теоријске анализе уграђеног погона.

Глава 6 обрађује основе динамике и кинематике пловидбе брода, са посебним освртом на динамику брода „КОЗАРА” и на специфичности пловидбе брода на реци.

У глави 7 је представљен програм испитивања брода са новом врстом погона, а након тога су приказани резултати испитивања брода.

Глава 8 обрађује анализу добијених резултата испитивања, на основу поређења са резултатима испитивања брода са старом врстом погона, као и са резултатима испитивања сличних бродова. Обављена испитивања брода показују знатно побољшање маневарских и погонских особина брода у односу на класичан дизел погон са два мотора.

У глави 9 су дата запажања о експлоатацији брода након извршене замене погона која су неопходна за оцену квалитета уграђене опреме и економичности нове врсте погона.

У глави 10 је у закључним разматрањима назначен допринос нове врсте погона маневарским карактеристикама брода, као и друге предности дизел електричног погона брода. Може се закључити да је замена класичног дизел погона дизел електричним погоном ефикасан метод за побољшање маневарских карактеристика брода.

Глава 11 обрађује препоруке за даља истраживања на пољу примене дизел електричног погона, како на бродовима Речне флотиле тако и на осталим пловним објектима у нашој земљи.

## **2. ПОГОНСКИ СИСТЕМИ САВРЕМЕНИХ БРОДОВА СА ДИЗЕЛ ЕЛЕКТРИЧНИМ ПОГОНОМ**

У овом делу приказаће се кратак осврт на развој дизел електричног погона у свету, како на мору тако и на рекама, са посебним освртом на развој те врсте погона на војним бродовима.

### **2.1. РАЗВОЈ ДИЗЕЛ ЕЛЕКТРИЧНОГ ПОГОНА У СВЕТУ**

Први реализован електромоторни погон остварио је Мориц Јакоби 1838. године када је једно кратко време покретао чамац на реци Неви у Петрограду. За погон чамца дужине 7,5 метара са 14 особа је коришћен примитиван електромотор са одговарајућом трансмисијом. Од тада је електрични погон увек имао извесне експлоатацијске предности пред осталим конфигурацијама погона, које су подстицале његову примену на појединим врстама бродова. Попут многих других изума и електрични погон је своју примену најпре нашао у војној индустрији која је до краја 19. века изградила велики број подморница са потпуно електричним погоном напајаним из акумулаторских батерија. Пресудне експлоатацијске предности електричног погона тада су очигледно биле тихи рад и могућност пловидбе под водом без потрошње кисеоника и емисије продуката сагоревања [1].

Интересантно је навести да је још 1900. године, у часопису „Century Magazine”, Никола Тесла [2] најавио електрични погон великих бродова, као што је две године пре тога описао чувени чамац са бежичним управљањем.

Постојао је мали напредак у развоју електричног погона бродова све до 1903. године када је направљен један руски танкер, на који су уграђена три агрегата (три дизел мотора са генераторима), а сваки генератор је напајао одговарајући једносмерни електромотор који је покретао одговарајући пропелер. Након тога, 1904. године у Нижном Новгороду су била два брода „Vandal” и „Sarmat” са дизел електричним погоном [3].

Почетком двадесетог века направљени су бродови са једносмерном електричним погоном снаге пар MW. Већ 1908. године Немци су направили брод погоњен са турбогенератором и са два погонска једносмерна електромотора која су покретала два пропелера.

Један енглески брод био је 1911. године опремљен са два дизел мотора која су покретала генераторе наизменичне струје напајајући погонске асинхроне (индукционе) електромоторе. Генератори су имали један пар полова, а асинхрони електромотори су имали по два намотаја са различитим бројем пари полова обезбеђујући тиме по две брзине обртања погонских пропелера [4].

Између 1902. и 1910. године дизел мотори нису имали могућност промене смера обртања коленастог вратила па се електрични погон наметнуо способношћу једноставног реверзирања погона. У годинама које су следиле, а посебно током 20-тих и 30-тих година 20. века, изграђен је већи број војних и путничких бродова са турбоелектричним погоном. За избор електричног погона пресудна је била способност једноставног реверзирања, редукације броја обртаја и преноса врло велике снаге.

Током II светског рата поринуто је у САД-у више од 300 мањих војних бродова и 530 танкера с електричном погоном при чему је искориштена предност брзе градње и решен проблем премалих капацитета за производњу редуктора.

Појавом квалитетнијих дизел мотора, редуктора и пропелера с променљивим кораком, електрични погон средином 20. века привремено нестаје с трговачких бродова, али се због одличних маневарских способности и економичнијег рада при малом погону и даље интензивно користи на ледоломцима и истраживачким бродовима.

Откриће тиристора и развој регулисаних електромоторних погона напајаних из тиристорских исправљача 70-тих, односно статичких претварача фреквенције 80-тих година, омогућили су интеграцију бродског електроенергетског система, а тиме и потпуно искориштење укупне инсталиране снаге погонских мотора за погон брода, прекрцај терета и осталу потрошњу.

Након врло успешне замене парног погона дизел-електричним на „S/S Queen Elizabeth II” убрзо су предности у виду повећања корисног бродског простора, смањења потрошње горива, тихог и мирног рада, добрих маневарских способности и високе расположивости, подстакле примену истих решења и на новоизграђеним бродовима за кружна крстарења класе „Fantasy“ и „Princess”.

Концепција интегрисаног електроенергетског система константне фреквенције и напона с погонским електромоторима погоњеним из статичких претварача данас је стандардно решење на великим путничким бродовима, али и на пловилима с динамичким позиционирањем, које представља процес одржавања пловног објекта на задатој позицији уз дефинисан положај у простору (курс, угао нагиба, зарањај), при чему се свака тенденција за променом задатих параметара, услед деловања спољашњих или унутрашњих поремећаја, поништава деловањем антивних сила и момената извршних органа.

Нови замах електрични погон добија увођењем закретних подтрупних потисника (AZIPOD - *Azimuthing Podded Drive*) почетком 90-тих, који додатно потенцирају све њене експлоатацијске предности. За разлику од класичних погонских система код којих се погонски електромотор налази у броду, овде је он смештен у посебном кућишту привешеном на бродски труп. Цело кућиште се може закретати за пуни круг (360°) чиме је нестала потреба за системом кормиларења, као и потреба за прекретањем погонског мотора, који се сада стално окреће у истом смеру. Овим су значајно побољшане маневарске карактеристике брода, а престаје и потреба за прамчаним потисницима. Електрични погон с актуелном генерацијом подтрупних потисника, заснованом на електромоторима с перманентним магнетима, захваљујући повећаној хидродинамичкој ефикасности има и код пловидбе максималном брзином значајно мању потрошњу горива од дизел-механичког погона.

## 2.2. РАЗВОЈ ДИЗЕЛ ЕЛЕКТРИЧНОГ ПОГОНА НА РЕКАМА

Величине бродова који плове по рекама ограничене су због неколико услова. Услови могу бити природни, као што су дубина и ширина реке, речне кривине и вештачка ограничења, као што су мостови, преводнице и друго [4].

Постоје очекивања и прогнозе, да ће се у наредном периоду знатно повећати удео контејнерских и бродова за превоз терета на точковима, аутомобила, камиона, приколица и сл. (RO-RO бродови) на унутрашњим водама, који треба да су бржи, маневрибилнији и савременији од постојећих.

Електрични погони могу решити и неке од следећих специфичних проблема на рекама:

- *Континуалном регулацијом брзине обртања, од минималне до максималне, у оба смера обртања и уградњом потисника добијају се одличне маневарске особине брода које су потребне код пловидбе на унутрашњим пловним путевима, нарочито код упловљења и испловљења и пловидбе преко преводница.*
- *Познато је да се максимална снага погона користи у узводној вожњи, а то износи мање од 30% пловидбе на Европским рекама. Електрични систем управљања снагом (Power management system) омогућује да се укључењем или искључењем појединих агрегата, они оптимално користе, што нарочито долази до изражаја у низводној пловидби.*
- *Електрична енергија за општебродске потребе добијала би се из бродских генератора који би се користили и за напајање погонских уређаја. Електрична енергија је потребна и за напајање свих бродских уређаја, као што су сидрена и остала витла, прамчани пропелери, дизалице, итд.*
- *На мањим туристичким бродовима дизел генератори се могу сместити на најпогоднијем месту у броду, тако да са буком и вибрацијама најмање сметају посади и путницима.*

Ради поправљања стања на унутрашњим пловним путевима, у погледу обнове флоте, усвојена је на Рајни конвенција (Scrapping Scheme, ЕЕС 110/89) којом се жели у наредних 15 година извршити замену бродова по принципу ново за старо. Наиме, финансијски би помагали сечу старих бродова и градњу нових речних бродова.

Основни критеријуми за градњу нових бродова су: мобилност, сигурност и екологија. Електрични погони имају боље карактеристике и предности по свим овим критеријумима у односу на класичне дизел погоне. Боља мобилност и квалитетније маневарске карактеристике добијају се активним кормиларењем.

Сигурност и поузданост погона добијају се уградњом више дизел агрегата што омогућава да брод обави пловидбу и у случају да се деси неки квар на једном од њих. Обзиром да дизел мотори раде у генераторском режиму, сагоревање им је боље и на тај начин је смањена мисија штетних гасова.

Као једно савремено и оптимално решење градње нових речних бродова, у Европи се дуже време ради на пројекту ИНБИШИП [2] (INBISHIP – BRITE EURAM Project 2130). ИНБИШИП је нови прилаз пројектовању речних бродова чији је циљ смањење штетног утицаја на околину, смањење потрошње енергије и побољшање сигурности и економичности рада речних бродарских компанија.

### **2.3. РАЗВОЈ ДИЗЕЛ ЕЛЕКТРИЧНОГ ПОГОНА НА ВОЈНИМ БРОДОВИМА**

Као што је већ поменуто, због немогућности дизел мотора да врше промену смера обртања, почетком 20. века изграђен је већи број војних бродова с турбоелектричном погоном.

Америчка морнарица је 1913. године уградила турбо електрично постројење наизменичне струје на броду „Jupiter” [3] снаге 5.250 kW на вратилу. После тога, овај погон примењивао се на крстарицама, путничким и теретним бродовима и техничкој флоти. На ратним бродовима САД 20-тих година реализовани су овакви наизменични погони снаге 22 MW [5].

Почетком 20. века, највећи бродови су били војни бродови. Исти су имали одређене проблеме са обезбеђењем адекватног погона.

Турбо електрични погон је истраживан по први пут на америчком броду „Jupiter” 1913. године, а уграђен на бојном броду „New Mexico” [6] (слика 2.1). Овај брод је конструисан 1915. године, а завршен је и постао оперативан 1918. године. Брод је био дуг 195 m, широк 27,8 m са газом 9,5 m, а депласман му је био 32.000 t. Са погонском снагом 20.515 kW, са две парне турбине са редукторима, преко 4 асинхрона електромотора са укупном снагом од 20 MV на  $2.100 \text{ min}^{-1}$ , који покрећу 4 пропелера брод постигао максималну брзину од 21 чвора. Мрежни напон је био 2.300 V са фреквенцијом 33,2 Hz.



Слика 2.1. Први војни брод са електричним погоном „New Mexico” изграђен 1918. године у Америци

Генератор је имао један пар полова, а асинхрони електромотори са два калема су имали 6 или 9 пари полова, што је коришћено за смањење брзине обртања трансмисије. Први намотаји електромотора са 6 пари полова су коришћени за нормалне или линијске вожње, при чему је развијана максимална брзина обртања пропелера од  $167 \text{ min}^{-1}$ . Други калем са 9 полова је коришћен за маневар. Брод је имао 1084 чланова посаде. Брод је 1922. године модификован, а његова намена је промењена, тако да је постао носач авиона за 55 авиона и 468 чланова посаде. Брод је исечен 1947. године у Њујорку.

Турбоелектрични погон је пре свега развијан као замена за турбине са редукторима, ради смањења брзине обртања између парне турбине и пропелера. Предности турбоелектричног погона, у односу на турбине са редукторима, биле су следеће: једноставан маневар, велики обртни момент на вратилу, прекретање турбина није било неопходно, миран рад, смањење вибрација и економична пловидба са нижим брзинама. Постојала је могућност за пловидбу брода са мањом снагом, када је оштећен један од погонских мотора.

У свом раду под називом „Електрични погон војних бродова” из 1917. године, Тесла је посматрао само пропелере са фиксним кораком, јер у то време пропелери променљивог корака још нису развијени. За носач авиона велике погон снаге и све друге бродове велике снаге, брзина ротације пропелера је око  $100\text{--}200 \text{ min}^{-1}$ , што представља проблем код трансмисије са високо ротационих машина.

Основни критеријуми које морају задовољити погони великих бродова су:

- *Оперативна флексибилност - инсталисана снага главних погонских машина мора да омогући различите режиме рада (минималну, крстарећу и максималну брзину),*
- *Могућност прилагођавања и континуирано регулисање брзине обртања пропелера,*
- *Могућност употребе оперативних машина у стабилном оптерећењу, без брзих прелазних процеса,*
- *Могућност коришћења више једнаких радних машина – погонска поузданост, економичност, смањене потребе за одржавањем машина, итд.,*
- *Могућност за постављање главних погонских машина на најпогоднији место на броду,*



- Елиминација помоћних погона,
- Дуг и поуздан рад без одржавања.

Анализирајући могућу примену електричних погона на бродовима, Тесла је уочио и набројао све добре карактеристике и предности те врсте погона, које су се задржале до данас [7].

Почетак 20. века обележио је почетак авијације. У војним операцијама, авиони су имали огромне прерогативе, али им је недостајао већи радијус кретања у акцији. Ова потреба за већим пречником деловања авиона довела је до изградње највећих бродова, до тада.

Носачи авиона захтевају огромну погонску снагу. По пројекту, прорачунато је да ће укупна снага агрегата потребна на броду бити  $134.000 kW$ . Тесла је предлагао 4 агрегата снаге  $33.500 kW$ , сваки. Али, ове захтеве могле су у том тренутку постићи само парне турбине. Због велике брзине обртања од неколико хиљада, чак и преко  $10.000 min^{-1}$ , ове машине нису имале дуготрајну примену, с обзиром да је ротирајућа брзина пропелера знатно нижа.

Носач авиона „Саратога” [8] је конструисан 1922. године, а изграђен 1927. године (слика 2.2). Имао је дужину  $269 m$ , ширину  $32,1 m$  и пуни депласман  $38.746 t$  при газу  $7,4 m$ . Са погонском снагом  $134.280 kW$  коју су обезбеђивале две парне турбине, преко 4 синхрона генератора и 8 асинхроних електромотора која су погонили 4 пропелера достигао је брзину од  $33,25$  чворова. Електромотори су имали 11 или 22 пари полова, чиме је вршена регулација брзине обртања пропелерске осовине. Мрежни напон је био  $5.000 V$  са фреквенцијом  $58,5 Hz$ . Брод је имао 2.122 чланова посаде (морнара и пилота). Капацитет је био 90 летелица, а пловна аутономија  $10.000$  наутичких миља при брзини од  $10$  чворова. Брод је 1946. године коришћен као мета за истраживања дејства атомске бомбе, на острву Бикини.



Слика 2.2. Први носач авиона „Саратога” изграђен 1927. године у Америци

### **3. КРАТАК ИСТОРИЈАТ И ТЕХНИЧКИ ПОДАЦИ БРОДА „КОЗАРА” ПРЕ МОДЕРНИЗАЦИЈЕ**

У овој глави биће приказан кратак историјат брода „КОЗАРА”, технички опис брода пре модернизације и резултати испитивања брода са старим дизел погоном.

#### **3.1. ИСТОРИЈАТ БРОДА „КОЗАРА”**

Брод „КОЗАРА” је изграђен у Немачкој под именом „Kriemhild”, уочи почетка II светског рата, када се у немачкој ратној морнарици приступило пројектовању и изградњи помоћних војних бродова на стратегијски важном Дунаву. Као резултат таквих напора почетком 1939. године започета је изградња три брода истог типа „Uta”, „Kriemhild” и „Brunhild”. Сва три брода грађена су као брзи матични бродови базе.

Свечано поринуће брода „Kriemhild” извршено је 15.09.1939. године у, тада немачкој, луци Линц. Након градње брода он је укључен у састав Црноморске флоте, немачке морнарице [9]. Намена брода је била да служи као командни брод команданта за поморске и речне снаге на сектору Дунава, Црног Мора и Дњепра, те као брод матица за један дивизион миноловаца.

Брод се налазио у саставу Црноморске флоте све до 1945. године. Једно време брод је базирао у Одеси (Украјина) северозападно од Севастопоља, а касније у Констанци (Румунија). Према наводима комисије која је у периоду од 07. до 15.06.1960. године извршила преглед брода, на броду није било видљивих оштећења која би могла бити последица војних дејстава. На основу овог податка, а узимајући у обзир касније догађаје (нема га у попису бродова који су извлачени крајем рата Дунавом) вероватно је он пре 1945. године био извучен из састава ове формације и враћен у Немачку у Регенсбург, где га је и затекао крај рата. То да је био на Црном мору недвосмислено тврди комисија РПФ у свом извештају, а према тадашњем сведочењу бившег „управитеља машина” на броду Петера. На једном месту кажу да, иако је брод грађен за реку, веома се добро показао и у пловидби на мору. Такође на другом месту спомињући бродски дестилатор питке воде кажу да је исти употребљаван на Црном мору.

Од капитулације до 1948. године брод је био војни плен америчких окупационих снага и служио им је за смештај делова штабова дивизија. У том периоду, према подацима бродарског музеја у Регенсбургу, брод је први пут променио име у „USS OREGON” [10]. Током периода експлоатације од стране американаца брод је имао пар вожњи на краћим релацијама.

Након тог кратког периода, већ 1948. године брод је предат фирми Баварски Лојд из Регенсбурга која му је вратила старо име „Kriemhild”. Ова фирма је брод претворила у хотел. Сходно новој намени брода је адаптиран, при чему је са њега демонтирано наоружање и остала војна опрема (пре свега уређаји везе). Такође, након пријема брода фирма је „распремила”, односно конзервирала главне моторе. Према речима главног машинисте Петера, изговорених приликом прегледа брода од стране поменуто комисије брод је за период од 1940. до 1948. године имао приближно 9.000 погонских сати.

На слици 3.1 је приказан брод „Kriemhild” у Регенсбургу 1948. године када је служио као брод ресторан. „Kriemhild” је као брод ресторан коришћен све до 1954. године када је због нерентабилности затворен. Том приликом брод је отегљен у један рукавац Дунава и предат двома породицама на чување. У том моменту, обзиром да ником није био

потребан, изгледало је да више никад неће запловити већ да ће своју службу завршити као стамбени објекат, што је у наредних 6 година и био.



*Слика 3.1. Брод „Kriemhild” у Регенсбургу 1948. године*

Баварски Лојд је уложио велики напор да заштити брод од пропадања, као да су предосећали да брод није испречао све што је имао и да ће га историја још дуго памтити.

У исто време на релацији између фирми Дунавски Лојд из Сиска и Баварски Лојд из Регенсбурга почели су преговори о међусобној размени пловила. Наиме, Немци су као власници бившег војног брода „Kriemhild”, који им према њиховој рачуници не може послужити у привредне сврхе, били спремни да га уступе Сисачкој фирми у замену за један нови шлеп (1.000 t), чија је изградња у то време била еквивалентна цени главних мотора на „Kriemhild” (ово поређење дао је командант РРФ у свом образложењу команданту РМ за набавку овог брода). Ова разлика у цени била је последица других трговачких договора који су постојали између ове две фирме.

Обзиром да, као што је наглашено, брод није био рентабилан у привреди директор сисачког привредног предузећа је понудио тадашњој команди РРФ могућност да преко њихове фирме набаве брод који би задовољио потребе јединице имајући у виду његове тактичко техничке карактеристике. Крајем 50-их година у Речној Ратној Флотили указала се потреба набавке ратног брода за следеће намене:

- 1. Брод мора да има услове за рад и кухињу као и потребан број лежаја ради смештаја старешина дивизиона Речних миноловаца као и Одреда оклопних чамаца.*
- 2. Брод би морао да има довољне складшине капацитете да би могао да било где на речном бојишту буде брод матица за поменуте јединице.*
- 3. Бродске радионице би морале да задовоље услове теренских оправки јер би се избегла ситуација да због најмањег квара бродови морају напуштати састав и пловити за Нови Сад ради поправке.*
- 4. Брод својим капацитетима мора обезбедити смештај за услове за рад припадника Команде речне флотиле.*
- 5. Поред свега наведеног брод би се користио и као школски приликом боравка питомаца ВПА и ВВПА (војнопоморске и више војнопоморске академије).*

Команда флотиле учила је ову прилику, као идеалну, да по врло повољној цени набави брод који би у потпуности решио проблеме који су се РРФ наметнули због непостојања командног брода-матице.

Капетан бојног брода Михаило Тодоровић, тадашњи командант РРФ 19.03.1960. године покренуо је процедуру која је касније, за тачно пет и по месеци, односно 31.08.1960. године, резултирала коначном одлуком да се изврши замена брода „Фрушка Гора” за брод „Kriemhild” [11].

Преузимању брода претходило је утврђивање стања брода од стране комисије Команде Ратне морнарице (одобрење ДСНО, наредба број 168 од 23. маја 1960. године).

Након позитивног извештаја комисије [12] брод је преузет од предузећа из Сиска и одвежен у новосадско бродоградилште где се приступило реконструкцији брода. Том приликом је извршена замена бродова, при чему је брод „Kriemhild” постао део оружаних снага, а „Фрушка Гора“, исписана из флотне листе.

Већи део просторија је приведен првобитној намени осим одређеног броја у прамцу. Наиме, уместо стамбених просторија у прамцу је направљена велика конференцијска сала која може да прими до 60 људи.

Те и наредне године у ремонту су на брод монтирана средства везе чиме је брод и практично враћен у првобитну употребу. Уместо топова 40/2 mm на брод су уграђена 3 топа од 20/3 mm. Од помоћних агрегата на броду су остале све пумпе и компресори који су ту и данас. Сва остала помоћна опрема и уређаји су замењени.

У том ремонту на брод је уграђен навигацијски радар што је у то време још увек било реткост на реци (у то време се Сипски канал још увек савлађивао сипском вучом). Ово показује колико се поклањала пажња новом командном броду.

Кумовање новом броду Речне ратне флоте који је добио име „КОЗАРА”, извршено је на свечаности одржаној у Градини, на ушћу реке Уне у Саву, недалеко од Босанске Дубице, 05.06.1961. године. Том приликом је одржан и велики народни збор на ком су говорили највиши политички радници овог краја, представници Армије и изасланик врховног команданта генерал пуковник Бошко Шилеговић. После извршене смотре почасног вода, први командант брода капатан фрегате Ивица Мерчеп, прочитао је наредбу врховног команданта у којој се каже да новом броду даје име „КОЗАРА”. Затим је Петар Додик, председник Народног одбора среза Приједор, кумовао броду.

Након завршетка свечаности брод се упутио ка својој матичној луци Нови Сад, која ће то бити у наредних 47 година. На слици 3.2 је приказан део прве посаде брода.



*Слика 3.2. Чланови прве посаде брода „КОЗАРА”, на челу са капетаном фрегате Мерчеп Иваном (трећи слева) по допловљењу брода у Нови Сад након уматичења*

Наредних неколико година наставило се са интензивним радовима на броду, због чега је од 1961. до 1971. године брод био сваке године у просеку 60 дана у ремонту. Брод је 1961. године једини пут био у ремонту у новосадском бродоградилшту, а већ следеће године је отишао на ремонт у Апатин, где је наредних деценија сваки пут био ремонтван.

У току своје 70–то годишње експлоатације, до модернизације, брод је на основу евиденције која се водила на броду и извештаја комисије провео 55 година, 9 месеци и 22 дана у оперативној употреби, а 14 година, 2 месеца и 9 дана ван употребе (распрема и ремонти).

Током експлоатације остварио је 16.777 сати погона (према наводима комисије која га је преузела брод је у Немачком власништву остварио 9.000 сати погона) и при просечној брзини од 13,7 km/h, превалио пут од приближно 230.000 km, а од тога 23 дана у иностраним водама [12].

За време од када је у саставу флотиле брод је провео 1.530 дана у ремонтима чиме се његов радни век продужио. Током тих радова на броду су извршене одређене мање реконструкција, али је спољашњи изглед задржао готово у потпуности. Поред тога што је задржан спољашњи изглед брода сачуван је и веома велик број уређаја и система на броду [13].

## 3.2. ТЕХНИЧКИ ОПИС БРОДА „КОЗАРА” ПРЕ МОДЕРНИЗАЦИЈЕ

### 3.2.1. Основни ТТ подаци брода пре модернизације

Основни ТТ подаци брода пре модернизације приказани су у табели 3.1.

Табела 3.1. Основни ТТ подаци брода „КОЗАРА” пре модернизације

Дужина преко свега	67 m	Залихе уља за подмазивање	2,04 t
Највећа ширина	9,5 m	Залихе напојне воде за котлове	1,16 t
Висина бока на средини брода	2,7 m	Број ребара	132 ком
Висина брода са јарболом	13,6 m	Размак ребара	500 mm
Газ на прамцу	1,10 m	Димензије ребара	56x80x8 mm
Газ на средини	1,20 m	Дебљина лимова оплате	6 mm
Газ на крми	1,30 m	Дебљина лимова узвоја	7 mm
Стандардни депласман	550 t	Дебљина лимова дна (кобилице)	6 mm
Пуни депласман	601 t	Дебљина лимова главне палубе	5 mm
Број тона на 1 cm газа		Дебљина лимова чамчане палубе	3 mm
Метацитарска висина	4,2 m	Начин спајања оплате	цогловани
Залихе дизел горива	45 t	Начин закивања шавова	једноредно
Залихе питке воде	19,8 t	Начин закивања стикова	дворедно

### 3.2.2. Конструкција брода

Труп брода је грађен од вискоквалитетног бродограђевног челика по поречном систему градње и представља паралелни средњак, изузев врло кратког прелаза на крми и прамцу [13]. Крма брода је изграђена у депласманској форми, а прамац је класичан речни са вертикалом равном статвом. Брод је подељен на 10 водонепропусних преграда попречног система. Размак између ребара је 500 mm, а број ребара 130. Сви конструктивни елементи трупа и надграђа брода су спојени закивањем, на начин да су уздужни спојеви (шавови) закивани једноредно, а попречни спојеви (стикови) дворедно.

Главна палуба је изведена са прелуком и попречно укрепљена са подвезама и споњама. Оквирне споње су постављене на сваком ребру. Палуба је израђена од бродограђевног челика дебљине 5 mm.

Скелет брода чине следећи конструктивни елементи попречне чврстоће:

- ребра „L” профил димензија 80x65x8 mm
- протуребра „L” профил димензија 50x50x6mm
- оквирна ребра „I” профил димензија 250x6 mm

- ребренице „I” профил димензија 240x7 mm
- ојачања ребреница „L” профил димензија 60x60x8 mm
- ребра дна „L” профил димензија 60x60x8 mm
- споње „L” профил димензија 80x65x7 mm
- палубне подвезе „I” профил димензија 210x6 mm
- ојачања палубних подвеза „L” профил димензија 75x50x7 mm

и конструктивни елементи уздужне чврстоће:

- централни уздужни носач „I” профил димензија 290x7 mm
- два ојачања централног уздужног носача „L” профил димензија 75x50x7 mm
- уздужни носачи „I” профил димензија 145x6 mm
- бочне провезе „I” профил димензија 145x 6 mm
- угловнице бочних провеза „L” профил димензија 60x60x7 mm

Оплата брода је израђена од челичног лима следећих дебљина:

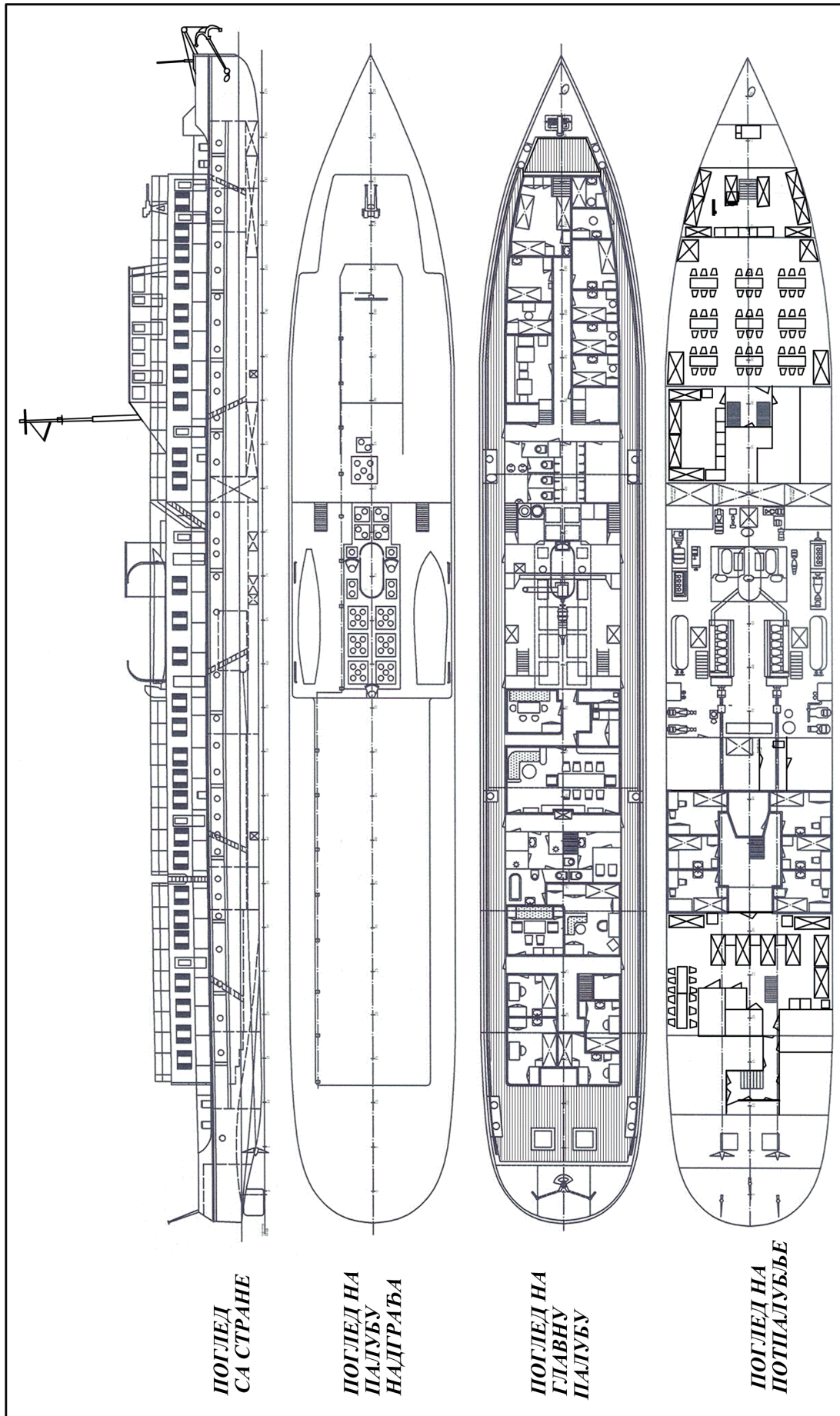
- лимови дна и оплате 6 mm
- лимови узвоја и водене линије 7 mm

Укупан број просторија на броду пре модернизације приказан је у табели 3.2.

Табела 3.2. Просторије брода „КОЗАРА” пре модернизације

Ред. број	Просторија	Број просторија (ком)	Број лежаја (ком)
1.	кабине официрске	13	23 лежаја
2.	кабине подофицирске	12	42 лежаја
3.	спаваона морнарска	1	50 лежаја
4.	салони	3	
5.	мунициске коморе	2	
6.	складишта	17	
7.	спремница	12	
8.	канине	3	
9.	кухиња	1	
10.	смочнице	2	
11.	радионице	3 - без шустерске	
12.	шустерска радионица	1	
13.	бродска берберица	1	
14.	бродска амбуланта	1	
15.	радио кабина	1	
16.	бродска телеф. централа	1	
17.	ланчаник	1	
18.	простори трим танкова	2	
19.	купатила	4 - два одељења тушева	
20.	командни мост	1	
21.	праоне	2	
22.	тоалети	5	
23.	просторије погон. уређаја	4	
	<b>УКУПНО:</b>	<b>93 просторије</b>	<b>115 лежаја</b>

На слици 3.3 приказан је генерални план брода пре извршене модернизације.



Слика 3.3. Генерални план брода „КОЗАРА” пре извршене модернизације

Вертикално брод је подељен на четири нивоа:

- ниво бродских каљужа,
- потпалубље,
- главна палуба и
- горња палуба.

### 3.2.3. Погонска група

Као главни погонски мотори на броду су била уграђена два четворотактна дизел мотора „KLOCKNER-HUMBOLDT-DEUTZ (A.G. KOLN – DEUTZ)“ од по  $298\text{ kW}$ ,  $400\text{ min}^{-1}$ , 6 цилиндара, тип мотора РВ6–М–345, произведени 1939. године. Мотори су били спојени директно на пропелерско вратило, тј. нису имали спојнице већ се промена смера обртања пропелера вршила на начин да је вршена промене смера обртања мотора помоћу уграђеног система (кврга за ход напред, односно крмом). Ова промена се вршила ручно помоћу полуге.

Сваки мотор је имао две расхладне пумпе од којих је једна била резервна. Расхлађивање мотора се вршило слатком водом. Расхладна вода је имала затворени кружни ток, а хладила се у једном резервоару помоћу две електромоторне пумпе, тип АWV 55, произвођача АЕГ из 1939. године, од којих је једна била резервна

### 3.2.4. Помоћни агрегати

Као помоћни мотори на брод су била уграђена два већа агрегата са моторима снаге  $65\text{--}75\text{ KS}$  фирме „Simering“ из Беча, тип ОМ–415,  $700\text{ min}^{-1}$ , 4 цилиндра. Сваки мотор погонио је по једну динамо машину и један компресор. Динамо машина је имала снагу  $40\text{--}48\text{ kW}$  и производила је струју напона  $115\text{ V}$ . Компресор је остваривао притисак од  $30\text{ bar}$  и имао је капацитет  $40\text{ m}^3/\text{h}$ . Агрегати су се налазили у машинском простору и то један са леве, а други са десне стране.

Трећи агрегат био је смештен на галерији машинског простора са мотором фирме „Simering“ из Беча тип С2, 2 цилиндра,  $19\text{--}24\text{ KS}$ , који је погонио динамо ( $12\text{--}15\text{ kW}$ ,  $115\text{ V}$ ) и центрифугалну пумпу ( $5.000\text{ l/min.}$ , висина тлачења  $7,5\text{ m}$ ).

На броду су била уграђена три генератора укупне снаге  $92\text{--}111\text{ kW}$ . Поред овога, могућ је био прикључак на спољашњи извор струје, али само за напон од  $110\text{ и }24\text{ V}$ . Бродска мрежа као и електро уређаји су пројектовани за напон од  $110\text{ V}$ . Поред овога, на броду су била уграђена два мотор - агрегата од којих је један служио за пуњење акумулатора.

### 3.2.5. Помоћни системи и уређаји

У засебној просторији, одмах до моторног простора су била уграђена два Покерова (Pauker) водоцевна котла, од којих је један котао био довољан да задовољи целокупне потребе брода, док је други служио као резерва. За напајање котлова водом служе две електро пумпе. Поред загревања просторија котлови су загревали воду за прање посуђа у кухињи, парно купатило и топлу воду у кабинама. Такође, могли су да даје пару другим бродовима у циљу загревања просторија или за неке друге сврхе. За загревање просторија у свим просторијама, сем муниционих комора уграђени су радијатори и спроведена парна дренажа.



Поред котлова, на броду су били уграђени следећи помоћни уређаји и системи:

- *Кормиларски уређај HITZLER RUDER, механички, произведен 1939. године,*
- *Сидро са сидреним ланцем и сидреним витлом, произведено 1939. година,*
- *Дестилатор питке воде, који је могао да дестилира и морску воду и употребљаван је када је брод био у Црном мору,*
- *Генератор за пуњење аку-батерија са инсталацијом,*
- *Противпожарни систем за гашење пожара водом,*
- *Систем санитарне воде,*
- *Систем дренаже,*
- *Систем за претакање горива и*
- *Систем питке воде.*

За пренос снаге са дизел мотора на пропелере на брод су уграђена два вратилна вода. Вратилни водови су, због велике дужине, били израђени из четири дела, међусобно пезезаних крутим спојницама, од којих је четврти део био везан за пропелер. Прва три дела су лежала на по два носача (ослонца) са котрљајућим ваљкастим лежајима. Делови везани за пропелере су се ослањали на по два клизна лежаја у статвеним цевима и на по једном клизном лежају у скроку. Пренос силе порива пропелера на труп брода оствариван је преко упорних лежаја смештених до мотора. Пропелери су били од ливеног челика, али су накнадно замењени са бронзаним.

Бродска дренажа је спроведена испод подница и изведена тако да је пумпе могуће користити и за дренажу и за плавлeње свих просторија.

На броду је уграђено пет структурних танкова погонског горива укупног капацитета  $57,9 \text{ m}^3$ , односно  $45 \text{ t}$ , и то:

- *2 танка капацитета  $9,98 \text{ m}^3$ , (простор 4),*
- *2 танка капацитета  $10,45 \text{ m}^3$  (простор 3) и*
- *1 танк капацитета  $16,98 \text{ m}^3$  (простор 4).*

Брод је имао два танка питке воде укупног капацитета  $18,46 \text{ m}^3$  који су се налазили у прамчаном делу брода. Поред ова два танка испод радионичког простора налазио се још један танк слатке воде који је уграђен након градње брода и служио је као резерва. Осим наведених танкова као танк питке воде користио и крмени баластни танк.

Танк уља за подмазивање капацитета  $1,88 \text{ m}^3$  се налазио у котловном простору. На броду су уграђена два баластна танка, и то: један на прамцу садржине  $17,6 \text{ m}^3$  и један на крми садржине  $33,9 \text{ m}^3$ .

Све стамбене просторије, магацини под палубом, моторни простор, котловница, радионица, а од просторија на палуби кабине команданта флотиле, перионица, WC и кухиња су имале вештачку вентилацију. Остале просторије су имале природну вентилацију.

Последњи значајан подухват који је изведен на броду јесте уградња савременијих навигацијских уређаја. Ова уградња одвијала се у периоду од децембара 2008. до јануара 2009. године [14]. На брод су уграђени следећи уређаји:

- *Радар Furuno RHRS – 2005RCTFT,*

- Речни информациони систем–РАС (Automatic Identification System–AIS),
- Дубиномер SIGMA 120,
- Компас SIGMA 345.

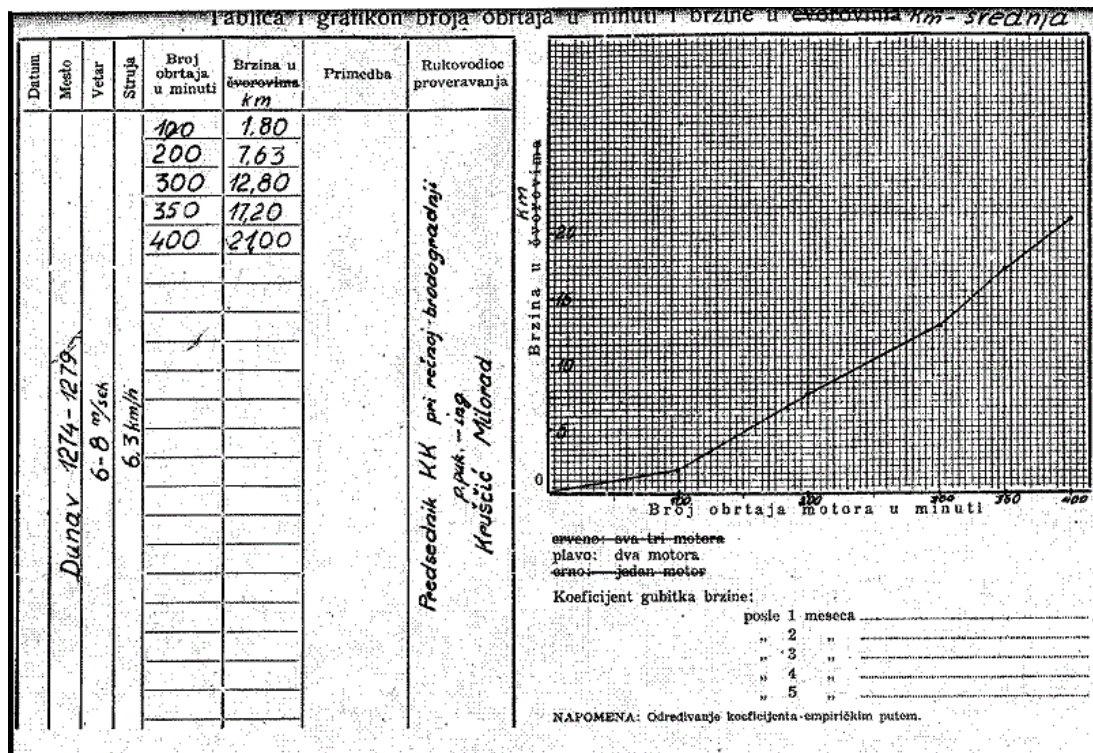
Након уградње ових уређаја брод је у могућности да безбедно плови у свим условима пловидбе целим током Дунава као и деловима акваторије непосредно уз обални појас мора, свих европских речно-морских лука јер испуњава стандарде које прописују надлежне власти. Самим тим, брод у домену навигационе опреме представља најсавременији брод у РФ, а са сигурношћу можемо рећи и у Р. Србији.

### 3.3. НЕКИ РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА ПОГОНСКИХ ОСОБИНА БРОДА СА КЛАСИЧНИМ ДИЗЕЛ ПОГОНОМ

Прво испитивање погонских и маневарских особина брода „КОЗАРА” са дизел погоном, од дана када је уписан у флотну листу Речне ратне флотиле, извршено је 19.09.1963. године [15]. Испитивања су вршена на реци Дунав, на делу пловног пута од 1.274 до 1.279 km, при следећим условима:

- Депласман брода 601 t
- Средњи газ брода 1,24 m
- Брзина речног тока 6,3 km/h
- Метеоролошки услови пловидбе ветар брзине 6 до 8 m/s

На слици 3.4 приказани су резултати испитивања брзине брода са дизел погоном извршеног 19.09.1963. године.



Слика 3.4. Резултати мерења брзине брода „Козара“ са дизел погоном

Резултати мерења брзине брода су следећи:

- при  $100 \text{ min}^{-1}$  обртаја пропелера средња брзина брода износила је 1,8 km/h,

- при  $200 \text{ min}^{-1}$  обртаја пропелера средња брзина брода износила је  $7,63 \text{ km/h}$ ,
- при  $300 \text{ min}^{-1}$  обртаја пропелера средња брзина брода износила је  $12,8 \text{ km/h}$ .
- при  $350 \text{ min}^{-1}$  обртаја пропелера средња брзина брода износила је  $17,2 \text{ km/h}$  и
- при  $400 \text{ min}^{-1}$  обртаја пропелера средња брзина брода износила је  $21,0 \text{ km/h}$ .

Следеће мерење брзине брода са дизел погоном извршено је 21.10.1976. године у условима при депласману брода од  $550 \text{ t}$  у низводној пловидби на реци Дунав [15]. Измерена брзина брода износила је:

- $15 \text{ km/h}$  при  $360 \text{ min}^{-1}$  обртаја пропелера.

Последње мерење брзине брода са дизел погоном извршено је 20.04.1985. године при депласману брода од  $550 \text{ t}$  у узводној пловидби на реци Дунав [15]. Измерена брзина брода износила је:

- $23 \text{ km/h}$  при  $380 \text{ min}^{-1}$  обртаја пропелера.

Испитивање зауставног пута са дизел погоном обављено је 19.09.1963. године у склопу првих мерења маневарских карактеристика у истим условима у којима је мерена брзина брода. Мерење је вршено у низводној и узводној пловидби брода на режимима брода у вожњи НАПРЕД и КРМОМ са  $100, 200$  и  $360 \text{ min}^{-1}$  и пребацивањем погона у режим СТОЈ и у режиме КРМОМ и НАПРЕД на исти број обртаја.

На слици 3.5 приказани су резултати мерења зауставног пута брода са дизел погоном у низводној пловидби, а на слици 3.6 су приказани резултати мерења зауставног пута брода са дизел погоном у узводној пловидби.

Највећи зауставни пут измерен је у низводној вожњи и износи:

- $300 \text{ m}$  при  $360 \text{ min}^{-1}$  обртаја пропелера.

Tablica zaleta broda

Datum	Mesto	Vetar	More	Skrta	Rad glavnih mehanizama u momentu isdavanja narednja za novi rad	Novi naredeni rad glavnih mehanizama						PRIMEDBA	Rukovodilac proveravanja		
						K R M O M			S T O J	N A P R E D					
						Polagano <i>100 1/min</i>	Polu snage <i>200 1/min</i>	Svom snagom <i>360 1/min</i>		Polagano <i>100 1/min</i>	Polu snage <i>200 1/min</i>			Svom snagom <i>360 1/min</i>	
<i>19. IX. 1963. god.</i>	<i>Koz. 1269 - 1269</i>	<i>Bez vetra</i>		<i>NIZVODNO</i>		<i>Polagano</i>					<i>150 m</i>	<i>100 m</i>	<i>40 m</i>	<i>Vodstoj za 19. IX. 1963. godine</i>	
						<i>100 1/min</i>				<i>STRUJE BROD</i>	<i>1"32"</i>	<i>1"5"</i>	<i>35"</i>		
						<i>Polu snage</i>				<i>STRUJE</i>	<i>420</i>	<i>350</i>	<i>120</i>		
						<i>200 1/min</i>				<i>NIZ STRUJU</i>	<i>3"15"</i>	<i>1"48"</i>	<i>1"10"</i>		
						<i>Svom snagom</i>				<i>USLED</i>	<i>750 m</i>	<i>550 m</i>	<i>200 m</i>		
						<i>360 1/min</i>				<i>PROVI NIZ STRUJU</i>	<i>4"10"</i>	<i>4"12"</i>	<i>2"25"</i>		
						<i>STOJ</i>	/	/	/	/	/	/	/		
						<i>Polagano</i>	<i>400 m</i>	<i>200 m</i>	<i>120 m</i>	/					
						<i>100 1/min</i>	<i>3"26"</i>	<i>1"36"</i>	<i>1"5"</i>	/					
						<i>Polu snage</i>	<i>600 m</i>	<i>350 m</i>	<i>140 m</i>	/					
<i>200 1/min</i>	<i>4"35"</i>	<i>2"18"</i>	<i>1"22"</i>	/											
<i>Svom snagom</i>	<i>800 m</i>	<i>450 m</i>	<i>300 m</i>	/											
<i>360 1/min</i>	<i>4"16"</i>	<i>2"15"</i>	<i>1"35"</i>	/											

НАПОМЕНА: У горњу половину квадрата се уноси залет у метрима, а у доњу половину време заleta у минутима и секундама.

Слика 3.5. Резултати мерења зауставног пута брода Козара са дизел погоном у низводној пловидби

Tablica zaleta broda

Datum	Mesto	Vetar	More	Struja	Rad glavnih mehanizama u momentu izdavanja narednja za novi rad	Novi naredeni rad glavnih mehanizama								PRIMEDBA	Rukovodilac proveravanja	
						K R M O M			S T O J	N A P R E D						
						Polagano	Pola snage	Svom snagom		Polagano	Pola snage	Svom snagom				
12. IX. 1963. god.	Km 1268 - 1269	Bez vetra			UZVODNO	K R M O M	Polagano				45 <sup>m</sup>	35 <sup>m</sup>	20 <sup>m</sup>	10 <sup>m</sup>	Vodostaj za 12. IX. 1963. godine Novi Sad + 277; struja v = km	
							100 <sup>7</sup> min				30 <sup>s</sup>	20 <sup>s</sup>	14 <sup>s</sup>	7 <sup>s</sup>		
							Pola snage				100 <sup>m</sup>	75 <sup>m</sup>	45 <sup>m</sup>	20 <sup>m</sup>		
							200 <sup>7</sup> min				1 <sup>m</sup>	34 <sup>s</sup>	30 <sup>s</sup>	15 <sup>s</sup>		
							Svom snagom				200 <sup>m</sup>	130 <sup>m</sup>	100 <sup>m</sup>	65 <sup>m</sup>		
							360 <sup>7</sup> min				1 <sup>m</sup> 53 <sup>s</sup>	1 <sup>m</sup> 15 <sup>s</sup>	1 <sup>m</sup>	38 <sup>s</sup>		
							S T O J	/	/	/	/	/	/	/		
							Polagano	80 <sup>m</sup>	50 <sup>m</sup>	20 <sup>m</sup>	/					
							100 <sup>7</sup> min	42 <sup>s</sup>	35 <sup>s</sup>	15 <sup>s</sup>	/					
							Pola snage	110 <sup>m</sup>	95 <sup>m</sup>	70 <sup>m</sup>	/					
200 <sup>7</sup> min	1 <sup>m</sup> 02 <sup>s</sup>	58 <sup>s</sup>	48 <sup>s</sup>	/												
Svom snagom	225 <sup>m</sup>	145 <sup>m</sup>	105 <sup>m</sup>	/												
360 <sup>7</sup> min	1 <sup>m</sup> 49 <sup>s</sup>	1 <sup>m</sup> 03 <sup>s</sup>	1 <sup>m</sup> 02 <sup>s</sup>	/												

NAPOMENA: U gornju polovicu kvadrata se unosi zalet u metrima, a u donju polovicu vreme zaleta u minutama i sekundama.

Слика 3.6. Резултати мерења зауставног пута брода Козара са дизел погоном у узводној пловидби

## 4. МОДЕРНИЗАЦИЈА БРОДА „КОЗАРА”

У овој глави ће бити приказан начин модернизације погона и кормиларског уређаја брода „КОЗАРА”. Модернизација осталих бродских система неће бити посебно обрађивана. На почетку ће бити приказани постављени захтеви за модернизацију погона и начин избора новог погона, након чега ће бити приказан избор опреме дизел електричне погоске групе и уградња опреме на брод као и избор новог кормиласког уређаја. На крају ће бити приказан опис брода након извршене модернизације.

### 4.1. ТЕХНИЧКИ ЗАХТЕВИ ЗА МОДЕРНИЗАЦИЈУ ПОГОНА БРОДА „КОЗАРА”

Модернизација брода у првом реду подразумева замену „старог” дизел погона са новим типом или врстом погона. Основни технички захтеви које треба да задовољи нови тип или врста погонског комплекса су:

1. *Повећање брзине брода.*
  - Првобитна погонска група је због дугог века и рока употребе знатно погоршала перформансе (смањење снаге, повећање потрошње горива и уља). Са новом погонском групом обезбедити побољшање перформанси, а тиме и брзине брода.
2. *Побољшање маневарских особина.*
  - Уградња прамчаног потисника, као и независна регулација обртања пропелера чиме би се у првом реду скратио зауставни пут брода и смањио пречник круга окрета.
3. *Жилавост система.*
  - Могућност рада погонске групе на нижим режимима (смањена снага) и у случају оштећења једног погонског агрегата.
4. *Поузданије напајање електричном енергијом.*
  - Електрични извори на броду треба да задовоље прелаз на систем 3 x 380 V, а самим тим и стабилно напајање више нових електричних уређаја.
5. *Дуготрајан поуздан рад.*
  - Све компоненте погона морају бити обезбеђене код поузданих произвођача са карактеристикама рада у оптималном режиму, а то значи у опсегу где им је обезбеђен дуг век трајања.
6. *Одржавање.*
  - То значи да је погон једноставно конципиран и израђен од поузданих компонената за које се захтева минимално одржавање.
7. *Прихватљива укупна цена модернизације.*
  - Обзиром на жељене перформансе, инвестициона цена погонске групе треба да је прихватљива.

Технички носилац је модернизацију брода покренуо израдом планских докумената, тј. програма реализације у коме је дефинисана потреба за модернизацијом, као и обим модернизације брода. Након усвајања програма расписан је тендер за набавку тј. фирмама

које се баве том делатношћу достављен је захтев за понуду модернизације погона брода [16]. Технички носилац није унапред дефинисао врсту новог погона, већ је захтевом за понуду предвидео могућност двеју варијанти. Овакав приступ је био неопходан из разлога што до сада није било искустава у примени дизел електричног погона, како на бродовима Речне флотиле тако и на осталим бродовима у земљи.

### Варијанта 1.

Задржаваће постојећих вратилних водова са упорним лежајима и пропелерима (четвероделно пропелерско вратило укупне дужине  $l = 25,5 \text{ m}$ ) и пропелери  $d = 1.470 \text{ mm}$  уз минимални број обртаја пропелера  $n_{min} = 70 \text{ min}^{-1}$  и максимални број обртаја  $n_{max} = 412 \text{ min}^{-1}$ , са пројектом уградње, надзора и управљања за прамчани потисник (трансферзални тунелског типа) снаге 100 kW.

### Варијанта 2.

Без било каквих ограничења за моторе, спојнице, редукторе, вратилне водове, упорне лежаје и пропелере, а према предлогу и пројекту понуђача, са пројектом уградње, надзора и управљања за прамчани потисник (трансферзални тунелског типа) снаге 100 kW.

Захтев наручиоца за обе варијанте:

1. *Управљање моторима преко машинског телеграфа са пулта управљања и надзора ГМ у кормиларници и локално управљање са пулта локалног управљања на моторима у машинском простору.*
2. *Даљинско управљање погоном (моторима и прамчаним потисником) са отворене палубе уз кормиларску кућицу на левом и десном боку брода, са прамца и крме брода.*
3. *Потисник одабрати према типу који се може сервисирати без доковања брода.*
4. *Мотори који се уграђују морају бити према стандардима за емисију штетних гасова ЕРА Tier 3 regulations који су на снази у ЕУ. Мотори треба да буду континуираног сервис рејтинга – S (Continuous service rating – S), тј. мора да обезбеде погонску снагу која укључује случајеве лаког и тешког пропелера.*
5. *Мотори, спојнице, редуктори (ако су одвојени од спојнице), пропелери, потисници, упорни лежајеви (уколико се предлаже замена) и остала опрема надзора и управљања погоном морају бити од реномираног, светски познатог и признатог произвођача.*

## 4.2. ИЗБОР НОВОГ ПОГОНА НА БРОДУ „КОЗАРА”

На расписани тендер технички носилац је добио неколико понуда за замену старог дизел погона са **новим типом** и једну понуду за замену старог дизел погона са **новом врстом погона**, тј. са дизел електричним погоном. У конкретном случају технички носилац се, након анализе приспелих понуда и анализе више врста погонских система приказаних у литератури [17] **одлучио да постојећи дизел погон замени са дизел електричним погоном.**

Одлуци је претходила економска анализа прихватљивости укупне инвестиционе цене нове погонске групе. Важан фактор у овој анализи била је потреба да се основни бродски напон 110 V, једносмерна струја, замени наизменичним напоном 380 V 50 Hz, тј. уградња нових генератора и комплетног развода електричне енергије. Како ДЕП обједињује два захтева за електричном енергијом, а то су снабдевање погонских електромотора и прамчаног потисника са једне стране и свих осталих бродских уређаја и потрошача са друге стране, процењено је да је замена врсте погона економски оправдана.

У економској анализи узета је у обзир и могућност мање потрошње горива брода са уграђеном дизел електричном погонском групом у односу на погонску групу дизел мотора.

Одлуци да се изврши замена врсте погона претходила је и анализа могућности примене дизел електричног погона на броду „КОЗАРА” која је обухватила техничко технолошку анализу могућности уградње нове врсте погонске групе на брод и анализу предности и недостатака те врсте погона у односу на класични дизел погон.

Техничко технолошка анализа је обухватила анализу трупа брода и бродских простора, првенствено да би се утврдила могућност формирања новог машинског простора и уградње тунела прамчаног потисника, као и могућност постављања темеља за опрему дизел електричне погонске групе. Анализом је утврђено:

- *На броду постоји могућност да се формира нови машински простор на крменом делу брода између НП 18 до НП 32 у који би се сместили погонски електромотори,*
- *На прамчаном делу брода у подручју ребара Р 118 до Р 120 постоји могућност да се угради тунел прамчаног потисника,*
- *Могуће је извршити скраћивање вратилних водова брода и њихово прилагођавање новом облику погона,*
- *Структура бродског трупа омогућава уградњу темеља за погонске електромоторе уз уградњу додатних елемената уздужне чврстоће брода.*

Анализом предности и недостатака ДЕП-а утврђени су следећи разлози да се донесе одлука за уградњу ове врсте погона на брод „КОЗАРА”:

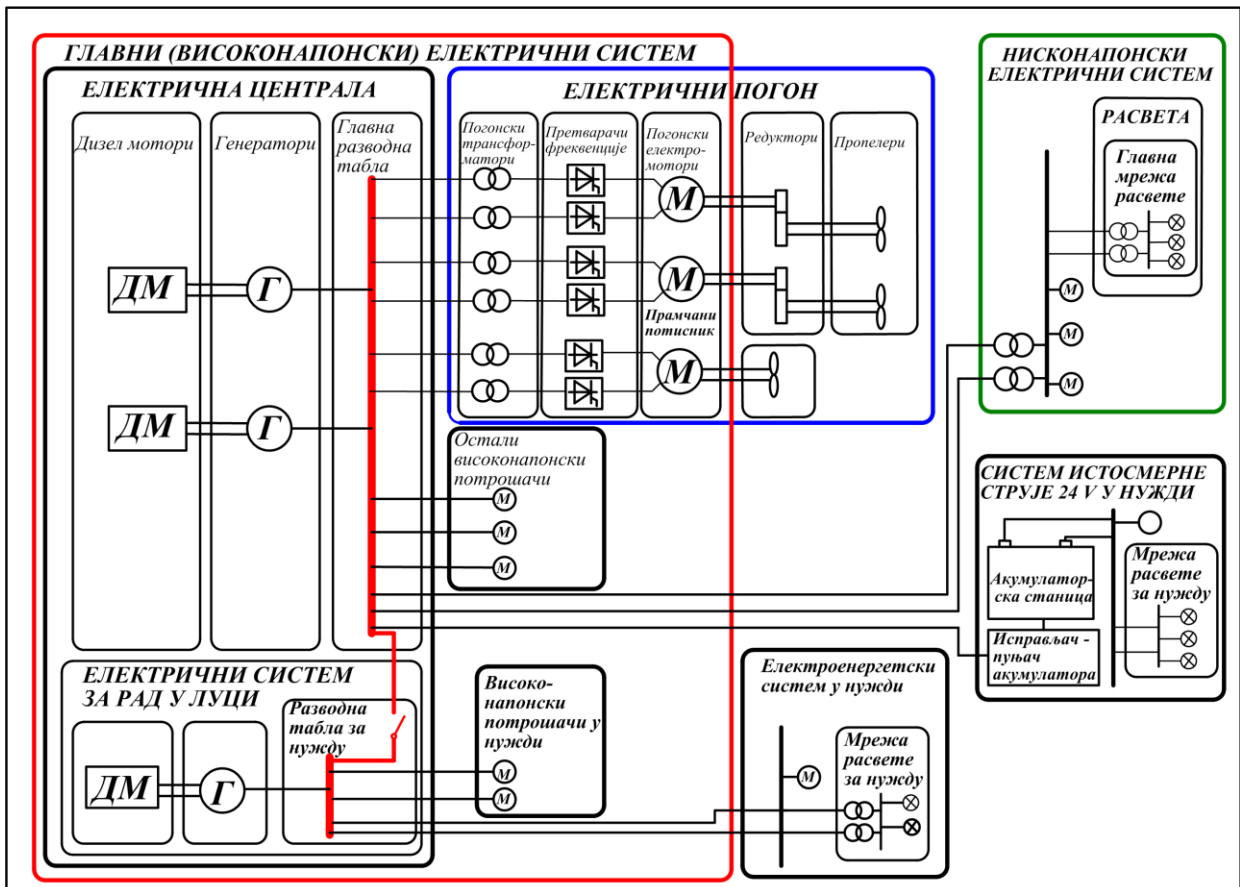
- *Дизел електрични погон има предности у односу на класичан дизел погон што се потврђује имплементацијом истог на мору [19, 20], као и унутрашњим водама [21], где је потребно да се размотре нове врсте погонских уређаја [22]. Ово се пре свега огледа у побољшању маневарских карактеристика брода,*
- *ЕМ су постављени у машински простор бр. 2 чиме је значајно скраћен вратилни вод и тиме је избегнута опасност да ће доћи до поремећаја осности лежаја вратилног вода због извијања брода по централној линији узрокованог демонтажом постојећих мотора и система, чија је процењена тежина око 40 t, из средњег дела брода и растерећења конструкције брода,*
- *Уградњом нових фундамената и њихово повезивање са фундаментима старих дизел мотора побољшава се уздужна чврстоћа брода,*
- *Демонтажом делова пропелерског вратила који су пролазили кроз кабине посаде, изнад пода, повећава се комфор кабина,*
- *Уградњом два дизел генератор агрегата снаге 400 kW и нове главне разводне табле решава се целокупан енергетски биланс брода.*

Поред наведеног и следећи критеријуми били су важни за доношење ове одлуке:

- *Могућност континуалне регулације брзине обртања наизменичних електромотора у оба смера обртања,*
- *Брз прекрет пропелера и пловидба крмом истом снагом као за пловидбу напред,*
- *Елиминација уређаја за реверзирање,*
- *Могућност подешавања оптималне брзине обртања пропелера,*
- *Претпостављена економичнија пловидба брода због мањег утрошка горива,*

- Одличне маневарске карактеристике брода и
- Смањење линеарних вибрација и торзионих осцилација.

Као најоптималнији концеп ДЕП-а прихваћен је концепт потпуно интегрисаног електро енергетског система (IFEP - Integrated Full Electric Propulsion) [18], тј. потпуно интегрисаног електричног погона, чија је карактеристика једна електрична централа која с константним напоном и фреквенцијом напаја све електричне уређаје на броду укључујући и електрични погон. На слици 4.1 је приказана начелна једнополна шема потпуно интегрисаног електроенергетског система са његовим подсистемима на броду „КОЗАРА”.



Слика 4.1. Начелна једнополна шема потпуно интегрисаног електроенергетског система са његовим подсистемима на броду „КОЗАРА”

### 4.3. ИЗБОР И УГРАДЊА ОПРЕМЕ ДИЗЕЛ ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОГОНСКЕ ГРУПЕ

У овом поглављу ће бити приказан начин избора опреме дизел електричне погонске групе брода „КОЗАРА”, а након тога и поступак уградње опреме на брод.

#### 4.3.1. Избор опреме дизел електричне погонске групе

Избор опреме дизел електричне погонске групе извршила је фирма која је извела модернизацију, након сагледавања захтева за понуду и анализе старог облика погона [23], а тактички носилац је верификовао предлоге.

##### 4.3.1.1. Избор погонских електромотора

Како су на броду задржани стари пропелери, нови погонски електромотори морали су им предати исту снагу коју су им предавали дизел мотори са старим обликом погона.



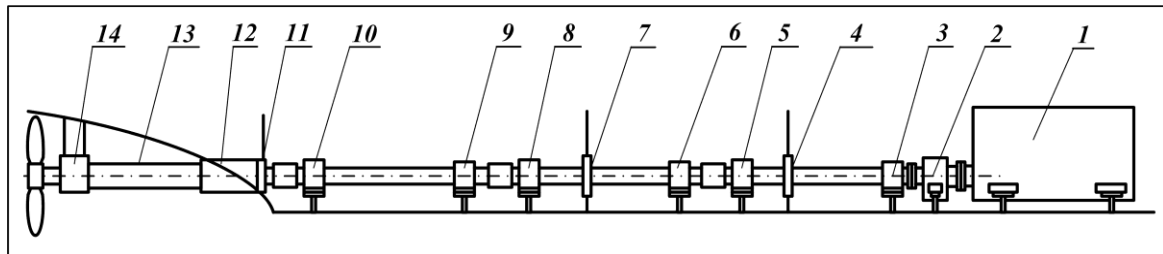
Први корак у прорачуну потребне снаге електромотора јесте прорачун снаге коју је дизел мотор предавао пропелеру. У трансмисији снаге од дизел мотора до пропелера јављају се губицима који су изражени са коефицијентом корисности вратилног вода  $\eta_w$ . Код дизел погона на броду „КОЗАРА” за његово одређивање узети су о обзир коефицијенти корисности следећих појединих делова вратилног вода; упорног лежаја вредности 0,99, лежаја вратилног вода (9 комада) вредности 0,995 и заптивача на проласцима вратилног вода кроз водонепропусне преграде (3 комада) вредности 0,995. На овај начин одређен је коефицијент корисности вратилног вода  $\eta_w=0.93$ .

Доведена снага пропелеру у случају класичног дизел погона се може израчунати по формули

$$P_D = P_n \cdot \eta_w = 294 \cdot 0,93 = 273,42 \text{ [kW]} \quad (4.1)$$

где је  $P_n = 294 \text{ [kW]}$  – номинална снага дизел мотора.

На слици 4.1 је шематски приказан стари погонски систем брода са погонском групом дизел мотора. Како су леви и десни погонски системи идентични на слици је приказан један погонски систем.

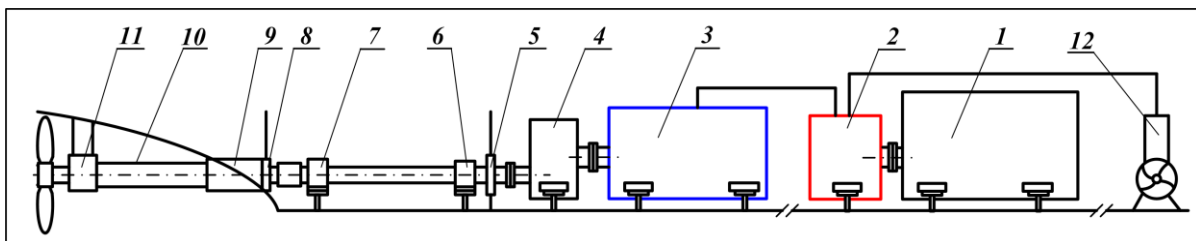


Слика 4.1. Један од два идентична погонска система брода „КОЗАРА” са погонском групом дизел мотора

1 - дизел мотор; 2 - упорни лежај; 3 и 5 - лежаји првог дела пропелерског вратила; 4 - пролаз кроз ВВП I; 6 и 8 - лежаји другог дела пропелерског вратила; 7 - пролаз кроз ВВП II; 9 и 10 - лежаји трећег дела пропелерског вратила; 11 - пролаз кроз ВВП III; 12 - статвена цев са два лежаја пропелерског вратила; 13 - ногавица; 14 - лежај у скроку.

Након израчунавања снаге коју су дизел мотори предавали пропелерима приступило се прорачуну потребне снаге електромотора.

На слици 4.2 је шематски приказан систем дизел електричне погонске групе брода. Као и код старог облика погона и нови систем погона се састоји од индентичног левог и десног система због чега је на слици проказан само један систем. Поред тога на шеми је приказан и прамчани потисник.



Слика 4.2. Један од два идентична погонска система брода „КОЗАРА” са дизел електричном погонском групом

1 – дизел мотор; 2 – генератор; 3 – погонски електромотор; 4 – редуктор; 5 – пролаз кроз ВВП; 6 и 7 – лежаји првог дела пропелерског вратила; 8 – пролаз кроз ВВП; 9 – статвена цев са два лежаја пропелерског вратила; 10 – ногавица; 11 – лежај у скроку; 12 – прамчани потисник

На почетку су анализирани губици у трансмисији снаге од електромотора до пропелера. Код ДЕП-а на броду „КОЗАРА” узет је у обзир коефицијент корисности редуктора са упорним лежајем  $\eta_R$  вредности 0,98 и коефицијент корисности вратилног

вода  $\eta_w$  који у свом систему има пет лежаја и један пролаз кроз водонепропусну преграду, на основу чега је одређена његова вредност  $\eta_v=0.97$ .

Доведена снага пропелеру рачуна се по формули

$$P_{DEM} = P_{EM} \cdot \eta_v \cdot \eta_R [kW] \quad (4.2)$$

из чега произилази да је снага електромотора

$$P_{EM} = \frac{P_{DEM}}{\eta_w \cdot \eta_R} [kW]. \quad (4.3)$$

Ако се у формулу уместо  $P_{DEM}$  унесе снага  $P_D$  коју је дизел мотор предавао пропелеру добиће се снага електромотора  $P_{EM}$  која је потребна да би дизел електрични погон предао исту снагу пропелеру, као и дизел погон:

$$P_{EM} = \frac{273,42}{0,97 \cdot 0,98} = 287,6 [kW]. \quad (4.4)$$

Израчуната снага ЕМ износи 287,6 kW. На основу израчунате снаге за погон брода је изабран типски ЕМ снаге  $P_{EM}=250 kW$ . ЕМ мање снаге су изабрани због тога што је процењено да ће брод са тим ЕМ остварити захтевану брзину. Приликом процене у обзир је узета чињеница да брод са новим обликом погона има мањи депласман. На избор снаге погонских ЕМ утицај је имала и велика разлика у набавној цени изабраних ЕМ и ЕМ веће снаге. Када се одабрана снага ЕМ унесе у горе наведену формулу добије се снага коју тај мотор може да трајно предаје пропелеру и која износи  $P_{DEM} = 238 kW$ .

Након израчунавања потребне снаге погонских електромотора потребно је одабрати и тип електромотора. Одабрани су асинхрони електромотори због својих предности у односу на остале електромоторе.

Предности асинхроних мотора су нижа инвестициона цена, проста конструкција и трајност. Асинхрони (индукциони) електромотори се користе за мале и средње снаге пропулзије (1–5 MW) најчешће у комбинацији са PWM (pulse width modulation) претварачима. У почетку примене електричне пропулзије су се више употребљавали због једноставности конструкције и мање тежине, чиме се избегла регулација побуде главних полова како је то случај код синхроних мотора. За веће снаге користе се асинхрони или синхрони електромотори са циклоконверторима као регулаторима брзине. Трофазна струја напајања статора производи обртно магнетно поље које индукује струју у кавезном намотају ротора. Међусобним деловањем статорског магнетног поља и струје ротора ствара се механички, обртни момент на погонској осовини. Да би се могла индуковати струја у ротору, његова брзина обртања мора бити нешто мања од брзине обртног магнетског поља статора. Та разлика брзина се зове клизање (s).

Главне мане асинхроних електромотора су мањи ваздушни зазор између ротора и статора те мањи фактор снаге ( $\cos\varphi = 0.8$ ) и степен искоришћења  $\eta$ . Велика полазна струја (7 – 8 пута већа од номиналне) приликом директног покретања мотора, представља додатни проблем о чему треба водити рачуна при пројектовању система, али се лако може превазићи коришћењем уређаја за меко пуштање у погон (употреба тзв. софт стартера) [24], или коришћењем инвертора.

Рад са пуним оптерећењем и пуном брзином је јако ефикасан и не захтева претварач између мотора и бродске електричне мреже. Степен искоришћења за снаге изнад MW износи 0,96, али ваздушни зазор између статора и ротора представља за бродску примену ограничавајући фактор. Режим константне брзине обртања не показује стварне предности ових електромотора. Њихове праве предности могу се видети у режиму променљиве брзине [25]. Асинхрони електромотори управљани напонско фреквентним претварачима

обезбеђују брзу промену броја обртаја пропелера од минималног до максималног, као и промену смера обртања.

Асинхрони електромотори су изузетно поуздани, а најчешћи кварови се јављају код лежаја. Од ових мотора, уз редовно одржавање и правилну експлоатацију, може се очекивати поуздан рад током животног века брода.

Асинхрони електромотори могу се изградити с релативно малим пречником и тежином па представљају врло квалитетно решење за електричну пропулзију, нарочито у комбинацији с редуктором, када раде на вишим обртајима, што је све чешће решење на неким бродовима, нпр. танкерима мањих димензија за превоз хемикалија [26].

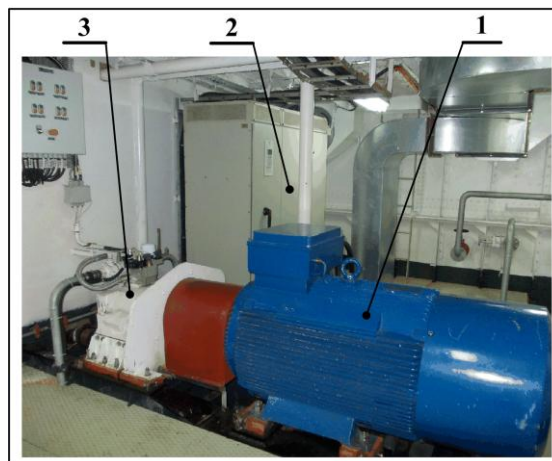
За погон брода „КОЗАРА” уграђена су два електромотора, сваки снаге 250 kW. Пренос снаге од електромотора до пропелера врши се преко редуктора. Један електромотор погони један пропелер. Регулација броја обртаја и обртног момента електромотора, односно пропелера врши се аутоматски преко напонско фреквентних претварача.

Основни технички подаци за електромоторе су следећи:

–	<i>Произвођач</i>	<i>Кончар-GIM</i>
–	<i>Тип</i>	<i>B6AZJ 354-04</i>
–	<i>Снага</i>	<i>250kW,</i>
–	<i>Напон</i>	<i>3x400V, 50Hz</i>
–	<i>Број обртаја</i>	<i>1500 min<sup>-1</sup></i>
–	<i>Заштита</i>	<i>IP54</i>
–	<i>Облик уградње</i>	<i>IM1001</i>
–	<i>Класа изолације</i>	<i>F</i>
–	<i>Погон</i>	<i>S1</i>

За пренос снаге са погонских електромотора на пропелере уграђена су редуктори ознаке ZF W350-1 произвођача ZF Friedrichshafen AG из Немачке, преносног односа 1:3,968.

Изабрани електромотор са редуктором и напонско фреквентним претвараčem приказан је на слици 4.3.



Слика 4.3. Леви погонски електромотор са редуктором  
1-електромотор; 2-редуктор; 3-напонско фреквентни претварач

При уградњи погонских електромотора неопходно је придржавање правила Југословенског регистра бродова [27] као и резолуција [28], који ограничавају максимално дозвољени напон као и време рада електромоторног погона при укоченом пропелеру код потисних уређаја са електричним преносом снаге.

Напон електричног система погонског уређаја не треба да прелази величине наведене у табели 4.1. Употребу виших напона разматра Југорегистар.

Табела 4.1. Максимално дозвољени напони за погон погонских уређаја

Редни број	Опис	Величина напона (V)	
		Једносмерни	Трофазни наизменични
1	Напајање главног струјног кола електричног погонског уређаја	1.200	7.500
2	Струјна кола управљања и сигнализације	220	380

Сви елементи погонског електричног уређаја једносмерне струје треба да буду предвиђени за рад при укоченом мотору под напоном за време од 1 min.

#### 4.3.1.2. Избор напонско фреквентних претварача

Следећи корак у избору опреме дизел електричне погонске групе био је избор напонско фреквентног претварача за управљање бројем обртаја електромотора.

Док се код једносмерних погонских мотора брзина обртања регулише само променом напона напајања, код наизменичних мотора се морају мењати и напон и фреквенција. На тај начин се регулишу брзина обртања и обртни момент.

По принципу рада постоје два основна типа напонско фреквентних претварача [24]:

- *Директни* – директно се из таласног облика улазног наизменичног напона синтетише жељени облик излазног напона и фреквенције, укључењем/искључењем полупроводничких уређаја;
- *Индиректни* – улазни наизменични напон се исправља у једносмерни напон, синтетише и обрађује и враћа у наизменични облик.

Врсте претварача с применом у бродској електричној пропулзији су :

- *Тиристорски контролисани DC погон (AC → DC) за DC моторе,*
- *PWM (pulse with modulation) (AC → DC → AC) за краткоспојене асинхроне моторе,*
- *Инверторски претварач (AC → DC → AC) за асинхроне и синхроне моторе,*
- *Циклоконвертор (AC → AC) за класичне или перманентно побудне синхроне моторе и асинхроне краткоспојене моторе.*

Познато је да се брзина обртања асинхроног мотора од празног хода до пуног оптерећења мења за пар процената, тако да је регулација брзине велики проблем.

Полазећи од обрасца за брзину обртања [25]

$$n = (1 - s) \cdot 60 \cdot \frac{f}{p} \quad (4.5)$$

види се да се брзина може мењати променом клизања, учестаности или броја пари полова.

Мада је познато више класичних метода регулације брзине, решење **променом учестаности примарне мреже (са инвертором) представља** савремено и врло квалитетно решење за регулацију брзине обртања асинхроних мотора са краткоспојеним ротором [25].

Полазећи од израза за напон

$$U = 4,44 \cdot k \cdot N \cdot f \cdot \Phi_{ob} \quad (4.7)$$

добија се, услов кога је потребно испунити да би се избегло презасићење магнетског кола или да обртни флуks не пређе максималну вредност

$$\Phi_{ob} = konst = k \cdot \frac{U_{var}}{f_{var}}. \quad (4.8)$$

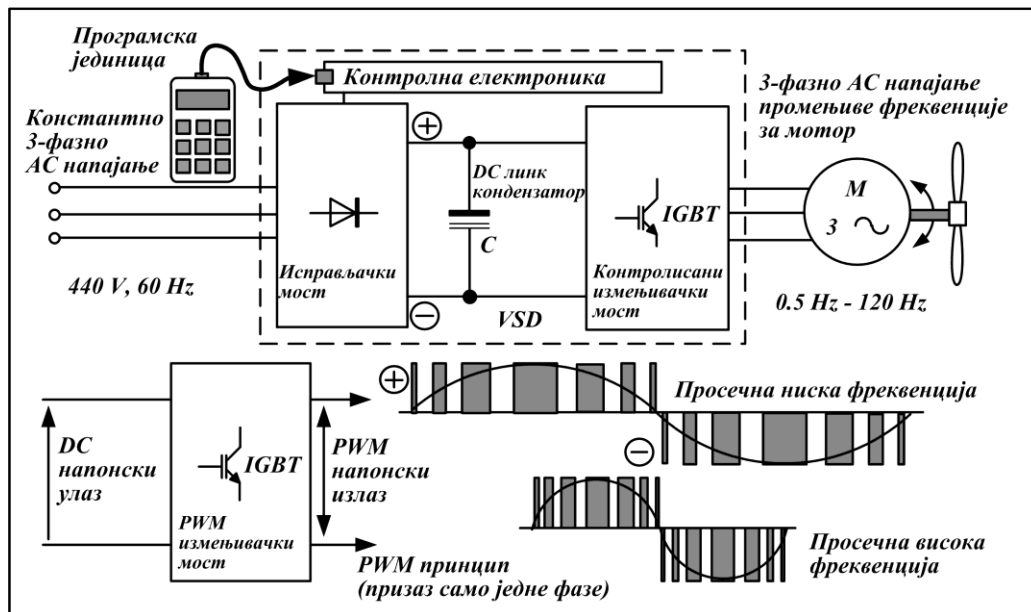
Из овог следи и услов за уређај којим се врши регулација брзине обртања асинхроног електромотора са краткоспојеним ротором. У целом опсегу промене брзине, а да магнетско коло не би било презасићено, потребно је да се однос напона и фреквенције одржава константним.

Важно је напоменути да се променом учестаности која се добија из примарне мреже и применом инвертора радне карактеристике електромотора мало мењају. Овај метод регулације брзине обртања асинхроних машина је веома ефикасан мада је сам уређај сложенији, а самим тим и инвестиционо скуплији.

У комбинацији са асинхроним погонским електромоторима за снаге (0.5-8 MW) најчешће се користи PWM претварач напона и фреквенције [23]. Код њих постоји двострука конверзија енергије (AC → DC → AC) па се састоје од диодног исправљача и транзисторског инвертора. Користи се PWM претварач с модулацијом ширине импулса по којем је овај претварач и добио назив. Једносмерни напон се сече у напонске импулсе промењиве ширине али константне максималне вредности у компјуторски контролисаном претварачу уз употребу IGBT (*eng. insulated gate bipolar transistor*) транзистора.

Мењањем ширине и поларитета импулса DC напона могуће је генерисати синусоидни AC излазни напон на великом фреквентном распону (0.5 – 120 Hz). Променом фреквенције мења се и брзина погонског електромотора. За разлику од тиристора, транзистори се могу укључивати и искључивати при високим фреквенцијама (више од 20 kHz код PWM претварача).

На слици 4.4. је приказана блок шема PWM напонско фреквентни претварача.



Слика 4.4. PWM напонско фреквентни претварач

Основна предност PWM методе регулације наизменичних електромотора у односу на друге методе које користе релативно ниске прекидачке фреквенције односи се на лакше филтрирање нежељених хармоника на излазу. Наиме, фреквенција нежељених хармоника је код PWM поступка много већа, односно, нежељени хармоници имају знатно више фреквенције и мање амплитуде тако да је олакшано филтрирање.

За регулисање брзине обртања погонских мотора на броду су одабрани напонско фреквентни претварачи регенеративне четвороквадрантне изведбе [29]:

- *Произвођач* *ЕЛМЕХ Ријека*
- *Тип* *ABB ACS 800 -17' 0320*
- *Снага  $P_{cont}$*  *250 KW*
- *Струја  $I_{cont}$*  *469 A*
- *Изведба* *IP 21 морска изведба ормара*
- *Филтери* *LCL filter ( $thd < 4\%$ ), EMC filter, common mode filter*

#### 4.3.1.3. Избор прамчаног потисника

Следећи корак је био избор прамчаног потисника због побољшања управљивости и маневарских карактеристика брода. Због тога је претходно било неопходно извршити анализу бродског трупа у зони прамчаног дела брода, како би се испитала могућност уградње потисника. Након позитивне анализе приступило се прорачуну потребне снаге потисника. Након завршене анализе и прорачуна одабран је потисник тунелског типа снаге 90 kW [23].

Основни подаци прамчаног потисника су:

- *Произвођач* *„Ducth Thruster Group“ – Холандија,*
- *Тип* *GT570-066,*
- *Тунел* *Заварена конструкција пречника  $\Phi$  610 mm,*
- *Максимална сила потиска* *13,1 kN,*
- *Максимални број обртаја* *1000 min<sup>-1</sup>,*
- *Пропелер* *4 крила пречника  $\Phi$  570 mm, тип Каплан.*

Потисник се погони електромотором следећих карактеристика:

- *Произвођач* *Hoyer Motors,*
- *Тип* *250M1-4,*
- *Снага* *90 kW,*
- *Напон* *3x400V, 50Hz*
- *Број обртаја* *1000 min<sup>-1</sup>,*
- *Заштита* *IP55,*
- *Облик уградње* *IMV1,*
- *Класа изолације* *F/B 20/+45,*
- *Погон* *S1.*

За управљање радом прамчаног потисника изабран је напонско фреквентни претварач тип АС АС 800–04, IP20, са локалним контролним панелом. У кормиларници је уграђен контролни и управљачки панел СР–ГТ–005, интегрисан у пулт управљања погонским електромоторима, са дојстиком за управљење бројем обртаја потисника и активационим кључем. Панел је опремљен са алармом „низак ниво уља” и дисплејом за оптерећеност.

#### 4.3.1.4. Избор дизел агрегата

Након избора погонских електромотора следећи основни корак био је избор генератора за напајање бродске мреже. Поред погонских ЕМ неопходно је узети у обзир и све остале потрошаче електричне енергије. Према билансу снаге електричних извора обавља се димензионисање погонских агрегата бродске централе. Биланс снаге је прорачун укупне потребне електричне снаге на броду. Нашим [26] а и страним прописима [28] детаљно су дефинисани услови за конструисање и примену наизменичних генератора на морским и речним бродовима. Дизел агрегати треба да буду прорачунати за непрекидан рад.

Како је производња електричне енергије процес који директно утиче на експлоатационе трошкове, генерално се тежи уградњи генератора што мање снаге. Али,

ако се на брод угради извор мање снаге него што је потребно, техничке карактеристике брода биће испод захтеваних. А ако се снага извора предимензионише, значи да се на брод мора уградити скупљи уређај већих габарита, веће тежине, са већом опремом, потрошњом горива и ваздуха за сагоревање и нормално ценом. На тај начин се смањује и онако скроман расположиви простор на броду. Све ово се не односи само на уређај о коме се ради, него и на остале уређаје који прате уградњу извора електричне енергије.

Биланс електричне енергије на бродовима се мора направити ради одређивања снаге и броја електричних извора. При овоме мора постојати одређено искуство у избору фактора оптерећења и фактора једновременности. Фактор оптерећења се уводи због разлога што су ради сигурности углавном сви електрични мотори изабрани са нешто већом снагом, а на броду раде са мањом снагом од називне. Ради одређивања фактора једновременности рада више електричних уређаја потребно је познавати рад свих погона и уређаја, навике посаде и путника као и све услове на броду у свим режимима експлоатације брода.

Приликом прецизног одређивања снаге извора електричне енергије, неопходно је познавати све потрошаче електричне енергије, њихову улогу у технолошком процесу на броду, зависност од осталих уређаја на броду, и слично. Осим тога, треба узети у обзир и чињеницу да је оптерећење електромотора мање од номиналног, па је самим тим и оптерећење електричне централе од стране тог мотора мање од његовог номиналног оптерећења. Другим речима, приликом одређивања снаге извора електричне енергије треба узимати у обзир ону снагу коју поједини електромотори узимају из мреже, а не снагу коју електромотори предају радној машини.

Најчешће се располаже податком о номиналној снази електромотора која представља максималну корисну снагу коју електромотор може трајно да даје, а не податком о стварној снази коју електромотор предаје радној машини. Да би се дошло да снаге коју електромотор узима из мреже у експлоатационим условима, потребна снага електромотора се мора умањити према стварном оптерећењу радне машине. Однос између потребне снаге електромотора и његове стварне снаге се назива **степеном оптерећења мотора и обележава се са  $k_o$** .

На броду се често уграђују по два уређаја који обављају исту намену. За биланс је веома важан податак да ли та два електромотора раде истовремено или један од њих служи као резерва. Тај податак се уноси у биланс као **коэффициент истовремености  $k_i$** .

Ради прегледности сви подаци се сређују табеларно и при томе се води рачуна да се групишу потрошачи сличне намене. Тако на пример, у исту групу се стављају потрошачи једне просторне целине или потрошачи који су везани за рад неке целине. Према сличном принципу, дефинишу се и остале групе потрошача према потреби.

Сви уређаји неће радити у исто време. Због тога се уводе фактори за одређени режим рада брода. У том циљу се и дефинишу поједини режими рада енергетског система као што су сидрење, пловидба, лука, дан, ноћ, лето, зима.

За сваки режим рада брода прво се одреде сви потрошачи који учествују у оптерећењу електричног извора у том режиму, а затим се процени стварно оптерећење електричног извора које ствара та група потрошача (на пример потрошачи машинског простора). Ова процена се врши увођењем **средњег коэффицијента режима  $k_{sr}$**  за сваки режим рада појединачно.

Поред тога, на посебан захтев могу се размотрити и посебни режими рада као што је режим рада за време пожара, или других хаварија које утичу на сигурност објекта при раду алтернативних извора електричне енергије. Могу се разматрати и неки други режими рада у складу са наменом и сврхом објекта.

На крају се узимају у обзир све групе потрошача које учествују у том режиму и одреди се оптерећење извора у том режиму рада на исти начин као код групе потрошача, **увођењем средњег коефицијента потрошача**  $k_{sp}$  за све потрошаче. Када се на овај начин обраде сви могући режими рада, добија се податак колико износи максимално могуће оптерећење у појединим случајевима и на основу тога се доноси одлука о величини и броју уграђених извора у објекту.

У пловидби и сидрењу је потребна укупна снага 596,4 kW што обезбеђују два дизелелектрична агрегата снаге по 400 kW (500 kVA). Агрегати ће у пловидби бити оптерећени око 75 % номиналне снаге чиме ће бити растерећени у погону, а оставиће се и солидна резерва енергије ради повећања потрошње у будућности. Док се брод налази у луци потрошња електричне енергије износиће око 48,3 kW, тако да се за ову намену треба обезбедити лучки или помоћни дизел агрегат снаге 51 kW (65 kVA).

Биланс електричне снаге брода „КОЗАРА” је приказан у табели 4.2.

Табела 4.2. Биланс електричне снаге брода

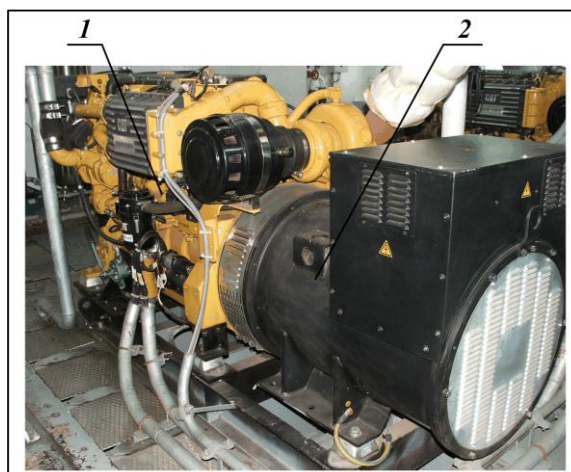
Биланс електричне снаге брода	ком	Јединична снага (kW)	Степен искоришћења $\eta$	Степен оптерећења $k_0$	Коефицијент истовремености $k_i$	Потребна снага (kW)	Режими рада			
							сидрење (kW)	пловидба (kW)	у луци (kW)	
Погонски ЕМ В6АЗЈ 354-04	2	250	0.95	1.00	1.00	526,3	105,3	526,3		
Прамчани потисник	1	90	0.94	1.00	1.00	95,8	95,8			
ПП пумпа	2	11	0.90	0.80	0.50	9,8	9,8	9,8	9,8	
Каљужна пумпа 1	1	3	0.86	0.80	1.00	2,8		2,8	2,8	
Каљужна пумпа 2	2	5,5	0.88	0.80	0.50	5,0			5,0	
Фекална пумпа	1	2,2	0.84	0.90	1.00	2,4			2,4	
Трансфер пумпа горива	1	1,5	0.82	0.95	1.00	1,8			1,8	
Вентилатори МР1 ТСФВ/4	4	1,12	0.80	1.00	1.00	5,6	5,6	5,6		
Вентилатори МР2 ТСВВ/4	4	1,66	0.80	1.00	1.00	8,3	8,3	8,3		
Сидрено витло	1	5,5	0.88	0.80	1.00	5,0	5,0			
Пумпа вишеводна за подмазивање	1	0,25	0.86	0.80	1.00	0,3	0,3	0,3		
Кухињски апарати	1	8	1.00	0.50	1.00	4,0	4,0	4,0	4,0	
Осветљење	1	14	1.00	0.80	1.00	11,2	11,2	11,2	11,2	
Палубно осветљење	1	5	1.00	1.00	1.00	5,0	5,0	5,0	5,0	
Бојлер	5	2	1.00	1.00	0.40	4,0	4,0	4,0	4,0	
Фрижидер	3	2	1.00	1.00	0.60	3,6	3,6	3,6	3,6	
Климатизација брода	1	30,3 6	1.00	0.95	1.00	28,9	28,9	28,9	28,9	
Електрични шпорет	1	30	1.00	0.60	1.00	18,0	18,0	18,0	18,0	
УКУПНА СНАГА ПОТРОШАЧА						kW	749,93	304,8	627,8	96,5
СТЕПЕН ИСТОВРЕМНОСТИ						$k_i$		0.95	0.95	0.50
ПОТРЕБНА СНАГА						kW		289,6	596,4	48,3



За основно напајање брода са електричном енергијом одабрана су два синхрона трофазна самопобудна безконтактна генератора од 400 kW, бродске конструкције, ваздушног хлађења, предвиђена за паралелни рад следећих карактеристика [23]:

–	Произвођач	“SINCRO” d.o.o. Пујека
–	Тип	SKM355 LM-4
–	Номинална снага	500 kVA
–	Номинални напон	3 x 400 V
–	Број обртаја	1500 min <sup>-1</sup>
–	Фреквенција	50 Hz
–	Фактор снаге	cosφ = 0,8

На слици 4.5. приказан је изабрани дизел електрични агрегат.



Слика 4.5. Леви дизел агрегат  
1-дизел мотор; 2-генератор

За погон генератора у сету дизел агрегата уграђени су дизел мотори следећих карактеристика:

–	Произвођач	CATERPILLAR,
–	Тип	C18, i-6, 4-тактни-дизел,
–	Номинална снага	492 kW
–	Број обртаја	1500 o/min
–	Емисије издувних гасова	IMO/EPA Tier I / CCNR
–	Запремина	18,1 l (1106 cu. in.)
–	Тежина, нето суви	1 630 kg
–	Заштита	искључење услед превелике брзине обртања (overspeed shutoff)

За потребе напајања брода електричном енергијом у луци на брод је уграђен АС синхрони генератор:

–	Произвођач	CATERPILLAR
–	Марка	OLYMPIAN
–	Тип	OLY00000KE4B01298
–	Номинална снага	64 kW
–	Број обртаја	1500 o/min
–	Напон/струја	400V/50Hz, 88 kVA

Исти је интегрисан у електроенергетски систем преко разводне плоче за нужду ЕЛМЕХ, према одобреном пројекту произвођача [23], у складу са захтевима из ПР-а.

Управљање радом генератора, тј. контролу бродске електричне централе омогућују интегрисани уређаји за синхронизацију и развод терета, који мере параметре мреже и генератора и управљају генераторским склопкама. Опремљени су и комуникационим картицама за пренос података према алармној централни.

Функције које уређај омогућује су:

- аутоматска синхронизација дизел генератора,
- контрола фреквенције мреже,
- аутоматска расподела терета међу генераторима,
- могућност ручног управљања генераторима,
- опремљен је дисплејем за локални приказ параметара мреже.

Уређај за заштиту од преоптерећења, приказ стања (струја, снага, напон, фреквенција) је произвођача „STUCKE ELECTRONIC”.

#### 4.3.1.5. Избор система за управљање погоном

За управљање погоном у кормиларници је уграђен пулт опремљен са опремом за даљинско управљање. На пулту је уграђен панел (слика 4.6) са одговарајућим контролним уређајима и индикаторима стања погонског система и прекидачима за избор режима рада система.



Слика 4.6. Панел за управљање погоном

За управљање бројем обртаја погонских електромотора у панел је уграђена једна двострука ручица модел ВУК – С произвођача Kwant Controls из Холандије. Ручица је повезана са програмабилним контролером који управља напонско фреквентним претварачима. За укључивање и искључивање напонско фреквентних претварача на панелу су уграђени прекидачи произвођача Schlegel Elektrokontakt.

Систем за управљање пропелзијом обухвата следећу опрему:

- програмабилни контролер „SIEMENS S7-1200”

- управљачке ручице „KWANT” BUK C
- дугмад и преклопке „SCHLEGEL”
- показне инструменте „ISKRA”
- релеје с подножјем „FINDER”
- изолационе претвараче „CABUR”
- редне стезаљке „KONČAR”

За управљање погоном са бокова брода или крме израђен преносни пулт који се прикључује на инсталацију система управљања са индустријским конекторима на местима предвиђеним за рад. Панел на пулту садржи следећу опрему потребну за управљање погоном:

- програмибилни контролер „SIEMENS S7-1200”
- управљачке ручице „KWANT” BUK C
- дугмад и преклопке „SCHLEGEL”
- конектори „HARTING”

За управљање радом прамчаног потисника у пулт за управљање погоном је уграђен контролни и управљачки панел CP-GT-005 са дојстиком, активационим кључем и сигнализацијом за низак ниво уља и за оптерећеност.

#### 4.3.1.6. Избор електричног дистрибуционог система

Поред наведене опреме извршен је избор електричног дистрибуционог система који се састоји од [29]:

- Главна разводна табла произвођача фирме „ЕЛМЕХ” Ријека са следећим пољима:
  - поље 1 – поље аутоматике, опремљено аутоматском управљачко алармном централом и опремом за „back – up” управљање погоном,
  - поље 2 – упутници 3x400 V 50 Hz,
  - поље 3 – погонски мотор бр.1 и потрошачи 3x400 V 50 Hz, опремљено ручном аутоматском склопком 630 А, трополном фиксне изведбе.
  - поље 4 – генератор бр. 1 (400 kW), опремљено генераторском моторном склопком (1.000 А), извличиве изведбе и уређајем LS1 који се састоји од следећих елемената: заштита од преоптерећења, кратког споја и повратне снаге; опреме за синхронизацију и расподелу терета и са приказом снаге, напона, струје и фреквенције.
  - поље 5 – синхронизација, прикључак са копна и напајање прамчаног потисника, опремљено синхронизатором (дупли волтметар, дупли фреквенцометар), трополном склопком (160 А) за прикључак са копном, трополном склопком за напајање прамчаног потисника (250 А) и трополним растављачем 800 А.
  - поље 6 – генератор бр. 2 (400 kW), опремљено генераторском моторном склопком (1.000 А), извличиве изведбе и уређајем LS2 који се састоји од следећих елемената: заштите од преоптерећења, кратког споја и повратне снаге; опреме за синхронизацију и расподелу терета и са показивачима снаге, напона, струје и фреквенције

- **поље 7 – генератор бр. 3 (70 kW)**, опремљено генераторском моторном склопком (160 A), извлачиве изведбе, уређајем LS3 који се састоји од следећих елемената: заштите од преоптерећења, кратког споја и повратне снаге; опреме за синхронизацију и расподелу терета и са показивачима снаге, напона, струје и фреквенције
- **поље 8 – погонски мотор бр.2 и потрошачи 3x400 V 50 Hz**, опремљено ручном аутоматском склопком 630 A, трополном фиксне изведбе.
- **поље 9 – путници 3x400 V 50 Hz**,
- **поље 10 – потрошачи 3x230 V 50 Hz**, опремљено склопницама за избор трансформатора, волтметром, амперметром, аутоматским трополним прекидачима и двополним прекидачима.
- У разводну таблу је уграђена опрема следећих произвођача:
  - Генераторске склопке, аутоматски прекидачи, сигналне лампице, дугмад „SCHNEIDER ELECTRIC”
  - Уређај за заштиту од преоптерећења и приказ стања (струја, снага, напон, фреквенција) „STUCKE ELECTRONIC”
  - Показни инструменти „ISKRA”
  - Релеји с подножјем „FINDER”
  - Преклопке, редне стезаљке „KONČAR”
- Разводна табла у нужди, произвођача фирме „ЕЛМЕХ” Ријека,
- Разводна табла 24 V DC, 2 кот, произвођача фирме „ЕЛМЕХ” Ријека,
- Исправљач 3x400 V/24 V DC "VICTRON ENERGY", 2 кот,
- Акумулаторске батерије 12V - "ТОПЛА", 8 кот,

#### 4.3.1.7. Избор система аутоматизације

За праћење рада погонских електромотора и дизел агрегата изабран је систем аутоматизације који се састоји се од централног програмибилног контролера с периферним картицама који има следеће функције:

- мерење свих аларма и приказ грешака погонских и помоћних машина,
- константан приказ важних параметара и мерења система на LCD тач (touch) панелу који се користи и за управљање системом,
- константан приказ важних параметара и мерења система на помоћном LCD тач (touch) панелу,
- активирање аларма по заданим граничним вредностима,
- детекција кварова и shut down према заданим условима,
- одржавање према сатима рада машина,
- дијагностика грешака система,
- принтање аларма и грешака,
- могућност обраде и приказа података са свих типова индустријских сензора (Pt, Ni-CrNi, 4-20mA, V,...) и мерења процесних величина попут температуре, притисака, обртаја и нивоа.

Опрема алармне централе састоји се од опреме следећих произвођача:

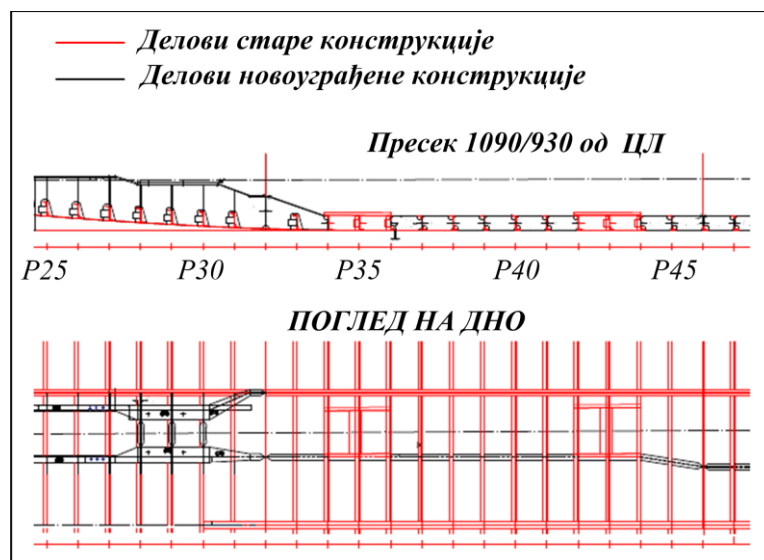
- програмабилни контролер „SIEMENS” S7-300,
- тач (touch) панел „ SIEMENS” MP-370,
- дугмад и преклопке „SCHNEIDER ELECTIC”,
- релеји с подножјем „FINDER”,
- изолациони претварачи „CABUR”,
- редне стезаљке „KONČAR”.

#### 4.3.2. Уградња дизел електричне погонске групе

Након избора опреме дизел електричне погонске групе приступило се њеној уградњи. Самој уградњи претходила је демонтажа опреме старе погонске групе дизел мотора и припадајућих система.

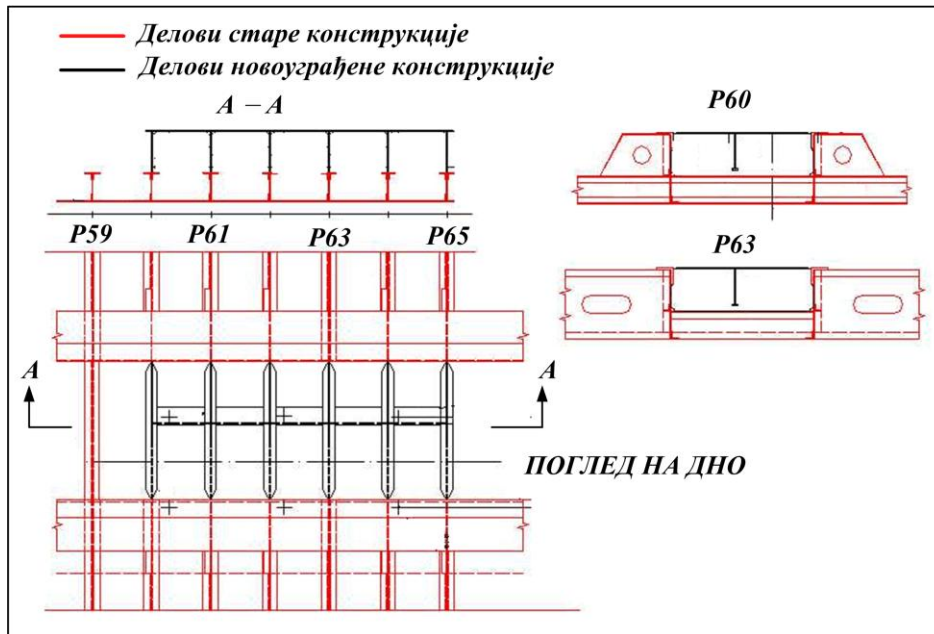
Уградња нове погонске групе извршена је на основу пројекта извођача радова, фирме БЕОЛАН Београд [23]. Да би се уградила нова дизел електрична погонска група било је неопходно извести следеће радове на бродском трупу и системима:

- Фрмирање новог машинског простора на крменом делу брода од P25 до P32 за смештај погонских електромотора и напонско фреквентних претварача.
- Уградња нових уздужњака са фундаментима погонских ЕМ и редуктора од НП18 до P 49. На слици 4.7 је приказана скица уграђених уздужњака са фундаментима ЕМ и редуктора, који су симетрично уграђени са леве и десне стране од ЦЛ:
  - 930/1090 мм од ЦЛ је додат један фундамент мотора, који се након НП32 продужава до P49 и уклапа у постојеће фундаменте мотора на P49,
  - 1840/2115 мм од ЦЛ је додат други фундамент мотора који се уклапа са постојећом провезом дна и протеже се до другог постојећег фундамента мотора на P49.



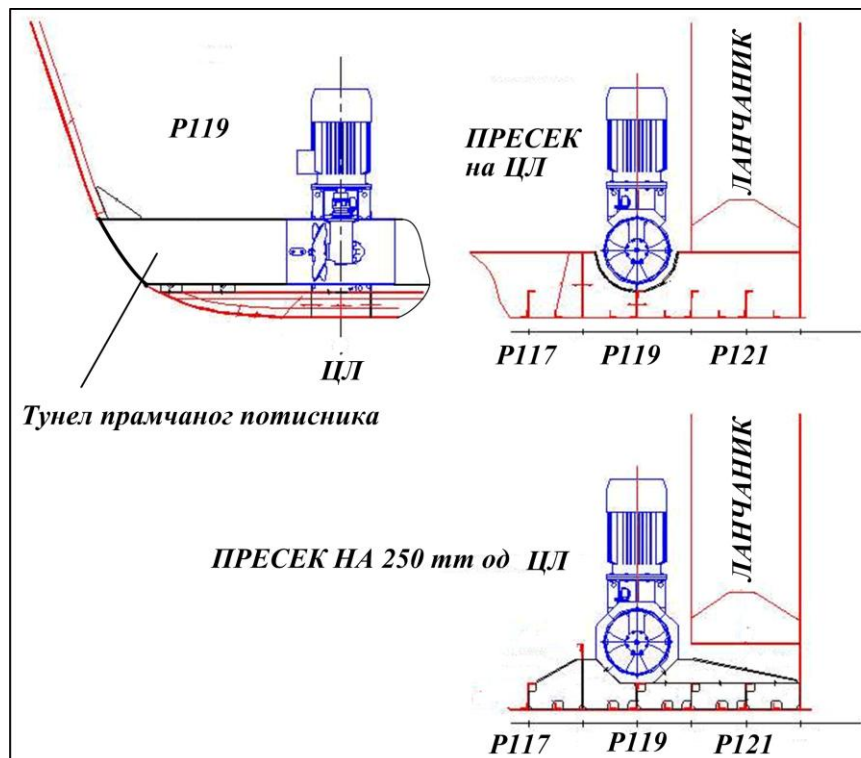
Слика 4.7. Скица дела уздужњака са фундаментима погонских ЕМ на броду „КОЗАРА”

- Постоља дизел агрегата од P60 до P65 на начин да је конструкција постојећих фундамената главних погонских мотора прилагођена постољу дизел агрегата (слика 4.8).



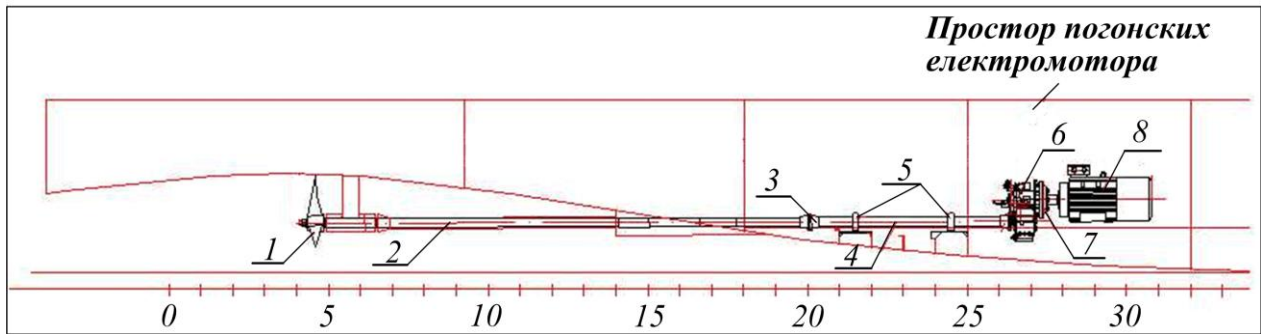
Слика 4.8. Скица фундамента дизел агрегата на броду „КОЗАРА”

- Уградња тунела за прамчани потисник заварене конструкције пречника  $\varnothing 610$  mm на прамчаном делу брода од P118 до P120 на начин да је постојећа бродска конструкција преправљена и ојачана. На слици 4.9 је приказана диспозиција уградње прамчаног потисника.



Слика 4.9. Диспозиција уградње прамчаног потисника на броду „КОЗАРА”

- Скраћивање постојећих вратилних водова тј. изградња по два дела и скраћивање трећег дела, на сваком вратилном воду, за повезивање редуктора са пропелерским вратилима. На слици 4.10 је приказана диспозиција новог вратилног вода.



Слика 4.10. Диспозиција новог вратилног вода на броду „КОЗАРА”

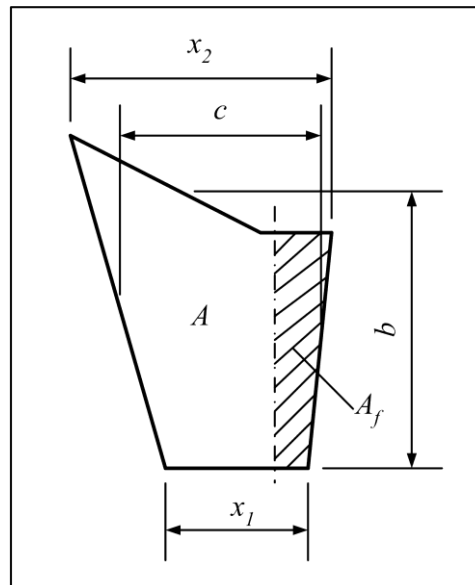
1 – пропелер; 2 – други део пропелерског вратила; 3 – спојница; 4 – први део пропелерског вратила; 5 – лежаји првог дела пропелерског вратила; 6 – редуктор; 7 – еластична спојница; 8 – електромотор

Сва новододата конструкција је урађена од бродограђевинског челика квалитета А. Димензионисање елемената је извршено у складу са постојећом конструкцијом и правилима регистра.

#### 4.4. ИЗБОР КОРМИЛАРСКОГ УРЕЂАЈА

Осим погонске групе за управљање бродом је од велике важности кормиларски уређај. Због тога је одлучено да се стари ручни кормиларски уређај замени са електро хидрауличним уређајем уз задржавање старих кормила.

За избор кормиларског уређаја неопходно је да се прорачунају силе и моменти на листовима кормила. Прорачун је извршен према правилима и смерницама стандарда Германског лојда (Germanischer Lloyd) [30]. На слици 4.11 је приказан лист кормила са димензијама и површинама листа кормила важним за прорачун силе и момента на листу кормила.



Слика 4.11. Лист кормила са димензијама и површинама важним за прорачун силе

$A$  – укупна површина листа кормила;  $A_f$  – површина листа кормила испред оси вратила;

Сила на листу кормила дефинисана је изразом:

$$F_K = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot 39 \cdot A \cdot v_0^2 \quad [N]. \quad (4.9)$$

Коефицијент  $k_1$  завистан од површина листова кормила је дефинисан изразом:

$$k_1 = \frac{\Lambda + 2}{3} = \frac{0,712 + 2}{3} = 0,9 \quad (4.10)$$

где је омер површина листа кормила  $\Lambda$  одређен изразом,

$$\Lambda = \frac{b^2}{A} = \frac{1,1^2}{1,7} = 0,712, \quad (4.11)$$

а димензије  $c$  и  $b$  су одређене изразима:

$$c = \frac{x_1 + x_2}{2} \quad (4.12)$$

и

$$b = \frac{A}{c} = \frac{1,7}{1,56} = 1,1. \quad (4.13)$$

Коефицијент  $k_2$  који зависи од врсте и профила кормила и коефицијент  $k_3$  који зависи од локације кормила одређују се према препорукама стандарда.

Момент на кормилу је дефинисан изразом:

$$M_K = F_K \cdot r \text{ [Nm]} \quad (4.14)$$

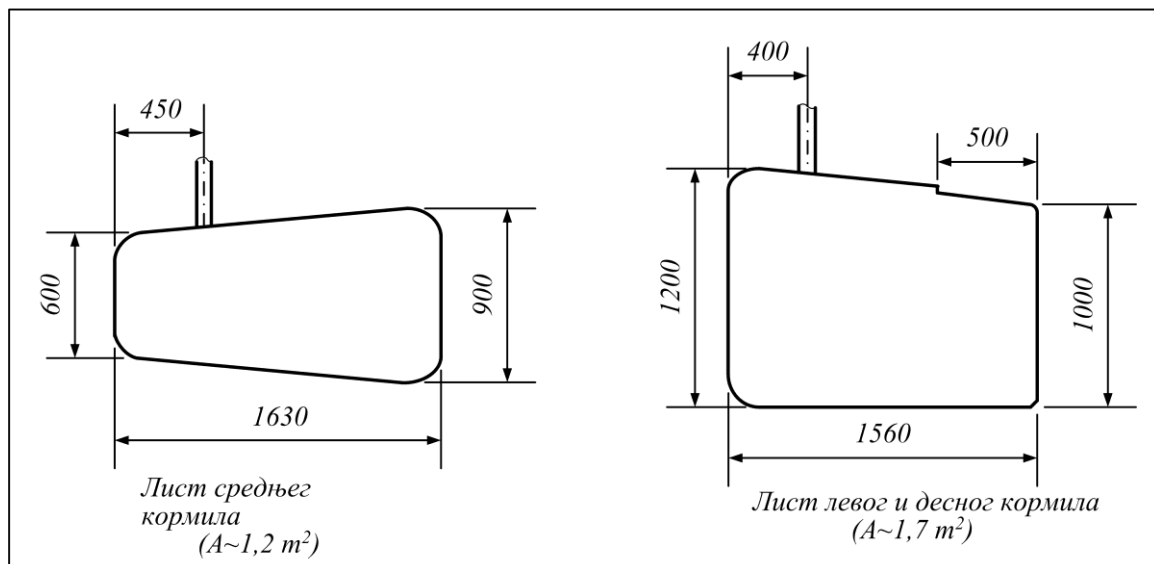
где је раздаљина силе на кормилу од осе вратила  $r$  одређена изразом:

$$r = c \cdot (\alpha - k_b). \quad (4.15)$$

Коефицијент  $\alpha$  је одређен препоруком стандарда и износи  $\alpha = 0,33$ , а коефицијент равнотеже  $k_b$  се рачуна према изразу:

$$k_b = \frac{A_f}{A}. \quad (4.16)$$

Брод „КОЗАРА” има три кормила, од којих су лево и десно идентични. Укупна сила и момент на кормилима једнака је збиру сила и момената на појединим кормилима. На слици 4.12 су приказани листови кормила брода са основним димензијама и површинама.



Слика 4.12. Листови кормила на броду „КОЗАРА”

Силе и моменти на кормилима брода су рачунати за средњу максималну брзину брода  $v_0 = 22,9 \text{ km/h}$  и израчунате површине листива кормила за лево и десно кормило  $A \sim 1,7 \text{ m}^2$  и средње кормило  $A \sim 1,2 \text{ m}^2$ .



Коефицијент  $k_1$  израчунат је према изразу (4.10) и износи, за лево и десно кормило  $k_1 = 0,9$ , а за средње кормило износи  $k_1 = 0,82$ . За коефицијенте  $k_2$  и  $k_3$  одређене су вредности  $k_2 = 1,1$ ,  $k_3 = 1$ . Израчуната раздаљина силе на кормилу од осе вратила  $r$ , према изразу (4.15) за лево и десно кормило износи  $r = 0,078 \text{ m}$ , а за средње кормило  $r = 0,17 \text{ m}$ .

Уношењем одређених вредности у израз (4.9) израчуната је сила на левом и десном кормилу  $F_{KLD}$  и сила на средњем кормилу  $F_{KS}$ :

$$F_{KLD} = 2 \cdot (0,9 \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 39 \cdot 1,7 \cdot 22,9^2) = 2 \cdot 34420,7 = 68841,4 \text{ [N]} \quad (4.17)$$

и

$$F_{KS} = 0,82 \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 39 \cdot 1,2 \cdot 22,9^2 = 22137,2 \text{ [N]}. \quad (4.18)$$

Уношењем вредности за израчунату силу на кормилима и раздаљину силе од осе вратила израчунати су моменти на левом и десном кормилу  $M_{KLD}$  и средњем кормилу  $M_{KS}$ , према изразу (4.14):

$$M_{KLD} = 68841,4 \cdot 0,078 = 5369,6 \text{ [Nm]} \quad (4.19)$$

и

$$M_{KS} = 22137,2 \cdot 0,17 = 3763,3 \text{ [Nm]}. \quad (4.20)$$

Укупна сила  $F_K$  и момент  $M_K$  на кормилима брода „КОЗАРА” добија се сабирањем сила и монета на левом и десном и на средњем кормилу:

$$F_K = F_{KLD} + F_{KS} = 68841,4 + 22137,2 = 90978,6 \text{ [N]} \quad (4.21)$$

и

$$M_K = M_{KLD} + M_{KS} = 5369,6 + 3763,3 = 9132,9 \text{ [Nm]}. \quad (4.22)$$

На основу израчунатог момента на кормилима брода извршен је избор кормиларског уређаја. Планирано је да се ручно кормиларење замени са електро хидрауличним кормиларењем, али је због недостатка новчаних средстава изабрано ручно хидраулично кормиларење где кормиларски точак служи за активирање хидрауличне пумпе, а уље под притиском се цевоводом спроводи до хидрауличног цилиндра који је повезан на полужје кормила на крми. У крменом делу брода је уграђена пумпа за резервно кормиларење.

Изабран је следећи ручни хидраулични уређај, код којег је хидраулична пумпа смештена у кормиларници и директно се погони кормиларским точком, а хидраулични цилиндри су уграђени на крми брода и повезани на полужје кормила:

–	Произвођач	ППТ Трстеник
–	Тип	ORBITOL
–	Врста	ручни хидраулични
–	Отклон кормила	+55° - 55°

#### 4.5. НАМЕНА И ТЕХНИЧКИ ОПИС БРОДА „КОЗАРА” НАКОН МОДЕРНИЗАЦИЈЕ

У овом поглављу ће бити приказани намена и технички опис брода након извршене модернизације. Новим програмским документима намена брода је проширена с обзиром на могућности које нови облик погона и опреме пружа.

##### 4.5.1. Намена брода

Програмским документима којим је дефинисан обим модернизације, одређена је и намена брода. С обзиром на новоуграђену опрему броду су придодате неке од намена које раније нису биле одређене, тако да је нова намена брода дефинисана на следећи начин.

Брод „КОЗАРА” је брод Речне флотиле (РФ) Војске Србије намењен да буде [31]:

- *Командни брод Речне флотиле,*
- *Протоколарни брод Министарства одбране, Војске Србије и Речне флотиле (протоколарне почасте и приједи за највише државне званичнике),*
- *Брод база за смештај и боравак људства Речне флотиле,*
- *Брод за превозење људства (уздужно и попречно) на унутрашњим пловним путевима (УПП) и*
- *Брод за обуку кадета Војне академије Војске Србије (садржаји из практичних облика наставе).*

Брод је намењен за пловидбу у подручју пловидбе 1, тј. за међународну пловидбу свим морима и водама које су приступачне са мора.

##### 4.5.2. Опис брода након модернизације

На слици 4.13 је приказан брод „КОЗАРА” након извршене модернизације у бродоградилшту Апатин 2013. године у пловидби Дунавом.



Слика 4.13. Брод „КОЗАРА” након извршене модернизације

##### 4.5.2.1. Основни ТТ подаци брода након модернизације

Због замене погона брода и уградње нове опреме промењени су основни ТТ подаци брода, који су приказани у табели 4.3.

Табела 4.3. Основни ТТ подаци брода „КОЗАРА” након модернизације

Ред. број	ТТ карактеристика	Вредност	Напомена	
1.	Депласман брода	Стандардни	530 t	укључује опремљен брод са 50% залиха
		Пуни	562 t	
2.	Газ брода	На стандардном депласману	1,11 m	
		На пуном депласману	1,17 m	
3.	Просечна брзина брода	Низводно	26 km/h	Захтевани минимум је просечно 15 km/h низводно
		Узводно	20 km/h	
4.	Смештајни капацитети брода	Посада	29	
		Укупни капацитет	70	
5.	Залихе брода	Погонско гориво	61 m <sup>3</sup>	
		Питка вода	30 m <sup>3</sup>	

#### 4.5.2.2. Труп брода, надграђе и бродске просторије

У модернизацији брода су извршене одређене измене на трупу, надграђу и бродским просторијама.

Труп брода је у потпуности задржао ранији облик, а за потребе новог облика погона у њега су уграђени следећи конструктивни елементи [32]:

- Фундаменти погонских мотора и редуктора од НП18 до НП32 са уздужњацима до Р49,
- Постоља дизел генератор сетова од Р60 до Р65,
- Тунел прамчаног потисника од Р118 до Р120.

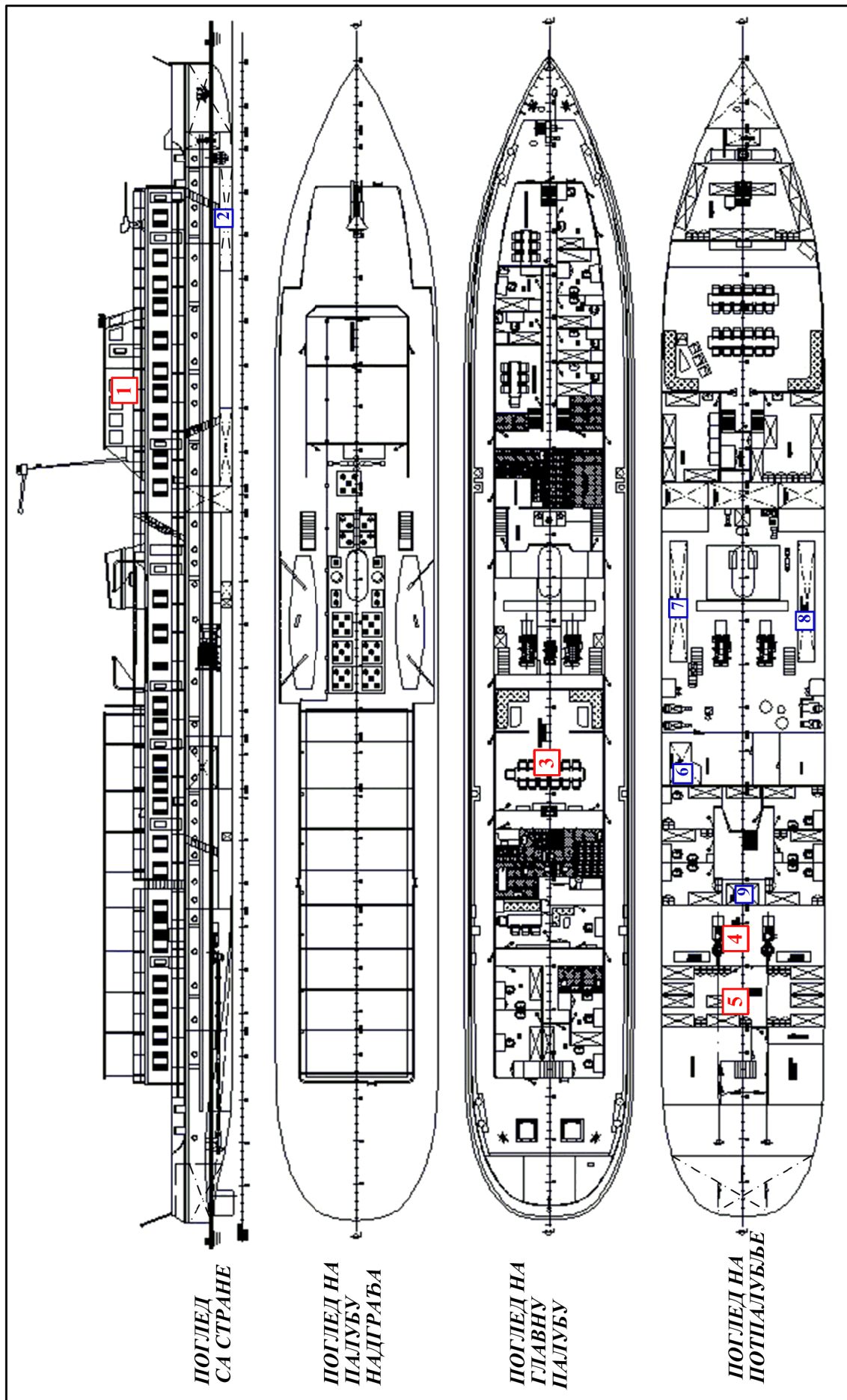
Генерални план брода након завршене модернизације је приказан на слици 4.14.

На надграђу брода је уграђена нова кормиларница, позиција [1] на слици 4.14, веће ширине у односу на стару кормиларницу. Тиме је омогућен смештај нових пултева са опремом за управљање радом погонских електромотра и бродом и за навигационо информациони систем брода, као и већи бродски оперативни центар.

Крменом сударном простору, који је имао намену танка питке воде, запремине 25,00 m<sup>3</sup>, враћена је намена баластног танка, а за танк питке воде на прамчаном делу у дну брода, који није био у употреби, запремине 18,5 m<sup>3</sup>, позиција [2] на слици 4.14, извршена је пренамена у баластни танк. Уз прамчани баластни танк запремине 13,52 m<sup>3</sup> брод сада располаже са баластним танковима укупне запремине приближно 57 m<sup>3</sup>. Пренамена је извршена у циљу постизања бољих погонских и маневарских карактеристика брода, односно добијена је могућност повећања газа што за резултат има бољи зарон погонских пропелера и прамчаног потисника. Око кокера кормиларског уређаја у крменом баластном танку израђен је кофердам, опремљен лествама и поклопцем 630x630 mm.

На броду су задржана два крмена пика (од R3 до R9) за смештај бродарске опреме и опреме погонског одреда.

У димњак су смештени издувни водови дизел мотора, као и издувни водови котлова система грејања.



Слика 4.14. Генерални план брода „КОЗАРА“ након завршене модификације

У оквиру модернизације брода део бродских просторија је реконструисан. Од дела крменог морнарског простора формиран је нови машински простор бр. 2 или простор електричног погона од Р25 до Р32, позиција [4] на сл. 4.14. Од преосталог дела морнарског простора и спремишта формиран је нови морнарски простор од Р18 до Р25, позиција [5] на слици 4.14. На нивоу главне палубе у надграђу су просторије: велики салон, мали салон, бродска кантина и бродско спремиште спојене у један велики ВИП салон, позиција [3] на слици 4.14. Промењене су димензије и смештајни капацитети крменог морнарског простора који је сада формиран од Р18 до Р25.

У току модернизације није било измена на структури и распореду бродских танкова горива.

У оквиру модернизације на брод су уграђени следећи неструктурни танкови:

- танкови питке воде, неструктурни, 2 ком. капацитета: 2 x 7.500 l, позиције [7] и [8] на слици 4.14,
- танк питке воде, неструктурни, 1 ком. капацитета 6.100 l, позиција [6] на слици 4.14,
- танк фекалија,  $V=4,50 \text{ m}^3$  (танк је повезан на међународни прикључак за пражњење, опремљен је одушником и прикључком за чишћење и прање), позиција [9] на слици 4.14.

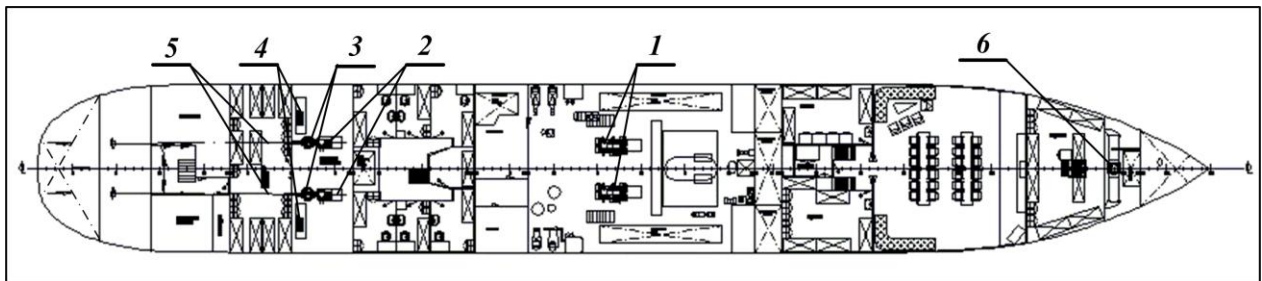
На главну и шетну палубу је нанет заштитни премаз типа HYPERDESMO уместо дотадашњег заштитног слоја палубе од дрвених треница.

#### 4.5.2.3. Погонски комплекс и бродски системи

Опрема дизел електричне погонске групе уграђена је у стари машински простор (машински простор бр. 1), у новоформирану крмени машински простор (машински простор бр. 2) и у простор прамчаног потисника.

У стари машински простор су уграђени дизел агрегати, главна разводна табла, помоћна разводна табла, разводна табла 24 V DC, а у крмени машински простор су уграђени погонски електромотори, редуктори и напонско фреквентни претварачи. Прамчани потисник је уграђен у простор прамчаног потисника на прамчаном делу брода док је централни пулт за управљање пропулзијом уграђен у пулт у кормиларници.

На слици 4.15 је приказан распоред уграђене опреме дизел електричног погона.



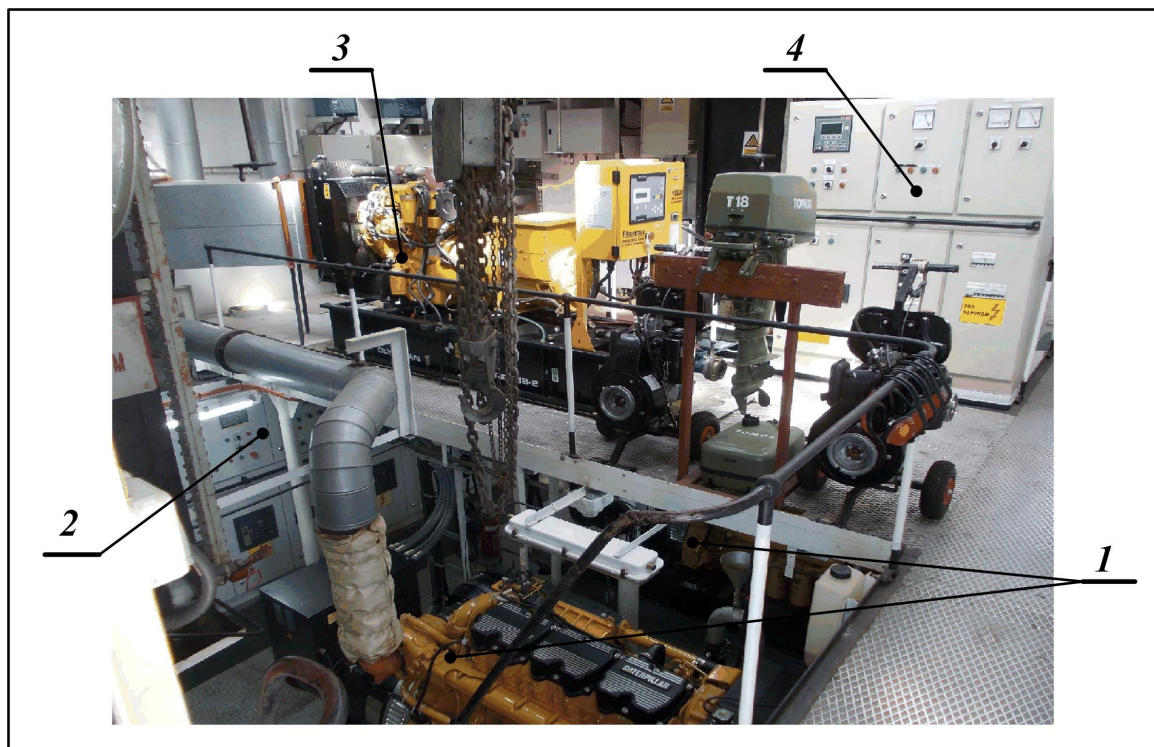
Слика 4.15. Погонска група дизел електричног погона  
1 – дизел електрични агрегати; 2 – погонски електромотори; 3 – редуктори; 4 – напонско фреквентни претварачи; 5 – вратилни водови; 6 – прамчани потисник.

Новоуграђена опрема дизел електричне погонске групе је приказана у табели 4.4.

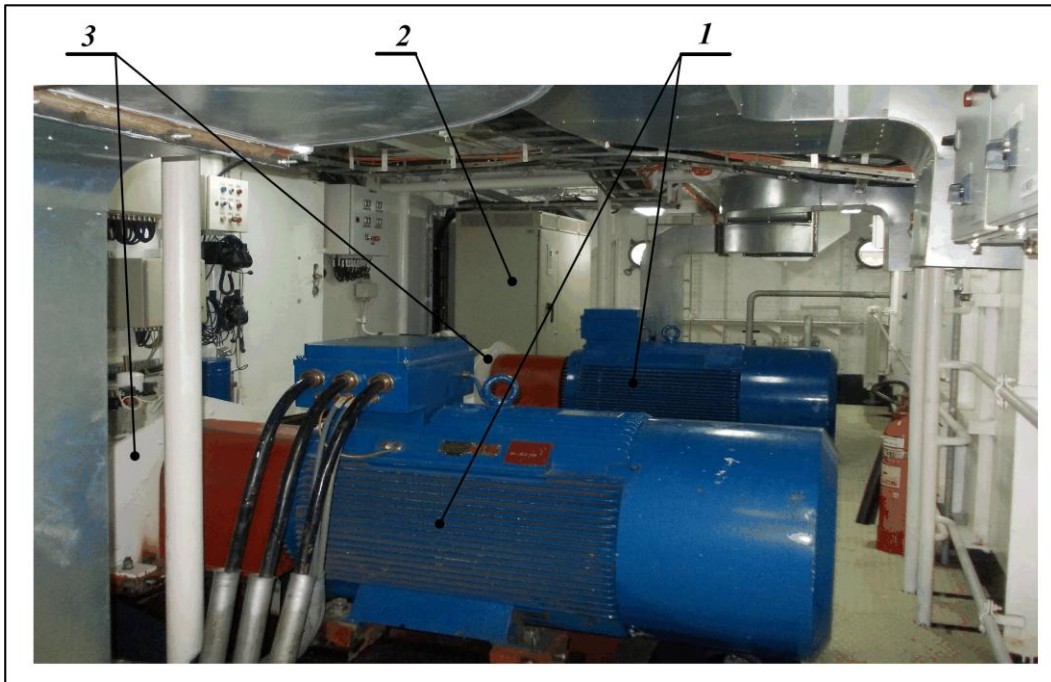
Табела 4.4. Опрема дизел електричне погонске групе

Ред. број	Уграђени уређај		Тип	Количина	Намена
1.	Дизел агрегати	Дизел мотор	C18 CATERPILLAR i-6, 4-тактни-дизел	2 ком	Производња електричне енергије
		Генератор	SKM355 LM-4	2 ком	
2. 3.	Лучки дизел агрегат		OLY00000KE4B01298	1 ком	Производња електричне енергије
4.	Електромотор		B6AZJ 354-04	2 ком	Погон брода
5.	Прамчани потисник		GT570-066	1 ком	Маневрисање бродом
6.	Редуктори		ZF W350-1	2 ком	Пренос снаге са ЕМ на вратилни вод и редуцију броја обртаја ЕМ
7.	Напонско фреквентни претварачи		ABB ACS 800 -17' 0320	2 ком	Управљање бројем обртаја погонских ЕМ
8.	Напонско фреквентни претварач		AC ACS 800-04, IP20	1 ком	Управљање бројем обртаја прамчаног потисника
9.	Централни пулт за управљање пропулзијом				Даљинско управљање и надзор система пропулзије
10.	Преносни пулт				Управљање пропулзијом

На сликама 4.16 и 4.17 приказани су машински простори 1 и 2.



Слика 4.16. Машински простор бр. 1 на броду „КОЗАРА”  
 1 – дизел агрегати; 2 – главна разводна табла; 3 – лучки дизел агрегат;  
 4 – разводна табла у нужди



Слика 4.17. Машински простор бр. 2 на броду „КОЗАРА”

1 – погонски електромотори; 2 – леви напонско фреквентни претварач; 3 - редуктори

Вратилни водови за пренос обртног момента са електромотора на пропелер, након модернизације, састоје се од дводелних пропелерских вратила спојених крутим спојницама. Први делови леже на по два носача (ослонца) са котрљајућим ваљкастим лежајевима. Други делови пропелерских вратила су ослањени на по два клизна лежаја у статвеним цевима и на по једном клизном лежају у скроку. Дужина пропелерског вратила је 8 m. На део пропелерског вратила који се налази у води навучена је цев (ногавица) напуњена машћу и спојена за труп брода и скрок. За подмазивање лежаја статвене цеви уграђен је нови централни уређај за подмазивање.

За управљање бродом на брод је уграђен ручни хидраулични кормиларски уређај који је повезан са старим листовима кормила из 1939. године.

Ради обезбеђења оптималних услова рада посаде на брод је уграђен „SPLIT” систем климатизације који се састоји од следећих клима јединице произвођача „Fujitsu”:

- спољне клима јединице: тип AOYG30LAT4 (ком.5), тип AOYG24LAT3 (ком.3) и тип AOYG18LATA3 (ком.2), (укупно 10 комада);
- унутрашње клима јединице: тип ASYG09 (ком.17), тип ASYG12 (ком.3) и тип ASYG18 (ком.2), (укупно 22 комада).

У реконструкцији брода на брод је уграђен нови сидрени уређај следећих карактеристика:

- |   |                     |                                  |
|---|---------------------|----------------------------------|
| – | Произвођач          | „Dijvler Materiaal b.v.” Holland |
| – | Модел               | D.V.M.6                          |
| – | Снага електромотора | 5,5 kW                           |
| – | Вучна сила          | 49,91 kN                         |

Брод је уз сидрено витло опремљен и новим сидром следећих карактеристика:

- |   |            |                 |
|---|------------|-----------------|
| – | Тип        | „Hall”          |
| – | Тежина     | 585 kg          |
| – | Ланац      | пречник Ø 22 mm |
| – | Челик чело | пречник Ø 24 mm |

На брод је уграђен систем за вентилацију машинских простора који се састоји од:

- *вентилатора, аксијалних AVTC 50-2/4, 9000 m<sup>3</sup>/h, избацивање ваздуха из МП1 и МП2, ком.4,*
- *вентилатора, аксијалних AVTC 40-2/4, 8000 m<sup>3</sup>/h, убацивање ваздуха у МП1 и МП2, ком.4,*
- *упутника и регулатора брзине који омогућава две брзине вентилације,*
- *кутије заустављања у нужди.*

Поред навигационог информационог система (НИС), који је на брод уграђен пре модернизације брода, на брод су уграђени и следећи бродски електронски системи:

- *системи унутрашњих бродских веза (бродски командни интерфон, безбатеријски телефони и систем радио концертних и TV уређаја),*
- *систем спољашњих бродских веза (радио комуникације и прикључак на јавну телефонску мрежу),*
- *систем светлосне и звучне сигнализације (навигацијска и сигнална светла и општи бродски аларм – клаксон),*
- *систем дојаве продора воде,*
- *систем дојаве пожара и*
- *систем видео надзора.*



## 5. АНАЛИЗА ИЗАБРАНОГ ПОГОНА МОДЕРНИЗОВАНОГ БРОДА „КОЗАРА”

У овој глави биће дате теоријске претпоставке утицаја нове врсте погона брода како на маневарке и погонске карактеристике тако и на жилавост брода и на економичност пловидбе. Поред тога биће дат и осврт на одржавање ДЕП-а.

### 5.1. ТЕОРИЈСКЕ ПРЕТПОСТАВКЕ УТИЦАЈА НОВЕ ВРСТЕ ПОГОНА НА МАНЕВАРСКА И ПЛОВНА СВОЈСТВА БРОДА

Да би се сагледао утицај нове врсте погона на маневарска и пловна својства брода треба идентификовати све његове разлике у односу на стари погон, а које имају значајан утицај на наведена својства брода.

Главне разлике новог погона и опреме брода у односу на стари су:

- *Мањи депласман брода због знатно мање укупне масе новоурађене опреме,*
- *Уградња електромотора који се напајају из статичких претварача напона и фреквенције за погон брода,*
- *Уградња прамчаног потисника,*
- *Уградња додатних баластних танкова.*

Од депласмана брода директно зависи брзина брода на начин да смањен депласман брода омогућава већу брзину. Због тога је за очекивати да ће за одређену брзину, на мањем депласману, пропелеру бити потребна мања доведена снага него за ту исту брзину брода на већем депласману. Ово директно утиче на економичност пловидбе тј. мању потрошњу горива.

Електромотори напајани из статичких претварача напона и фреквенције могу радити с константним максималним моментом у целом подручју брзина, што се постиже истовременом регулацијом фреквенције и напона. Захваљујући великом моменту могуће је брзо заустављање и убрзавање бродског пропелера у оба смера обртања што даје брз одзив брода као објекта регулације, односно одлична динамичка својства.

Једноставна промена смера обртања електромотора управљаних преко напонско фреквентних претварача омогућава да се веома брзо, померањем управљачких ручица у нови режим, прелази са режима вожње напред у режим вожње крмом. Очекује се да ова особина електричног погона у значајној мери допринесе смањењу зауставног пута брода и знатно бољем маневару брода код окрета због могућности употребе спрега. Окрет брода спрегом подразумева режим рада погонских електромотора у коме би један возио напред, а други крмом.

Од уградње прамчаног потисника очекује се додатно смањење пречника круга окрета брода и поузданији и лакши маневар упловљења и испловљења брода, као и пловидба брода кроз преводнице.

Пренамена старог танка питке воде у додатни баластни танк, као и враћање намене крменом баластном танку треба да омогући подешавање депласмана брода тј. газа брода према условима пловидбе. На крстарећим пловидбама брода танкови треба да буду празни да би се одређена брзина брода постигла са минимумом потребне енергије, а у условима

честог маневрисања, упловљења и испловљења танкови треба да буду пуни како би се омогућио пуни ефекат прамчаног потисника. Поред подешавања депласмана (газа) брода, уградња додатних баластних танкова треба да омогући и лакше тримовање брода, тј. подешавања нагиба брода.

## 5.2. УТИЦАЈ НОВЕ ВРСТЕ ПОГОНА НА ЖИЛАВОСТ БРОДА

Уградња нове врсте погона се позитивно одражава на жилавост брода. На повећање жилавости утичу следеће чињенице:

- *формирањем новог машинског простора и смештајем погонских ЕМ у одвојен простор смањена је опасност да брод услед пожара и продора воде у један од машинских простора остане без властитог погона,*
- *уградња система за дојаву пожара и продора воде посада брода има могућност правовременог откривања пожара и продора воде у почетним фазама чиме је увелико повећана могућност за њихово заустављање,*
- *уградња видео надзора у виталне бродске просторе који такође доприноси могућности раног откривања појава пожара, продора воде и неких кварова (у првом реду пуцање цевовода) и*
- *уградња додатних елемената чврстоће у дну бродског трупа, између два машинска простора доприноси чврстоћи трупа.*

Новији бродови с електричним погоном се граде с више одвојених машинских простора како би се у случају пожара у једном задржала производња електричне енергије, а тиме и погон брода.

## 5.3. УТИЦАЈ НОВЕ ВРСТЕ ПОГОНА НА ЕКОНОМИЧНОСТ ПЛОВИДБЕ

Иако све до сада поменуте предности електричног погона утичу на побољшање погонских и маневарских особина брода, важно је истаћи и економичност брода, због директног утицаја на трошкове експлоатације. Очекује се да ће брод са новом врстом погона имати мању потрошњу горива, што би био један од значајних позитивних ефеката.

Иако електрични погон има веће губитке у преносу снаге до пропелера од механичког погона, предност електричног погона се огледа у могућности повећања коефицијента корисности на почетку и на крају погонског ланца [1]. Због ниског коефицијента корисности погонских машина и бродског пропелера, на поменутим местима, управо на њима се може постићи највеће смањење губитака, а тиме и значајне уштеде на трошковима горива. Прецизније речено, електрични погон омогућава:

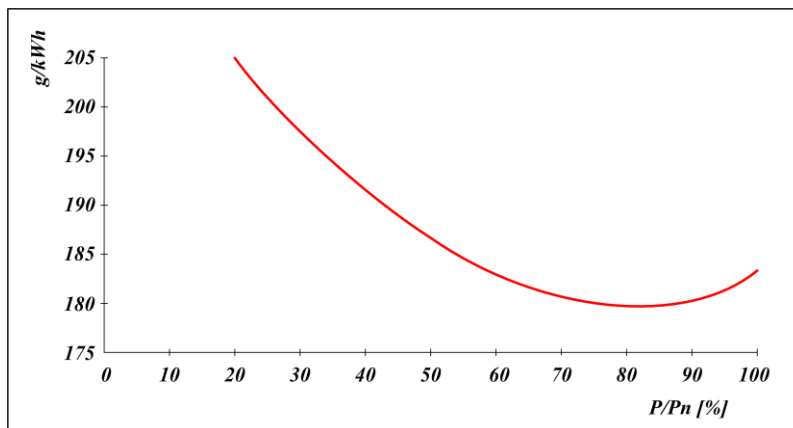
- *рад погонских машина с константним обртајима у подручју око оптималног оптерећења без обзира на експлоатацијску намену пловила.*
- *могућност коришћења оптималног броја агрегата у узводној и низводној пловидби.*

На слици 5.1 приказан је дијаграм специфичне потрошње горива дизел мотора у функцији оптерећења [1].

Из дијаграма се види да је најмања специфична потрошња горива у подручју оптерећења од 70 до 90% номиналне снаге мотора.

Смањење специфичне потрошње погонских мотора брода с електричним погоном своди се на укључивање и искључивање дизел-генератора у складу са потребном снагом у појединим режимима пловидбе, тако да дизел-мотори углавном раде при оптималном

оптерећењу и уз константан број обртаја. Повећавањем броја уграђених агрегата сужава се подручје њиховог оптерећења (раде у подручју оптималног оптерећења), односно смањује просечна специфична потрошња горива, али се истовремено повећавају трошкови одржавања.



Слика 5.1. Специфична потрошња горива дизел мотора у функцији оптерећења

На броду „КОЗАРА” на коме су уграђена два дизел агрегата веће снаге сужена је могућност уштеде горива на описани начин. Услови пловидбе ратног брода углавном захтевају рад два генератора. Уштеда горива може се очекивати у низводној пловидби, при мањим брзинама пловидбе, када би радио један дизел агрегат на оптималном оптерећењу.

#### 5.4. ОСВРТ НА ОДРЖАВАЊЕ НОВЕ ВРСТЕ ПОГОНА

Иако је систем електричног погона много сложенији од система дизел-механичког погона, ипак захваљујући великој редунданцији (способност да задржи функциоаланост код појаве кварова), има знатно већи степен расположивости [1]. Електрични системи преузимају све веће подручје примене због малих захтева одржавања, високог степена поузданости и трајности. Стога је и електрични пренос снаге модерног брода са електричним погоном пројектован тако да захтева минималне интервенције током експлоатацијског века употребе брода. По правилу, сви би бродски системи морали бити направљени тако да се могу одржавати, а у случају потребе и поправити на броду, капацитетима посаде брода. Међутим, у данашње време све је више бродске опреме, у првом реду електронике (напонско фреквентни претварачи, аутоматизовани алармни системи итд.), коју је потребно сервисирати од стране овлаштених сервисера, чак и када је на броду као члан посаде присутан селектроничар. Овим се значајно повећавају трошкови одржавања.

Највећи захтеви за одржавање система електричног погона, везани су за његове најсложеније подсистеме, напонско фреквентне претвараче и систем дизел мотора и требало би да постоји могућност отклањања каврове на њима без заустављања бродског пропелера. Савремени системи самодијагностике, те приступачност и манипулативност резервних делова омогућују релативно брзо отклањање отказа на напонско фреквентним претварачима, док трајање застоја на дизел мотору у великој мери зависи од врсте квара, али је у сваком случају краће, него код старијих погона без система самодијагностике. За успешно одржавање наведених система, споственим капацитетима, неопходно је да брод располаже са довољном количином резервних делова и склопова и оспособљеним кадром.

Асинхрони мотори имају предности у одржавању, у односу на друге (синхроне) моторе у погледу [33]:

- компактне конструкције,

- *мањих потешкоћа при вађењу ротора,*
- *дозвољена краткотрајна преоптерећења при високом преносу обртног момента,*
- *високе поузданости (најчешћи откази на лежајевима).*

Квалитетно направљени асинхрони пропулзијски мотори, уз редовно одржавање и правилну експлоатацију, могу трајати колико и сам брод.

На броду „КОЗАРА” има неколико фактора који негативно утичу на одржавање опреме дизел електричне погонске групе:

- *уграђена опрема дизел електричне погонске групе нема високу редунданцију која је карактеристична за савремене електричне системе погона брода,*
- *у саставу посаде нема електроничара,*
- *брод није снабдевен потребним количинама резервних делова и склопова и*
- *нема дефинисаног модела одржавања за дизел електричну погонску групу.*

Због наведеног, одржавање дизел електричне погонске групе је у почетној фази експлоатације потребно организовати на следећи начин:

- *за одржавање напонско фреквентних претвараача и система управљања и надзора, за које Речна флотила и Војска Србије немају капацитете неопходно је ангажовање овлашћених сервисера,*
- *одржавање дизел агрегата и осталих појединих компоненти ДЕП-а вршити на основу упутстава за одржавање прописаних од стране произвођача опреме.*

У даљој употреби брода неопходно је развити сопствени модел одржавања дизел електричне погонске групе. У складу са новим трендовима у одржавању потребно је применити систем одржавања према стању уз употребу савремених метода дијагностике као што су: ендоскопска дијагностика, параметарска дијагностика укључујући електричне параметре, вибродијагностика, спектрална анализа уља, примена термовизијских камера и примена ултразвука.

Модел одржавања развијати уз коришћење људских и материјалних капацитета Техничког опитног центра и Војнотехничког института.

## 6. ДИНАМИКА И КИНЕМАТИКА ПЛОВИДБЕ БРОДА

За добро разумевање понашања брода у пловидби, нарочито и разним маневрима, неопходно је познавање динамике и кинематике кретања брода. Динамике са становишта сила које делују на брод и услед којих се брод креће и кинематике са становишта самог кретања брода у простору кроз приказивање тренутног положаја, брзине, убрзања и пређеног пута брода у функцији времена. У овом делу рада биће разматране основе динамике и кинематике кретања брода са тежиштем на њиховој примени на брода „КОЗАРА” са свим специфичностима пловидбе на реци.

### 6.1. ДИНАМИКА ПЛОВИДБЕ БРОДА

У анализи динамике кретања брода полази се од активних сила (пропулзионих или поривних сила) и реактивних сила или сила отпора. Погонска сила која покреће брод код бродова са пропелером се добија на крилима пропелера на основу разлике притисака са стране лица и наличја крила. Ова сила зависи од врсте и геометрије пропелера, а њој се супротстављају различите силе отпора које воде порекло од воде (за подводни део трупа) и ваздуха (за надводни део трупа).

#### 6.1.1. Отпор брода

Брод у пловидби изазива поремећаје у својој околини, води и ваздуху. Маса воде и ваздуха пружају отпор његовом кретању. Отпор брода је сила којом се средина супроставља праволинијском тегљењу брода константном брзином. Другим речима, отпор брода је сила тегљења, односно сила потребна за одржавање константне брзине пловидбе без кориштења пропулзора. Наиме, пропулзори повећавају укупни отпор брода тако да је отпор брода којег покреће пропулзор већи од отпора брода који је тегљен. Ако на подводном делу трупа нема никаквих изданака, онда се говори о отпору голог трупа [34].

Снага потребна за свладавање овог отпора назива се ефективном снагом или снагом тегљења и изражава се следећом формулом:

$$P_E = R_T \cdot v \quad (6.1)$$

Овде је потребно напоменути да се брзина брода у бродограђевно-поморској терминологији изражава у чворовима због чега је треба претварати у m/s према следећој једнакости:

$$1 \text{ чвор} = 1 \frac{Nm}{h} = \frac{1852,3}{3600} \frac{m}{s} \approx 0,5144 \frac{m}{s} \quad (6.2)$$

Када је у питању пловидба брода на реци брзина брода се најчешће изражава у km/h.

Укупни отпор састоји се од неколико компоненти чији су узроци веома различити, а узајамно деловање појединих компоненти укупног отпора представља врло комплексан проблем.

Због тога је потребно најпре расчланити укупни отпор брода у мирној води на следећи начин:

- Отпор трења,

- Отпор таласа,
- Отпор вртложења и
- Отпор ваздуха.

Отпори трења, таласа и ваздуха биће детаљније обрађени, а због специфичности пловидбе брода на реци посебно ће бити објашњен утицај дубине воде и пресека (ширине) пловног пута.

Отпор вртложења настаје стварањем вртлога на трупу брода и његовим изданцима. Локално вртложење јавља се иза изданака као што су ногавице, вратила и скрокови. Локално вртложење може се појавити и на крменом делу трупа или кормилу, ако на тим местима није постигнуто добро опструјавање трупа. Ако је крмено заобљење мало, вода неће моћи пратити закривљење на крменом делу брода што ће резултирати стварањем вртлога те повећавањем отпора услед сепарације граничнога слоја.

#### 6.1.1.1. Отпор трења

Отпор трења настаје због кретања трупа брода кроз вискозан флуид и резултанта је деловања сила у смеру тангенте на сваки део трупа.

Испитивањима је установљено да код нових бродова мање брзине, поприлично глатке површине отпор трења износи 80 до 85 % укупног отпора, док код бродова веће брзине отпор трења може износити до око 50 % укупног отпора [32]. Свака неравнина на подводном делу оплате трупа повећаће ће отпор трења значајно изнад отпора трења глатке површине. Због тога, на отпор трења највише делује напредовање корозије и обрастање трупа. Повећањем отпора трења мењају се карактеристике суструјања и пропулзије.

На темељу бројних испитивања у базенима бродарских института и помоћу коефицијената за опис трупа, развијене су различите методе прорачуна силе вискозног отпора. Сваки од тих прорачуна мора бити и експериментално испитан на моделу брода пре коначног пројекта брода. Сила отпора вискозног трења је:

$$R_F = C_F \cdot A_S \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}. \quad (6.3)$$

Сила отпора брода због вискозног трења пропорционална је квадрату брзине пловидбе.

#### 6.1.1.2. Отпор таласа

Отпор таласа настаје због формирања система таласа на површини мирне воде који су последица промена хидродинамичког притиска уздуж бродског трупа и резултанта је деловања сила у смеру нормале на сваки део трупа.

Дубоко уроњена тела, која се крећу праволинијски константном брзином не могу стварати таласе на површини, иако на њих, такође, делују силе притиска нормалне на површину тела.

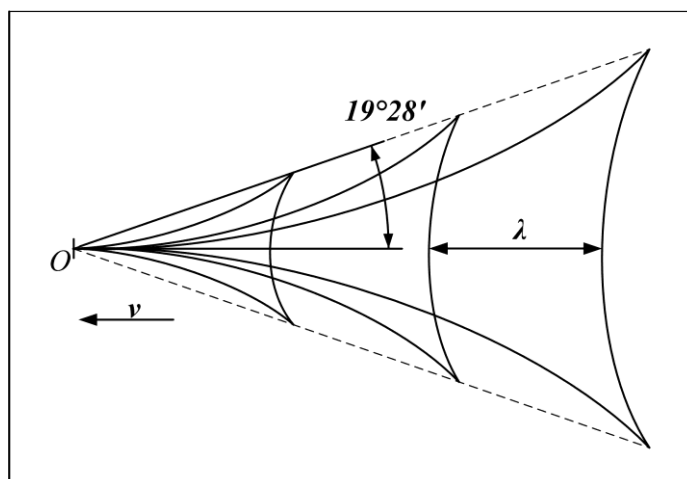
Ако тело плови на површини или близу површине, промена притиска уздуж оквашене површине проузроковаће таласе, који ће опет бити узрок изменама у расподели притиска дуж исте површине. Због тога ће постојати разлика резултатних сила на предњем и задњем делу тела (прамцу и крми) која се назива отпором таласа.

Израчунавање силе отпора таласа врши се на сличан начин као и код силе трења, применом коефицијента отпора таласа  $C_U$  уз напомену да вредност тог коефицијента зависи од брзине пловидбе и дужине брода:

$$R_U = C_U \cdot A_S \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (6.4)$$

Секундарни таласи се појављују кад материјална тачка крећући се површином воде пређе прву критичну брзину, која износи  $v'_k = 0,233 \text{ m/s}$ . Код брзина мањих од  $v'_k$  преовлађује капиларни напон и не долази до стварања таласа [35].

Код већих брзина, изнад прве критичне брзине  $v'_k$ , појављују се гравитациони таласи. Гравитациони таласи се јављају до друге критичне брзине  $v''_k$ , тј. док нема појаве динамичког узгона. Гравитациони таласи су унутар угла од  $19^\circ 28'$  као што је приказано на слици 6.1.



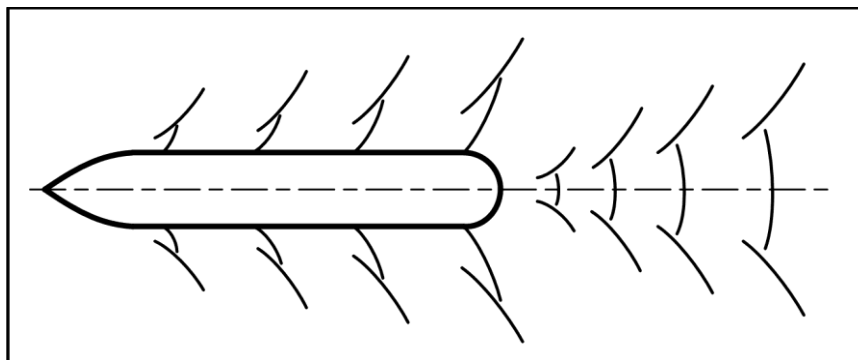
Слика 6.1. Гравитациони таласи

Док попречни (трансверзални) таласи релативно брзо ишчезавају, разизлазни (дивергентни) таласи веће су висине и знатно су израженији на већој удаљености од брода. Поред прамца брода најочљивији су разизлазни таласи. Они се шире тако да на прамцу настају већи таласи иза којих се формирају остали таласи закривљени уназад, што се види на слици 6.2.

Између појединих разизлазних таласа настају трансферзални таласи. Њихове контуре брегова су нормалне на правац пловидбе брода. Приближавајући се разизлазним таласима, трансверзални таласи се све више савијају да би се на крају спојили заједно са њима.

Исти таласи настају и на крми брода, међутим они често нису добро уочљиви због јасне доминације прамчаних таласа.

Трансверзални таласи крећу се у истом смеру и истом брзином као и брод. Због тога би се могло очекивати да имају дужину слободних таласа.



Слика 6.2. Систем таласа које ствара брод у пловидби

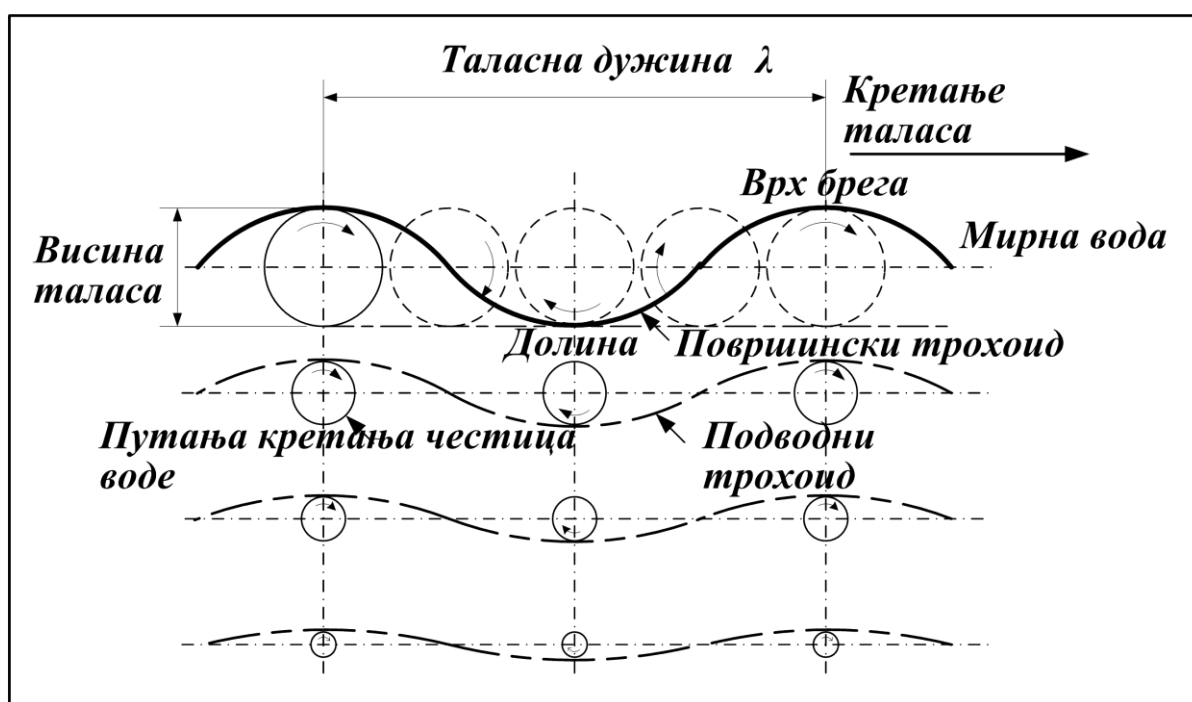
Келвин је 1890. године дао математичко решење таласа које се потпуно подудара са опажањима. Удаљеност врхова два узастопна попречна таласа одговара теоретској дужини  $\lambda$  нормалног трохоидног таласа који се креће брзином  $v_0$ .

$$\lambda = \frac{2\pi}{g} \cdot v_0^2 \cong 0,64v_0^2 \quad (6.5)$$

Брзина таласа може се проматрати у зависности о односу  $h_v/\lambda$ , где је  $h_v$  дубина воде, а  $\lambda$  је таласна дужина, која представља растојање између врхова два суседна брега.

На дубокој води профил таласа је трохоида настала из кружне путање (слика 6.3). Брзина таласа одређена је изразом [36]:

$$v_0 = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h_v}{\lambda}}. \quad (6.6)$$



Слика 6.3. Изглед таласа на дубокој води

У дубокој води када је однос дубине воде и дужине таласа  $h_v/\lambda$  велики и износи приближно  $h_v/\lambda \geq 1/2$ ,

$$\left( \tanh \frac{2\pi h_v}{\lambda} \right) \rightarrow 1,0 \quad (6.7)$$

па је брзина простирања таласа једнака:

$$v_0 = \sqrt{\frac{g \cdot \lambda}{2\pi}} \cong 1,25\sqrt{\lambda}. \quad (6.8)$$

На укупни систем таласа код брода највећи утицај има нагло повећање притиска на прамцу и на крми, као и смањење притиска на боковима брода.

Брод који ствара велике таласе није добар, јер губи велику енергију управо на стварање таласа. Прамчани талас се ствара од позитивног, а крмени од негативног система тачака притиска. Прамчани талас почиње врхом иза кога следи долина, а крмени талас



почиње долином иза које следи врх таласа. Прамчани талас на некој удаљености прати крмени талас. Резултирајући систем таласа настаје преклапањем (суперпонирањем) таласа ова два система. Укупан отпор (губитак енергије) није прост збир ова два система. Због појаве интерференције оба система таласа укупан отпор може бити већи или мањи, што зависи од расподеле брегова и долина таласа. По Келвиновој теорији прамчани и крмени таласи чине систем два трохидна таласа једнаке дужине  $\lambda$ , а различитих висина  $h_1$  и  $h_2$  на међусобном растојању " $a$ ". Висина резултујућег таласа  $h$  је одређена изразом:

$$h = \sqrt{h_1^2 + h_2^2 + 2 \cdot h_1 \cdot h_2 \cdot \cos \frac{2\pi a}{\lambda}}. \quad (6.9)$$

Одавде се види да резултујућа висина таласа може бити највише  $h_1 + h_2$ , а најмање  $h_1 - h_2$ , према томе да ли је растојање врхова

$$a = n \cdot \lambda \quad (6.10)$$

или

$$a = (n - 1/2) \cdot \lambda \quad (6.11)$$

где  $n$  може бити било који цео број.

Енергију за одржавање система таласа даје брод, а она је пропорционална квадрату висине таласа што значи да је отпор стварања таласа директно зависан од функције косинуса у изразу (6.9).

Вредност ове функције је зависна од односа дужине и неке функције брзине. Ову констатацију потврђује и појава "грбе" на кривој отпора у функцији брзине. "Грба" на кривој показује пораст отпора при неким брзинама.

Укупна енергија  $E_{tot}$  у неком систему таласа за трохидни талас мале висине у односу на дужину се може приближно узети:

$$E_{tot} = n \cdot b \frac{h^2 \lambda}{8} \cdot g. \quad (6.12)$$

### 6.1.1.3. Утицај дубине воде

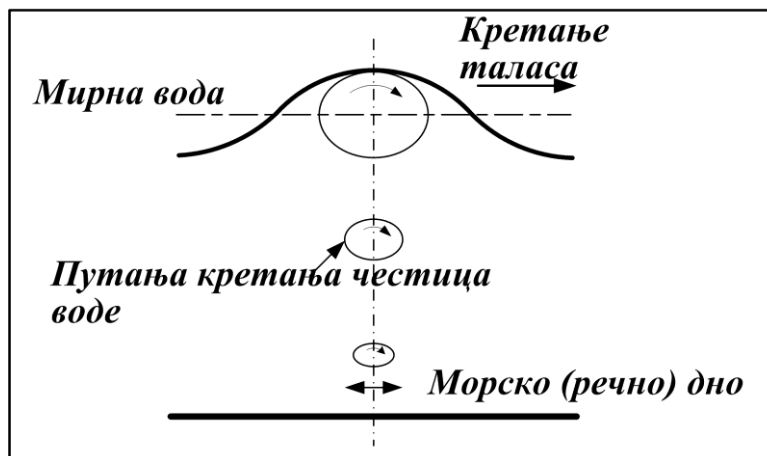
Када брод плови у води мале дубине, која се назива плитка вода, дешава се низ промене због интеракције између брода и дна. Кретање честица воде које прамацем потискује брод и "вуче" их за собом, преноси се преко осталих честица воде према дну где настаје трење воде о дно [35].

Због ове појаве повећава се отпор брода који расте с порастом брзине брода. Због овог отпора смањује се брзина брода, а упоредо са смањењем брзине брода опада и број обртаја пропелера. Другим речима да би се задржао број обртаја пропелера и брзина брода потребно је повећање снаге погонских мотора.

Поред наведеног, утицај плитке воде огледа се и у смањењу брзине простирања таласа и у повећању њихове висине. Ово се нарочито пдноси крмени талас, због појаве да честице воде, потиснуте бродским дном, настоје да „изроне” иза крме брода.

На плиткој води стварају се трохидни таласи са елиптичним осама  $a$  и  $b$ , где је  $a > b$  (слика 6.4) [36]. Брзина распростирања таласа ( $v_0$ ) је у том случају:

$$v_0 = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h_v}{\lambda}} = \sqrt{v \tanh \frac{2\pi h_v}{\lambda}} = v \sqrt{\frac{b}{a}}. \quad (6.13)$$



Слика 6.4. Изглед таласа у плиткој води

Одавде се види да је брзина таласа неке дужине мања у плиткој води него у дубокој. За случај да је дубина воде мања од половине дужине таласа ова се појава јасно уочава. За мало  $h_v$  у односу на дужину таласа  $\lambda$ , вредност фактора  $b/a$  се приближава граничној вредности:

$$\frac{2\pi h_v}{\lambda} \quad (6.14)$$

па је са тим одређена и гранична вредност брзине простирања таласа:

$$v'_{kk} = \sqrt{g \cdot h_v} \quad (6.15)$$

што значи да у плиткој води брзина ширења таласа  $v_0$  никад не може бити већа од брзине појединачног таласа  $v_k$ . Ова брзина не зависи од дужине таласа, већ је одређена једино дубином воде  $h_v$ . Овим се потврђује и разлог наглог пораста отпора брода (независно од величине) приближавањем другој критичној брзини  $v'_k = \sqrt{g \cdot h_v}$ .

За пројектанте бродова на ограниченим дубинама пловног пута ова чињеница је од великог значаја, јер доказује да друга критична брзина брода није условљена димензијама брода већ само дубином воде у пловном путу.

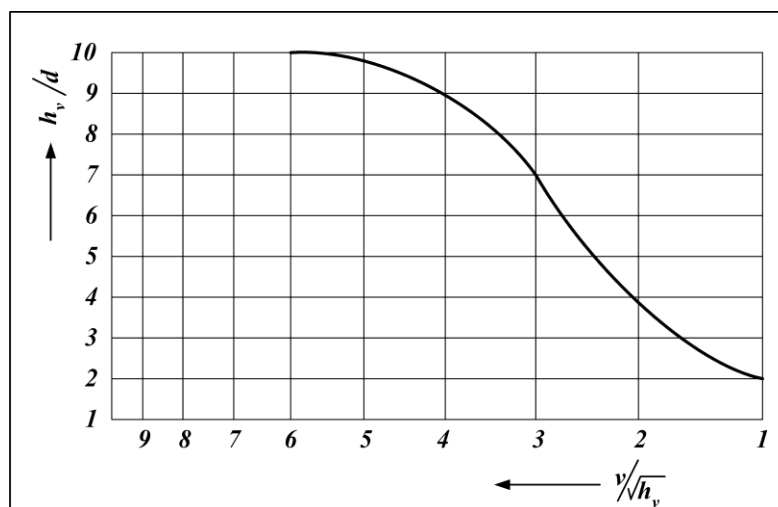
Смањењем дубине воде  $h_v$  повећава се угао прамчаног таласа ( $19^\circ 28''$ ) при приближавању другој критичној брзини  $v'_k$  тежи углу од  $90^\circ$ , уз све веће скупљање попречних таласа. Код критичне брзине  $v'_k = \sqrt{g \cdot h_v}$ , попречни таласи се скупе у један велики попречни усамљени талас.

Даљим повећањем брзине или смањивањем дубине воде овај усамљени талас не може да развије већу брзину од  $v'_k$ , те он нестаје, а остају само секундарни таласи чији се углови смањују повећањем брзине и брод почиње да глисира.

Утицај дубине је општи, тако да је и дубина у мору од 40 метара за брзе бродове ограничена дубина. Немачки научник Кемпф је овај утицај дубине дијаграмски представио у функцији брзине  $v$ , дубине воде  $h_v$  и газа брода  $d$  (слика 6.5).

Пловидбу пловним путем у условима мале дубине воде прати појава повећања газа тј. уроњења или динамичког спуштања брода [36]. Гледано са командног моста, ова појава се запажа као лагано издизање прамца уз истовремено спуштање крме. Брод испред себе гура водени брег, а иза крме вуче удубљење уз карактеристичан шум воде. Са стране брода настаје удубљење чија је средња дубина једнака износу уроњења брода на главном ребру.

Не сме се дозволити да удубљење иза брода дође у висину и пређе крму (шум воде мења интензитет), јер постоји опасност од наседања. Зато треба смањити брзину чим се удубљење приближи равни крме (крменом зрцулу).



Слика 6.5. Утицај ограничене дубине воде (према Кемпфу)  
 $d$  – дужина брода;  $h_v$  – дубина воде;  $v$  – брзина брода

Уроњење се јавља у свим случајевима пловидбе брзинама мањим или једнаким тзв. првој критичној брзини. Услед даљег повећања брзине брод прелази на глисирање, а појава уроњења сасвим исчезава. Величина уроњења зависна је не само од брзине пловидбе, већ и од међусобног односа дубине пловног пута и газа брода, затим од односа дубине и дужине брода и друго.

Током пловидбе критичном брзином при неповољном односу дубине и газа брода може доћи до наседања брода или његовог приљубљивања уз дно, што за последицу има оштећење трупа, односно пропелера или листа кормила. Да би се избегло наседање брода треба смањити брзину пловидбе.

#### 6.1.1.4. Отпор ваздуха

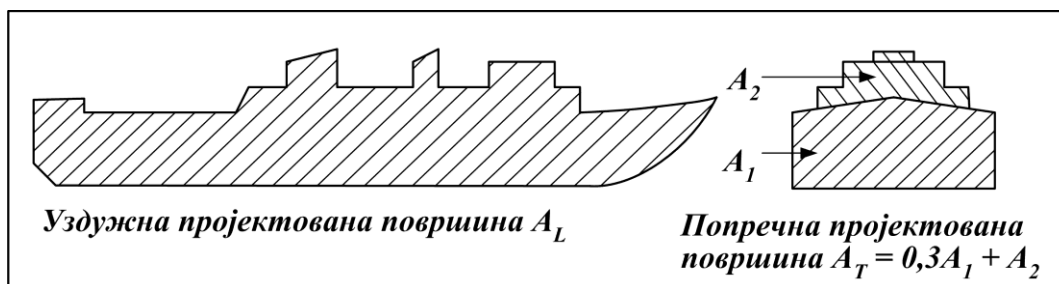
Отпор ваздуха настаје кретањем надводног дела брода кроз ваздух. Овај отпор може представљати врло значајан део укупног отпора поготово ако се ради о бродовима који се крећу већом брзином и који имају веће надграђе.

Отпор ваздуха зависи од релативне брзине брода у односу на ваздух и од површине надводног дела брода [34]. Због тога на отпор ваздуха утиче брзина брода и смер и брзина ветра. Ако ветар дува у прамац брода, релативна брзина ваздуха је сума брзине ветра и брзине брода. Отпор ваздуха надрагађа настаје првенствено због стварања вртлога око њега будући да надрагађа трговачких бродова увек често имају оштре ивице. Као што је познато, аеродинамично прилагођена надграђа изводе се само за врло брзе бродове. Према томе, отпор ваздуха надграђа расте с квадратом релативне брзине ваздуха, а утицаји Reynolds-овог броја могу се занемарити. За брод који пливи при мирном ваздуху, без ветра, отпор ваздуха може се одредити следећим изразом:

$$R_{AA} = coef \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_T \cdot v^2. \quad (6.16)$$

Кефицијент у изразу има вредност која зависи од облика трупа и његових изданака. На слици 6.6 приказана је уздужна  $A_L$  и попречна  $A_T$  пројектована површина надводног дела брода. Уздужна пројектована површина користи се за прорачун отпора ваздуха код бочног кретања брода (у маневру) и код бочног ветра. Као што се види са слике попречна пројектована површина надводног дела брода  $A_T$  једнака је суми 30% пројектоване

површине надводног дела трупа брода  $A_1$  и пројектоване површине надграђа  $A_2$ . Вредност 30% површине  $A_1$  узима се због аеродинамичног облика прамца брода.



Слика 6.6. Површина отпора ваздуха

Тачнији израз извео је Тејлор (Taylor, D. W.) 1943. год. предлажући да се отпор ваздуха уобичајених бродова при прамачном ветру може сматрати једнаким отпору равне плоче постављене нормално на смер кретања брода. Сматра се да је ширина  $B$  једнака ширини брода, а висина је једнака половини ширине брода. Према томе изводи се следећи израз:

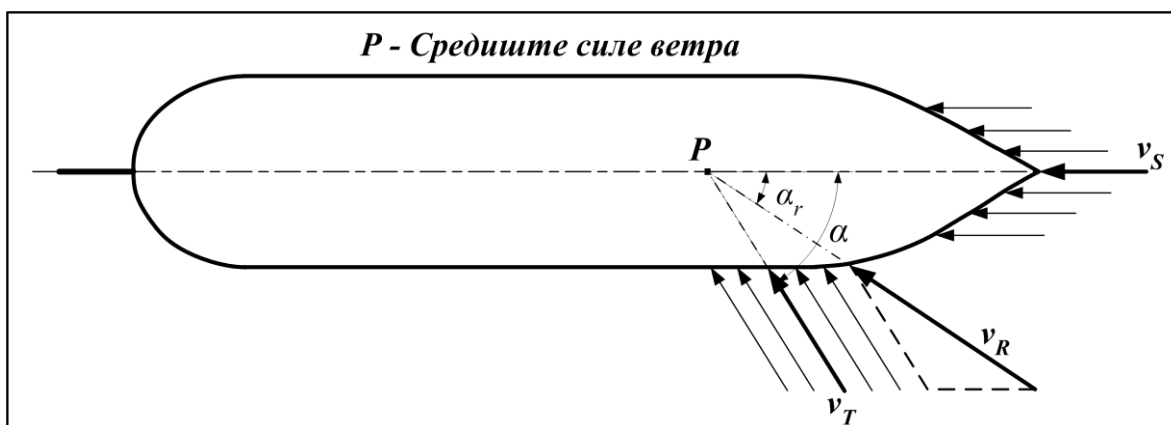
$$R_{AA} = 1,28 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_T \cdot v_R^2 = 1,28 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,223 \cdot \frac{1}{2} \cdot B^2 \cdot v_R^2 \quad (6.17)$$

Релативна брзина ваздуха одређује се векторски према слици 6.7. Дакле, према слици се изводе изрази за релативну брзину и релативни нападни угао ваздуха:

$$v_R = \sqrt{(v_s + v_T \cos \alpha)^2 + v_T^2 \sin^2 \alpha} \quad (6.18)$$

и

$$\alpha_r = \arctan \left( \frac{v_T \cdot \sin \alpha}{v_T \cdot \cos \alpha + v_s} \right). \quad (6.19)$$



Слика 6.7. Одређивање релативне брзине ваздуха

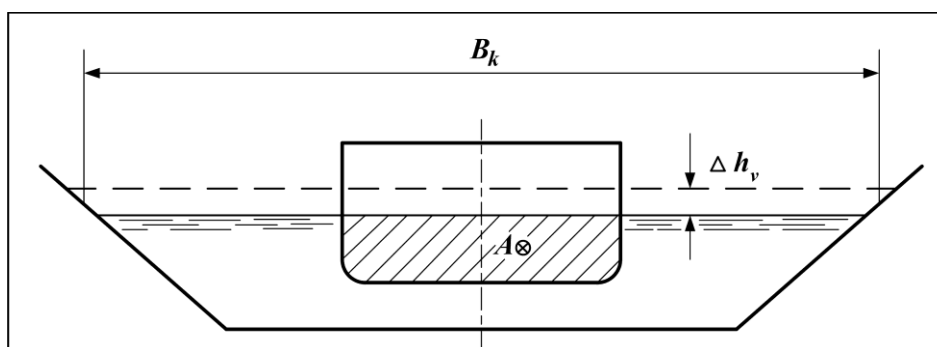
Уздужни отпор ваздуха се одређује према следећем изразу:

$$R_{AA} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{va} \cdot v_R^2 \cdot C_{AAW} \cdot A_T. \quad (6.20)$$

#### 6.1.1.5. Утицај ограниченог пресека пловног пута

Величина површине попречног пресека пловног пута, кад је поред дубине ограничена и ширина, још драстичније утиче на отпор брода.

При кретању брода ограниченим пловним путем настаје повећање отпора трења и пад нивоа површине воде, јер брод ради у таквом пресеку као клип са повећаним таласом на прамцу и повећаном брзином струјања око брода (слика 6.8).



Слика 6.8. Брод у каналу – попречни пресек  
 $B_k$  – ширина канала;  $\Delta h_v$  – промена дубине воде;  
 $A_{\otimes}$  – површина пресека главног ребра у води

К. Хелм је проучавао утицај ограничене дубине и пресека канала у Хамбуршком институту (HSVA) [35] и установио, на основу бројних испитивања, да повећање отпора у каналу настаје услед:

- смањења дубине,
- повећања отпора трења као последице повећане брзине струјања око брода и
- смањења критичне брзине таласа у каналу у односу на неограничену ширину пловног пута.

Друга критична брзина у каналу је на основу тога изведена заменом дубине воде  $h_v$  хидрауличним радијусом  $R_h$ , тј. у облику:

$$v_k'' = \sqrt{g \cdot R_h} = \sqrt{g \frac{A_k - A_{\otimes}}{U_k + U_{\otimes}}}. \quad (6.21)$$

### 6.1.2. Снага и коефицијент корисности погона

Како би се брод довео у стање кретања потребно је произвести силу која ће савладати силу отпора. Та се потребна сила добија направама или механизмима који се уопштено називају пропулзорима. Најстарији пропулзори су весла и једра. Једро се као пропулзор примењује од старог Египта до данас, у разним облицима, комбинацијама и димензијама [38].

Механичка пропулзија је релативно млада, а почиње највероватније бродским колом спојеним на парну машину. 19. век је обележен као раздобље парне клипне машине са точковима као пропулзорима. Точкови са лопатицама као мање ефикасне пропулзоре истискује бродски вијак - пропелер. Прва се практична примена приписује американцу Стивенсу (Stevens) 1804. године који је испитивао бродић дужине 7,5 m.

Џозеф Расел (Josef Ressel) спровео је 1828. године испитивање у Трсту на броду дужине 18 m. Пробна вожња је трајала око 10 минута након чега је експлодирала цев за пару. Тај вијак је имао, као и низ касније патентираних, облик Архимедова пужа. Једно од значајнијих решења је Шмитов (Smith) вијак. Демонстрирајући пловидбу с вијком облика дугачке спирале  $2 \cdot 2\pi$  доживљава малу хаварију у којој се откинуо део спирале. Након хаварије брод је ишао брже, а Smith је на основу тога израдио другу, бољу варијанту. Око 1845. године пропелер је већ имао облик који је био веома сличан данашњем. Први брод с

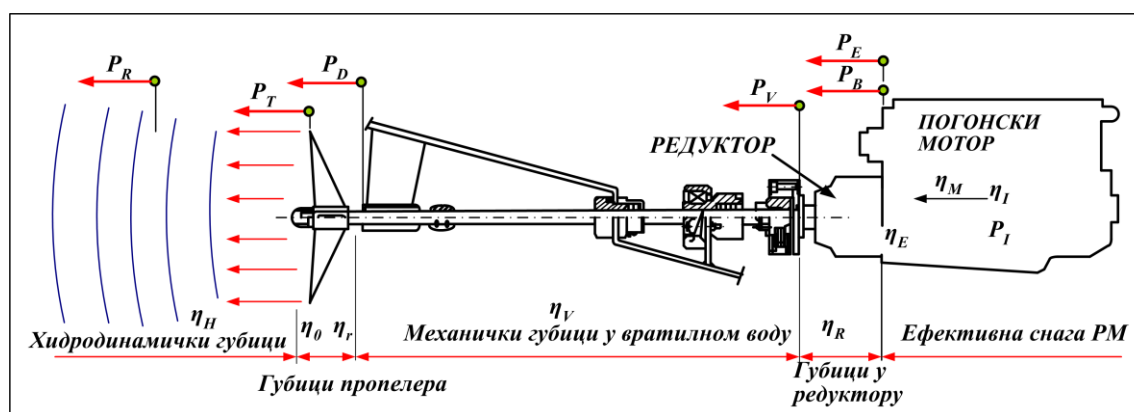
пропелером „Great Britain” прешао је Атлантик 1854. године означавајући почетак доба превласти бродског пропелера као најчешћег представника данашњих пропулзора.

У овом делу биће приказани основни појмови о снази и искористивости класичног дизел погона и дизел електричног погона, са пропелером као пропулзором.

### 6.1.2.1. Снага и коефицијент корисности дизел погона

Механичку енергију потребну за погон брода производи погонски мотор из хемијске енергије садржане у гориву. Укупна снага која се добија сагоревањем одређене количине горива у јединици времена назива се доведена снага и означава са  $P_{dov}$ . Доведену снагу мотор не може искористити у целости већ се део ње губи одвођењем топлоте у околину, хлађењем мотора и издувним гасовима [39].

Снага умањена за износ тих губитака зове се индицирана снага дизел мотора и означава се са  $P_I$ . Због механичких губитака у дизел мотору, снага мерена на прирубници коленастог вратила мања је од  $P_I$  и назива се кочена снага мотора  $P_B$ . Мотор снагу предаје преносницима снаге, тј. редуктору броја обртаја и вратилу које снагу предаје пропелеру. На слици 6.9 је приказан пренос снаге и врста губитака у погонском систему.



Слика 6.9. Пренос снаге и врсте губитака у погонском систему

$P_I$  – индицирана снага;  $P_B$  – кочена снага;  $P_E$  – ефективна снага;  $P_V$  – снага на вратилу иза редуктора;  $P_D$  – снага предата пропелеру;  $P_T$  – снага потиска;  $P_R$  – снага отпора;  $\eta_I$  – индицирани коефицијент корисности;  $\eta_M$  – механички коефицијент корисности;  $\eta_E$  – ефективни коефицијент корисности;  $\eta_R$  – коефицијент корисности редуктора;  $\eta_V$  – коефицијент корисности вратилног вода;  $\eta_r$  – коефицијент прелаза;  $\eta_0$  – коефицијент корисности пропелера у слободној возњи;  $\eta_H$  – коефицијент утицаја форме трупа.

Укупан коефицијент корисности погонског система зависи од више фактора: *forme брода, стања трупа, услова и режима пловидбе, врсти и конструкцији пропелера, врсти и конструкцији погонског мотора, врстама и конструкцијама преносника снаге као и њихове интеракције.*

Снага коју вратило предаје пропелеру означава се са  $P_D$  и мања је од снаге  $P_B$  за износ механичких губитака у редуктору и у лежајима вратила. Пропелер, због властитих губитака, није у стању да у потпуности искористити сву снагу за погон брода. Снага коју пропелер искориштава за савлађивање отпора и развијање брзине брода означава се са  $P_O$ . Претварање енергије и укупни пренос снаге у погонском систему дефинисани су различитим изразима.

Укупно доведена снага  $P_{dov}$  погонском дизел мотору дефинисана је изразом :

$$P_{dov} = B \cdot N_d \quad (6.22)$$

док је индицирана снага дизел мотора:

$$P_I = P_{dov} \cdot \eta_I. \quad (6.23)$$

Ефективна снага  $P_E$  представља снагу потребну за савладавање укупног отпора односно одржавање брзине брода

$$P_E = R_T \cdot v. \quad (6.24)$$

Кочена снага  $P_B$  дизел мотора је снага измерена на кочници при испитивању мотора на испитном столу и одређена је изразом:

$$P_B = 2\pi M n. \quad (6.25)$$

Кочена снага може се изразити и помоћу индициране снаге и механичких губитака исказаних механичким коефицијентом корисности  $\eta_M$

$$P_B = P_I \cdot \eta_M. \quad (6.26)$$

Кочена снага се преко вратилног вода преноси на пропелер. Систем вратилног вода чине:

- редуктор броја обртаја са укључно – искључном и прекретном спојницом,
- вратило (и међувратила),
- еластична спојница и
- лежаји вратилног вода.

Губици снаге у вратилном воду имају карактер механичких губитака. Укупни коефицијент корисности вратилног вода  $\eta_W$  једнак је производу коефицијента корисности редуктора  $\eta_R$  и коефицијента корисности осталог дела система вратилног вода (вратила, спојница и лежаји)  $\eta_v$ :

$$\eta_W = \eta_R \cdot \eta_v. \quad (6.27)$$

Предата снага  $P_D$  представља снагу коју вратилни вод предаје пропелеру:

$$P_D = P_B \cdot \eta_W = P_V \cdot \eta_v. \quad (6.28)$$

Снага предата пропелеру може се изразити и на следећи начин:

$$P_D = 2\pi M_Q n. \quad (6.29)$$

Коефицијент корисности пропелера  $\eta_0$  представља однос између предате снаге  $P_D$  и снаге потиска у „слободној вожњи”  $P_O$ :

$$\eta_0 = \frac{P_D}{P_O}. \quad (6.30)$$

Снага потиска пропелера у „слободној вожњи”  $P_O$  једнака је производу силе потиска пропелера у „слободној вожњи”  $F_O$  и брзине напредовања слободног пропелера  $v_A$ :

$$P_O = F_O \cdot v_A. \quad (6.31)$$

Када пропелер ради на крми брода, услови рада се мењају у односу на услове рада у „слободној вожњи”. Услед струјања воде око бродског трупа долази до промене поља притиска и поља брзина на крми брода што утиче на величину укупног коефицијента корисности погона  $\eta_D$ , који је сада једнак производу коефицијента корисности пропелера  $\eta_0$ , коефицијента утицаја форме трупа  $\eta_H$  и коефицијента прелаза  $\eta_r$  (корелација „слободан пропелер” – пропелер на крми брода):

$$\eta_D = \eta_0 \cdot \eta_r \cdot \eta_H = \frac{P_R}{P_D}. \quad (6.32)$$

Коефицијент утицаја форме трупа  $\eta_H$  представља однос између снаге отпора  $P_R$  и потисне снаге пропелера  $P_T$  и дефинисан је следећим изразом:

$$\eta_H = \frac{P_R}{P_T} \quad (6.33)$$

Снага потиска пропелера на крми  $P_T$  дата је следећим изразом:

$$P_T = P_D \cdot \eta_0 \cdot \eta_r \quad (6.34)$$

Укупни коефицијент корисности потисног система  $\eta_T$  одређен је следећим изразом:

$$\eta_T = \eta_I \cdot \eta_M \cdot \eta_W \cdot \eta_0 \cdot \eta_r \cdot \eta_H \quad (6.35)$$

Укупни коефицијент корисности може се изразити и следећим односима снага у систему погона:

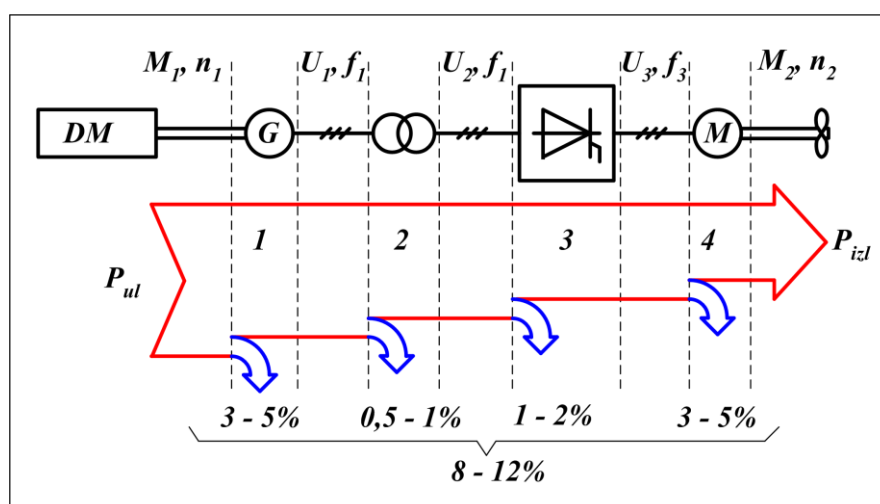
$$\frac{P_E}{P_{dov}} = \frac{P_I}{P_{dov}} \cdot \frac{P_B}{P_I} \cdot \frac{P_D}{P_B} \cdot \frac{P_T}{P_D} \cdot \frac{P_R}{P_T} \quad (6.36)$$

Искористивост знатно варира међу великим бројем типова пропелзора који се данас уграђују на разне врсте пловних објеката. Међутим, искористивост пропелера јако је тешко достићи, што је главни разлог његовог одржања у савременом поморском транспорту.

#### 6.1.2.2. Снага и искористивост дизел електричног погона

У концепцији брода с потпуно интегрисаним електроенергетским системом (IFEP - Integrated Full Electric Ship), коју карактерише једна електрична централа с константном фреквенцијом и напоном мреже, те регулација броја обртаја погонских електромотора помоћу статичких претварача напона и фреквенције, систем електричног преноса снаге на бродски вијак претпоставља четири степена конверзије енергије (слика 6.10) [1]:

1. *механичко-електричну конверзију у синхроним генераторима,*
2. *трансформацију напона у погонским трансформаторима,*
3. *регулацију фреквенције и напона у погонским претварачима фреквенције и*
4. *електричко-механичку конверзију у погонским електромоторима.*



Слика 6.10. Снага губитака у систему дизел електричног преноса

Из дијаграма губитака у систему дизел електричног преноса снаге, приказаног на слици 6.10 може се видети да се, и поред врло високог степена корисности појединих елемената у систему електричног погона, ипак у електричном преносу енергије до



бродског пропелера укупно изгуби између 8 и 12 % снаге [40]. У поређење с директним механичким погоном код које се, зависно од броја обртаја, дужине вратилног вода и тога да ли је примењен редуктор, губи између 2 и 4% снаге [41], електрични пренос је, енергетски гледано, лошији избор.

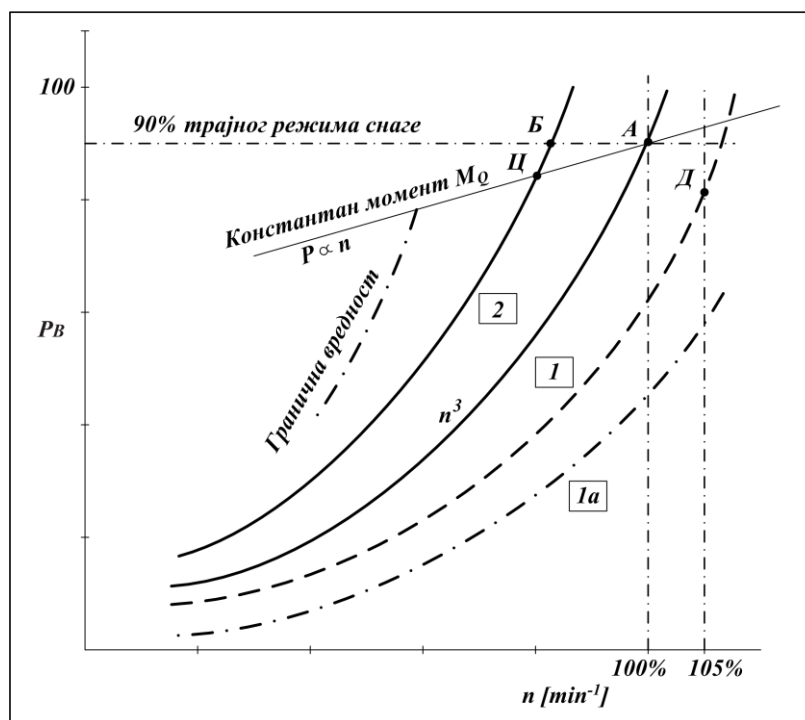
Предност електричног погона је, међутим, садржана у добијању брода са бољим маневарским карактеристикама и у могућности повећања коефицијента корисности на почетку и на крају погонског ланца. Због ниског коефицијента корисности погонских машина и бродског пропелера, управо се на поменутим местима може постићи највеће смањење губитака, а тиме и значајне уштеде на трошковима горива.

### 6.1.2.3. Избор оптималног пропелера

Значајна побољшања укупног коефицијента корисности, у оквирима стандардних изведби погонских система на модерним бродовима, постиже се углавном правилним избором пропелера. Заједнички рад пропелера и погонског мотора треба бити такав, да се радна тачка дизел мотора увек налази унутар дизелског подручја рада за које је тај мотор предвиђен, како би се повећали укупан коефицијент корисности и економичност погонског система [42]. За правилно искориштење могућности мотора, треба омогућити постизање максималног броја обртаја на коме мотор има максималну снагу.

Ако пропелер ускладимо са максималним бројем обртаја, при редуковању броја обртаја за неки проценат, снага мотора ће се смањити у складу са пропелерском кривом. Другим речима, момент на вратилу неће бити у складу са кривом момента мотора него мањи – мотор ће бити растерећен.

На слици 6.9 су приказане одговарајуће карактеристичне криве мотора и пропелера [36].



Слика 6.9. Карактеристичне криве мотора и пропелера

За константан обртни момент (нпр. максимални обртни момент)

$$P = 2\pi n M_Q \quad (6.37)$$

из чега произилази да је снага пропорционална броју обртаја  $P \rightarrow n$ , слика 6.10. Ако обртни момент није константан претпоставља се да се снага мења по кубној параболи у

функцији броја обртаја  $P(= 2\pi n M_Q) \rightarrow n^3$ , из чега произилази да је обртни момент пропорционалан квадрату броја обртаја

$$M_Q \rightarrow n^2 \quad (6.38)$$

што значи да је коефицијент обртног момента  $K_Q$  константан ( $K_Q = M_Q / \rho n^2 D^5$ ). Ако се зна да је коефицијент напредовања пропелера са фиксним крилима  $J$  ( $J = v/nD$ ) константан, тада је и коефицијент потиска пропелера  $K_F$  константан ( $K_F = F/\pi n^2 D^4$ ). Ако је  $K_F$  константан, тада  $F \rightarrow n^2$ , али ако  $J$  је константан,  $n^2 \rightarrow v^2$  и  $F \rightarrow v^2$  (или  $R \rightarrow v^2$  за стално смањење силе потиска  $F$ )  $R \rightarrow v^2$  је оправдана претпоставка у нормалном опсегу брзине за депласманске бродове, и зато је  $P \rightarrow n^3$  оправдана претпоставка, а израз за снагу је:

$$P_D = M \cdot \omega = K \cdot n^2 \cdot \frac{\pi \cdot n}{30} = K_1 \cdot n^3 \quad (6.39)$$

Треба напоменути, међутим, да се индекс броја обртаја мења за различите бродове, нпр. бродове великих брзина или споре депласманске бродове, у ком случају  $P \rightarrow n^x$ , где  $x$  неће нужно бити 3 и генерално ће бити између 2,5 до 3,5.

Типично, претпоставља се да оператер неће оставити мотор на подручју вишем од 90% његовог трајног режима снаге у експлоатацији без ограничења (continuous service rating - CSR).

Као што је већ показано карактеристика бродских дизел мотора се обично заснива на „пропелерској карактеристици”, за коју претпостављамо да је  $P \rightarrow n^3$ , што је прихватљиво за већину депласманских бродова. Са  $n^3$  је означена основна крива снаге и она пролази кроз тачку А.

Приликом пројектовања пропелера за такозвани чист труп и мирну воду, уобичајено је да се стварна пропелерске крива задржи десно од криве мотора (линија  $n^3$ ), као што је приказано кривом [1], како би се омогућили ефекти будућег обрастања и лошег времена. У случају криве [1] се каже да је корак лак. Ако се корак смањује и даље, линија ће се померити на криву [1a], итд.

Ако труп брод обрасте или се брод нађе у невремену, крива [1] ће се померити у лево, прво до криве  $n^3$  и онда даље на криву [2]. Потребно је напоменути да у случају криве [2], максимална доступна снага у тачки Б сада није доступна због крајње границе обртног момента, а максимална радна тачка је Ц што узрокује смањење снаге, а самим тим брзине брода.

Потребно је напоменути, такође, да је горња граница броја обртаја за криву [1], у тачки Д на 105% максималног броја обртаја. У овом тренутку пуна доступна снага неће бити апсорбована за случај „чисти труп - мирна вода”, а пуна „пројектована” брзина неће бити постигнута. На сличан начин, ако брод има мања оптерећења, као што је мање стање баласта, крива [1] ће се померити удесно (нпр. ка криви [1a]) и опет, пуна снага неће бити доступна због ограничене брзине обртаја, а брзина ће се смањити.

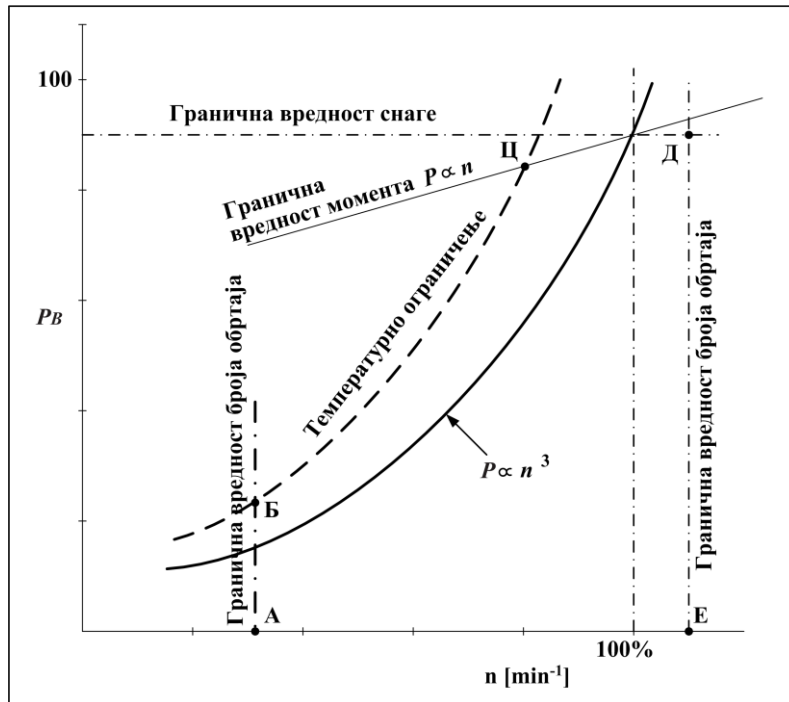
Ове карактеристике се морају разматрати при састављању уговорне пројектоване брзине брода (терет и баласт) и пробних брзина.

Претпоставка да је  $P \rightarrow n^3$  је дефинисана од стране произвођача мотора као „пропелерска карактеристика” и они пројектују своје моторе за најбољу ефикасност (нпр потрошња горива) у зависности о овој криви. То не мора да значи да пропелер заправо ради на овој криви, као што је раније речено.

Важно је да се поклапа број обртаја пропелера, обртни моменат и развијена снагу у сигурним радним границама уграђеног погонског мотора. Типична ограничења снаге,

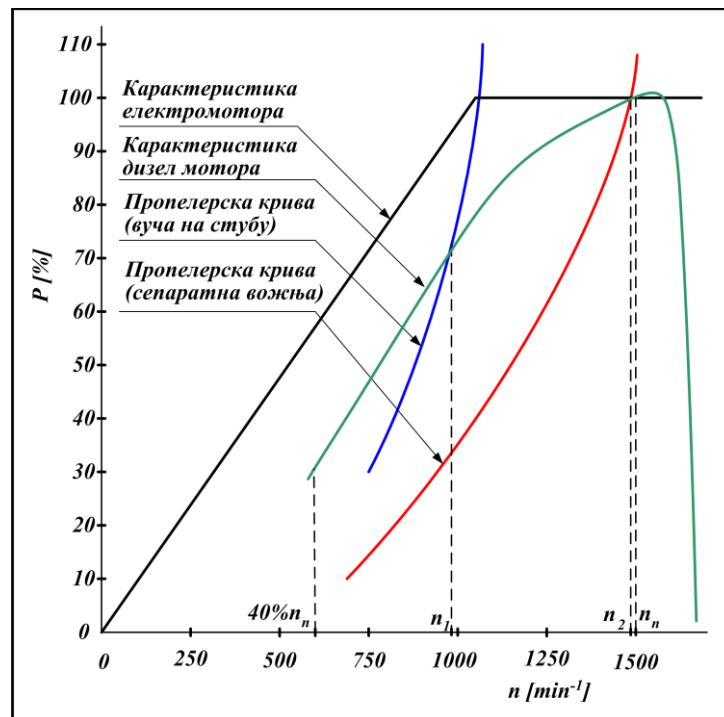
обртног момента и броја обртаја за дизел мотор су приказани на слици 6.10, у оквиру АБЦДЕ [36].

Треба напоменути да корак пропелера одређује са којим ће бројем обртаја пропелер, а тиме и мотор, радити. Сходно томе, пропелер (корак и обртаји) мора бити пројектован тако да је упарен са уграђеним мотором.



Слика 6.10. Ограничења снаге, обртног момента и броја обртаја дизел мотора [36]

У односу на остале варијанте преноса снаге од погонске машине до пропелера, електрични погон има неколико предности који се могу сагледати са дијаграма на слици 6.11 [43].



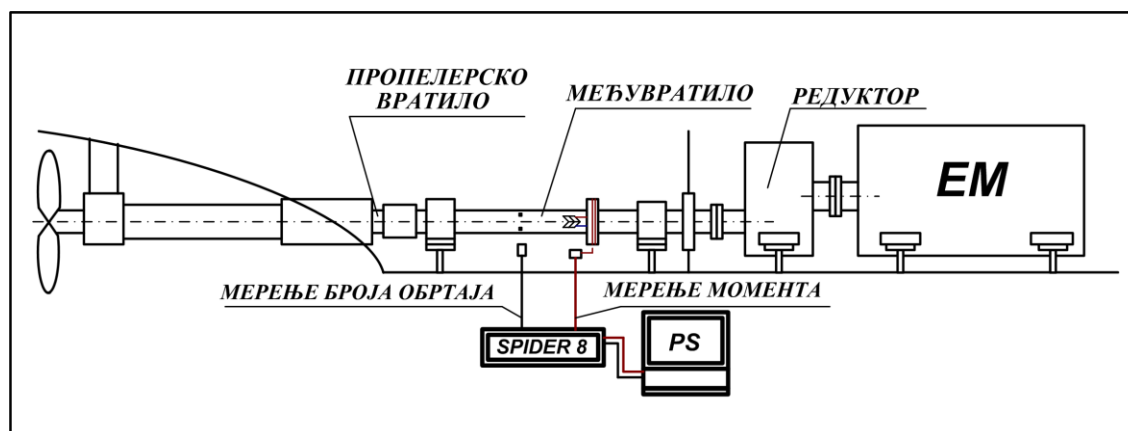
Слика 6.11. Карактеристике пропелера, дизел мотора и електромотора

Са дијаграма на слици 6.11 могуће је видети да се погонском дизел мотору, а који се најчешће користи на унутрашњим водама, може мењати брзина у опсегу од око 40%  $n_n$  до 100%  $n_n$  (од празног хода до режима 100% номиналног броја обртаја). Брзину изнад овог опсега могуће повећати само у краткотрајно, најчешће до 110%  $n_n$ . Није могуће чак ни смањити брзину обртања испод овог опсега, јер долази до заустављања погона. Криве оптерећења брода често се веома разликују. Пример је пун или празан гурачки састав или реморкер у слободној вожњи или у тегљу. На слици су приказана два случаја пропелерске криве, за вучу на стубу када је пропелер „најтежи” и за самосталну (сепаратну) вожњу брода за коју је пропелерска крива кубна парабола у функцији броја обртаја.

Код електромоторног преноса снага са брзином обртања пропелера линеарно расте до номиналне вредности, а од те тачке је могуће повећати брзину обртања и до 60% изнад номиналне, при чему се нормално, снага задржава на сталној, номиналној вредности. Последица тога је да електромотор може да ради на 100% снаге за све случајеве пропелерске криве, за разлику од дизел мотора који за случај пропелерске криве за вучу на стубу може да ради на бројевима обртаја од празног хода до броја обртаја  $n_1$ . У овоме се огледа највећа преденост електромотора као погонског уређаја.

Када се врши замена погона новим типом погона, при чему се задржавају стари бродски пропелери, нови погонски мотори се морају ускладити са пропелерима. Мерењем снаге на пропелерском вратилу може се проверити како су усклађени пропелер и погонски мотор. На слици 6.12 је приказан један аквизицијски систем за мерење снаге на вратилу.

Ради се о вишеканалном мобилним мерном систему СПАЈДЕР 8 (SPIDER 8) произвођача ХБМ (НВМ – Hottinger Baldwin Messtechnik), који је повезан са одговарајућим сензорима мерне траке типа 6/120 XY21 [44] и оптичким мерним системом типа АО1 за мерење броја обртаја [45].



Слика 6.12. Шематски приказ мерног ланца за мерење момента и броја обртаја

Приказаним системом се мери брзина обртања и обртни момент на пропелерском вратилу. Снага на вратилу, тј. апсорбована снага потрошача се израчунава на основу измерених вредности према формули:

$$P = \frac{2\pi \cdot n}{60} \cdot M_Q. \quad (6.40)$$

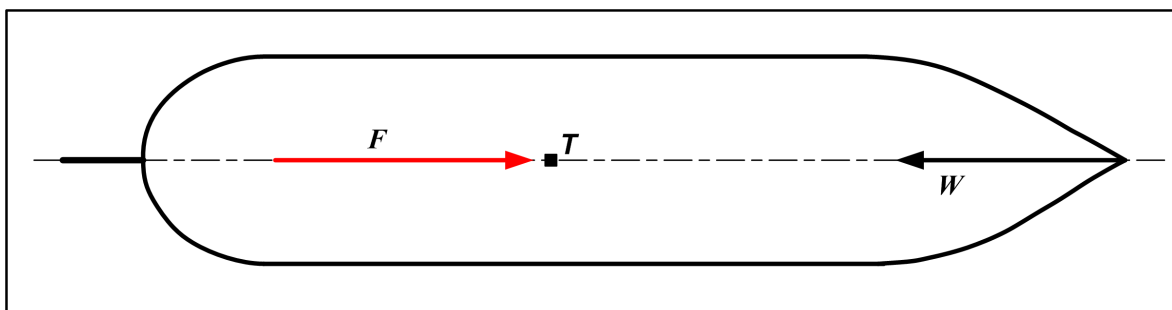
На основу измерених вредности снаге на пропелерском вратилу може се нацртати пропелерска крива и одредити константа  $K_1$  која зависи од особина пропелера.

### 6.1.3. Маневрисање бродом

Управљање бродом се остварује помоћу кормиларског уређаја. Под управљањем бродом подразумева се стабилност смера пловидбе, тј. способност да се жељени смер

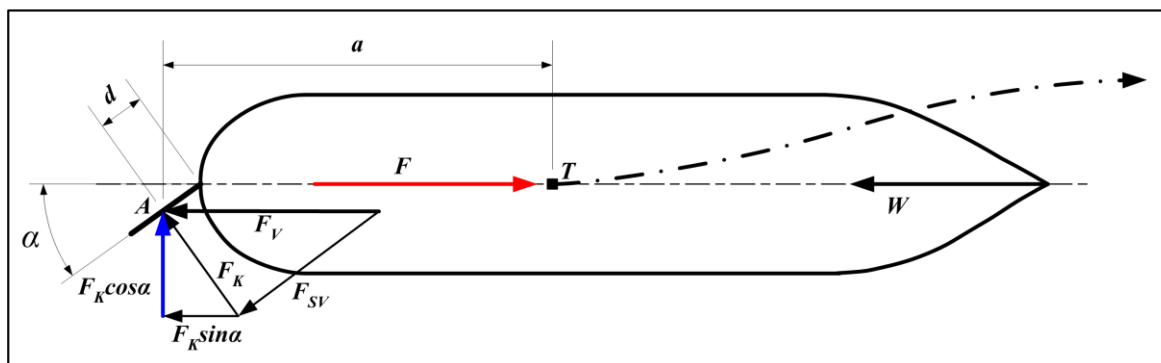
добро одржава, способност окрета, тј. тежња да се направи што мањи круг окрета, те осетљивост уређаја, односно способност да се брод из једног смера пловидбе брзо доведе у други смер [34].

Симетрични облик линија брода условљава једнако струјање воде са обе стране брода. Листови кормила у свом „0“ положају не ремете континуитет струјања све док се не отклоне за неки угао  $\alpha$  у односу на уздужну осу брода. Када је кормило у средишњем "нултом" положају на брод делује сила отпора  $W$  и сила потиска  $F$  (слика 6.13).



Слика 6.13. Силе на труп брода са кормилом у нултом положају  
 $F$  – потиска сила пропелера;  $W$  – отпор у правцу кретања брода

Када се кормило отклони од уздужне осе брода који плови, на њега делује струјање воде одређеном силом  $F_V$  коју чине сила струјања воде  $F_{SV}$  и хидродинамичка сила притиска на кормило  $F_K$ . Сила  $F_K$  је резултанта уздужног отпора  $F_K \sin \alpha$  (сила кочења) која смањује брзину брода и компоненте  $F_K \cos \alpha$  (сила кормиларења) која делује на лист кормила тако да настоји да га врати у основни положај (слика 6.14).



Слика 6.14. Силе на труп брода неопсредно по отклону кормила

$F_V$  – сила деловања воде на кормило;  $F_{SV}$  – сила струјања воде;  $a$  – угао отклона кормила,  $F_K$  – хидродинамичка сила притиска на кормило;  $F_K \cos \alpha$  – сила кормиларења;  $F_K \sin \alpha$  – сила кочења;  $d$  – крак силе у односу на осовину кормила;  $a$  – крак силе у односу на тежиште брода  $T$ ;  $F$  – потиска сила пропелера;  $W$  – отпор у правцу кретања брода

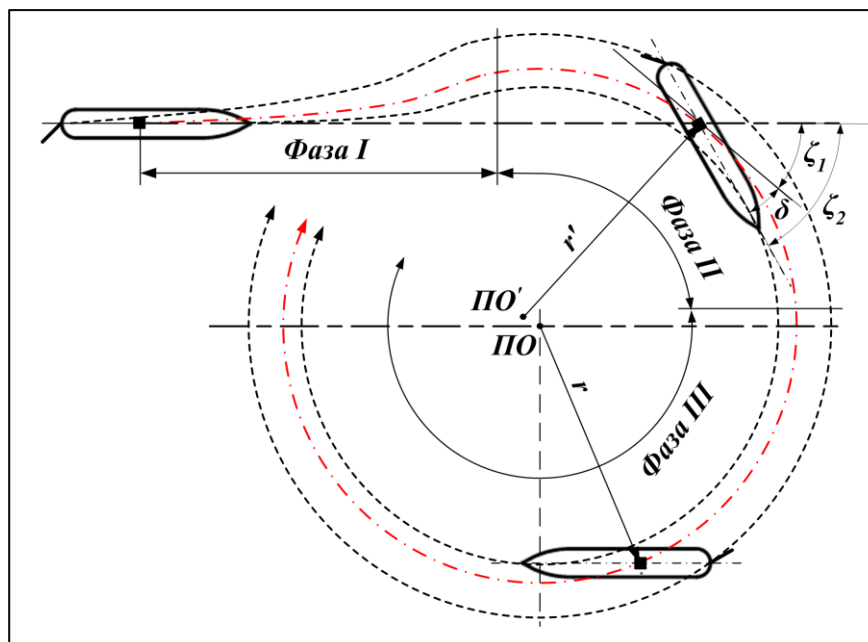
Компонента силе  $F_K \sin \alpha$  повећава отпор и успорава кретање брода, а попречна компонента  $F_K \cos \alpha$  производи бочно кретање и ствара момент  $M_K = F_K \cos \alpha \cdot a$ . Ова компонента мора савладати момент инерције брода са делом масе повучене воде, пре него што почне окрет брода око вертикалне осе кроз тежиште брода  $T$ . Силе на кормило делују у простору, али се посебно разматра деловање у хоризонталној и вертикалној равни [34].

### 6.1.3.1. Понашање брода у хоризонталној равни

Деловање силе  $F$  на брод расчлањује се на три фазе кретања у хоризонталној равни [35], које су приказане на слици 6.15:

- Фаза I или маневарски период почиње са закретањем кормила и завршава се када брод почне да се окреће око своје вертикалне осе.

- Фаза II или еволуциони период ја наставак фазе I и траје све време док се повећава угаона брзина окрета.
- Фаза III или период кружности окрета почиње када се угаона брзина брода устали тј. постане константна, а брод описује круг окрета одређеног полупречника.

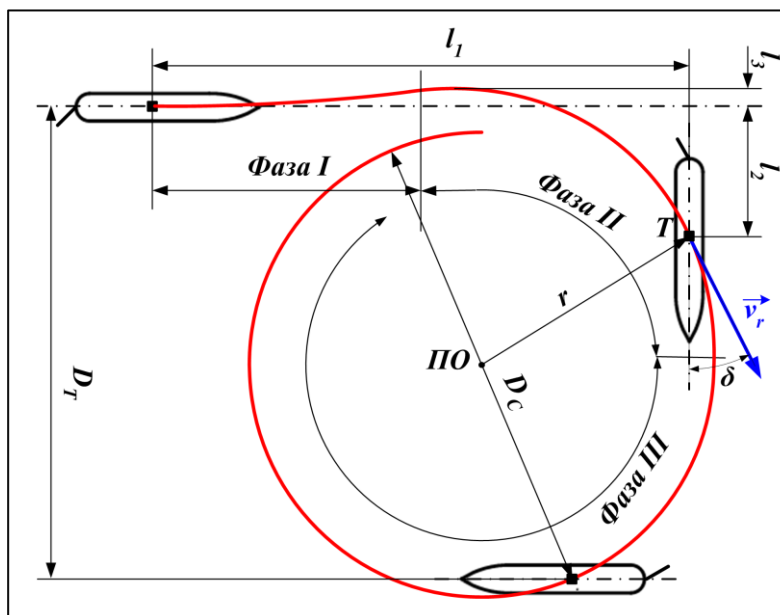


Слика 6.15. Фазе при окрету брода

$\delta$  – угао завлачења (деривације);  $\zeta_1$  – угао курса;  $\zeta_2$  – угао скретања (девијације)  
 $r'$  – променљиви полупречник круга окрета;  $PO$  – променљиви пол окрета;  
 $PO'$  – устаљени пол окрета;  $r$  – полупречник круга окрета

Основни параметри путање окрета брода су следећи [37, 46] (слика 6.16):

- Тактички пречник  $D_T$  који представља растојање између уздужне осе брода на почетку маневра и осе брода када се он закрене за  $180^\circ$ . Искусствено тактички пречник је за 1,1 до 1,2 пута већи од пречника круга окрета брода у III фази  $D_C$ ,
- Прелазна путања  $l_1$  представља пут који брод (тежиште брода) пређе од почетка маневра до тренутка када се закрене за  $90^\circ$ ,
- Позитивни бочни помак  $l_2$  представља растојање између уздужне осе брода на почетку окрета и тежишта брода када се он закрене за  $90^\circ$  и приближно је једнак 0,6 до 1,5  $D_C$ ,
- Негативни бочни помак  $l_3$  представља растојање између уздужне осе брода на почетку маневра и крајњег положаја брода у коме се нађе услед заносења супротном од смера окрета и приближно је 0,1  $D_C$ ,
- Брзина пловидбе брода  $v_r$ ,
- Угаона брзина тежишта брода  $\omega$ ,
- Време пуног окрета за  $360^\circ$   $t_{ук}$ ,
- Угао заносења (деривације) брода  $\delta$  који представља угао између смера брзине тежишта брода и уздужне осе брода.



Слика 6.16. Параметри путање окрета брода

$D_T$  - тактички пречник;  $l_1$  - прелазна путања;  $l_2$  - позитивни бочни помак;  
 $l_3$  - негативни бочни помак;  $D_C$  - пречника круга окрета брода у фази III;  
 $\delta$  - угао заносења (деривације) брода

### 6.1.3.2. Анализа деловања сила у појединим фазама

#### Фаза I

У фази I се брод бочно помера, испочетка на супротну страну од отклона листа кормила, затим почетком окрета започиње следећа фаза.

#### Фаза II

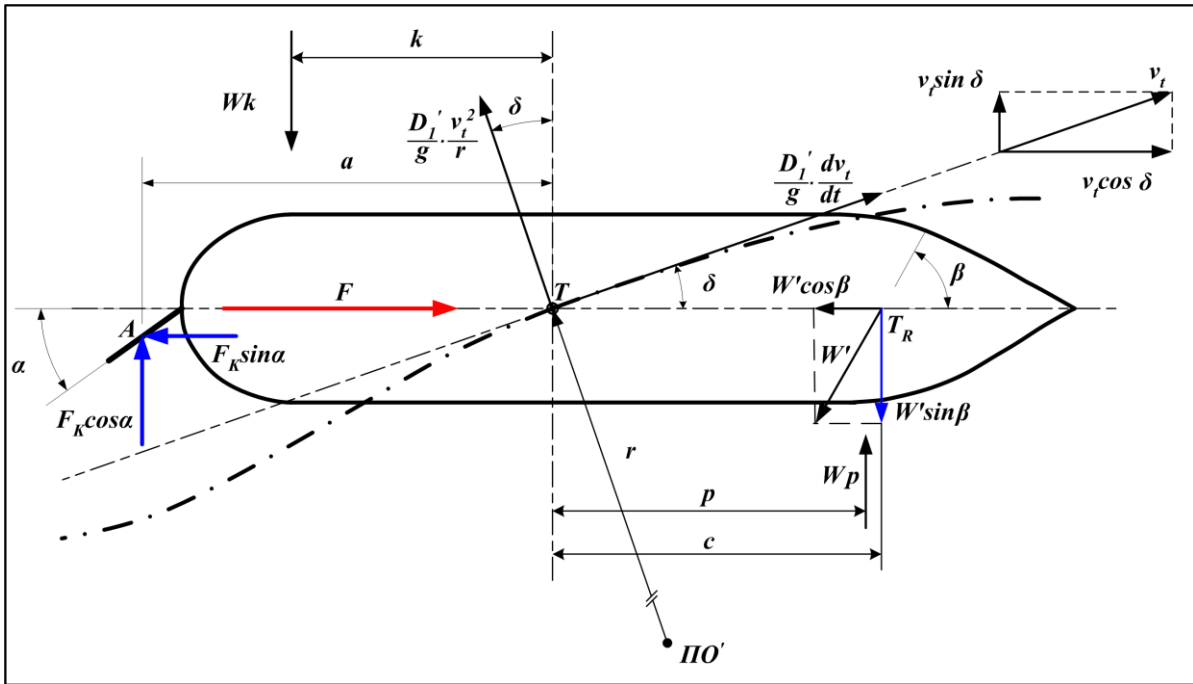
Момент окретања  $M_H = F_K \cos \alpha \cdot a$ , који настаје деловањем кормила, окреће брод у страну закрета кормила. Тај се момент постиже кормиларским уређајем. Сила  $F_K \cos \alpha$  која делује на кормило зависи од површине и облика листа кормила, трупа, брзине брода и угла отклона.

Када се брод почне окретати хидродинамичка сила отпора воде  $W$  излази из симетрале брода, мења величину у  $W'$  и почиње деловати на њега под углом  $\beta$  који се повећава са повећањем отклона кормила.

Нападна тачка силе  $W'$  је у тежишту подводног дела трупа  $T_R$  које се налази око једне четвртине дужине брода удаљено од прамчане статве.

Бочно померање брода проузрокује и промену величине отпора брода  $W$  у  $W'$  који сада делује на брод под неким углом  $\beta$  у односу на уздужну осу брода. Компонента силе  $W' \cos \beta$  повећава отпор брода, а компонента  $W' \sin \beta$  је паралелна са силом  $F_K \cos \alpha$ , али делује у супротном смеру и на тај начин повећава момент који окреће брод око вертикалне осе за износ  $M_W = W' \sin \beta \cdot c$ . Због овога расте угаона брзина окрета док се не устали у равнотежном положају када почиње фаза III.

Крмени део брода у окрету се креће по спољашњој путањи, а прamac по унутрашњој путањи. Овакво кретање условљава повећање отпора и услед тога смањење брзине. Упоредо са овом појавом брод се нагиње под дејством центрифугалне силе. При кретању брода (слика 6.17) са отклоном кормила у десну страну долази до појаве додатних статичких отпора воде  $W_k$  и  $W_p$  који делују на растојањима  $k$  и  $p$  од тежишта брода  $T$ . Ови отпори стварају момент пригушења  $M_{st} = W_k \cdot k + W_p \cdot p$  супротан моментима који окрећу брод. У неком тренутку је део путање круг полупречника  $r_1$  до тренутног пола  $PO'$ .



Слика 6.17. Деловање сила на труп брода у фази II окрета

$F$  – потисна сила пропелера;  $F_K \cos \alpha$  – сила кормиларења;  $F_K \sin \alpha$  – сила кочења;  $\alpha$  – угао закрета кормила;  $T$  – тежиште брода;  $W'$  – отпор брода у пловидби под углом  $\beta$ ;  $W_k$  – додатни отпор воде на крми;  $W_p$  – додатни отпор воде на прамцу;  $k$  – растојање додатног отпора на крми од тежишта;  $p$  – растојање додатног отпора на прамцу од тежишта;  $c$  – растојање отпора воде од тежишта;  $a$  – растојање силе кормиларења од тежишта;  $ПО'$  – тренутни пол окрета;  $r$  – тренутни полупречник окрета;  $\beta$  – угао деловања отпора воде;  $g$  – убрзање;  $v_t$  – тангенцијална брзина кретања тежишта брода;  $\delta$  – угао завлачења – деривације;  $T_R$  – тачка деловања отпора воде;  $D_1'$  – маса брода са масом повучене воде

Тангенцијална брзина тежишта  $T$  је  $v_t$ , маса брода са масом повучене воде  $D_1'$ , убрзање  $t$ .

На брод у том тренутку делују две силе маса:

1. центрифугална сила  $\frac{D_1'}{g} \cdot \frac{v_t^2}{r}$  у радијалном правцу и
2. сила инерције  $\frac{D_1'}{g} \cdot \frac{dv_t}{dt}$  у смеру тангенцијалне брзине.

Ако се са  $J_p$  означи поларни момент инерције масе брода заједно са масом повучене воде у односу на тежиште брода  $T$ , а са  $\delta$  угао завлачења – деривације, тј. угао између уздужне осе брода и тангенте на путању тежишта  $T$ , тада се могу поставити једначине кретања у односу на уздужну осу брода за кретање у уздужном смеру (6.41), попречном смеру (6.42) и окрет (6.43) [33]:

$$-\frac{D_1'}{g} \cdot \frac{dv_t}{dt} \cos \delta + \frac{D_1'}{g} \cdot \frac{v_t^2}{r} \cdot \sin \delta = F - W' \cos \beta - F_K \sin \alpha \quad (6.41)$$

$$-\frac{D_1'}{g} \cdot \frac{dv_t}{dt} \sin \delta - \frac{D_1'}{g} \cdot \frac{v_t^2}{r} \cdot \cos \delta = F_K \cos \alpha + W_p - W_k - W' \sin \beta \quad (6.42)$$

$$J_p \frac{d^2 \cdot \theta_2}{dt} = F_K \cos \alpha \cdot a + W' \sin \beta \cdot c - W_p \cdot p - W_k \cdot k. \quad (6.43)$$



## Фаза III

Почиње када наступи равнотежа сила и када се устали кретање. Тада нестаје угаоно убрзање, уравнотежује се центрифугална сила са отпором воде, пречник кривине окрета постаје константан, а тежиште система Т описује круг. Једначине (6.41), (6.42) и (6.43) добијају облик:

$$\frac{D'_1}{g} \cdot \frac{v_t^2}{r} \cdot \sin\delta = F - W' \cos\beta - F_K \sin\alpha \quad (6.44)$$

$$\frac{D'_1}{g} \cdot \frac{v_t^2}{r} \cdot \cos\delta = F_K \cos\alpha + W_p - W_k - W' \sin\beta \quad (6.45)$$

$$F_K \cos\alpha \cdot a + W' \sin\beta \cdot c = W_p \cdot p - W_k \cdot k. \quad (6.46)$$

## 6.1.3.3. Промена брзине при окрету брода

За време фаза I и II опада брзина брода да би се у фази III усталила што долази као последица повећаног отпора брода. За двомоторне бродове испитивање је извршио Шенхер [35] и на основу тога дао израз за брзину брода у окрету (фаза III) у функцији улазне брзине на праволинијском путу.

$$\frac{v_g}{v} = 1 - \frac{\alpha}{K_s} \cdot \frac{A}{S}. \quad (6.47)$$

У табели 6.1 приказане су вредности коефицијента  $K_s$  у зависности од односа  $\nabla/SL$ .

Табела 6.1. Вредности коефицијента  $K_s$  у зависности од односа  $\nabla/SL$ 

$\nabla/SL$	$K_s$	$\nabla/SL$	$K_s$
0,04	4,25	0,10	2,27
0,05	3,77	0,11	2,13
0,06	3,33	0,12	2,02
0,07	2,97	0,13	1,94
0,08	2,68	0,14	1,88
0,09	2,45	0,15	1,83

Ако се у израз (6.47) унесу вредности за брод „КОЗАРА“:

- $\nabla = 564 \text{ m}^3$  (истинина брода),
- $\alpha = 35^\circ$  (угао отклона кормила),
- $A = 4,6 \text{ m}^2$  (укупн аповршина листова кормила),
- $v = 22,9 \text{ km/h} = 6,36 \text{ m/s}$  (максимална средња брзина брода),
- $S = 837,8 \text{ ft}^2$  (латерални пресек брода на газу 1,17 m) и
- $K_s = 2,02$  (коефицијент одређен према табели 5),

добије се вредност брзине брода у окрету  $v_g = 5,6 \text{ m/s} = 20,16 \text{ km/h}$ .

Радијус кривине окрета  $r_k$  се може срачунати по формули:

$$r_k = K_3 \cdot \frac{\nabla(\text{m}^3)}{\zeta_n \cdot \cos\alpha \cdot A(\text{m}^2)}. \quad (6.48)$$

У табели 6.2 приказане су вредности коефицијента  $K_3$  у зависности од односа  $\nabla/SL$ .

Табела 6.2. Вредности коефицијента  $K_3$  у зависности од односа  $\nabla/SL$

$\nabla/SL$	$K_3$	$\nabla/SL$	$K_3$
0,050	1,410	0,10	0,460
0,055	1,285	0,11	0,400
0,060	1,100	0,12	0,370
0,065	0,960	0,13	0,355
0,070	0,845	0,14	0,345
0,080	0,670	0,15	0,340
0,090	0,550		

Специфична нормална сила се рачуна према изразу:

$$\zeta_n = \frac{N}{l/2 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A} \quad (6.49)$$

Нормална сила се рачуна према изразу:

$$N = A \cos \alpha + W \sin \alpha. \quad (6.50)$$

Израчуната сила на кормилима брода у поглављу 4.4 омогућава прорачун специфичне нормалне силе, а самим тим и радијуса кривине окрета  $r_k$ .

Ако се у израз (6.49) унесу вредности за брод „КОЗАРА“:

- $N = 83151,8 \text{ N}$  (сила на кормилима брода),
- $l = 1,56 \text{ m}$  за лево и десно кормило и  $l = 1,63 \text{ m}$  за средње кормило (дужина листа кормила),
- $A = 4,6 \text{ m}^2$  (укупн аповршина листова кормила),
- $v = 22,9 \text{ km/h} = 6,36 \text{ m/s}$  (максимална средња брзина брода) и
- $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  (густина воде),

добје се вредност специфичне нормалне силе  $\zeta_n = 0,62$ .

Ако се у израз (6.48) унесу вредности за брод „КОЗАРА“:

- $\nabla = 564 \text{ m}^3$  (истинина брода),
- $\alpha = 35^\circ$  (угао отклона кормила),
- $A = 4,6 \text{ m}^2$  (укупн аповршина листова кормила),
- $\zeta_n = 0,62$  (специфична нормална сила) и
- $K_3 = 0,46$  (коефицијент одређен према табели б),

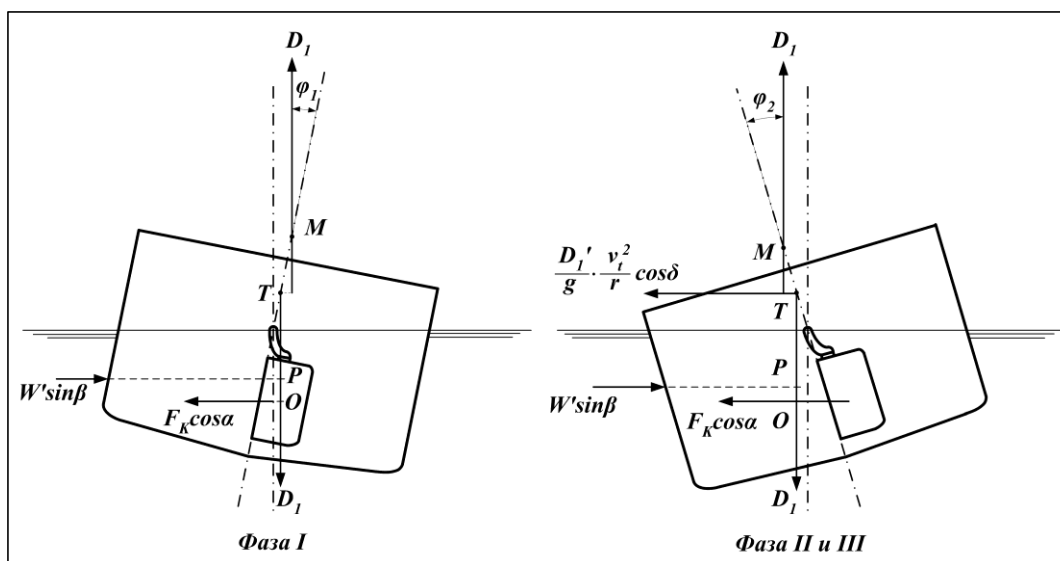
добје се вредност радијуса круга окрета  $r_k = 111 \text{ m}$ .

#### 6.1.3.4. Понашање брода у вертикалној равни

На брод у окрету делују силе које га окрећу и око хоризонталне уздужне осе тј. брод се нагињу услед момената који настају као резултат деловања сила у нападним тачкама које су на различитим висинама [35]. Деловање ових сила, односно момената, у окрету брода приказано је на слици 6.18.

У фази **I** окрета на брод делује попречна сила  $F_K \cos \alpha$ , а касније и компонента отпора воде  $W' \sin \beta$  која је на почетку мала и има незнатан утицај. Компонента  $F_K \cos \alpha$

прво производи нагиб на страну на коју је отклоњено кормило брода. Са порастом вредности компоненте  $W' \sin \beta$  нагиб брода се смањује, јер је нападна тачка  $P$  силе  $W' \sin \beta$  обично изнад нападне тачке  $O$  деловања силе  $F_K \cos \alpha$ .



Слика 6.18. Нагиби брода у вертикалној равни у фази I, односно фазама II и III окрета  
 $T$  – тежиште брода;  $P$  – нападна тачка силе  $W' \sin \beta$ ;  $O$  – нападна тачка силе  $F_K \cos \alpha$ ;  $M$  – метацентар

У **фази II**, када се брод почне окретати око тренутног пола  $PO'$ , долази до изражаја дејство компоненте центрифугалне силе

$$\frac{D_1'}{g} \cdot \frac{v_t^2}{r} \cos \delta \quad (6.51)$$

која настоји да брод нагне на супротну страну. Највећи угао нагиба настаје у тренутку после преласка брода из нагиба са једног на други бок. Због инерције масе брода, брод се нагиње и преко угла нагиба статичке равнотеже дате изразом:

$$D_1 \overline{MT} \sin \varphi_2 = \frac{D_1'}{g} \cdot \frac{v_t^2}{r} \cdot \cos \delta \cdot \overline{TP} - F_K \cos \alpha \overline{OP}. \quad (6.52)$$

У **фази III** брод је нагнут на исти бок као и у фази II и нагиб је константне величине која је дата изразом (6.52).

Нагиб је највећи на почетку фазе II окрета и то је најопаснији моменат у маневру. Из израза (6.52) види се да компонента  $F_K \cos \alpha$  делује у смислу смањења угла нагиба па из тога следи да у том тренутку не треба враћати кормило у положај "0". Тада би у изразу (6.52) нестало члан  $F_K \cos \alpha \overline{OP}$  што би проузроковало још веће нагибе. Ово је веома важно за кормиларе који у случају превеликог нагиба не смеју исправљати брод враћањем кормила у положај "0" већ треба да смање снагу погонских мотора.

## 6.2. ДИНАМИКА ПЛОВИДБЕ БРОДА „КОЗАРА”

Специфичност брода „КОЗАРА” је у томе што се погон остварује са два погонска електромотора тј. са два пропелера, а управљивост брода се остварује са три листа баланских кормила. Поред тога на брод је уграђен прамчани потисник за побољшање маневарских карактеристика и побољшање управљивости брода при малим брзинама пловидбе.

Нови тип погона има две основне предности у односу на стари тип погона. Прво, брзом променом смера обртања пропелера може се брзо мењати смер вожње брода НАПРЕД-КРМОМ и обрнуто. Друго, брод са два пропелера може једноставно и брзо, без употребе листа кормила, мењати правац кретања тако што се пропелери истовремено окрећу у супротним смеровима. Овај начин маневрисања бродом се назива спрегом.

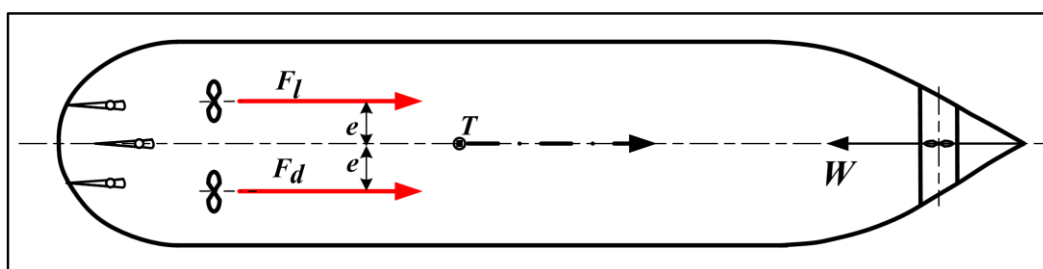
У овом поглављу ће бити приказане силе и моменти који делују да брод у пловидби напред и у свим облицима маневра, а након тога ће бити дата анализа сила и момената.

### 6.2.1. Погонске силе и моменти брода „КОЗАРА”

Погонских силе и моменати ће бити приказани према облицима пловидбе и маневра.

#### 6.2.1.1. Пловидба напред или крмом без промене смера (кормило у средини)

Пловидба брода остварује се деловањем погонских сила левог пропелера  $F_l$  и десног пропелера  $F_d$  који су погоњени електромоторима постављеним на растојању  $e$  од уздужне осе брода (слика 6.19).



Слика 6.19. Деловање сила на труп брода у вожњи оба ЕМ напред и кормилом у средини  $F_l$  – потисна сила левог пропелера;  $F_d$  – потисна сила десног пропелера;  $e$  – растојање пропелера од уздужне осе брода;  $T$  – тежиште брода;  $W$  – отпор у правцу кретања брода

Укупна потисна сила једнака је збиру потисних сила левог и десног пропелера.

#### 6.2.1.2. Маневар окрета са оба мотора напред уз отклон кормила у лево или десно

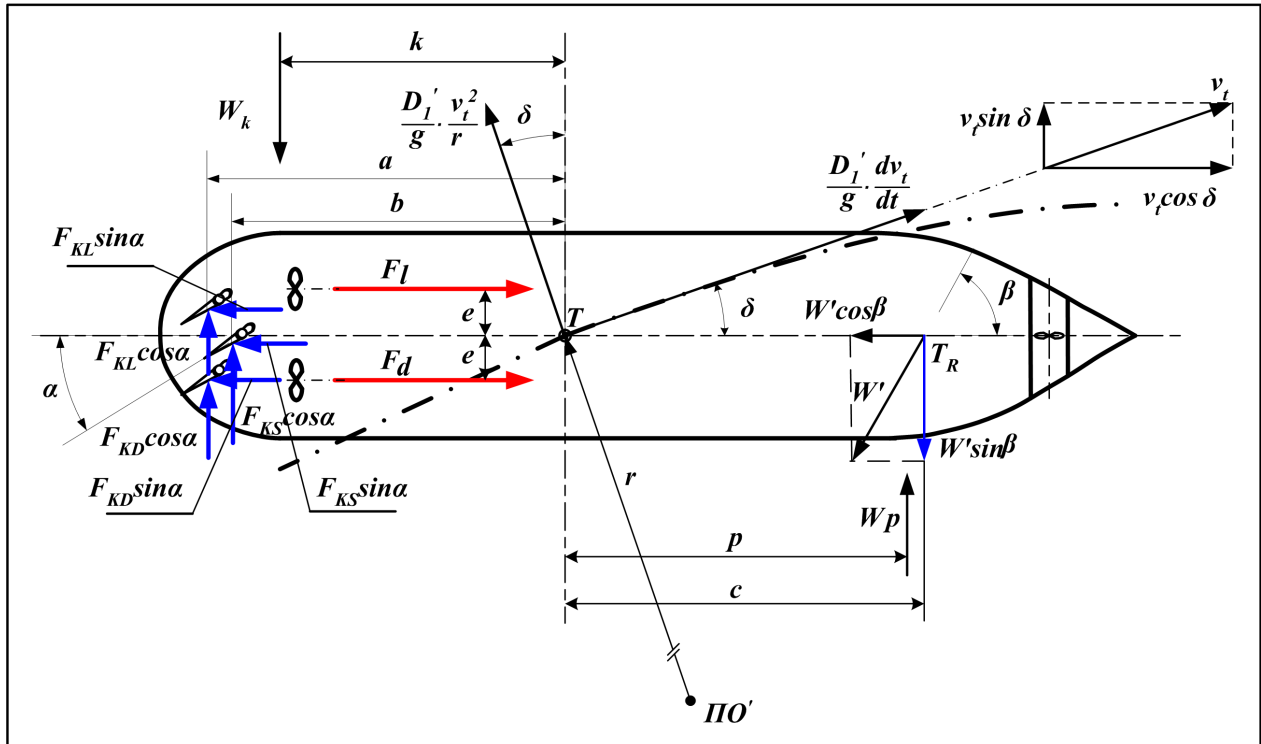
При овој маневру брод се окреће услед деловања сила кормиларења на листовима кормила:

- $F_{KL} \cos \alpha$ ,
- $F_{KD} \cos \alpha$  и
- $F_{KS} \cos \alpha$ .

Силе кормиларења стварају моменте у односу на тежиште брода:

- $M_{KL} = F_{KL} \cos \alpha \cdot a$ ,
- $M_{KD} = F_{KD} \cos \alpha \cdot a$  и
- $M_{KS} = F_{KS} \cos \alpha \cdot b$ .

На слици 6.20 су приказане силе које делују на труп брода у наведеном маневру.



Слика 6.20. Деловање сила на труп брода у фази II окретања при маневру оба ЕМ напред и отклоном кормила у једну страну

Једначине кретања брода у хоризонталној равни, у односу на уздужну осу брода, за кретање у фази II окрета у уздужном смеру (6.53), попречном смеру (6.54) и окрету (6.55) у овом маневру имају следећи облик:

$$-\frac{D'_1}{g} \cdot \frac{dv_t}{dt} \cos \delta + \frac{D'_1}{g} \cdot \frac{v_t^2}{r} \cdot \sin \delta = F_d + F_l - W' \cos \beta - (F_{KL} + F_{KD} + F_{KS}) \sin \alpha \quad (6.53)$$

$$-\frac{D'_1}{g} \cdot \frac{dv_t}{dt} \sin \delta - \frac{D'_1}{g} \cdot \frac{v_t^2}{r} \cdot \cos \delta = (F_{KL} + F_{KD} + F_{KS}) \cos \alpha + W_p - W_k - W' \sin \beta \quad (6.54)$$

$$J_p \frac{d^2 \cdot \theta_2}{dt} = (F_{KL} + F_{KD}) \cos \alpha \cdot a + F_{KS} \cos \alpha \cdot b + W' \sin \beta \cdot c - W_p \cdot p - W_k \cdot k \quad (6.55)$$

У фази III окрета једначине (6.53), (6.54) и (6.55) добијају облик:

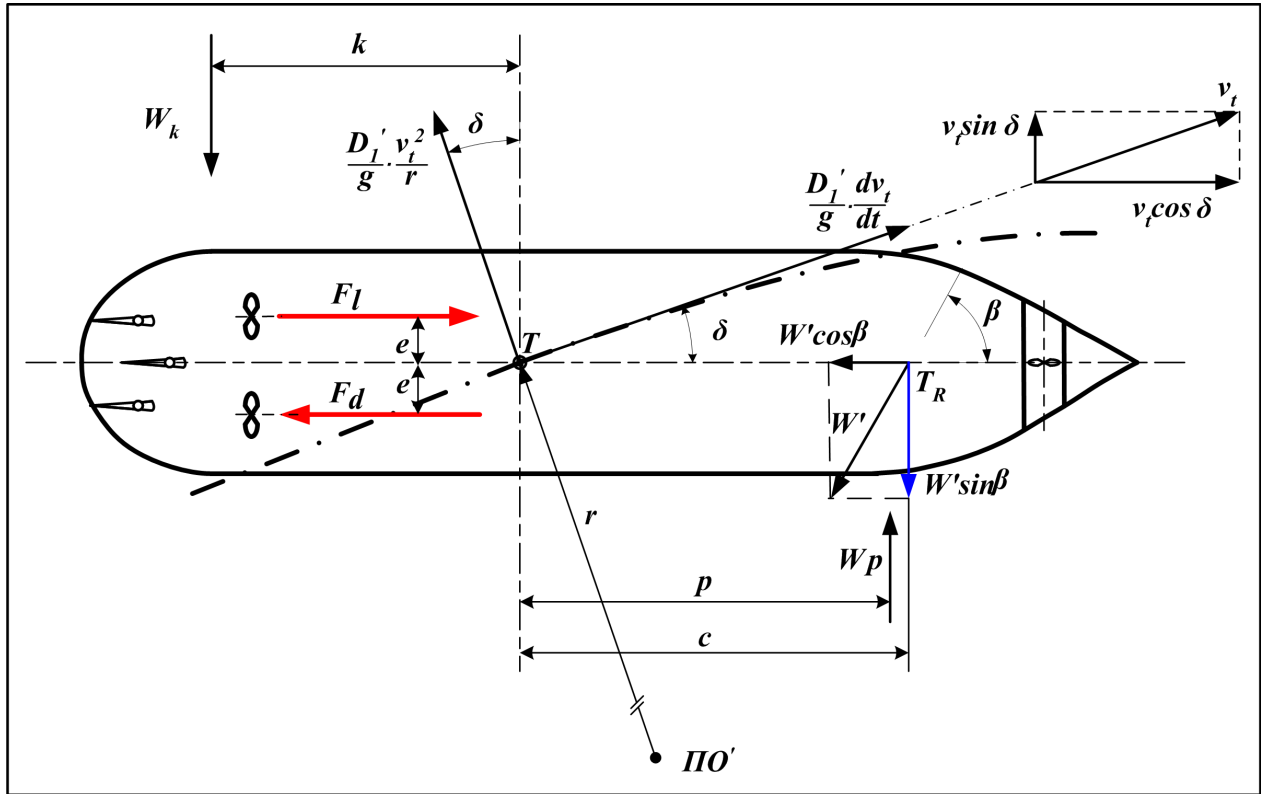
$$\frac{D'_1}{g} \cdot \frac{v_t^2}{r} \cdot \sin \delta = F_d + F_l - W' \cos \beta - (F_{KL} + F_{KD} + F_{KS}) \sin \alpha \quad (6.56)$$

$$\frac{D'_1}{g} \cdot \frac{v_t^2}{r} \cdot \cos \delta = (F_{KL} + F_{KD} + F_{KS}) \cos \alpha + W_p - W_k - W' \sin \beta \quad (6.57)$$

$$(F_{KL} + F_{KD}) \cos \alpha \cdot a + F_{KS} \cos \alpha \cdot b + W' \sin \beta \cdot c = W_p \cdot p - W_k \cdot k \quad (6.58)$$

## 6.2.1.3. Маневар окрета са спрегом без употребе кормила

При овој маневру окрета на труп делује спрег сила левог и десног пропелера при чему стварају момент у односу на тежиште брода  $M_F = (F_d + F_l) \cdot e$ . На слици 6.21 су приказане силе које делују на труп брода у наведеном маневру.



Слика 6.21. Деловање сила на труп брода у фази II окретања при маневру спрега ЕМ и кормилом у средини

Једначине кретања у односу на уздужну осу брода за кретање у фази II окрета у уздужном смеру (6.59), попречном смеру (6.60) и окрету (6.61) имају следећи облик:

$$-\frac{D'_1}{g} \cdot \frac{dv_t}{dt} \cos \delta + \frac{D'_1}{g} \cdot \frac{v_t^2}{r} \cdot \sin \delta = F_d - F_l - W' \cos \beta \quad (6.59)$$

$$-\frac{D'_1}{g} \cdot \frac{dv_t}{dt} \sin \delta - \frac{D'_1}{g} \cdot \frac{v_t^2}{r} \cdot \cos \delta = W_p - W_k - W' \sin \beta \quad (6.60)$$

$$J_p \frac{d^2 \cdot \theta_2}{dt} = (F_d + F_l) \cdot e + W' \sin \beta \cdot c - W_p \cdot p - W_k \cdot k \quad (6.61)$$

У фази III окрета једначине (6.59), (6.60) и (6.61) добијају облик:

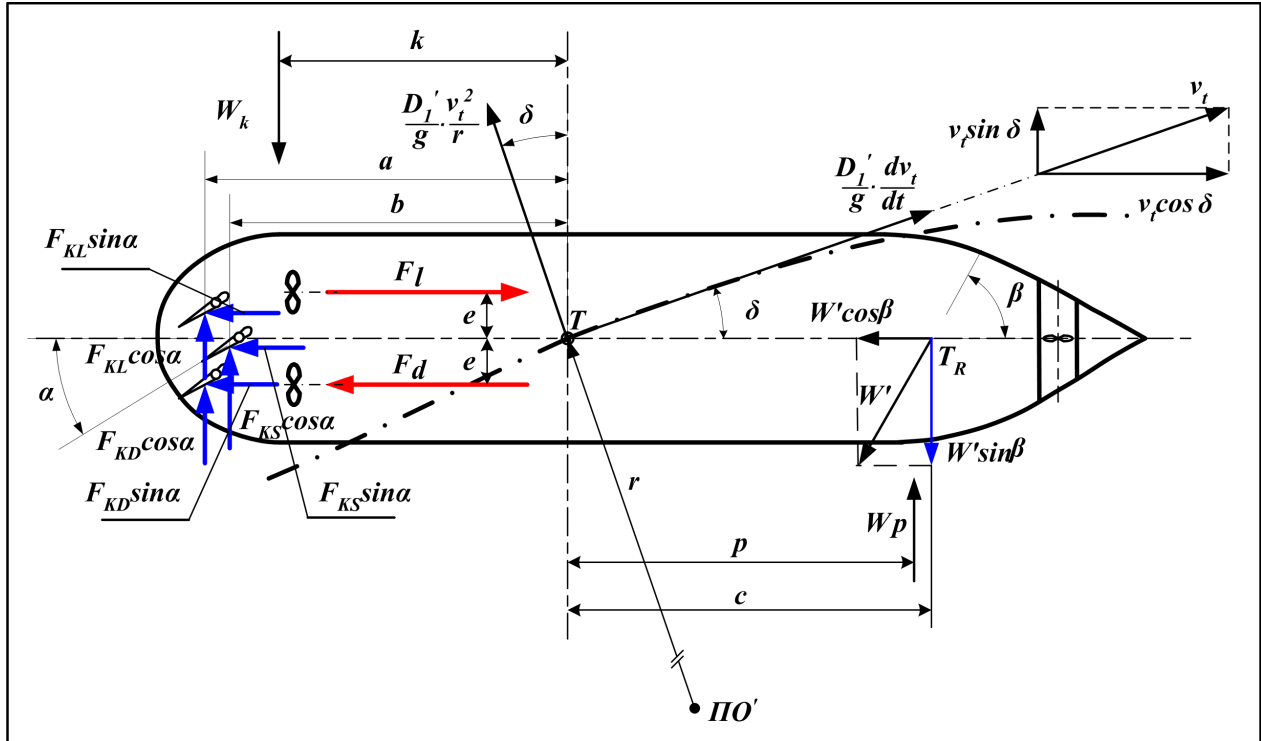
$$\frac{D'_1}{g} \cdot \frac{v_t^2}{r} \cdot \sin \delta = F_d - F_l - W' \cos \beta \quad (6.62)$$

$$\frac{D'_1}{g} \cdot \frac{v_t^2}{r} \cdot \cos \delta = W_p - W_k - W' \sin \beta \quad (6.63)$$

$$(F_d + F_l) \cdot e + W' \sin \beta \cdot c = W_p \cdot p + W_k \cdot k \quad (6.64)$$

## 6.2.1.4. Маневар окрета са спрегом и отклоном кормила у једну или другу страну

При овом маневру брод се закреће услед деловања сила на листове кормила брода и спрега погонских ЕМ који, у односу на тежиште, стварају моменте приказане у претходним маневрима. На слици 6.22 су приказане силе које делују на труп брода у маневру окретања при спрегу ЕМ и са отклоњеним кормилом у једну страну.



Слика 6.22. Деловање сила на труп брода у фази II окретања при маневру спрега ЕМ и отклоном кормила у једну страну

Једначине кретања у односу на уздужну осу брода за кретање у фази II окрета у уздужном смеру (6.65), попречном смеру (6.66) и окрету (6.67) имају следећи облик:

$$-\frac{D'_1}{g} \cdot \frac{dv_t}{dt} \cos \delta + \frac{D'_1}{g} \cdot \frac{v_t^2}{r} \cdot \sin \delta = F_d - F_l - W' \cos \beta - (F_{KL} + F_{KD} + F_{KS}) \sin \alpha \quad (6.65)$$

$$-\frac{D'_1}{g} \cdot \frac{dv_t}{dt} \sin \delta - \frac{D'_1}{g} \cdot \frac{v_t^2}{r} \cdot \cos \delta = (F_{KL} + F_{KD} + F_{KS}) \cos \alpha + W_p - W_k - W' \sin \beta \quad (6.66)$$

$$J_p \frac{d^2 \cdot \theta_2}{dt} = (F_d + F_l) \cdot e + (F_{KL} + F_{KD}) \cos \alpha \cdot a + F_{KS} \cos \alpha \cdot b + W' \sin \beta \cdot c - W_p \cdot p - W_k \cdot k \quad (6.67)$$

У фази III окрета једначине (6.65), (6.66) и (6.67) добијају облик:

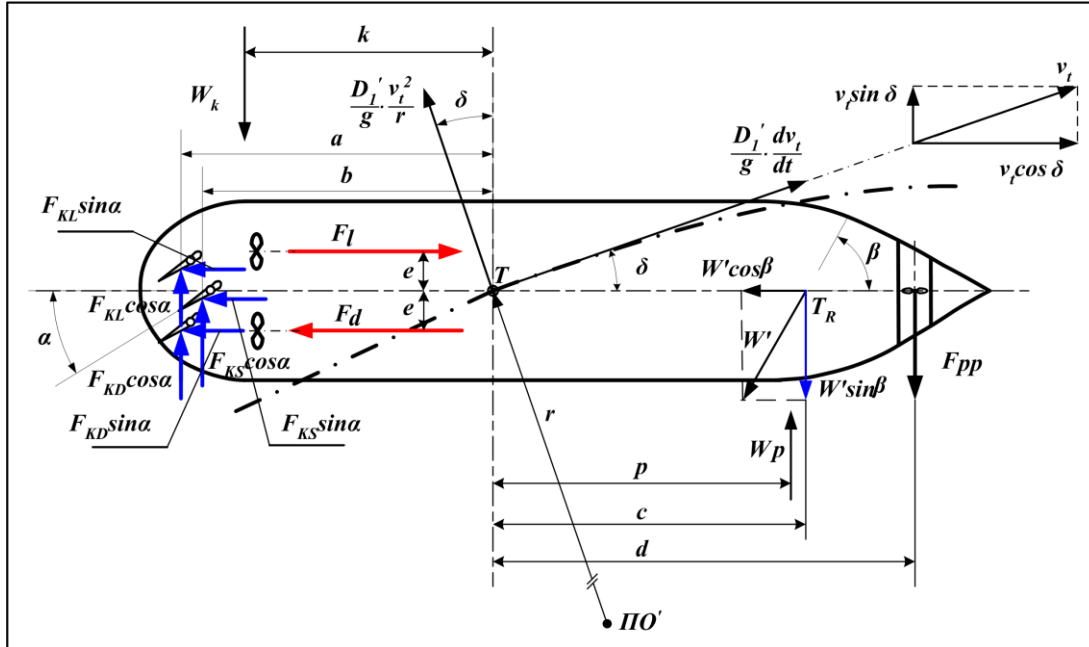
$$\frac{D'_1}{g} \cdot \frac{v_t^2}{r} \cdot \sin \delta = F_d - F_l - W' \cos \beta - (F_{KL} + F_{KD} + F_{KS}) \sin \alpha \quad (6.68)$$

$$\frac{D'_1}{g} \cdot \frac{v_t^2}{r} \cdot \cos \delta = (F_{KL} + F_{KD} + F_{KS}) \cos \alpha + W_p - W_k - W' \sin \beta \quad (6.69)$$

$$(F_d + F_l) \cdot e + (F_{KL} + F_{KD}) \cos \alpha \cdot a + F_{KS} \cos \alpha \cdot b + W' \sin \beta \cdot c = W_p \cdot p - W_k \cdot k \quad (6.70)$$

## 6.2.1.5. Маневар окрета са спрегом, отклоном кормила у једну страну и употребом прамчаног потисника

При овом маневру брод се окреће услед деловања сила на листове кормила брода, спрега погонских ЕМ и силе потиска прамчаног потисника  $F_{PP}$  која делује на брод са краком  $d$  и у односу на тежиште брода ствара додатни момент окрета  $M_{F_{PP}} = F_{PP} \cdot d$ . На слици 6.23 су приказане силе које делују на труп брода у наведеном маневру.



Слика 6.23. Деловање сила на труп брода у фази II окретања при маневру спрега ЕМ, отклоном кормила у једну страну и употребу прамчаног потисника

Једначине кретања у односу на уздужну осу брода за кретање у фази II окрета у уздужном смеру (6.71), попречном смеру (6.72) и окрету (6.73) имају следећи облик:

$$-\frac{D'_1}{g} \cdot \frac{dv_t}{dt} \cos \delta + \frac{D'_1}{g} \cdot \frac{v_t^2}{r} \cdot \sin \delta = F_d - F_l - W' \cos \beta - (F_{KL} + F_{KD} + F_{KS}) \sin \alpha \quad (6.71)$$

$$-\frac{D'_1}{g} \cdot \frac{dv_t}{dt} \sin \delta - \frac{D'_1}{g} \cdot \frac{v_t^2}{r} \cdot \cos \delta = (F_{KL} + F_{KD} + F_{KS}) \cos \alpha + F_{PP} + W_p - W_k - W' \sin \beta \quad (6.72)$$

$$J_p \frac{d^2 \cdot \theta_2}{dt} = (F_d + F_l) \cdot e + (F_{KL} + F_{KD}) \cos \alpha \cdot a + F_{KS} \cos \alpha \cdot b + F_{PP} \cdot d + W' \sin \beta \cdot c - W_v \cdot v - W_k \cdot k \quad (6.73)$$

У фази III окрета једначине (6.71), (6.72) и (6.73) добијају облик:

$$\frac{D'_1}{g} \cdot \frac{v_t^2}{r} \cdot \sin \delta = F_d - F_l - W' \cos \beta - (F_{KL} + F_{KD} + F_{KS}) \sin \alpha \quad (6.74)$$

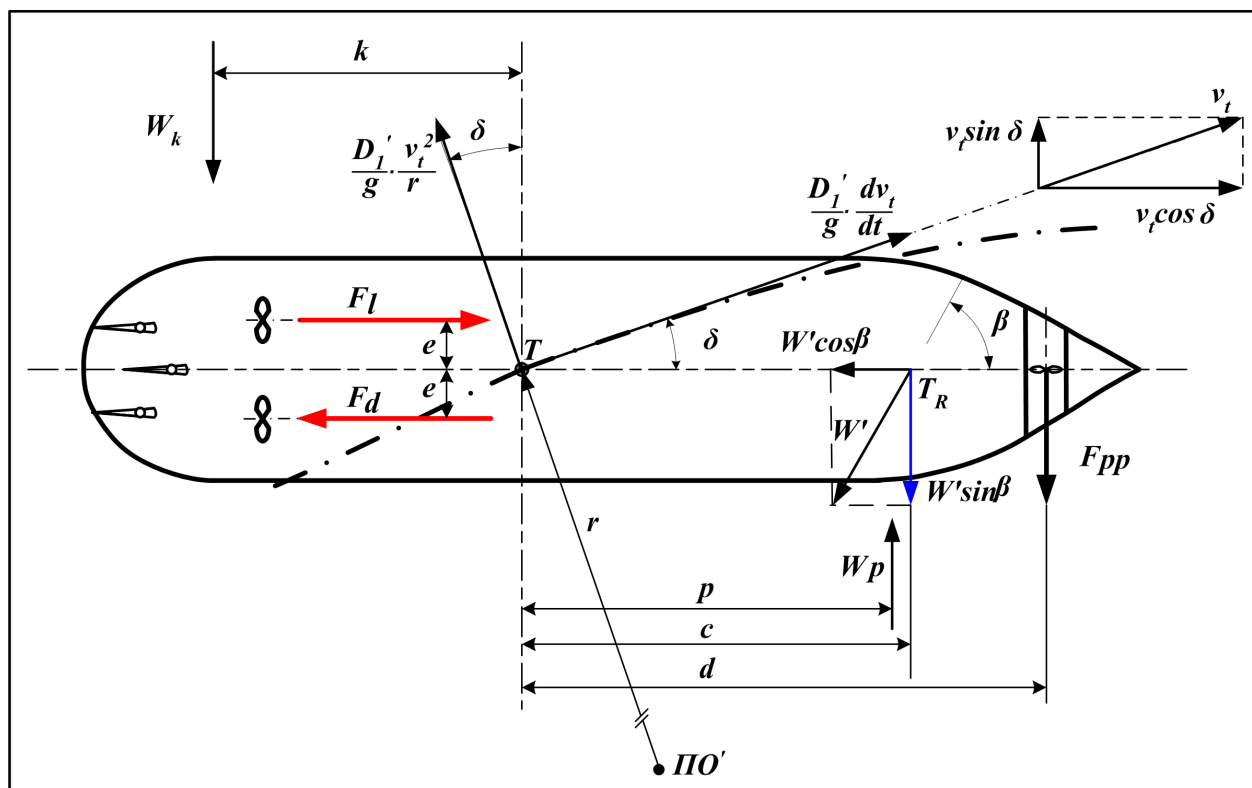
$$\frac{D'_1}{g} \cdot \frac{v_t^2}{r} \cdot \cos \delta = (F_{KL} + F_{KD} + F_{KS}) \cos \alpha + F_{PP} + W_p - W_k - W' \sin \beta \quad (6.75)$$

$$(F_d + F_l) \cdot e + (F_{KL} + F_{KD}) \cos \alpha \cdot a + F_{KS} \cos \alpha \cdot b + F_{PP} \cdot d + W' \sin \beta \cdot c = W_p \cdot p + W_k \cdot k \quad (6.76)$$



## 6.2.1.6. Маневар окрета са спрегом и употребом прамчаног потисника без употребе кормила

При овом маневру брод се окреће услед деловања сила спрега погонских ЕМ и силе потиска прамчаног потисника. На слици 6.24 су приказане силе које делују на труп брода у наведеном маневру.



Слика 6.24. Деловање сила на труп брода у фази II окретања при маневру спрега ЕМ, кормилом у средини и употребу прамчаног потисника

Једначине кретања у односу на уздужну осу брода за кретање у фази II окрета у уздужном смеру (6.77), попречном смеру (6.78) и окрету (6.79) имају следећи облик:

$$-\frac{D'_1}{g} \cdot \frac{dv_t}{dt} \cos \delta + \frac{D'_1}{g} \cdot \frac{v_t^2}{r} \cdot \sin \delta = F_d - F_l - W' \cos \beta \quad (6.77)$$

$$-\frac{D'_1}{g} \cdot \frac{dv_t}{dt} \sin \delta - \frac{D'_1}{g} \cdot \frac{v_t^2}{r} \cdot \cos \delta = F_{PP} + W_p - W_k - W' \sin \beta \quad (6.78)$$

$$J_p \frac{d^2 \cdot \theta_2}{dt} = (F_d + F_l) \cdot e + F_{PP} \cdot d + W' \sin \beta \cdot c - W_p \cdot p - W_k \cdot k \quad (6.79)$$

У фази III окрета једначине (6.77), (6.78) и (6.79) добијају облик:

$$\frac{D'_1}{g} \cdot \frac{v_t^2}{r} \cdot \sin \delta = F_d - F_l - W' \cos \beta \quad (6.80)$$

$$\frac{D'_1}{g} \cdot \frac{v_t^2}{r} \cdot \cos \delta = F_{PP} + W_p - W_k - W' \sin \beta \quad (6.81)$$

$$(F_d + F_l) \cdot e + F_{PP} \cdot d + W' \sin \beta \cdot c = W_p \cdot p + W_k \cdot k \quad (6.82)$$

### 6.2.2. Анализа динамике брода „КОЗАРА”

На пловидбу брода „КОЗАРА” у условима мирне воде (без таласа) и пловидбе без ветра, у зависности од врсте маневра, утичу следеће силе:

- потисне силе левог пропелера  $F_l$  и десног пропелера  $F_d$ ,
- силе кормиларења на левом кормилу  $F_{KL} \cos \alpha$ , десном кормилу  $F_{KD} \cos \alpha$  и на средњем кормилу  $F_{KS} \cos \alpha$ ,
- потисна сила прамчаног потисника  $F_{PP}$  и
- сила инерције масе брода са масом повучене воде  $\frac{D_1'}{g} \cdot \frac{dv_t}{dt}$ .

Поред ових сила на брод у окрету делује следеће силе:

- компонента силе отпора воде  $W' \sin \beta$ ,
- додатне силе отпора воде на крменом делу брода  $W_k$  и на прамчаном делу  $W_p$  и
- центрифугална сила  $\frac{D_1'}{g} \cdot \frac{v_t^2}{r}$ .

Потисне силе пропелера могу деловати према напред или према назад зависно да ли брод плови напред или крмом или у спрегу, ако се маневрише бродом, при чему стварају моменат  $M_F = (F_d + F_l) \cdot e$  у односу на тежиште брода.

Силе на кормилу одржавају пловидбу брода у одређеном курсу или врше промену курса брода. Промену курса врше компоненте сила на кормилима које стварају моменте у односу на тежиште брода  $M_{KL} = F_{KL} \cos \alpha \cdot a$ ,  $M_{KD} = F_{KD} \cos \alpha \cdot a$  и  $M_{KS} = F_{KS} \cos \alpha \cdot b$ .

Потисна сила прамчаног потисника  $F_{PP}$  настоји да ротира брод око тежишта моментом  $M_{FPP} = F_{PP} \cdot d$ .

Отпори воде у окрету стварају моменте  $M_W = W' \sin \beta \cdot c$  и  $M_{st} = W_k \cdot k + W_p \cdot p$ . Момент  $M_W$  додатно okreће брод док се момент  $M_{st}$  супротставља окрету.

У маневру окрета са спрегом без употребе кормила је потребно напоменути да је растојање пропелера од уздужне осе брода  $e$  веома мало услед чега ће логично и моменат окрета бити мали, што доводи у питање успешност извођења окрета са тим маневром. Поред момента окрета, који чине силе пропелера, вожња крмом једног од пропелера ће узроковати смањење брзине кретања брода у прелазној путањи окрета, што се позитивно одражава на смањење пречника окрета.

Код маневра спрега са употребом кормила за очекивати је да ће се пречник круга окрета смањити услед деловања момента спрега потисних сила пропелера и додатног смањења брзине брода, услед пребацивања једног пропелера у вожњу крмом.

Код маневра окрета са спрегом, отклоном кормила и употребом прамчаног потисника поред већ поменутих утицаја кормила и спрега погонских ЕМ у овом маневру на окрет брода ће утицати и деловање силе потиска прамчаног потисника  $F_{PP}$  са својим моментом у односу на тежиште брода. Претпоставља се да ће уградња прамчаног потисника значајно побољшати маневарске карактеристике брода. Важно је напоменути да је употреба прамчаног потисника у великој мери повезана са брзином брода. Наиме од брзине брода зависи количина воде која наструјава у тунел прамчаног потисника. Што је брзина брода већа количина воде је мања што упућује на закључак да је прамчани потисник ефикаснији што је брзина брода мања.

Код маневра са спрегом и употребом прамчаног потисника, а имајући у виду анализу маневра у претходним случајевима, може се закључити да је примена овога

маневра најјефикаснија када је потребно брод окренути у месту, тј. када брод мирује или плови лагано напред.

Ако се анализирају изрази за динамику кретања брода „КОЗАРА” могу се на основу израза (6.55), (6.61), (6.67), (6.73) и (6.79) за поларни момент инерције масе брода  $J_p$  заједно са масом повучене воде у односу на тежиште брода  $T$ , донети следећи закључци:

1. Највећи поларни момент  $J_p$  брод ће имати у маневру када се користи спрег погонских ЕМ, прамчани потисник и кормило се отклони у једну страну (израз 6.73) што ће узроковати да пречник окрета у том маневру буде најмањи за одређену брзину брода,
2. Најмањи поларни момент  $J_p$  брод ће имати у маневру када се користи само спрег погонских ЕМ, а кормило задржи у средини (израз 6.61). На ово упућује чињеница да је удаљност ЕМ од уздужне осе брода  $e$  мала, због чега је и момент спрега мали. Ова чињеница доводи у питање успешност маневра окрета на реци када брод у окрету треба да савлада и снагу речног тока.

### 6.3. КИНЕМАТИКА ПЛОВИДБЕ БРОДА НА РЕЦИ

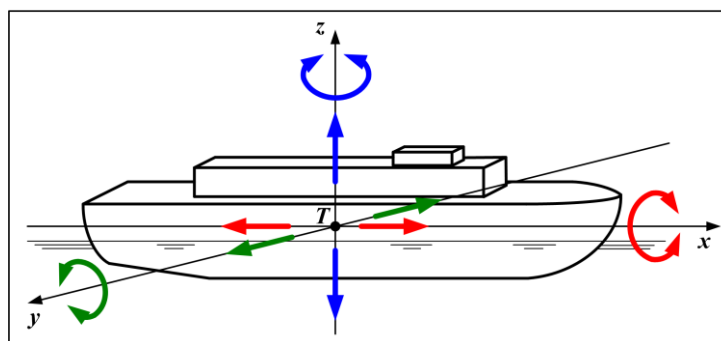
У овом поглављу биће извршена анализа кинематике кретања брода на реци са тежиштем на кретању брода у окрету. На почетку ће бити приказане основне карактеристике кретања брода на реци, а затим ће бити анализирано кретање брода у окрету за маневар оба погонска мотора напред и закрет кормила у једну страну након чега ће се анализирати кретање брода у окрету за маневар спрега погонских мотора, употребу прамчаног потисника и закрет кормила у једну страну.

Положај тачке која се креће потпуно је одређен вектром положаја  $\vec{r}$ , чији је почетак у некој непокретној тачки  $O$ , а крај у покретној тачки. Пошто тачка мења положај у односу на тачку  $O$  током времена, мења се и вектор положаја по интензитету, правцу и смеру. Према томе, вектор положаја представља векторску функцију времена  $t$ :

$$\vec{r} = \vec{r}(t) \quad (6.83)$$

Под положајем крутог тела у простору подразумева се положај свих тачака тела у односу на утврђени координатни систем. С обзиром да су код крутог тела узајамна растојања тачака непроменљива, могуће је положај било које тачке крутог тела при његовом кретању једнозначно одредити ако је познато одстојање те тачке од осталих тачака тела [47].

Као и остала крута тела брод при кретању у простору има шест степени слободe кретања, три транслације и три ротације приказане на слици 6.25.



Слика 6.25. Слободе кретања брода у простору

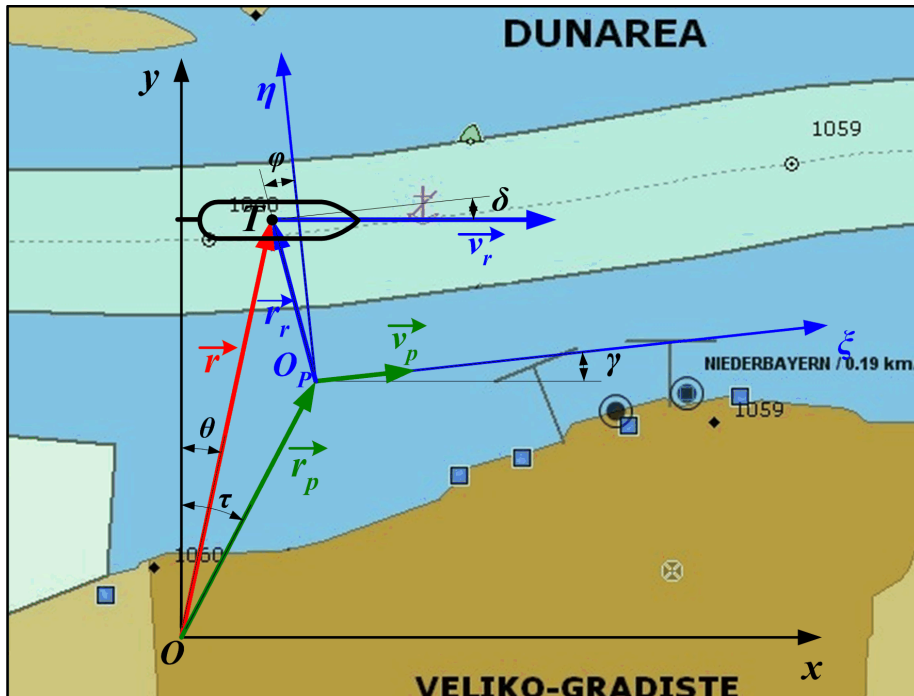
Слободе кретања брода су термилошки одређене према следећем [35]:

- Транслације:
  - **Напредовање** – транслаторно кретање у правцу уздужне осе  $x$ ,
  - **Заношење** – траслаторно кретање у правцу попречне осе  $y$ ,
  - **Понирање** - транслаторно кретање у правцу вертикалне осе  $z$ .
- Ротације:
  - **Љуљање** – ротационо кретање око уздужне осе  $x$ ,
  - **Посртање** – ротационо кретање око попречне осе  $y$ ,
  - **Закретање** – ротационо кретање око вертикалне осе  $z$ .

### 6.3.1. Основне карактеристике пловидбе брода на реци

Кретање брода на реци може се посматрати као сложено кретање крутог тела у једној равни. Брод се креће по реци при чему се водена маса речног тока може сматрати покретним телом за који вежемо покретни координатни систем  $\zeta O_P \eta$ , а који се произвољно креће у односу на земљу за коју се веже непокретни кординатни систем  $xOy$  (слика 6.26). Покретни координатни систем  $\zeta O_P \eta$  је усмерен тако да ординта  $\zeta$  буде у смеру брзине воде из разлога што је то и најчешћи смер кретања брода на реци, а кординатни систем  $xOy$  је усмерен тако да ордината  $y$  буде у смеру севера N.

У овом случају кретање брода у односу на речни ток јесте релативно кретање, кретање речног тока у односу на земљу је преносно кретање, док је кретање брода у односу на земљу апсолутно или сложено кретање.



Слика 6.26. Кретање брода на реци

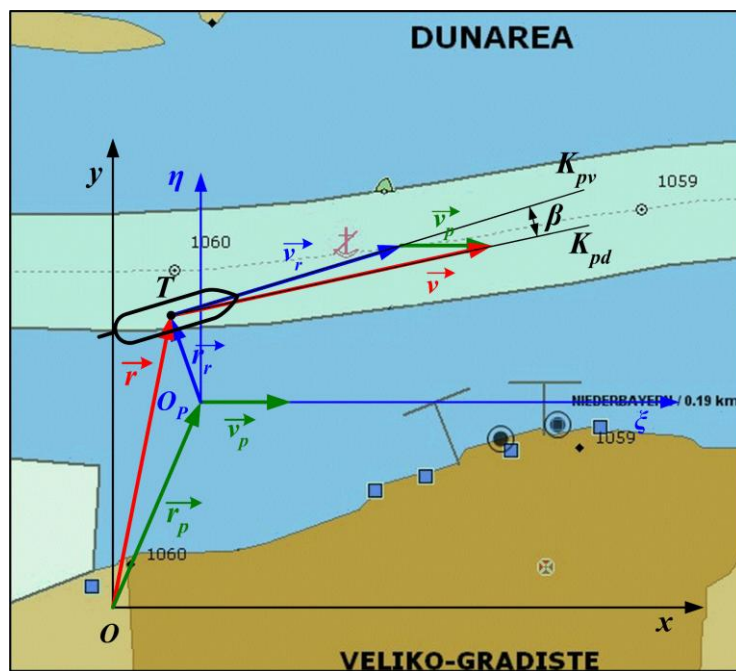
$\theta$  – апсолутни угао помераја;  $\tau$  – преносни угао помераја;  $\phi$  – релативни угао помераја;  
 $\gamma$  угао положаја покретног координатног система у односу на непокретни координатни систем;  $\delta$  – угао смера брзине брода у односу на осу  $\zeta$

Релативна брзина  $\vec{v}_r$  и релативно убрзање  $\vec{a}_r$  брода су брзина и убрзање које брод има при кретању у односу на воду тј. покретни координатни систем  $\zeta O_P \eta$ .

Преносна брзина  $\vec{v}_p$  и преносно убрзање  $\vec{a}_p$  су брзина и убрзање које речни ток има у односу на земљу, тј. покретни координатни систем  $\zeta O_p \eta$  при кретању у односу на непокретни координатни систем  $xOy$ .

Апсолутна брзина  $\vec{v}$  и апсолутно убрзање  $\vec{a}$  брода су брзина и убрзање које брод има при кретању у односу на земљу, тј. непокретни координатни систем  $xOy$ . Апсолутна брзина брода једнака је векторском збиру преносне и релативне брзине брода.

Ако се брод креће под неким углом на смер речног тока са неким курсом  $K_{pv}$  (курс преко воде) тада ће утицај речног тока довести до тога да се курс брода у односу на земљу  $K_{pd}$  (курс преко дна) помера за одређени угао  $\beta$  у односу на курс  $K_{pv}$  (слика 6.27). Угао  $\beta$  се назива углом заношења.



Слика 6.27. Брзина пловидбе брода на реци низводно под углом у односу на речни ток

Генерално, пловидба брода на реци у праволинијском кретању и окрету одређена је са:

- Апсолутним вектором положаја  $\vec{r}$ , (m)
- Преносним вектором положаја  $\vec{r}_p$ , (m),
- Релативним вектором положаја  $\vec{r}_r$ , (m),
- Пређеним путем, тј. преваљеним луком  $s$ , (m)
- Апсолутним углом помераја  $\theta$  (rad),
- Преносним углом помераја  $\tau$  (rad),
- Релативним углом помераја  $\varphi$  (rad),
- Угаоном брзином  $\omega$  (rad/s),
- Апсолутном брзином брода  $\vec{v}$  (m/s),
- Релативном брзином брода  $\vec{v}_r$  (m/s),
- Преносном брзином речног тока, тј. покретног координатног система  $\vec{v}_p$  (m/s).

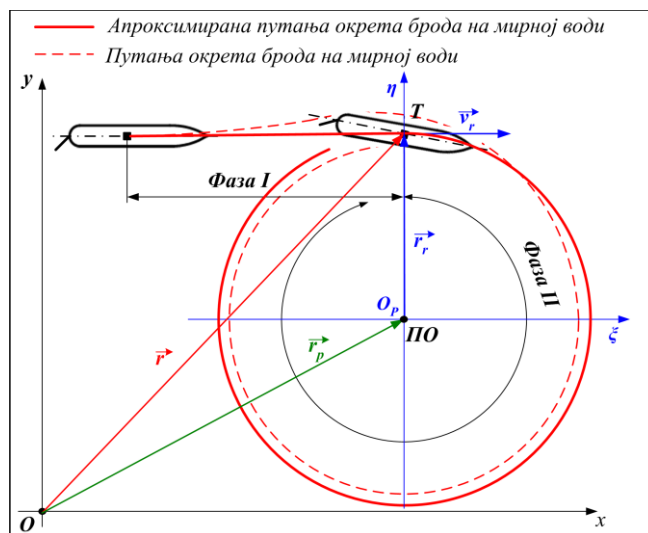
### 6.3.2. Кретање брода у окрету са маневром оба погонска мотора напред и откломом кормила у једну страну

Овде ће бити извршена анализа сложеног кретања брода у окрету на реци при пловидби са оба погонска мотора напред и откломом кормила у једну страну.

Ако се пође од чињенице да је брзина брода позната и да се брзина брода у окрету и пречник окрета на мирној води могу израчунати, према изразима који су приказани у поглављу 6.1.3.2., израчуната брзина и радијус могу се узети као релативна брзина брода и интензитет релативног вектора положаја. Ако се зна да је вектор брзине тежишта брода нормалан на полупречник круга окрета може се, са доста великом тачношћу, одредити почетни положај релативног вектора положаја брода. Ако је, поред тога, позната и брзина речног тока може се извршити теоријска анализа и приближно одређивање путање брода у окрету на реци.

За даље разматрање биће усвојене следеће претпоставке:

- у почетном тренутку времена смер речног тока је у смеру ординате  $x$ , а кретање брода у смеру ординате  $\xi$  тј.  $\gamma=0$  и  $\delta=0$  (слика 6.26),
- речни ток се као покретно тело креће равномерно брзином у целој зони окрета брода, тј. све тачке речног тока имају исту брзину,
- извршиће се апроксимација путање брода у окрету, на начин де се окрет брода прикаже у две фазе, при чему ће брод вршити праволинијско кретање у фази I и кружно кретање са константним пречником круга у фази II (слика 6.28),
- на почетку ће се посматрати окрет брода од тренутка када брод заврши фазу I и уђе у фазу II окрета (положај T на слици 6.28). При томе ће израчуната брзина брода  $v_g$  бити узета као интензитет релативне брзине брода  $v_r$ , а израчунати пречник окрета  $r_k$  као интензитет релативног вектора положаја  $\vec{r}_r$  са исходиштем у полу окрета који ће бити везан за почетак покретног координатног система,

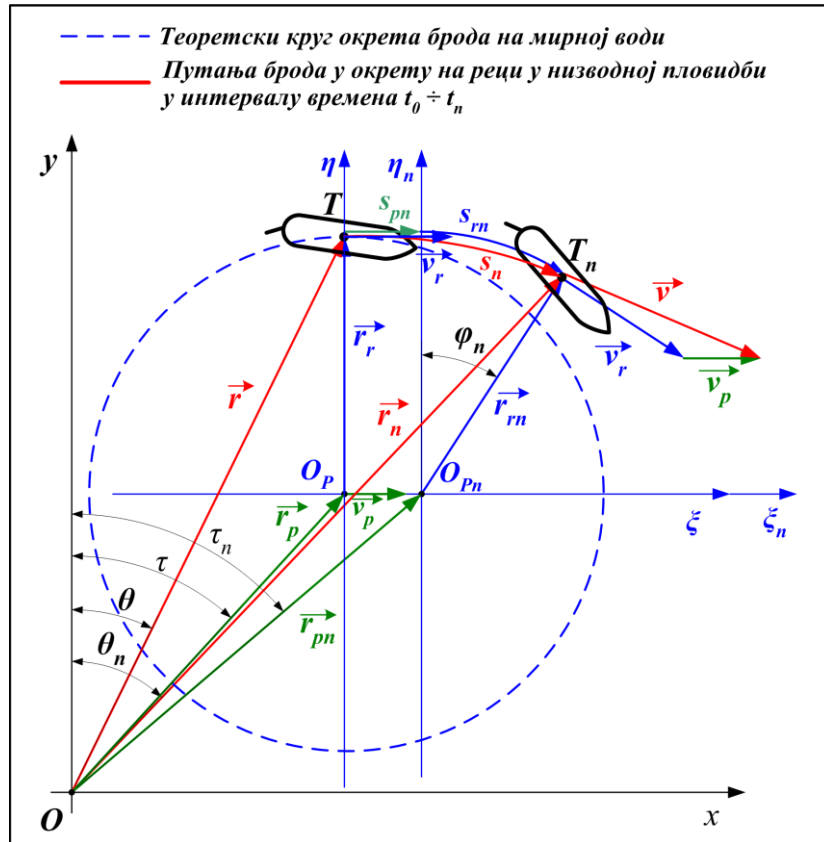


Слика 6.28. Апроксимирана путања окрета брода и положај брода у окрету у почетном тренутку времена  $t_0$

- у анализи кретања брода на речном току посматраће се путања коју описује његово тежиште,
- релативни вектор положаја тежишта брода не мења се по интензитету већ по положају и смеру,

- апсолутни и преносни вектори положаја мењају се по интензитету и по смеру,

На слици 6.29 је приказан положај брода који брзином  $\vec{v}_r$  плови на реци чија је брзина речног тока  $\vec{v}_p$  и положај покретног координатног система у почетном тренутку времена  $t_0$  (положај  $T$ ) и у неком тренутку времена  $t_n$  (положај  $T_n$ ). Испрекиданом линијом је представљен претпостављени круг окрета брода на мирној води.



Слика 6.29. Положај покретног координатног система и брода у почетном тренутку времена  $t_0$  и у одређеном тренутку времена  $t_n$

За одређено време  $t_n$  покретни координатни систем  $\zeta O_p \eta$  ће заузети нови положај  $\zeta_n O_{pn} \eta_n$  са преносним вектором положаја  $\vec{r}_{pn}$  чији је угао помераја  $\tau_n$ , при чему ће превалити пут  $s_{pn} = |\vec{v}_p| \cdot t_n$ , а брод ће заузети нови положај, тј. тачка  $T$  ће заузети положај  $T_n$  са релативним вектором положаја  $\vec{r}_{rn}$  чији је угао помераја  $\varphi_n$  у односу на покретни координатни систем, услед чега ће брод превалити релативни пут  $s_{rn} = \varphi_n \cdot |\vec{r}_{rn}|$ . У односу на непокретни координатни систем тежиште брода ће превалити пут  $s_n = |\vec{v}| \cdot t_n$ , а апсолутни вектор положаја ће променити смер за угао помераја  $\theta_n$ .

Како је апсолутна брзина једнака збиру релативне и преносне брзине

$$\vec{v} = \vec{v}_p + \vec{v}_r, \quad (6.84)$$

а релативна брзина брода се може приказати

$$\vec{v}_r = \vec{v}_p \sin \varphi + \vec{v}_r \cos \varphi \quad (6.85)$$

израз за интензитет апсолутне брзине брода може имати следећи изглед

$$|\vec{v}| = \sqrt{|\vec{v}_p|^2 + |\vec{v}_r|^2 \sin^2 \varphi + |\vec{v}_r|^2 \cos^2 \varphi}. \quad (6.86)$$

Угао  $\varphi$  се за пуни окрет брода мења од  $0^\circ$  до  $360^\circ$  или изражено у радијанима од 0 до  $2\pi$  rad.

У координатном систему путању (преваљени пут) брода представља ходограм апсолутног вектора положаја брода у односу на тачку  $O$ . Апсолутни вектор положаја може бити приказан на следећи начин:

$$\vec{r} = \vec{r}_p + \vec{r}_r \quad (6.87)$$

или

$$\vec{r} = \vec{r}_p \sin \tau + \vec{r}_p \cos \tau + \vec{r}_r \sin \varphi + \vec{r}_r \cos \varphi. \quad (6.88)$$

Апсолутни вектор положаја је одређен својим интензитетом и апсолутним углом помераја  $\theta$ .

Интензитет вектора се може израчунати из следећег израза

$$|\vec{r}| = \sqrt{(|\vec{r}_p| \sin \tau + |\vec{r}_r| \sin \varphi)^2 + (|\vec{r}_p| \cos \tau + |\vec{r}_r| \cos \varphi)^2}. \quad (6.89)$$

Како се угао помераја  $\varphi$  мења са временом потребно га је изразити у функцији времена. Ако се зна да је  $s_r = \varphi \cdot r_r$  угао помераја може да се изрази  $\varphi = \frac{s_r}{r_r}$ . Ако се у овом изразу преваљени пут прикаже  $s_r = v_r \cdot t$  добиће се угао помераја  $\varphi$  у функцији времена. Исто то ће се добити ако се угао помераја посматра у зависности од релативне угаоне брзине која се можемо приказати изразом  $\omega = \frac{v_r}{r_r}$  или са друге стране  $\omega = \frac{\varphi}{t}$  из чега произилази да је  $\frac{v_r}{r_r} = \frac{\varphi}{t}$ .

На основу горе наведеног може се угао  $\varphi$  изразити у функцији времена и познатих величина релативне брзине и пречника круга окрета, тј. релативног вектора положаја, на начин да је

$$\varphi(t) = \frac{v_r \cdot t}{r_r}. \quad (6.90)$$

Са временом се мењају и интензитет преносног вектора положаја  $\vec{r}_p$  и преносни угао помераја  $\tau$ . Ако је познат почетни положај брода у односу на неку тачку на земљи, тј. у односу на непокретни координатни систем интензитет преносног вектора положаја и преносни угао помераја могу се изразити у функцији времена:

$$|\vec{r}_p|(t) = \sqrt{(|\vec{r}_p| \cos \tau)^2 + (|\vec{r}_p| \sin \tau + v_p \cdot t)^2} \quad \text{и} \quad (6.91)$$

$$\tau(t) = \arctan \frac{|\vec{r}_p| \sin \tau + v_p \cdot t}{|\vec{r}_p| \cos \tau}. \quad (6.92)$$

Ако се изрази за угао помераја  $\varphi$  и интензитет преносног вектора положаја унесу у израз (6.89) добиће се израз за интензитет вектора положаја у функцији времена

$$|\vec{r}|(t) = \sqrt{\left( |\vec{r}_p| \sin \tau + v_p \cdot t + |\vec{r}_r| \sin \frac{|\vec{v}_r| \cdot t}{|\vec{r}_r|} \right)^2 + \left( |\vec{r}_p| \cos \tau + |\vec{r}_r| \cos \frac{|\vec{v}_r| \cdot t}{|\vec{r}_r|} \right)^2}. \quad (6.93)$$

Апсолутни угао помераја  $\theta$  може се израчунати из израза

$$\theta = \arccos \frac{|\vec{r}_p| \cos \tau + |\vec{r}_r| \cos \varphi}{|\vec{r}|} \quad (6.94)$$



или

$$\theta = \arctan \frac{|\vec{r}_p| \sin \tau + |\vec{r}_r| \sin \varphi}{|\vec{r}_p| \cos \tau + |\vec{r}_r| \cos \varphi}. \quad (6.95)$$

Израз за апсолутни угао помераја приказан у функцији времена је

$$\theta(t) = \arctan \frac{(|\vec{r}_p| \sin \tau + v_p \cdot t) + |\vec{r}_r| \sin \frac{\vec{v}_r \cdot t}{|\vec{r}_r|}}{|\vec{r}_p| \cos \tau + |\vec{r}_r| \cos \frac{\vec{v}_r \cdot t}{|\vec{r}_r|}}. \quad (6.96)$$

Ако се речни ток, тј, покретни координатни систем креће под неким углом у односу на непокретни координатни систем (угао  $\gamma \neq 0$ ) изрази за интензитет апсолутног вектора положаја и апсолутног угла помераја у функцији времена имаће опште изразе:

$$|\vec{r}|(t) = \sqrt{\left( |\vec{r}_p| \sin \tau + (\vec{v}_p \cdot t) \sin \gamma + |\vec{r}_r| \sin \left( \frac{|\vec{v}_r| \cdot t}{|\vec{r}_r|} \pm \gamma \right) \right)^2 + \left( |\vec{r}_p| \cos \tau + \vec{r}_r \cos \left( \frac{|\vec{v}_r| \cdot t}{|\vec{r}_r|} \pm \gamma \right) \right)^2} \quad (6.97)$$

и

$$\theta(t) = \arctan \frac{(|\vec{r}_p| \sin \tau + (\vec{v}_p \cdot t) \sin \gamma) + |\vec{r}_r| \sin \left( \frac{|\vec{v}_r| \cdot t}{|\vec{r}_r|} \pm \gamma \right)}{(|\vec{r}_p| \cos \tau + (\vec{v}_p \cdot t) \cos \gamma) + |\vec{r}_r| \cos \left( \frac{|\vec{v}_r| \cdot t}{|\vec{r}_r|} \pm \gamma \right)}. \quad (6.98)$$

Вектор преносне брзине брода у односу на координатни систем, за време окрета брода, задржава исти смер, док вектор релативне брзине код кретања брода низводно има почетни позитиван смер, а код кретања брода узводно има почетни негативан смер. Ово резултира различитим обликом путање кретања брода у окрету при низводној и узводној пловидби.

Ако брод плови низводно и релативни угао помераја  $\varphi$  се повећава у смеру кретања казальке на сату, компоненте релативног вектора положаја  $\vec{r}_r$ , у зависности од величине релативног угла помераја  $\varphi$  имају предзнак + или – према следећем:

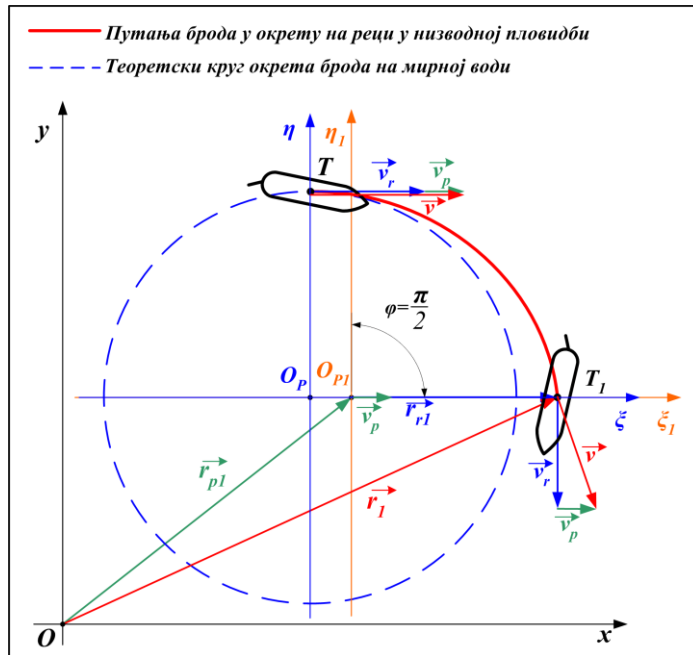
$$\vec{r}_r \sin \varphi(\varphi) = \begin{cases} +, & 0 \div \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \div \pi \\ -, & \pi \div \frac{3\pi}{2}, \frac{3\pi}{2} \div 2\pi \end{cases} \quad (6.99)$$

$$\vec{r}_r \cos \varphi(\varphi) = \begin{cases} +, & 0 \div \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2} \div 2\pi \\ -, & \frac{\pi}{2} \div \pi, \pi \div \frac{3\pi}{2} \end{cases} \quad (6.100)$$

Анализа пуање брода у пуном окрету на реци биће анализирана кроз положаје брода за четири карактеристична угла помераја. Ако се са  $t_{uk}$  означи време за које брод направи пуни окрет и посматра брод у низводној пловидби може се закључити да ће:

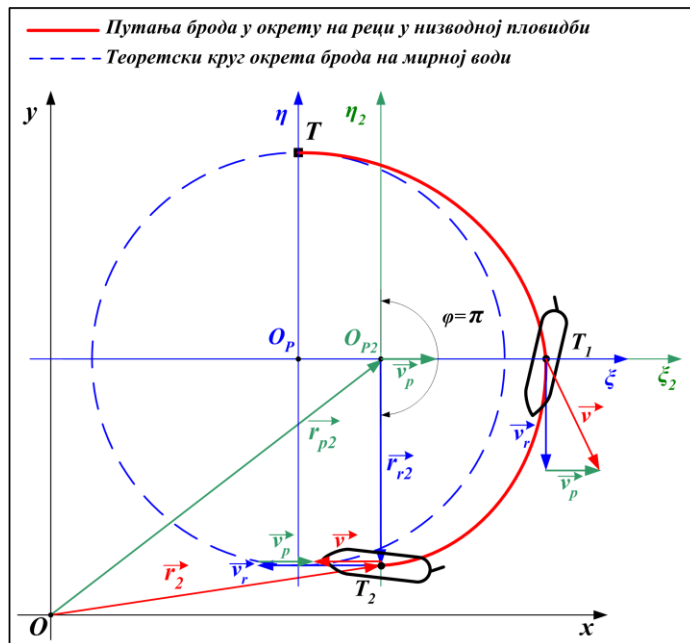
- За тренутак времена  $t_1 = \frac{t_{uk}}{4}$  угао помераја брода износити  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ , а преносни пут  $s_{p1} = \vec{v}_p \cdot \frac{t_{uk}}{4}$ , при чему ће покретни координатни систем  $\zeta O_{p1} \eta$  заузети положај  $\zeta_1 O_{p1} \eta_1$ ,

а брод ће заузети положај  $T_1$ . На слици 6.30 приказан је део претпостављене путање брода у интервалу времена  $t_0 \div t_1$ .



Слика 6.30. Путања брода у окрету код возње низводно за тренутак времена  $t_1$

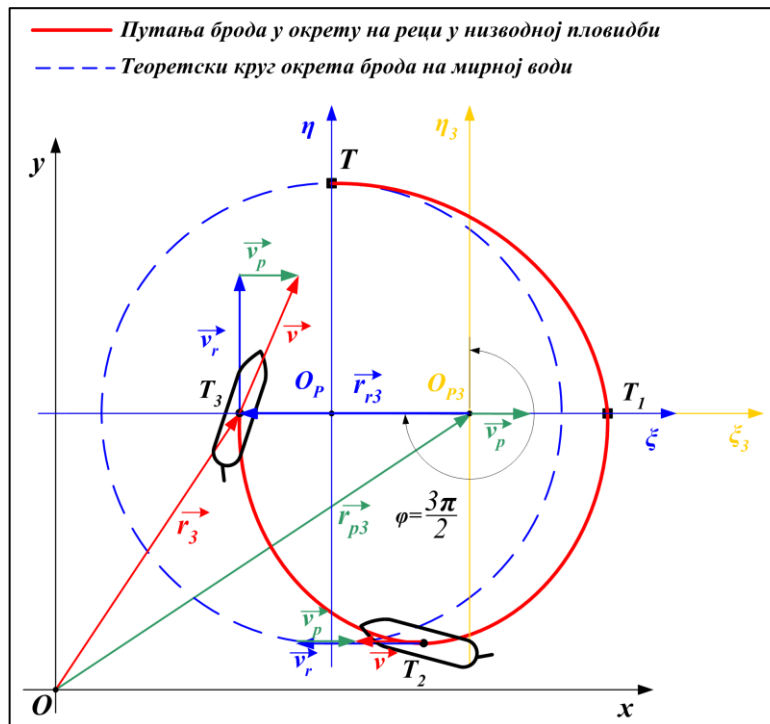
- за тренутак времена  $t_2 = \frac{t_{uk}}{2}$  угао помераја брода износити  $\varphi = \pi$ , а преносни пут  $s_{p2} = \vec{v}_p \cdot \frac{t_{uk}}{2}$ , при чему ће покретни координатни систем  $\zeta O_P \eta$  заузети положај  $\zeta_2 O_{P2} \eta_2$ , а брод ће заузети положај  $T_2$ . На слици 6.31 приказан је део претпостављене путање брода у интервалу времена  $t_0 \div t_2$ .



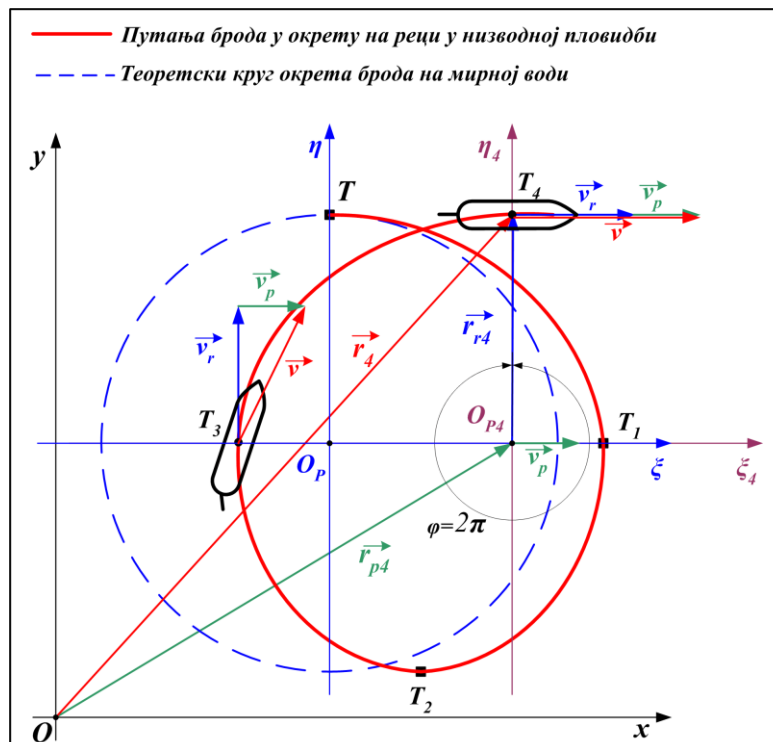
Слика 6.31. Путања брода у окрету код возње низводно за тренутак времена  $t_2$

- за тренутак времена  $t_3 = \frac{3t_{uk}}{4}$  угао помераја брода износити  $\varphi = \frac{3\pi}{2}$ , а преносни пут  $s_{p3} = \vec{v}_p \cdot \frac{3t_{uk}}{5}$ , при чему ће покретни координатни систем  $\zeta O_P \eta$  заузети

положај  $\xi_3 O_{P3} \eta_3$ , а брод ће заузети положај  $T_3$ . На слици 6.32 приказан је део претпостављене путање брода у интервалу времена  $t_0 \div t_3$ .



- Слика 6.32. Путања брода у окрету код возње низводно за тренутак времена  $t_3$
- за тренутак времена  $t_4 = t_{uk}$  угао помераја брода износити  $\varphi = 2\pi$ , а преносни пут  $s_{p4} = \vec{v}_p \cdot t_{uk}$ , при чему ће покретни координатни систем  $\xi O_P \eta$  заузети положај  $\xi_4 O_{P4} \eta_4$ , а брод ће заузети положај  $T_4$ . На слици 6.33 приказан је део претпостављене путање брода у интервалу времена  $t_0 \div t_4$ .



Слика 6.33. Путања брода у окрету код возње низводно за тренутак времена  $t_4$

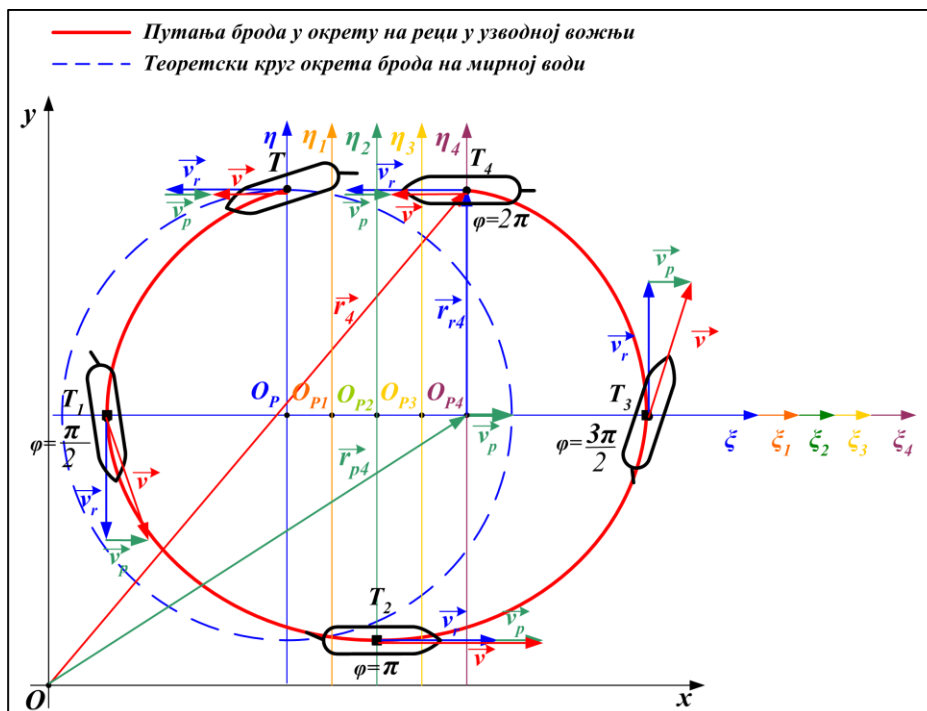
Из датих израза следи да се преносни пут брода повећава са временом од  $s_p = 0$  за  $t = 0$  до максималног износа на крају окрета  $s_p = v_p \cdot t_{uk}$  за  $t = t_{uk}$ .

Ако се брод креће узводно и релативни угао помераја  $\varphi$  се повећава у смеру супротном кретању казаљке на сату, компоненте релативног вектора положаја  $\vec{r}_r$ , у зависности од величине релативног угла помераја  $\varphi$  имају предзнак + или – према следећем:

$$\vec{r}_r \sin \varphi(\varphi) = \begin{cases} -, & 0 \div \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \div \pi \\ +, & \pi \div \frac{3\pi}{2}, \frac{3\pi}{2} \div 2\pi \end{cases} \quad (6.100)$$

$$\vec{r}_r \cos \varphi(\varphi) = \begin{cases} +, & 0 \div \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2} \div 2\pi \\ -, & \frac{\pi}{2} \div \pi, \pi \div \frac{3\pi}{2} \end{cases} \quad (6.101)$$

Аналогно начину посматрања кретања брода у окрету у низводној пловидби може се добити облик путање кретања брода у окрету у узводној пловидби. На слици 6.34 је приказана путања сложеног кретања брода у окрету при узводној пловидби са приказаним положајима тежишта брода и покретног координатног система за времена  $t_1, t_2, t_3$  и  $t_4$

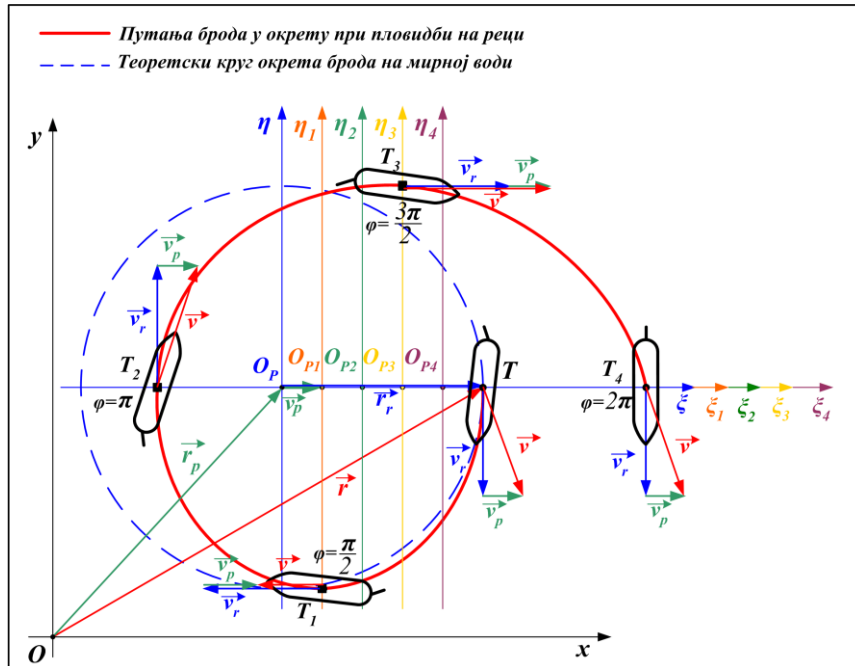


Слика 6.34. Путања брода у окрету при пловидби узводно

Може се закључити да путања брода у окрету на реци има облик елипсе који зависи од смера пловидбе брода у односу на смер кретања речног тока и од односа брзине кретања брода и брзине кретања речног тока. Што је разлика брзине брода у односу на брзину речног тока већа путања окрета брода је приближнија кругу.

До сада је разматрана путања кретања брода у узводној и низводној пловидби када брод пливи у правцу кретања речног тока. Ако брод крене у окрет у пловидби под неким углом на кретање речног тока облик путање окрета ће се променити.

Као пример биће приказана путања окрета брода када брод уђе у окрет при пловидби нормално на смер речног тока. На слици 6.35 приказана је претпостављена путања окрета брода када брод плови нормално на смер кретања речног тока и започиње окрет узводно.



Слика 6.35. Путања брода у окрету код курса брода нормално на реку и скретању узводно

У претходним разматрањима је показано како брзина речног тока утиче на облик путање окрета брода на реци у фази II апроксимиране путање брода.

Ако се анализира путања окрета од тренутка уласка у маневар (отклона кормила) до почетка кружног кретања, тј. у фази I апроксимиране путање брода у окрету треба нагласити да у тој фази окрета брод губи брзину, тј. да успорава што значи да има негативно убрзање. Ако са  $\vec{v}$  означимо брзину брода са којом брод улази у окрет, а са  $\vec{v}_g$  израчунату брзину брода у окрету, а са  $t_l$  означи време за које брод пређе путању у фази I и улази у фазу II окрета, када плови константном брзином, средње убрзање може се одредити из израза

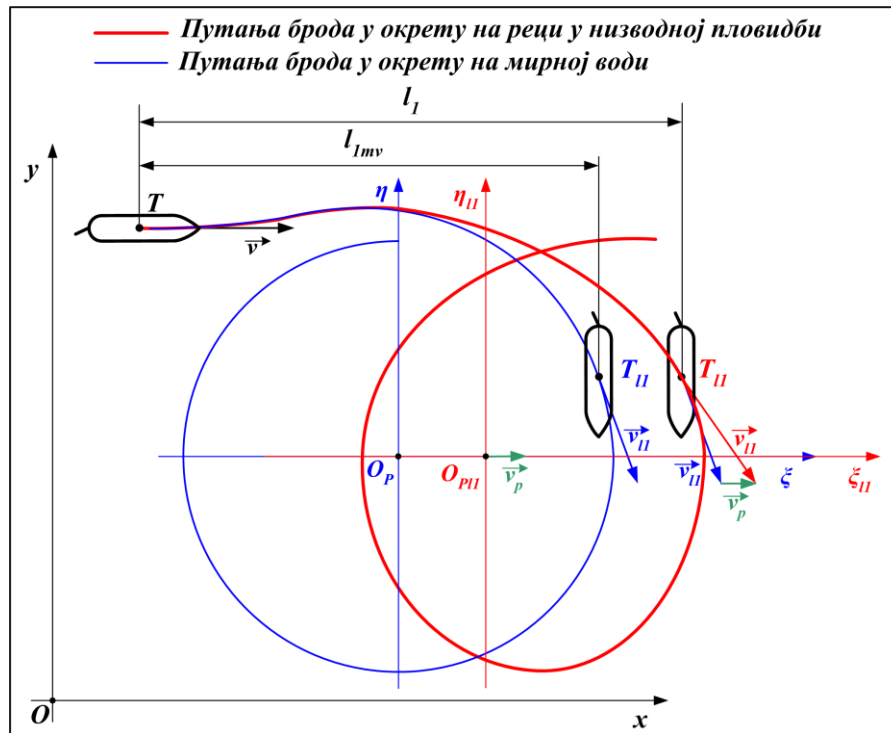
$$\vec{a}_{sr} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v}(t + \Delta t) - \vec{v}(t)}{t + \Delta t} = \frac{\vec{v}_g - \vec{v}}{t_l} \quad (6.102)$$

Вредност средњег убрзања брода у окрету може се одредити експерименталним путем мерењем параметара брода у окрету приликом испитивања у пловидби.

Може се закључити да је утицај брзине речног тока највећи у првој и у другој фази окрета, тј. у прелазној путањи  $l_1$  (приказана на слици 6.40). У самом окрету брода, а нарочито у трећој фази окрета утицај речног тока на дужину путање је занемарив јер се у једном делу окрета брзине брода и речног тока сабирају, а у другом делу окрета одузимају.

На слици 6.36 је приказана прелазна путања брода  $l_1$  у низводној пловидби брода. Са  $l_{1mv}$  означена је прелазна путања брода у окрету на мирној води.

Може се закључити да се приликом пловидбе брода низводно прелазна путања увећава за израз  $|\vec{v}_p| \cdot t_{l1}$ , тј. за преносни пут речног тока. Исто тако у узводној пловидби прелазна путања се скраћује за преносни пут речног тока. За окрет брода при низводној вожњи је потребно више простора него за окрет при узводној вожњи. Ово је важно знати када се пловидба одвија у ограниченом и уском простору речног тока.



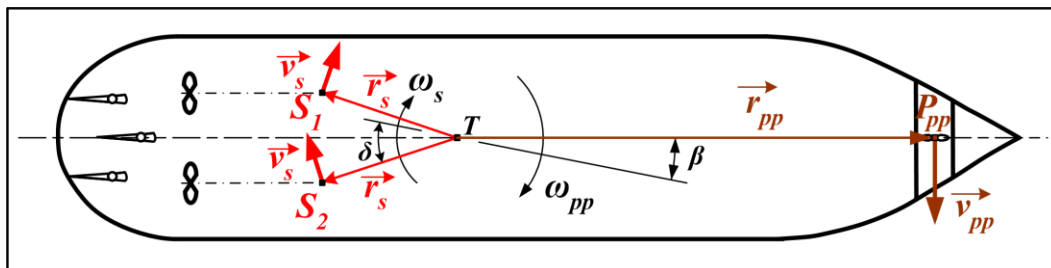
Слика 6.36. Прелазна путања брода у окрету при низводној пловидби

### 6.3.3. Кретање брода у окрету са маневром спрега погонских мотора, употребом прамчаног потисника и отклоном кормила у једну страну

Након извршене анализе окрета брода на реци у маневру оба мотора напред и отклоном кормила у једну страну анализирати ће се и окрет брода у маневру са спрегом погонских мотора и употребом прамчаног потисника и са отклоном кормила у једну страну. Окрет се може вршити, како је то показано у поглављу о динамици брода на реци, са употребом спрега, употребом прамчаног потисника или истовременом употребом и једног и другог уз закрет кормила у једну страну.

У овом случају брод посматрамо као тело које, поред горе наведеног сложеног кретања, истовремено врши додатно ротационо кретање око осе која пролази кроз тежиште и нормална је на раван кретања. Ово доводи до повећавања угла скретања  $\zeta_2$  приказаном на слици 6.15.

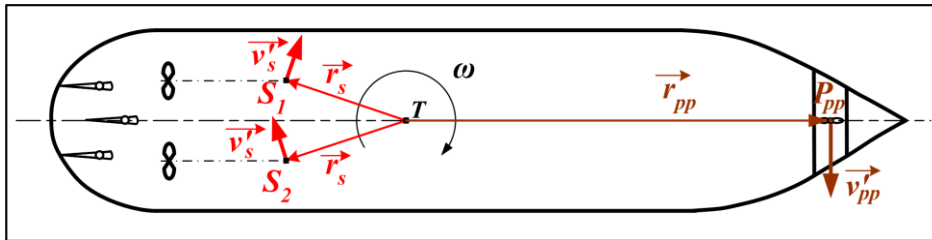
На слици 6.37 је приказан брод са распоредом познатих тачака на броду  $S_1$ ,  $S_2$  и  $P_{pp}$  са угаоним брзинама и векторима положаја које су познате код деловања спрега и прамчаног потисника. Тачке  $S_1$  и  $S_2$  су тачке упорних лежаја погонских мотора док је тачка  $P_{pp}$  тачка упорног лежаја прамчаног потисника.



Слика 6.37. Угаоне брзине карактеристичних тачака на броду при употреби спрега погонских мотора или прамчаног потисника

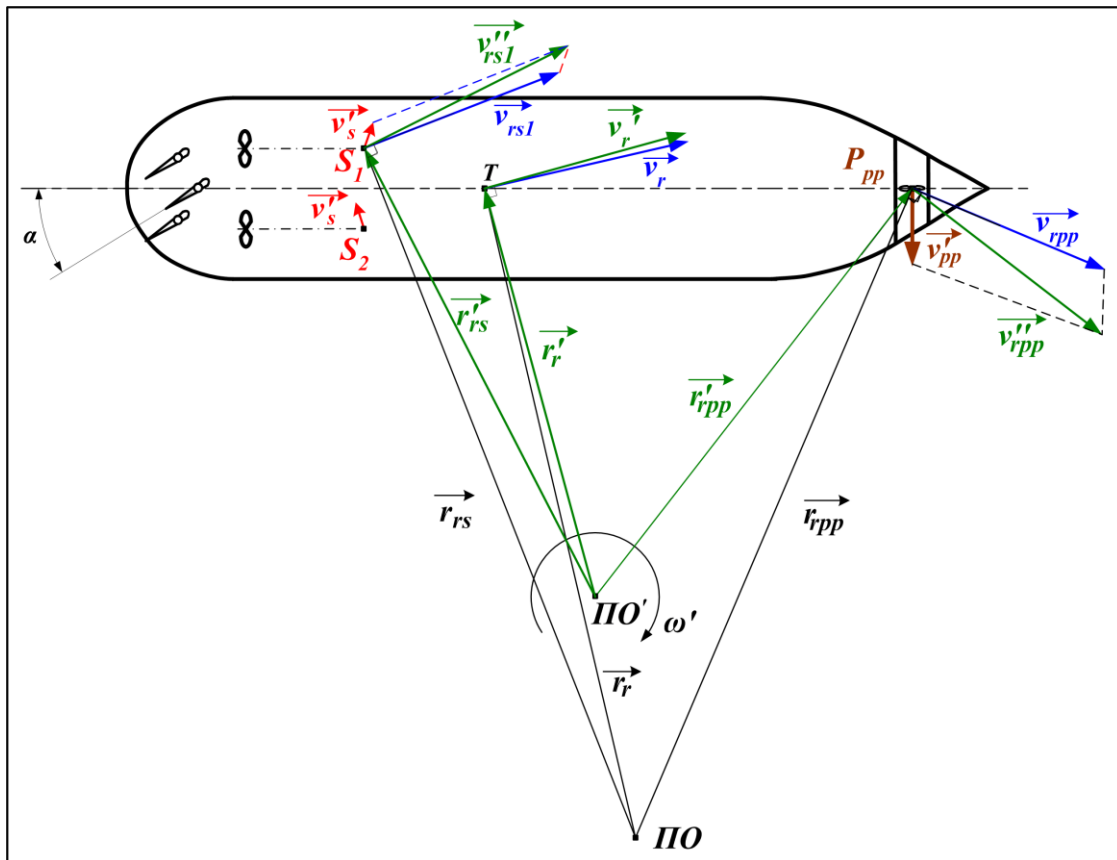
За почетак ће се посматрати брод који врши окрет из стања мировања. Тачка  $P_{pp}$  која, услед деловања прамчаног потисника, има брзину  $\vec{v}_{pp}$  одређену вектором положаја  $\vec{r}_{pp}$  и углом  $\beta$ . Тачке  $S_1$  и  $S_2$  услед деловања спрега погонских мотора имају брзину  $\vec{v}_s$  и одређене су вектором положаја  $\vec{r}_s$  и углом помераја  $\delta$ . Уколико је укључен само спрег погонских електромотора брод ће ротирати око тежишта  $T$  угаоном брзином  $\omega_s$ . Ако је укључен само прамчани потисник брод ће ротирати око тежишта  $T$  угаоном брзином  $\omega_{pp}$ .

Ако се окрет врши истовременим укључивањем спрега погонских мотора и прамчаног потисника брод ће ротирати око тежишта  $T$  угаоном брзином  $\omega = \omega_s + \omega_{pp}$  при чему ће тачке  $S_1$  и  $S_2$  имати брзину  $v'_s = r_s \cdot \omega$ , а тачка  $P_{pp}$  брзину  $v'_{pp} = r_{pp} \cdot \omega$  (слика 6.38).



Слика 6.38. Угаоне брзине карактеристичних тачака на броду при истовременој употреби спрега погонских мотора и прамчаног потисника

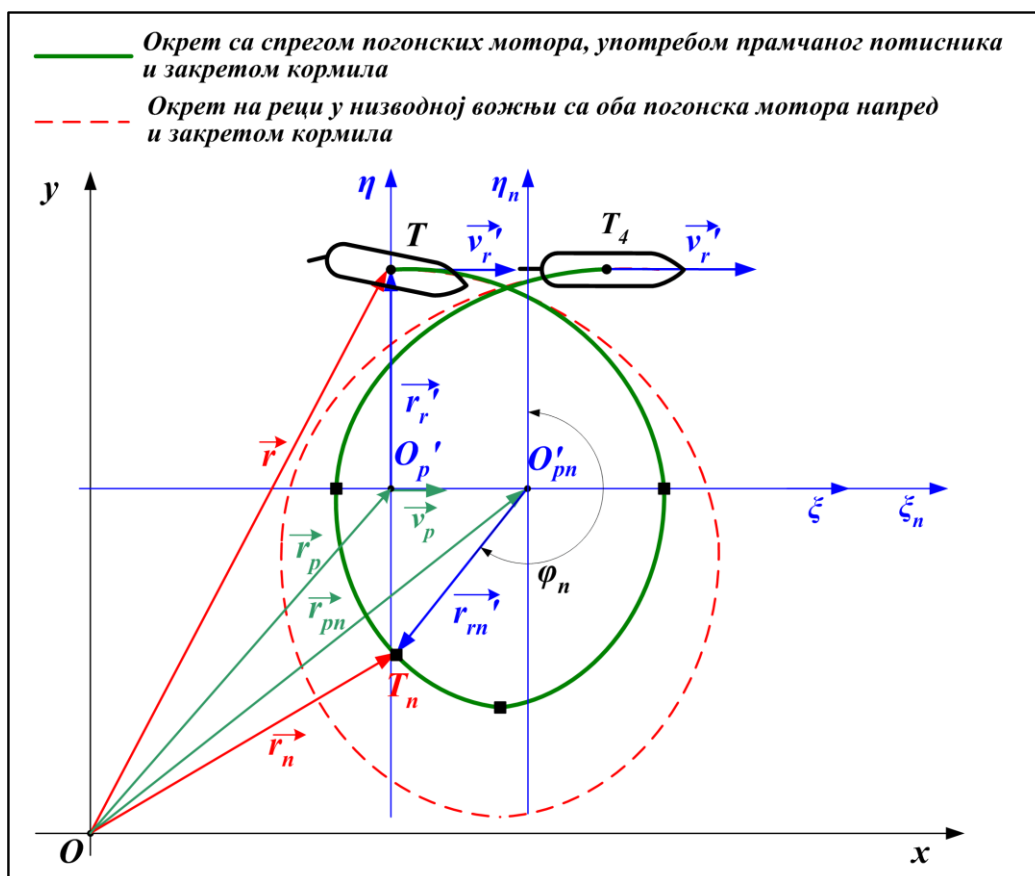
Ако брод у пловидби услед отклона кормила започне окрет са брзином тежишта  $\vec{v}_r$  тачке  $S_1$  и  $S_2$  ће имати брзину  $\vec{v}_{rs1}$  и  $\vec{v}_{rs2}$ , а тачка  $P_{pp}$  брзину  $\vec{v}_{rpp}$ , са смером вектора нормалним на релативне векторе положаја у односу на пол окрета ПО. Укључивање спрега и прамчаног потисника узроковаће промену брзине тих тачака, а самим тим и промену тренутног пола брзина брода у окрету. Одређивање тренутног пола брзина, тј. окрета приказано је на слици 6.39.



Слика 6.39. Одређивање пола окрета брода у окрету при употреби отклона кормила, спрега погонских мотора и прамчаног потисника

Брзине кретања горе наведених тачака у окрету брода  $\vec{v}_{rs1}''$ ,  $\vec{v}_{rs2}''$  и  $\vec{v}_{rpp}''$  биће једнаке векторском збиру брзина тих тачака услед пловидбе брода  $\vec{v}_{rs1}$ ,  $\vec{v}_{rs2}$  и  $\vec{v}_{rpp}$  и наведених брзина тачака услед деловања спрега  $\vec{v}_s'$  и прамчаног потисника  $\vec{v}_{pp}'$ , тј.  $\vec{v}_{rs1}'' = \vec{v}_{rs1} + \vec{v}_s'$ ,  $\vec{v}_{rs2}'' = \vec{v}_{rs2} + \vec{v}_s'$  и  $\vec{v}_{rpp}'' = \vec{v}_{rpp} + \vec{v}_{pp}'$ . Како је за одређивање пола окрета довољно познавање брзине две тачке тела на слици су приказане брзине тачака  $S_1$  и  $P_{pp}$ . Нови тренутни пол брзина брода  $ПО'$  налази се у сецишту релативних вектора положаја  $\vec{r}_{rs}'$  и  $\vec{r}_{pp}'$  и померен је ближе броду у односу на пол брзина брода  $ПО$  када је брод у маневру окрета са оба погонска мотора напред и отклоном кормила, без употребе прамчаног потисника. Важно је напоменути и то да ће се услед деловања спрега погонских мотора брод успорити, тј. интензитети вектора брзине  $\vec{v}_{rs1}$ ,  $\vec{v}_{rs2}$  и  $\vec{v}_{rpp}$  проматраних тачака ће бити мањи, што ће узроковати додатно померање пола окрета ближе броду. Резултат померања пола окрета ближе броду је тај да брод врши окрет са мањим пречником, тј. тежиште брода се креће брзином  $\vec{v}_r'$ , а његов релативни вектор положаја  $\vec{r}_r'$  је мањег интензитета.

Ако се сада посматра брод у окрету на реци може се закључити да ће претпостављени облик путање брода у возњи низводно, са наведеним маневром, имати облик приказан на слици 6.40. Ради поређења на слици је приказана и путања окрета у раније приказаном маневру окрета у возњи са оба погонска мотора напред и отклоном кормила у једну страну.



Слика 6.40. Путања брода у окрету код возње низводно са употребом отклона кормила, спрега погонских мотора и прамчаног потисника

Приликом пловидбе брода на реци на њега утичу и специфични услови пловидбе, као што су брзина речног тока, смер пловидбе брода у односу на смер кретања воде и дубина воде [37].



Река својим током непрестано утиче на брзину брода, маневре окретања, залетања брода (зауоставни пут), сидрење и на маневре пристајања тј. испловљења брода.

У пловидби се мора узети у обзир угао заношења, тј. угао између курса преко воде и курса брода преко дна због настојања речног тока да закрене брод. Угао заношења се смањује са повећањем брзине брода и обрнуто, а исто тако, при константној брзини брода, угао заношења може се смањити ако се курс брода изједначи са смером речног тока.

У условима мале дубине воде долази до појаве повећања газа или тзв. урођења, тј. делимичног спуштања брода. О овој појави се мора водити рачуна због могућег наседања брода на дно или приљубљивања брода уз дно.

Приликом извођења окрета брода морају се узети у обзир ширина пловног пута, смер и јачина речног тока, дужина брода, смер и јачина ветра и маневарске карактеристике брода. Пре извођења окретања потребно је одредити страну преко које се врши окрет, а она се одређује тако да резултантна деловања речног тока и ветра потпомаже окретање.

Да би се утицај речног тока на испитивање брода свео на минимум потребно је испитивање брода вршити на делу речног тока где је река широка, а дубина воде довољно велика што резултира мањом брзином речног тока.

## 7. ИСПИТИВАЊЕ БРОДА „КОЗАРА” НАКОН МОДЕРНИЗАЦИЈЕ

У овој глави су приказани поступци, опрема за испитивање, програм испитивања и резултати испитивања.

### 7.1. ДЕФИНИСАЊЕ ПРОГРАМА ИСПИТИВАЊА

Програм испитивања брода „КОЗАРА” након модернизације садржи [48]:

- *испитивање погонских и маневарских карактеристика брода,*
- *мерење обртног момента на вратилном воду и снимање перформанси и*
- *мерење торзионих осцилација и мерење линераних вибрација на темељима опреме и на трупу брода.*

#### 7.1.1. Испитивање маневарских и погонских карактеристика брода „КОЗАРА”

Циљ испитивања маневарских и погонских карактеристика брода је оцена управљивости брода „КОЗАРА” након модернизације.

Појам „управљивост” брода обухвата више различитих погледа на карактеристике управљања бродском путањом, брзином и позицијом, како на отвореном мору, тако и у ограниченим пловним путевима, под ограниченим условима акваторија.

Управљивост брода садржи низ међусобно зависних карактеристика, као што су: покретање, убрзавање, успоравање, заустављање, споро напредовање, вожња крмом, држање курса, промена курса, заокрет, прекид кружења, а у неким случајевима и одржавање задате позиције.

Међународна поморска организација (International Maritime Organization - ИМО) је препознала проблем и дала упутства за израду квантитативних стандарда перформанси управљивости [49]. Тако су, на пример, ИМО Резолуцијом А.751(18), приказани захтеви на управљивост за бродове дужине преко 100 метара, а Резолуција А601 препоручује да се управљивост брода предвиди пре конструисања, а провери након.

##### 7.1.1.1. Мерење брзине брода

Брзина брода се мери помоћу система ГПС на режимима рада: 50%, 75%, 100% номиналног броја обртаја погонских електро мотора при њиховом заједничком раду. Испитивање се изводи према важећим стандардима и процедурама [50], у низводној и узводној пловидби, а резултате мерења се уносе у одговарајућу испитну листу.

##### 7.1.1.2. Мерење пречника круга окрета

Сврха овога испитивања јесте оцена ефикасности активног управљања погоном при окрету брода у пловидби. Испитивање се изводи према важећим стандардима и процедурама [50]. Мерење пречника круга окрета се изводи на више различитих режима погона уз употребу кормила, или без његове употребе, уз укључивање прамчаног потисника, према следећем:

- a. На режимима рада: 25%, 50% и 100% номиналног броја обртаја погонских мотора при њиховом заједничком раду, на начин да су оба пропелера у пловидби напред, а кормило се отклони  $35^\circ$  лево или десно.
- б. На режимима рада: 25%, 50% и 100% номиналног броја обртаја погонских мотора при њиховом заједничком раду, на начин да се један пропелер нагло пребаци у пловидбу крмом, а кормило задржи у нултом положају.
- в. На режимима рада 25%, 50% и 100% номиналног броја обртаја погонских мотора при њиховом заједничком раду, на начин да се један пропелер нагло пребаци у пловидбу крмом, а кормило отклони  $35^\circ$  у одговарајућу страну.
- г. На режимима рада: 25%, 50% и 100% номиналног броја обртаја погонских мотора при њиховом заједничком раду, на начин да се један пропелер нагло пребаци у пловидбу крмом, кормило отклони  $35^\circ$  у одговарајућу страну и прамчани потисник се укључи у одговарајући смер погона максималном снагом.
- д. На режимима рада: 25%, 50% и 100% номиналног броја обртаја погонских мотора при њиховом заједничком раду, на начин да се један пропелер нагло пребаци у пловидбу крмом, кормило задржи у средини и прамчани потисник се укључи у одговарајући смер погона максималном снагом.

Резултати испитивања се уносе у одговарајућу испитну листу.

#### 7.1.1.3. Мерење зауставног пута

Карактеристика зауставног пута се мери на режиму рада 100% номиналног броја обртаја погонских мотора при њиховом заједничком раду и отклону кормила једнаком нули на нормалном депласману брода. Испитивање се изводи према важећим стандардима и процедурама [50], у низводној и узводној пловидби, а резултати мерења се уносе у одговарајућу испитну листу.

Параметри који се региструју при испитивању зауставног пута су:

- време од наређења „Стој- Крмом” до почетка вожње крмом,
- пређени пут од наређења „Стој- Крмом” до почетка вожње крмом.
- постизање брзину од  $0,25 \text{ m/s}$  уназад, када се и испитивање прекида.

#### 7.1.1.4. Испитивање убрзања

Мери се време које је потребно да брод достигне максималну брзину и растојање које до тада пређе, при чему брод креће из режима мировања погонских електромотора. Испитивање се врши према важећим стандардима и процедурама [50].

Испитивање се спроводи у узводној и низводној пловидби, а резултати мерења се уносе у одговарајућу испитну листу.

### 7.1.2. Мерење обртног момента на вратилном воду и снимање перформанси

Обртни момент се мери на вратилним водовима брода на режимима рада погонских електромотора са бројем обртаја пропелерских вратила:  $101, 202, 301, 375$  и  $393 \text{ min}^{-1}$ .

Мерење се изводи на једном од пропелерских вратила са вишеканалним мобилним мерним системом **SPIDER 8** према Упутству за мерење обртног момента [45]. На основу измерених вредности обртног момента, израчунава се снага на вратилном воду и цртају дијаграми снаге и обртног момента у функцији броја обртаја вратилног вода.

### 7.1.3. Мерење торзионих осцилација вратилних водова

Мерење торзионих осцилација се изводи у склопу мерења обртног (торзионог) момента у складу са захтевима Управе за утврђивање способности бродова за пловидбу (некадашњи Југословенски регистар бродова) [27], са циљем да се провери напрезање пропелерских вратила на увијање при различитим бројевима обртаја и да ли се на радним подручјима обртаја погонских мотора јављају недозвољена резонантна напрезања.

Мерење се изводи применом принципа мерења нивоа торзионих осцилација на основу мерења торзионог момента при континуалној промени броја обртаја и на задатим бројевима обртаја пропелера:  $101$  и  $375 \text{ min}^{-1}$ . Први начин мерења даје нестационаран сигнал чијом се анализом проверавају положаји критичних бројева обртаја и понашање система на прелазним режимима. Од другог начина мерења очекује се квазистационаран сигнал ( $n = \text{const.}$ ), на основу којег се одређује напрезање вратила на увијање услед торзионих осцилација на задатом броју обртаја мотора. Резонантне брзине, уколико постоје у мерном подручју, могу се уочити на дијаграму тока промене торзионог момента јер им одговарају веће вредности амплитуда.

Вредност максималног тангенцијалног напона (у даљем тексту тангенцијални напон) рачуна су делењем измереног торзионог момента са израчунатим поларним отпорним моментом:

$$\tau = \frac{M}{W_0} \quad (7.1)$$

Поларни отпорни момент за пропелерско вратило кружног попречног пресека израчунава се према формули:

$$W_0 = \frac{\pi \cdot d^3}{16} \approx 0,2d^3 \quad (7.2)$$

Код дизел погона тангенцијални напон на мерном месту директно је пропорционалан укупној тангенцијалној сили на коленастом вратилу мотора:

$$\tau = \frac{M}{W_0} = \frac{M_M \cdot \eta_{sp} \cdot i}{W_0} = \frac{F_T \cdot r \cdot \eta_{sp} \cdot i}{W_0} \quad (7.3)$$

Код погона електромотором тангенцијални напон на мерном месту директно је пропорционалан укупној снаги електромотора:

$$\tau = \frac{M}{W_0} = \frac{M_{EM} \cdot \eta_{sp} \cdot i}{W_0} = \frac{\frac{P}{\omega} \cdot \eta_{sp} \cdot i}{W_0} = 9,55 \frac{P \cdot n_{sp} \cdot i}{n \cdot W_0} \quad (7.4)$$

Напрезања пропелерског вратила од челика с границом развлачења од 430 до 510 МПа, настала услед резонантних, приближно резонантних и принудних осцилација, при дуготрајном раду не треба да пређу вредност  $\tau_{doz}$ :

$$\tau_{doz} = \pm \left( 45 - 0,4\sqrt{d} - 13 \frac{n}{n_n} \right) \quad (7.5)$$

За вратила од челика, чија границом развлачења прелази 510 МПа, дозвољено напрезање одређује се по изразу:

$$\tau = \tau_{doz} \frac{2R_m - 510}{R_m} \quad (7.6)$$

#### 7.1.4. Мерење линеарних вибрација на темељима опреме и на трупу брода

Одређивање мерних места на којима се врши мерење линеарних вибрација врши се на основу препорука Упутстава за рад са мерним уређајима и на основу искуства према значају мерних места за правилан рад уграђене опреме. Одређена су следећа мерна места на уграђеној опреми:

- 1 – предњи лежај левог електромотора на броју обртаја  $n=1468 \text{ min}^{-1}$ ,
- 2 – предњи лежај десног електромотора, на броју обртаја  $n=1468 \text{ min}^{-1}$ ,
- 3 – излазни лежај левог редуктора, на броју обртаја  $n=365 \text{ min}^{-1}$ ,
- 4 – излазни лежај десног редуктора, на броју обртаја  $n=365 \text{ min}^{-1}$ ,
- 5 – леви дизел генератор, 6 цилиндар,
- 6 – десни дизел генератор, 6 цилиндар,

Мерење линеарних вибрација на пропелерским вратилима брода извршено је у оквиру другог испитивања брода. Мерење је извршено на следећим мерним местима:

- 1 – предњим котрљајним лежајима пропелерских вратила и
- 2 – задњим котрљајним лежајима пропелерских вратила.

Линеарне вибрације на лежајима електромотора и редуктора и на цилиндрима дизел генератора мере се уређајем Vibrometer VIB-10. Уређајем се мери ефективна брзина вибрација у mm/s. Измерен ниво вибрација се пореди са референтним вредностима датим у стандарду (ISO 10816) [51], на основу чега се се даје оцена стања машине („добро”, „прихватљиво”, „незадовољавајуће”). Резултати мерења се евидентирају у испитну листу прописану упутством за рад са уређајем. У листи су означене класе уређаја на којима се мере вибрације, од I до VI, са дозвољеним нивоом вибрација. Добро стање вибрација означено је тамно зеленом бојом, прихватљиво стање светло зеленом бојом, још увек прихватљиво светло црвеном, а лоше стање бордо бојом.

Линеарне вибрације на предњем и задњем лежају међувратила вратилног вода мере се уређајем Shock Pulse Meter 43A. Уређај ради на принципу тзв. SPM методе [52], односно, мери индиректну брзину удара, тј. разлику у брзини између два тела у тренутку судара, а на излазу даје звучни сигнал одређене фреквенције (корисник чује испрекидан или непрекидан тон) у dB. Стање котрљајног лежаја се оцењује на основних, тзв. „тепих” вредности  $\text{dB}_C$  и максималних, тзв. „вршних” вредности  $\text{dB}_M$  које се читавају на скали  $\text{dB}_N$ . Резултати мерења се евидентирају у испитну листу која има зелено, жуто и црвено поље. Поља служе као путоказ за одређивање стања лежаја. Вршна и тепих вредност унутар зеленог поља означавају добро погонско стање. Мало повишена „тепих” вредност и вршна вредност унутар жутог поља означавају ограниченост века трајања. Велика разлика између „тепих” и вршних вредности и вршне вредности унутар црвеног поља означавају лоше погонско стање.

## 7.2. ИСПИТИВАЊЕ БРОДА „КОЗАРА” У ПЛОВИДБИ

У овом поглављу су приказани услови у којима је извођено испитивање, опрема са којом су вршена мерења задатих величина и резултати испитивања погонских и маневарских карактеристика брода (брзина и убрзање брода, пречник круга окрета и зауставни пут), мерења обртног момента на вратилном воду уз цртање перформанси, мерења торзионих вибрација вратилног вода и мерење линераних вибрација на темељима опреме и лежајевима вратилних водова. Испитивања брода су изведена по угледу на слична испитивања бродова у свету [53].

Прво испитивање брода у пловидби извршено је 09.05.2012. године на реци Дунав, на делу пловног пута од Новог Сада до Београда [54] и у оквиру њега је извршено прво мерење брзине, зауставног пута и убрзања брода и мерење обртног момента на вратилном воду брода. Испитивање је извршено у условима:

- *Депласман брода* 530 t
- *Средњи газ брода* 1,11 m
- *Дубина воде* 10 m
- *Брзина речног тока* 3,43 km/h
- *Метеоролошки услови пловидбе* без ветра и таласа

Друго испитивање брода у пловидби извршено је од 18. до 20.10.2013. године на реци Дунав на делу пловног пута у рејону Великог Градишта и Доњег Милановца [55] у оквиру којег је извршено друго мерење брзине, зауставног пута и убрзања брода и мерење пречника круга окретања брода. Испитивање је извршено у условима:

- *Депласман брода* 564 t
- *Средњи газ брода* 1,17 m
- *Дубина воде* до 15 m
- *Брзина речног тока* 2,24 km/h
- *Метеоролошки услови пловидбе* занемариви таласи са ветром који је 18.10.2013. године дувао из правца југа брзином 5 m/s у бок брода под правим углом, а 19. и 20.10.2013. године из правца југозапада брзинама 3 и 2 m/s, у бок брода под углом приближно 45°

Обим испитивања је био ограничен одобреним количинама горива и временским периодом у коме је брод могао бити испитиван, због чега је у реализацији испитивања дошло до следећих одступања од програма испитивања:

- *Испитивања нису вршена на пуном газу и у стању баласта, тј. на два гранична стања брода,*
- *Није вршен препоручени број понављања испитивања на појединим планираним маневрима, због чега није остварена поновљивост резултата и добијање средње вредности,*
- *Мерење пречника круга окрета није извршено за све планиране режиме у појединим маневрима. Овде је важно напоменути, да део испитивања пречника круга окрета*

са маневром где се користи спрег пропелера, није вршен на максималном режиму из разлога да се избегну превелика напрезања конструкције брода, узимајући у обзир временску старост структуре брода.

### 7.2.1. Испитивање погонских и маневарских карактеристика брода

Испитивање погонских и маневарских карактеристика брода „КОЗАРА” са новим дизел електричним погоном, извршено је у оквиру првог и другог испитивања брода на реци Дунав и обухватило је мерење: брзине, пречника круга окрета, зауставног пута и убрзања брода.

#### 7.2.1.1. Мерење брзине брода

Мерење брзине брода извршено је у оквиру првог и другог испитивања брода. За мерење брзине брода коришћен је бродски систем GPS (Global Position System). Дужина залета брода, пре самог мерења при константној брзини обртања погонских електромотора и уз минимално кормиларење, износила је око 3 наутичке миље (5,6 km), па је укупна дужина пута потребног за спроводење мерења износила 7 наутичких миља (приближно 13 km).

Мерење брзине брода на првом и другом мерењу обављено је:

- у једном пролазу у низводној пловидби на унапред дефинисаним бројевима обртаја погонских електромотора:  $750 \text{ min}^{-1}$ ,  $1.125 \text{ min}^{-1}$ ,  $1.490 \text{ min}^{-1}$  и  $1.550 \text{ min}^{-1}$ ,
- у једном пролазу у узводној пловидби на унапред дефинисаним бројевима обртаја погонских електромотора:  $1.125 \text{ min}^{-1}$ ,  $1.490 \text{ min}^{-1}$  и  $1.550 \text{ min}^{-1}$ .

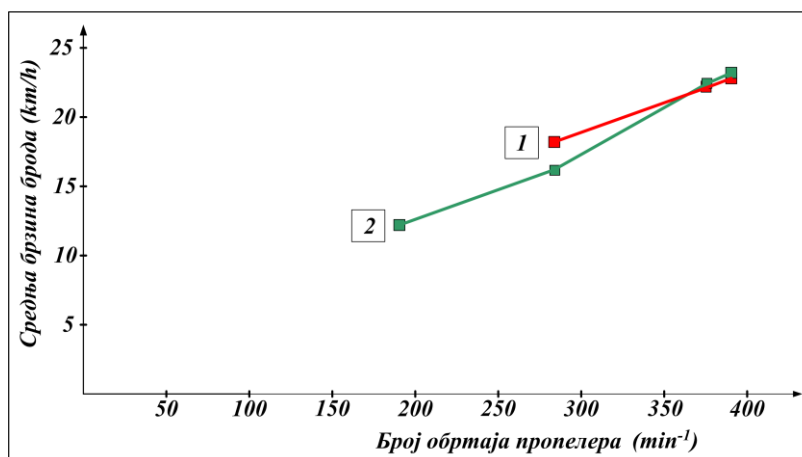
Наведени режими броја обртаја приближно одговарају режимима од: 50%, 75%, 100% и 110% номиналне снаге погонских електромотора.

Резултати мерења брзине брода „КОЗАРА” са ДЕП-ом на првом и другом мерењу приказани су у табели 7.1.

Табела 7.1. Резултати мерења брзине брода „КОЗАРА” са дизел електричним погоном на првом и другом мерењу

Ред. број	Број мотора у погону	Брзина обртања погонских електромотора [ $\text{min}^{-1}$ ]	Брзина обртања пропелера [ $\text{min}^{-1}$ ]	Брзина [ $\text{km/h}$ ]		
				низводно	узводно	средња
<i>а – Прво мерења брзине брода са ДЕП-ом на делу пловног пута од Новог Сада до Београда</i>						
1.	2	750	189	16		
2.	2	1125	283,5	21,1	15,2	18,15
3.	2	1490	375,5	25,56	18,71	22,14
4.	2	1550	390,6	26,1	19,63	22,87
<i>б – Друго мерење брзине брода са ДЕП-ом на делу пловног пута у рејону Великог Градишта</i>						
5.	2	750	189	12,6	12	12,3
6.	2	1125	283,5	17,0	15,4	16,2
7.	2	1490	375,5	24,5	20,0	22,25
8.	2	1550	390,6	26	20,4	23,2

На слици 7.1 приказан је дијаграм средњих брзина брода са дизел електричним погоном, измерених 09.05.2012. године на пловном путу од Новог Сада до Београда [1] (прво мерење) и 18.10.2013. године у рејону Великог Градишта [2] (друго мерење).



Слика 7.1. Дијаграм средње брзине брода „КОЗАРА” у функцији брзине обртања пропелера са дизел електричним погоном, за два мерења **1** и **2**

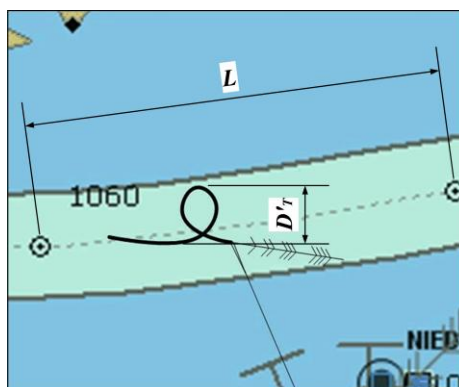
### 7.2.1.2. Мерење пречника круга окрета брода

Мерење пречника круга окрета извршено је у оквиру другог испитивања брода 18. и 19.10.2013. године на делу пловног пута у рејону Великог Градишта и Доњег Милановца, у следећим варијантама употребе погона за маневре окрета:

- максимални отклон кормила у лево или десно, без промене режима мотора код вожње напред у режимима погонских ЕМ:  $750 \text{ min}^{-1}$ ,  $1000 \text{ min}^{-1}$  и  $1490 \text{ min}^{-1}$ ,
- спрега, без употребе кормила и прамчаног потисника, у режимима погонских ЕМ:  $1000 \text{ o/min}$  напред или крмом,
- спрега и отклона кормила у једну или другу страну, у режимима погонских ЕМ:  $750 \text{ min}^{-1}$  и  $1000 \text{ min}^{-1}$  напред или крмом,
- спрега и отклона кормила у једну или другу страну и употребу прамчаног потисника у режимима погонских ЕМ:  $1000 \text{ min}^{-1}$  напред или крмом,
- спрега и употребом прамчаног потисника, без употребе кормила у режимима погонских ЕМ:  $1000 \text{ min}^{-1}$  напред или крмом.

Мерење пречника круга окрета извршено је на начин приказан на слици 7.2 тако што је путања брода снимана на навигационом информационом систему брода, а на основу снимка је вршено графичко мерење пречника окрета  $D'_T$  и рачунање пречника круга окрета  $D_T$  у односу на дужину мерног километра на карти пловног пута  $L$ , према изразу:

$$D_T = \frac{D'_T \cdot 1000}{L} \quad [m] \quad (7.7)$$



Слика 7.2. Одређивање пречника круга окретања

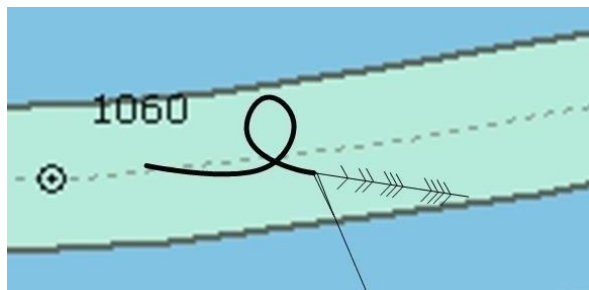


Резултати мерења пречника круга окрета са дизел електричним погоном су приказани у табели 7.2.

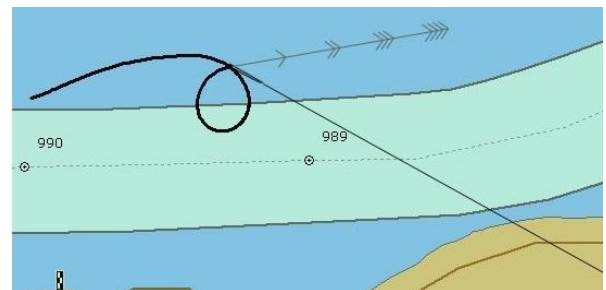
Табела 7.2. Резултати мерења пречника круга окретања брода „КОЗАРА” са дизел електричним погоном

Ред. број	Број мотора у погону	Број обртаја погонских мотора [ $\text{min}^{-1}$ ]	Број обртаја прамчаног потисника [ $\text{min}^{-1}$ ]	Отклон кормила	Угао отклона [ $^{\circ}$ ]	Време вожње у пуном кругу [s]	Пречник круга окрета [m]	Слика број
<i>а - Маневар окрета у режиму оба пропелера напред и максимални отклон кормила</i>								
1.	2	750		Лево	$35^{\circ}$	5.4	188	7.3
2.	2	1000		Десно	$35^{\circ}$	4.17	234	7.4
3.	2	1490		Лево	$35^{\circ}$	3.25	272	7.5
<i>б - Маневар окрета у режиму спрега десни пропелер напред, леви крмом и кормило у средини</i>								
4.	2	1000	0	Кормило у средини	0		Окрет брода није остварено	7.6
<i>в - Маневар окрета у режиму спрега пропелера и максимални отклон кормила</i>								
5.	2	750		Лево	$35^{\circ}$	4,45	Окрет у месту	7.7
6.	2	1000		Десно	$35^{\circ}$	7.51	102	7.8
<i>г - Маневар окрета у режиму спрега десни пропелер напред, леви крмом, прамчани потисник лево и кормило лево сасвим</i>								
7.	2	1000	980	Лево	$35^{\circ}$	3,42	73	7.9
<i>д - Маневар окрета у режиму спрега десни пропелер напред, леви крмом, прамчани потисник лево и кормило у средини</i>								
8.	2	1000	980	Кормило у средини	0	5,07	170	7.10

На сликама 7.3 и 7.4 приказане су путање брода за мерења на редном броју 1 и 2 табеле 7.2.



Слика 7.3. Маневар окрета у режиму оба ЕМ напред  $750 \text{ min}^{-1}$  и кормило лево сасвим

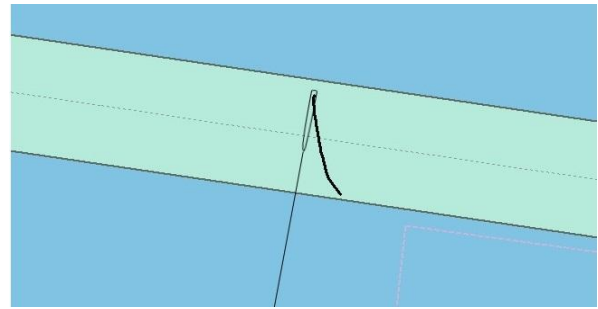


Слика 7.4. Маневар окрета у режиму оба ЕМ напред  $1000 \text{ min}^{-1}$  и кормило десно сасвим

На сликама 7.5 и 7.6 приказане су путање брода за мерења на редном броју 3 и 4 табеле 7.2.

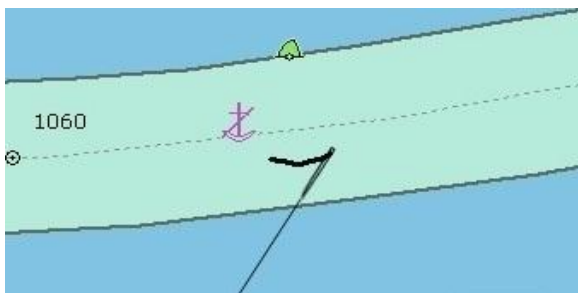


Слика 7.5. Маневар окрета у режиму оба ЕМ напред  $1490 \text{ min}^{-1}$  и кормило лево сасвим



Слика 7.6. Маневар окрета у режиму спрега десни ЕМ напред  $1000 \text{ o/min}$ , леви ЕМ крмом  $1000 \text{ min}^{-1}$  и кормило у средини

На сликама 7.7 и 7.8 приказане су путање брода за мерења на редном броју 5 и 6 табеле 7.2..

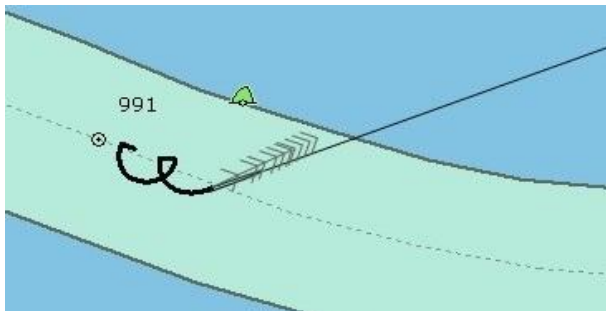


Слика 7.7. Маневар окрета у режиму спрега десни ЕМ напред  $750 \text{ min}^{-1}$ , леви ЕМ крмом  $750 \text{ min}^{-1}$  и кормило лево сасвим

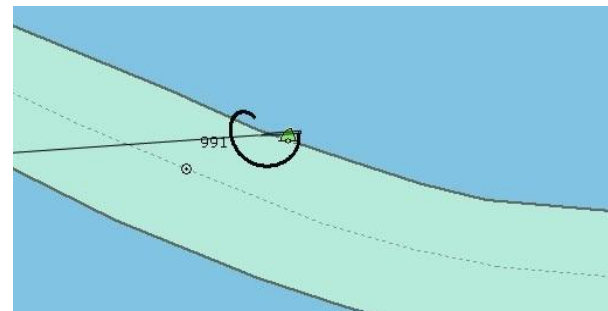


Слика 7.8. Маневар окрета у режиму спрега десни ЕМ крмом  $1000 \text{ min}^{-1}$ , леви ЕМ напред  $1000 \text{ min}^{-1}$  и кормило десно сасвим

На сликама 7.9 и 7.10 приказане су путање брода за мерења на редним бројевима 8 и 9 табеле 7.2.



Слика 7.9. Маневар окрета у режиму спрега десни ЕМ напред  $1000 \text{ min}^{-1}$ , леви ЕМ крмом  $1000 \text{ min}^{-1}$ , прамчани потисник лево  $980 \text{ min}^{-1}$  и кормило лево сасвим



Слика 7.10. Маневар окрета у режиму спрега десни ЕМ напред  $1000 \text{ min}^{-1}$ , леви ЕМ крмом  $1000 \text{ min}^{-1}$ , прамчани потисник лево  $980 \text{ min}^{-1}$  и кормило у средини

### 7.2.1.3. Мерење зауставног пута

Мерење зауставног пута брода „КОЗАРА” је извршено тако што је брод доведен у устаљено праволинијско кретање константном брзином напред на режиму 100% снаге погона, а курс пловидбе одабран је тако да је брод пловио низводно, средином пловног пута, након чега је извршено пребацивање погона у пловидбу крмом пуном снагом тзв, CRASH-STOP маневар. Испитивање је прекинуто кад је брод постигао брзину  $0,25 \text{ m/s}$  унатраг.

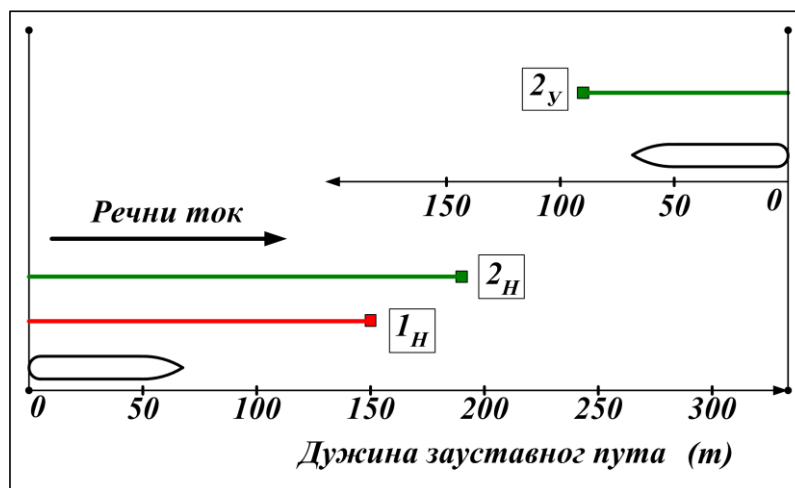
Током испитивања мерени су пређени пут брода до почетка пловидбе кромом и време до почетка пловидбе кромом. За ова мерења коришћен је бродски ГПС (GPS).

Резултати првог мерења тзв. CRASH-STOP маневра на делу пловног пута од Новог Сада до Београда (09.05.2012. године) и другог мерења у рејону Великог Градишта (18.10.2013. године) приказани су у табели 7.3.

Табела 7.3. Резултати првог и другог мерења зауставног пута брода „КОЗАРА” са дизел електричним погоном

Ред. број	Број мотора у погону	Претходни режим (број обртаја пропелера) [ $\text{min}^{-1}$ ]	Нови наређени режим	Време до почетка пловидбе кромом [s]	Пређени пут до почетка пловидбе кромом		Примедба
					У метрима [m]	У дужинама брода	
<i>а – Прво мерење зауставног пута брода са ДЕП-ом</i>							
1.	2	374	КРМОМ	54	150	2,23	Низводно
<i>б – Друго мерење зауставног пута брода са ДЕП-ом</i>							
2.	2	374	КРМОМ	59	191	2,8	Низводно
3.	2	374	КРМОМ	43	95	1,6	Узводно

На слици 7.11 дат је графички приказ дужине зауставног пута брода са дизел електричним погоном, измереног 09.05.2012. године на пловном путу од Новог Сада до Београда у низводној возњи  $1_H$  и 18.10.2013. године у реону Великог Градишта у низводној  $2_H$  и узводној возњи  $2_Y$ . Ради сагледавања дужине зауставног пута у односу на дужину брода на слици је приказана и силутеа брода у сразмерној величини.



Слика 7.11. Графички приказ дужине зауставног пута брода „КОЗАРА” са дизел електричним погоном

#### 7.2.1.4. Испитивање убрзања брода

Испитивање убрзања брода извршено је у оквиру другог испитивања брода у пловидби на делу пловног пута у рејону Великог Градишта 18.10.2013. године. Испитивање је почело тако што је брод доведен у устаљено праволинијско кретање и заустављен, а курс пловидбе одабран је тако да је брод пловио низводно или узводно, средином пловног пута, након чега је извршено пребацивање погона у возњу пуном снагом напред. Мерење је прекинуто кад је брод постигао максималну брзину.

Током испитивања мерени су преваљени пут и брзина брода. За мерење резултата коришћен је бродски GPS. Резултати мерења убрзања брода приказани су у табели 7.4.

Табела 7.4. Резултати мерења убрзања брода „КОЗАРА” са дизел електричним погоном

Ред. број	Број мотора у погону	Претходни режим (број обртаја пропелера) [ $\text{min}^{-1}$ ]	Нови наређени режим	Максимална брзина [ $\text{km/h}$ ]	Време до достизања максималне брзине [ $s$ ]	Растојање [ $m$ ]	Примедба
1.	2	Празан ход	НАПРЕД-СВОМ СНАГОМ	18,9	90	320	узводно
2.	2	Празан ход	НАПРЕД-СВОМ СНАГОМ	23,7	71	276	низводно

### 7.2.2. Мерење обртног момента на вратилном воду и снимање перформанси

Мерење обртног момента на вратилном воду брода „КОЗАРА” са дизел електричним погоном извршено је 09.05.2012. године на делу пловног пута од Новог Сада до Београда, у оквиру првог испитивања брода након модернизације.

Мерење је извршено на пропелерском вратилу иза редуктора левог вратилног вода брода, а мерена је брзина обртања и обртни момент на вратилу, на начин описан у пододељку 6.1.2.3.

Снага на вратилу, тј. апсорбована снага пропелера израчуната је на основу измерених вредности према формули:

$$P = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \cdot M \quad (7.7)$$

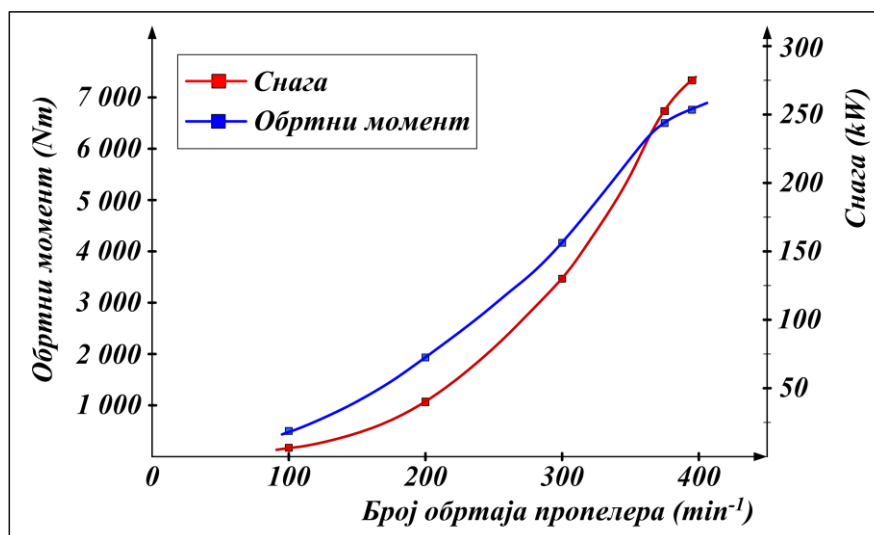
Резултати мерења обртног момента и израчунате снаге на одређеним бројевима обртаја пропелера су приказани у табели 7.5.

Табела 7.5. Измерене вредности обртног момента и израчунате снаге на вратилном воду брода „КОЗАРА”

Ред. бр.	Брзина обртања вратила ( $\text{min}^{-1}$ )	Обртни момент ( $Nm$ )	Снага $P$ ( $kW$ )
1.	101	510,68	5,4
2.	202	1925,27	40,7
3.	301	4123,54	129,9
4.	375	6425,7	252,2
5.	393	6758,64	278

Резултати мерења снаге на вратилном воду потврђују снагу погонских електромотора као и могућност да погонски електромотори раде у преоптерећењу од 10% у временском периоду од једног часа.

На слици 7.12 су приказани дијаграми обртног момента и апсорбоване снаге пропелера у функцији брзине обртања пропелера.



Слика 7.12. Дијаграм обртног момента и снаге пропелера у функцији брзине обртања пропелера

### 7.2.3. Мерење торзионих осцилација вратилних водова

Мерење торзионих осцилација извршено је на левом пропелерском вратилу у склопу мерења обртног момента 09.05.2012. године, с тим да из одређених техничких разлога није извршено мерење при континуалној промени броја обртаја већ само на задатим бројевима обртаја пропелера. На основу измереног обртног (торзионог) момента израчунат је максимални тангенцијални напон на левом пропелерском вратилу брода.

Прорачун максималног и дозвољеног тангенцијалног напона извршен је на основу података:

- пречник вратилног вода 128 mm
- материјал пропелерског вратила челик за побољшање чија је граница развлачења од 430 до 510 МПа.

На основу пречника вратила израчунат је поларни отпорни момент:

$$W_0 = \frac{\pi \cdot d^3}{16} \approx 0,2d^3 = 0,2 \cdot 0,128^3 = 4,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \quad (7.8)$$

Максимални тангенцијални напон на вратилном воду и дозвољени тангенцијални напон израчунати су према изразима (7.1) и (7.5), на:

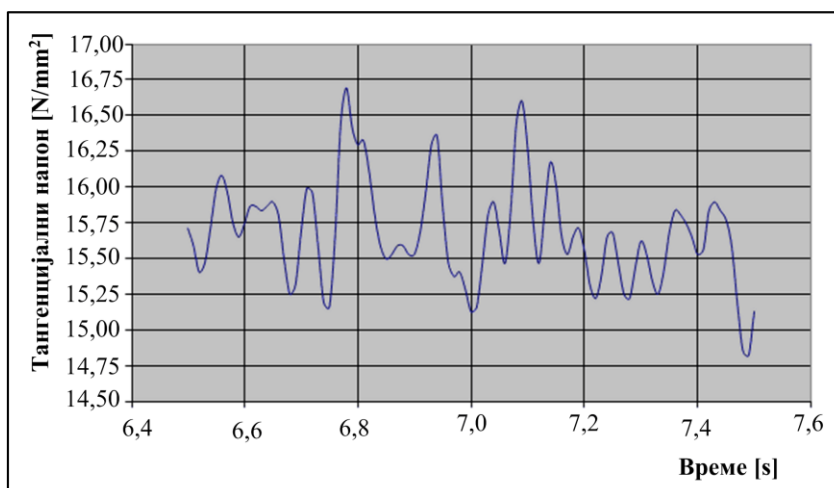
- снази празног хода при броју обртаја пропелера 101 min<sup>-1</sup> и
- максималној снази при броју обртаја пропелера 375 min<sup>-1</sup>.

У табели 7.6 су приказане вредности измереног обртног момента и прорачунатог тангенцијалног напона на левом пропелерском вратилу брода „КОЗАРА”.

Табела 7.6. Обртни момент и тангенцијални напон на левом међувратилу брода „КОЗАРА”

Ред. број	Број обртаја пропелера (min <sup>-1</sup> )	Измерени торзиони момент (Nm)	Тангенцијални напон на међувратилу (N/mm <sup>2</sup> )	
			Измерене максималне вредности тангенцијалног напона	Дозвољена максимална вредност
1.	101	510,68	1,2	41,36
2.	375	6512,29	15,50	31,96

На слици 7.13 приказан је ток промене тангенцијалног напона на левом пропелерском вратилу, при 375 о/мин пропелера и низводној пловидби брода.



Слика 7.13. Ток промене тангенцијалног напона на левом међувратилу брода „КОЗАРА”

#### 7.2.4. Мерење линеарних вибрација на темељима опреме и лежајима вратилних водова

Мерење линеарних вибрације структуре брода, погона и опреме извршено је 26.04.2012. године у оквиру испитивања брода након завршене замене погонске групе, у луци у бродградилушту „Апатин” у Апатину. Извршено је мерење линеарних вибрација на лежајима електромотора, редуктора и на шестом цилиндру дизел генератора, као и на предњем и задњем лежају међувратила вратилног вода.

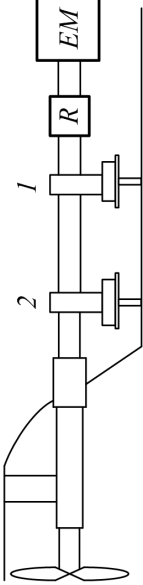
Мерење линеарних вибрација на лежајима електромотора, редуктора и на шестом цилиндру дизел генератора извршено је помоћу уређаја Vibrometer VIB-10. Резултати мерења су приказани у табели 7.7.

Табела 7.7. Линеарне вибрације на лежајевима ЕМ и редуктора и 6 цилиндру генератора

26.04.2012. године						<i>SPm</i> <i>VIB</i>		
1 - предњи лежај левог електромотора, $n=1468 \text{ min}^{-1}$ 2 - предњи лежај десног електромотора, $n=1468 \text{ min}^{-1}$ 3 - излазни лежај левог редуктора, $n=365 \text{ min}^{-1}$ 4 - излазни лежај десног редуктора, $n=365 \text{ min}^{-1}$ 5 - леви дизел генератор, 6 цилиндар 6 - десни дизел генератор, 6 цилиндар								
Ш	1	2	3	4	V	5	6	
28						71		
18						45		
11						28		
7.1						18		
4.5						11		
2.8						7.1		
1.8						4.5		
1.1						2.8		
0.7	1.8							
<i>H</i>	1,9	2	3,1	1,9	<i>H</i>	7,2	9,5	
<i>V</i>		2	2	2	<i>V</i>	8,7	8,4	
<i>A</i>		2	2,1	2,5	2,6	<i>A</i>	14,7	12,8

Мерење вибрација на предњем и задњем лежају пропелерских вратила извршено је са уређајем Shock Pulse Meter 43А. Резултати мерења су приказани у табели 7.8.

Табела 7.8.. Линеарне вибрације на лежајевима међувратила левог вратилног вода

	$d = 128 \text{ mm}$					$d =$					$d =$							
	$n = 375 \text{ o/min}$					$n =$					$n =$							
	$dB_i = 12$					$dB =$					$dB =$							
	$dB_M$	$dB_N$					$dB_M$	$dB_N$					$dB_M$	$dB_N$				
	$dB_C$	10	20	30	40	50	$dB_C$	10	20	30	40	50	$dB_C$	10	20	30	40	50
1Л	17/10	•	•															
1Л	17/10	•	•															
1Л	17/10	•	•															
1Л	17/10	•	•															
1Л	17/10	•	•															
2Л	20/13	•	•															
2Л	20/13	•	•															
2Л	20/13	•	•															
2Л	20/13	•	•															
2Л	20/13	•	•															
1Д	20/6	•	•															
1Д	15/5	•	•															
1Д	20/6	•	•															
1Д	20/5	•	•															
1Д	20/5	•	•															
2Д	20/10	•	•															
2Д	20/10	•	•															
2Д	20/10	•	•															
2Д	20/10	•	•															
2Д	20/10	•	•															

1Л - предњи лежај левог пропелерског вратила  
 2Л - задњи лежај левог пропелерског вратила  
 1Д - предњи лежај десног пропелерског вратила  
 2Д - задњи лежај десног пропелерског вратила

## 8. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА ИСПИТИВАЊА

Анализа резултата испитивања обухвата поређење резултата испитивања погонских и маневарских карактеристика брода са дизел електричним погоном, међусобно и са резултатима испитивања брода са претходним решењем погона.

### 8.1. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА ИСПИТИВАЊА ПОГОНСКИХ И МАНЕВАРСКИХ КАРАКТЕРИСТИКА БРОДА

#### 8.1.1. Анализа резултата мерења брзине брода

На делу пловног пута од Новог Сада до Београда при депласману брода од 530 t и газу брода 1,11 m измерене су брзине брода на режиму 100% снаге погонских електромотора:

- 25,56 km/h у низводној пловидби и
- 18,71 km/h у узводној пловидби.

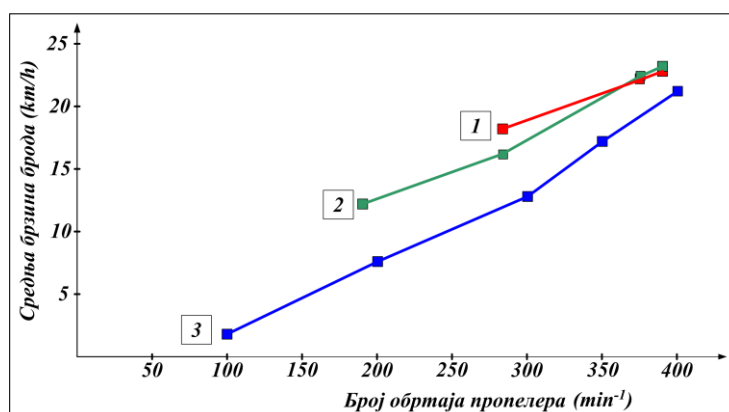
На делу пловног пута у рејону Великог Градишта при депласману брода од 564 t и газу брода 1,17 m измерене су брзине брода на режиму 100% снаге погонских електромотора:

- 24,5 km/h у низводној пловидби и
- 20,0 km/h у узводној пловидби.

Средње измерене брзине брода, на режиму 100% снаге погона, износе, за дизел електрични погон:

- 22,14 km/h и 22,25 km/h при броју окретаја пропелера од  $375,5 \text{ min}^{-1}$ ,  
а за дизел погон:
- 21 km/h при брзини окретања пропелера од  $400 \text{ min}^{-1}$ .

На слици 8.1 приказан је дијаграм средњих брзина брода са дизел електричним погоном, измерених 09.05.2012. године на пловном путу од Новог Сада до Београда [1] и 18.10.2013. године у реону Великог Градишта [2], и средње брзине брода са класичним дизел погоном [3] измерене 19.09.1963. године.



Слика 8.1. Дијаграм средње брзине брода „КОЗАРА” у функцији броја обртаја пропелера са дизел електричним погоном и са претходним дизел погоном



Закључци резултата мерења брзине брода „КОЗАРА” пре и после модернизације су:

1. Измерена брзина брода са дизел електричним погоном, у оба случаја, је већа око 5 % у односу на брзину брода са дизел погоном, на режиму 100% снаге погона. Како на броду нису мењани пропелери, а брзина обртања погонских електромотора се преко редуктора редукује на број обртаја пропелерских вратила који је нешто мањи од броја обртаја старих дизел мотора, који су били директно повезани са вратилним водовима, пораст брзине брода се може тумачити тиме што је новоуграђена погонска опрема значајно лакша у односу на опрему старог погона, а самим тим је и депласман брода мањи. Приликом мерења брзине брода у току 2012. године депласман је био мањи за 71 t од пуног депласмана брода са старим дизел погоном.
2. Мерење брзине брода које је извршено у току 2013. године вршено је са пуним баластним танковима, који су уграђени у брод ради ефикасног функционисања прамчаног потисника (потреба да његов тунел буде уроњен у воду) чиме је депласман брода повећан, али је и даље мањи за 37 t од пуног депласмана брода са старим дизел погоном.
3. Анализирајући резултате испитивања брзине брода са дизел електричним погоном уочљив је утицај депласмана брода и брзине речног тока на брзину брода. Ово се најбоље види на дијаграму средњих брзина брода, слика 7.16..
4. Резултати измерених брзина брода на најбољи начин показују утицај депласмана брода на његову брзину. Значајно је приметити чињеницу да је средња брзина брода са ДЕП-ом на мањем депласману већа за мање бројеве обртаја док је на вршним снагама погона нешто мања од брзине брода на већем депласману. Добијени резултати се могу тумачити чињеницом да од депласмана зависи уроњеност пропелера у воду (пропелери су конструктивно постављени тако да нису потпуно потопљени у воду). Другим речима од депласмана брода зависи отпор кретања брода кроз воду и сила потиска коју пропелери остварују. Утицај ова два фактора, под условом да је чистоћа бродског трупа непромењена, се очигледно мења са повећањем брзине брода. Брод мањег депласмана има веће убрзање, тј. брзине брода на мањим бројевима обртаја су веће док за максималну брзину брода већи утицај има уроњеност пропелера у воду.

### 8.1.2. Анализа резултата мерења пречника круга окрета брода

Резултати мерења пречника круга окрета брода у најбољој мери показују знатну предност дизел електричног погона у односу на класични дизел погон, који је био уграђен на броду „КОЗАРА”.

Како на броду нема података мерења круга окрета са дизел погоном можемо претпоставити да се они подударају са резултатима круга окрета брода са дизел електричним погоном на режиму оба ЕМ напред и са закретом кормила сасвим лево или десно што је приказано под *a* у табели бр 8.

Резултати пречника круга окрета су анализирани према маневрима на којима је окрет вршен са општом анализом на крају.

#### 8.1.2.1. Окрет брода у маневру са отклоном кормила у лево или десно, без промене режима мотора напред

Мерење пречника круга окрета извршено је на режимима оба електромотора напред 750, 1000 и 1490  $\text{min}^{-1}$  и отклоном кормила 35° лево или десно при чему су измерени резултати:

- На режиму оба ЕМ напред  $750 \text{ min}^{-1}$  и отклоном кормила  $35^\circ$  лево измерени пречник окрета износи 188 т уз време окрета од 5,4 с.
- На режиму оба ЕМ напред  $1000 \text{ min}^{-1}$  и отклоном кормила  $35^\circ$  десно измерени пречник окрета износи 234 т уз време окрета од 4,17 с.
- На режиму оба ЕМ напред  $1490 \text{ min}^{-1}$  и отклоном кормила  $35^\circ$  лево измерени пречник окрета износи 272 т уз време окрета од 3,25 с.

На основу резултата мерења закључује се да је пречник круга окрета већи за већу брзину брода.

#### 8.1.2.2. Окрет брода у маневру са спрегом без употребе кормила

Маневар окрета је вршен на режиму  $1000 \text{ min}^{-1}$  у условима пловидбе попречно на речни ток у страну супротну речном току при чему окрет није остварен. Брод је задржао мање више праволинијско кретање.

Закључак резултата мерења пречника круга окрета у маневру спрега без употребе кормила је да су погонски пропелери смештени на малом размаку од уздужне осе брода због чега је спрег сила сувише мали да би остварио закретање брода у условима када треба да савлада снагу речног тока и отпоре  $W_p$  и  $W_k$ . Поред отпора воде и речног тока на резултат испитивања утицај је имао и доста јак ветар који је дувао из правца југа.

#### 8.1.2.3. Окрет брода у маневру спрега и отклона кормила у једну или другу страну

Мерење пречника круга окрета извршено је на режимима спрега електромотора на бријевима обртаја:  $750 \text{ min}^{-1}$  и  $1000 \text{ min}^{-1}$  и отклоном кормила  $35^\circ$  лево или десно при чему су измерени резултати:

- На режиму десни ЕМ напред  $750 \text{ min}^{-1}$  и леви ЕМ крмом  $750 \text{ min}^{-1}$  и отклоном кормила  $35^\circ$  лево измерени пречник круга окрета је занемарљиво мали уз време окрета од 4,45 с.
- На режиму десни ЕМ крмом  $1000 \text{ min}^{-1}$  и леви ЕМ напред  $1000 \text{ min}^{-1}$  и отклоном кормила  $35^\circ$  десно измерени пречник круга окрета износи 102 т уз време окрета од 7,51 с

Закључци резултата мерења пречника круга окрета у маневру спрега са употребом кормила су:

1. Пречник круга окрета је значајно смањен у односу на претпостављени пречник круга окрета са класичним дизел погоном, од 100% на режимима  $750 \text{ min}^{-1}$  до око 56% на режиму  $1000 \text{ min}^{-1}$ .
2. Овако значајно смањење пречника круга окрета резултат је тога што нови облик погона омогућава ефикасну употребу спрега погонских мотора. Поред спрега погонских сила на смањење пречника круга окрета значајно утиче и чињеница да приликом употребе спрега брод значајно успорава. Ово је посебно дошло до изражаја при режиму спрега са  $750 \text{ min}^{-1}$  где је брод у окрету имао веома малу брзину што је резултирало тиме да пречник круга окрета буде толико мали да га бродска навигациона опрема није забележила на карти пловног пута.

#### 8.1.2.4. Окрет брода у маневру спрега и отклона кормила у једну или другу страну и употребу прамчаног потисника

Мерење пречника круга окрета је извршено са употребом спрега погонских ЕМ, десни ЕМ напред  $1.000 \text{ min}^{-1}$  и леви ЕМ крмом  $1.000 \text{ min}^{-1}$ , отклоном кормила  $35^\circ$  у десну страну и укључивањем прамчаног потисника на режиму  $980 \text{ min}^{-1}$  десно. Измерен је резултат пречника окрета:

- 73 т уз време окрета од 3,42 с.

Закључци резултата мерења пречника круга окрета у маневру спрега са употребом кормила и прамчаног потисника су:

1. Пречник круга окрета, на наведеном режиму, је око 69% мањи од претпостављеног пречника круга окрета са класичним дизел погоном
2. Ако се резултат мерења пречника круга окрета упореди са резултатом у маневру спрега и закрета кормила може се закључити да је пречник окрета са употребом прамчаног потисника 28% мањи, што додатно указује на то у којој мери уградња прамчаног потисника побољшава маневарске карактеристике.

#### 8.1.2.5. Окрет брода у маневру спрега и употребу прамчаног потисника без употребе кормила

Мерење пречника круга окрета је извршено са употребом спрега погонских ЕМ, десни ЕМ напред  $1000 \text{ min}^{-1}$  и леви ЕМ крмом  $1000 \text{ min}^{-1}$ , укључивањем прамчаног потисника  $980 \text{ min}^{-1}$  десно и кормилом у неутралном положају. Измерен је резултат пречника круга окрета:

- 170 т уз време окрета од 5,07 с.

Закључци резултата мерења пречника круга окрета у маневру спрега са употребом прамчаног потисника, без употребе кормила су:

1. Пречник круга окрета је око 37% мањи од претпостављеног пречника круга окрета са класичним дизел погоном, на приближно истом режиму.
2. Ако се има у виду чињеница да у маневру спрега погонских ЕМ и са кормилом у средини окрет брода није остварен овај резултат испитивања показује колико уградња прамчаног потисника доприноси побољшању маневарских карактеристика брода.

#### 8.1.2.6. Општа анализа резултата мерења пречника круга окрета брода

Ако се добијени резултати анализирају у односу на изразе за динамику кретања брода „КОЗАРА” за поларни момент инерције масе брода  $J_p$  заједно са масом повучене воде у односу на тежиште брода  $T$  и претпоставке изнете у поглављу 6.2, као и на кинематику кретања брода могу се донети следећи закључци:

1. Најмањи пречник круга окрета за одређену брзину брода је измерен у маневру када се користи спрег погонских ЕМ, прамчани потисник и кормило се отклони у једну страну, што потврђује претпоставку дату у поглављу 6.2. да је у том маневру поларни момент  $J_p$  највећи (израз 6.73) и да ће резултат тога бити најмањи пречник круга окрета,
2. Чињеница да приликом мерења пречника круга окрета у маневру када се користи само спрег погонских ЕМ, није остварен окрет брода делом је потврдило претпоставку да ће најмањи поларни момент  $J_p$  брод имати у овом маневру (израз 6.55) и да ће то узроковати да пречник круга окрета у том маневру буде највећи за одређену брзину брода. Ово је узроковано чињеницом да је удаљност ЕМ од уздужне осе брода мала што доводи до тога да је и момент окрета недовољан да савлада отпор воде и отпор ваздуха у условима пловидбе када ветар дува у супротном смеру од смера окрета брода.

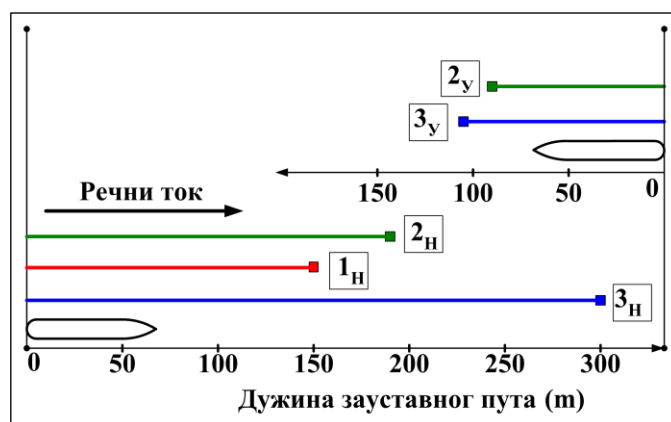
3. Путање маневара окрета у низводној и узводној пловидби приказане на сликама 7.3 до 7.10 потврђују теоретску анализу кинематике кретања брода која је приказана у поглављу 6.3.2. и показују специфичности пловидбе на реци, тј. утицаја речног тока на маневар окрета.
4. Из приказаних путања окрета јасније се види, раније наведена чињеница, да путања окрета на рекама уместо круга има облик елипсе, чија издуженост зависи од брзине реке, те од тога да ли се маневар врши низводно, узводно или од обале према матици реке или обрнуто.

### 8.1.3. Анализа резултата мерења зауставног пута

Измерени зауставни пут брода са дизел погоном, на режиму 100% снаге погона, износио је:

- 300 m уз време заустављања брода 1 min 35 s,  
а измерени зауставни пут брода са дизел електричним погоном износио је:
- 150 m уз време заустављања 54 s на депласману брода 530 t
- 191 m уз време заустављања брода 59 s на депласману 564 t.

На слици 8.2 дат је графички приказ дужине зауставног пута брода са дизел електричним погоном, измереног 09.05.2012. године на пловном путу од Новог Сада до Београда у низводној вожњи [1<sub>Н</sub>] и 18.10.2013. године у реону Великог Градишта у низводној [2<sub>Н</sub>] и узводној вожњи [2<sub>У</sub>] и дужине зауставног пута брода са класичним дизел погоном измереног 19.09.1963. године у низводној [3<sub>Н</sub>] и узводној вожњи [3<sub>У</sub>].



Слика 8.2. Графички приказ дужине зауставног пута брода „КОЗАРА” са дизел електричним погоном и са дизел погоном

Закључци резултата мерења зауставног пута брода „КОЗАРА” пре и после модернизације су:

1. Поређењем резултата испитивања зауставног пута уочљиво је да је дужина зауставног пута брода са дизел електричним погоном знатно краћа од дужине зауставног пута брода са дизел погоном.
2. Овако великом побољшању маневра заустављања допринела је могућност брзе промене смера обртања вратилних водова, што са дизел погоном није било могуће. Наиме, код старог дизел погона смер обртања пропелера мењао се на начин да су се погонски мотори обустављали, мењао се смер обртања мотора и мотори поново стартовали. Ово је било потребно из разлога што су мотори били директно везани са вратилним водовима, без редуктора. Код дизел електричног погона, где се

електромоторима управља преко напонско фреквентних претварача, промена смера обртања пропелера се врши једноставно, померањем управљачких ручица из једног смера војње у други, чиме се значајно скраћује време промене смера обртања, а тиме се и маневарске карактеристике брода значајно побољшавају.

- Осим горе наведеног из резултата испитивања зауставног пута брода са ДЕП-ом уочљив је и утицај инерције брода која зависи од депласмана брода. Брод на већем депласману има већу инерцију, а самим тим има и дужи зауставни пут (150 m при депласману од 530 t и 191 m при депласману од 564 t).

#### 8.1.4. Анализа резултата мерења убрзања брода

Измерено убрзање брода са дизел електричним погоном на депласману 564 t износило је:

- 71 s у низводној војњи уз преваљени пут 276 m, при чему је остварена брзина од 23,7 km/h и
- 90 sek у узводној војњи уз преваљени пут 320 m при чему је остварена брзина од 18,9 km/h.

Закључци резултата мерења убрзања брода „КОЗАРА” пре и после модернизације су:

- Како се не располаже са подацима убрзања брода са дизел погоном може се претпоставити да су добијени резултати са ДЕП-ом бољи од претпостављених резултата убрзања брода са дизел погоном због бржег постизања максималног броја обртаја пропелера и претпоставке да убрзање брода у првом реду зависи од депласмана брода на коме се мери убрзање.
- Поређењем резултата мерења убрзања у низводној и узводној војњи уочљиво је да речни ток на убрзање брода утиче на начин да брод у низводној војњи знатно брже постиже максималну брзину.

## 8.2. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА МЕРЕЊА СНАГЕ НА ВРАТИЛНОМ ВОДУ

На основу резултата мерења момента и снаге на пропелерском вратилу методом приближавања у изразу за рачунање пропелерске карактеристике

$$P_D = K \cdot n^3 \quad (8.1)$$

одређен је кофицијент  $K = 0,00476$  па израз за пропелерску карактеристику пропелера брода „КОЗАРА” гласи:

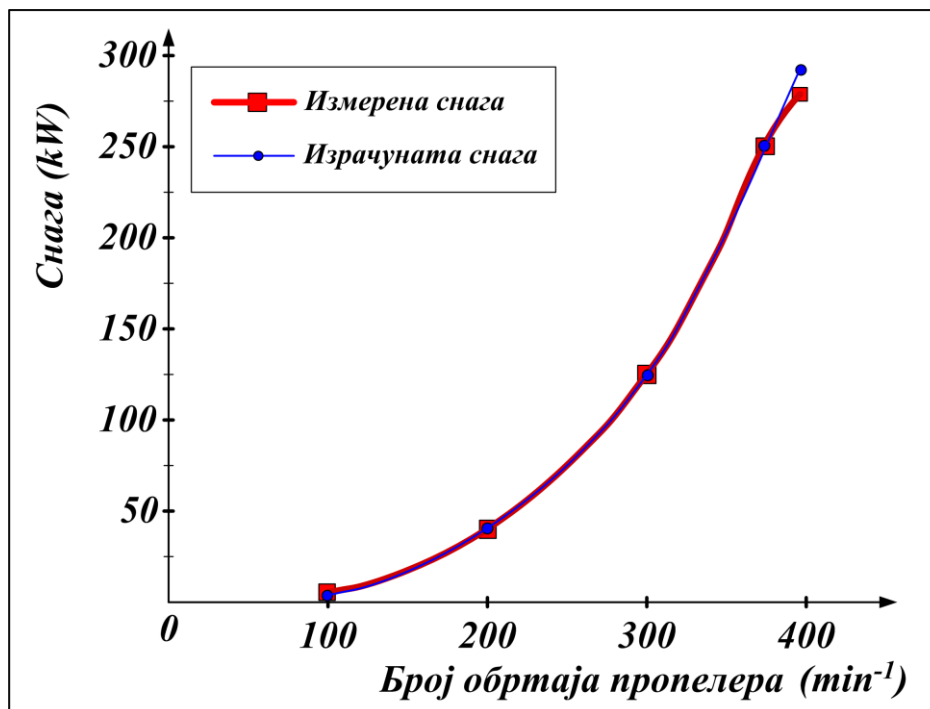
$$P_D = 0,00476 \cdot n^3. \quad (8.2)$$

У табели 8.1 су приказане измерене и израчунате вредности снаге предате пропелеру.

Табела 8.1. Измерене и израчунате вредности снаге предате пропелеру.

Ред. бр.	Брзина обртања вратила ( $\text{min}^{-1}$ )	Измерена снага P (kW)	Израчуната снага P (kW)
1.	101	5,4	4,9
2.	202	40,7	39,2
3.	301	129,9	129,8
4.	375	252,2	251
5.	393	278	288,9

На слици 8.3 је приказан дијаграм измерене и израчунате снаге која је предата пропелеру.



Слика 8.3. Дијаграм измерене и израчунае снаге која се предаје пропелеру

Закључци резултата мерења обртног момента на пропелерском вратилу брода „КОЗАРА” су:

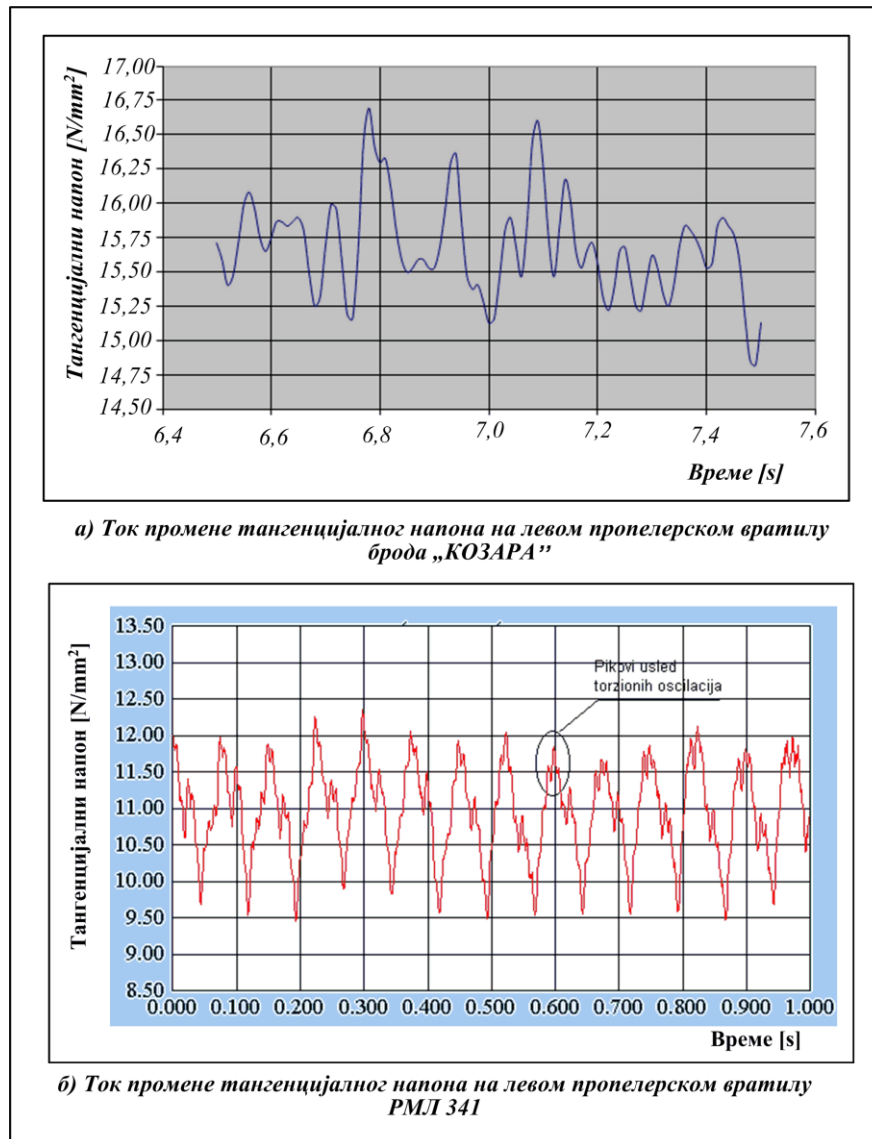
1. Резултати мерења снаге на вратилном воду потврђују усклађеност погонских електромотора и пропелера. као и могућност да погонски електромотори раде у преоптерећењу од 10% у временском периоду од једног часа.
2. Добро подударање измерених и израчунатих резултата снаге на пропелерском вратилу у потпуности потврђују валидност резултата и метода мерења снаге.
3. Резултати мерења снаге на пропелерском вратилу такође потврђују и исправност рада уграђених напонско фреквентних претварача. Мада је постојала бојазан од проблема са ТНД изобличењем мрежног напона [56] и сметњама које могу U/f претварачи да створе, испоставило се да није потребно стављати никакве филтре нити серијске индуктивности ради смањења виших хармоника у мрежи.

### 8.3. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА МЕРЕЊА ТОРЗИОНИХ ОСЦИЛАЦИЈА НА ВРАТИЛНОМ ВОДУ И ЛИНЕАРНИХ ВИБРАЦИЈА

На режиму 100% снаге погонског електромотора прорачуната је вредност максималног тангенцијалног напона  $15,50 \text{ N/mm}^2$  и вредност дозвољеног тангенцијалног напона  $31,96 \text{ N/mm}^2$ .

Карактер торзинх осцилација, тј. промене тангенцијалног напона је анализиран методом поређења са резултатима мерења торзионих осцилација на једном од бродова РФ који има класичан дизел погон. У овом случају то је био миноловац РМЛ-341[57].

На слици 8.4 су приказни токови промене тангенцијалног напона на левом пропелерском вратилу брода „КОЗАРА”, при  $375 \text{ min}^{-1}$  пропелера и низводној пловидби брода и на левом пропелерском вратилу моноловца РМЛ-341, при  $1600 \text{ min}^{-1}$  погонског мотора.



Слика 8.4. Ток промене тангенцијалног напона на левом пропелерском вратилу брода „КОЗАРА” и на левом пропелерском вратилу брода РМЛ 341

Закључци резултата мерења торзионих осцилација на вратилном воду и линерних вибрација на лежајима и темењима уграђене опреме су:

1. Прорачунате торзионе осцилације задовољавају захтев Правила за градњу бродова унутрашње пловидбе.
2. Поређењем дијаграма а) и б) на слици 7.19 може се видети да су на вратилима код дизел погона торзионе осцилације знатно учесталије и са знатно израженијим пиковима. Амплитуде осцилација промене тока тангенцијалног напона на вратилу брода РМЛ 341 крећу се и до  $2.5 \text{ N/mm}^2$  док се код брода „КОЗАРА” крећу до  $1 \text{ N/mm}^2$ , при чему је тангенцијални напон на вратилу брода „КОЗАРА” већи него на броду РМЛ 341. Овим је **потврђена хипотеза бр. 2** која је постављена на почетку истраживања.
3. Резултати мерења линеарних вибрација на лежајима и темељима уграђене опреме који су приказани у табелама 7.14 и 7.15 су у дозвољеним границама што потврђује исправност монтаже опреме дизел електричног погона брода.

## 9. ЗАПАЖАЊА О ЕКСПЛОАТАЦИЈИ БРОДА „КОЗАРА” НАКОН ИЗВРШЕНЕ МОДЕРНИЗАЦИЈЕ

Брод „КОЗАРА” је након завршене модернизације, у оквиру које је извршена и замена погона, враћен у јединицу и започео је извршавање редовних планских задатака.

Подаци о пловидби брода, који су везани за погон брода, евидентирају се у машински дневник. У дневник се евидентирају подаци о раду погонских мотора, агрегата и осталих уређаја везаних за погон брода као и подаци о потрошњи горива и мазива. Поред тога у машински дневник се евидентирају и сви већи кварови на погонској опреми.

У табели 9.1 приказани су значајнији кварови на опреми ДЕП-а, који су се десили након извршене модернизације и начин њиховог отклањања.

Табела 9.1. Кварови на опреми ДЕП-а и начин њиховог отклањања

Ред. број	Уређај на коме је дошло до квара	Манифестација квара и квар	Начин отклањања
1.	Напонско фреквентни претварач за погонске електромоторе тип АВВ АСS 800 -17' 0320	На дисплеју управљачког пулта дошло је до појаве аларма и грешке „кратак спој на левом фреквентном претварачу“ и уједно је леви погонски електромотор престао са радом. Утврђено је да отказао излазни модул .	Сервисери из фирме „АББ СРБИЈА“ су извршили замену свих електронских плоча, напојних каблова и енергетских транзистора у излазном модулу
2.	Напонско фреквентни претварач за прамчани потисник тип АС АСS 800-04, IP20	Отказ излазног модула	Сервисери из фирме „АББ СРБИЈА“ су извршили замену свих компоненти у излазном модулу.
3.	Редуктор ZFW 350-1	У току вожње на мањим бројевима обртаја ЕМ долази до грејања и пада притиска уља у копчама (аларм „низак притисак уља”) из разлога што при малим бројевима обртаја уљна пумпа не може да оствари довољан притисак уља у фриксионим дисковима копче.	Сервисери фирме „DUING“ Ријека, уградили су вентиле за троллинг систем, тј систем контролисаног проклизавања ламела спојнице.
4.	Систем аутоматског управљања дизел генератора	У пловидби брода дошло је до застоја и немогућности паралелног рада дизел генератор сетова С-18, фактор снаге на ДГС <i>СУN00300</i> – левом је 0, док је на ДГС <i>СУN00299</i> – десном 1. Десни генератор је почео да преузима струју од левог генератора ( <i>генератор је показивао карактеристике мотора</i> )	Сервисери из фирме „Stucke elektronik“, извршила су ажурирање кодова за читање CAN/Profibus, (софтверски проблем унутар „PLC Simens“ уређаја), као и промену маски у мапирању за читање порука са CAN/DP Couplera.
5.	Ручица на пулту управљања	Долази до повећања броја обртаја електромотора док је ручица за повећање броја обртаја била у нултом положају уз укључивање аларма „грешка управљања пропулзија лево”.	Квар је привремено отклоњен на начин да је ручица са преносног пулта уграђена на место неисправне ручице.



Према подацима из машинских дневника [58, 59, 60] у периоду 2013. године до маја 2015, године брод је пловио 2.347 km при чему је остварио 257 сати погона. При томе је потрошио 37.188 l горива или на годишњем нивоу:

- У току 2013. године брод је за потребе испитивања и возње делегација пловио 136 часова и 20 минута при чему је превалио 1.193,6 km при чему је потрошио 24.218 литара горива. Просечна потрошња горива је **177,6 l/h**.
- У току 2014. године брод је пловио 95 часова 7 минута при чему је превалио 832,5 km уз потрошњу горива 9.780 литара. Просечна потрошња горива је **103 l/h**.
- Од јануара до маја 2015. године брод је пловио 25 часова 39 минута при чему је превалио 321 km уз потрошњу горива 3.190 литара. Просечна потрошња **125 l/h**.

Потрошња горива брода „КОЗАРА” са старим дизел погоном израчуната је на основу података из машинског дневника за 2001. годину [61]. У току 2001. године брод је провео у пловидби 128 часова и 5 минута при чему је утрошио 11.950 литара горива за рад главних мотора и 3.815 литара за рад помоћних мотора. На основу тога израчуната је просечна потрошња горива од **123 l/h**. При томе је потрошња погонских дизел мотора износила **93,3 l/h**.

Поред кварова наведених у табели 9.1 у експлоатацији брода утврђена су и следећа два недостатка од великог значаја за употребу брода:

- Немогућност повезивања разводне табле у нужди са главном разводном таблом, тј. лучког генератора на главну разводну таблу. Уграђена је склопка за повезивање разводних табли, али није у функцији због чега није у могућности употреба лучког генератора, када се брод не напаја са копна, према идејном решењу, већ он служи као генератор у нужди. Због овога у свим случајевима властитог напајања брода ради један од два основна генератора што се огледа у великој, непланираној, потрошњи горива.
- На дизел моторе нису уграђени расхладници у систем повратног горива. Због овога долази до превеликог загревања горива у сладишим танковима, што доводи до повишења температуре у спремишту хране које се налази на нивоу главне палубе, изнад складишног танка.

Закључци запажања о експлоатацији брода „КОЗАРА” након извршене модернизације су:

1. Квалитет и поузданост уграђене опреме **није на нивоу који је очекиван за овакву врсту погона**. Незадовољавајући квалитет опреме је у највећој мери дошао до изражаја код напонско фреквентних претварача. Квар излазног модула на оба типа претварача упућује на незадовољавајући квалитет компоненти од којих су модули израђени. Исто тако квар ручице за подешавање броја обртаја указује на лошији квалитет истих.
2. Код избора одређених компоненти погонске групе пројектант није изабрао добар тип опреме. Пропуст пројектанта код избора опрема огледа се у избору редуктора електромотора. Правилним избором редуктора избегла би се појава неправилног рада на малим бројевима обртаја.
3. Подаци о потрошњи горива указују на то да нови облик погона није испунио очекивања о економичној пловидби, која се заснивала на мањој потрошњи горива. Као што се може видети на основу приказаних података потрошња горива са новим обликом погона је доста варијирала у току 2013., 2014. и 2015. године. На овако

велике разлике у потрошњи, поред брзине којом је брод пловио утиче и време проведено на сидру и у лукама у којима није могуће брод спојити на извор електричне енергије са копна. Овде до изражаја долази **немогућност укључивања лучког генератора на главну разводну таблу**, као што је већ наглашено. Ако се изузме 2013. година када је брод због испитивања пловио у специфичним условима и доста времена боравио ван матичне луке, **потрошња горива** пре и после модернизације брода је **приближно иста**.

Потрошња горива са ДЕП-ом за 2014. годину указује на то да постоји могућност да брод плови са мањом потрошњом горива од пловидбе са старим дизел погоном. Због овога је потребно да се у даљој експлоатацији подаци о потрошњи горива воде детаљније као би се утврдила стварна просечна потрошња у пловидби брода, без боравака у луци са властитим напајањем електричном енергијом.

4. У првом наредном ремонту брода неопходно је отклонити пропусте везане за повезивање лучког генератора на главну разводну таблу и уградњу расхладника повратног горива са дизел мотора.

## 10. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

Оригиналан изведен пројекат замене класичног дизел погона дизел електричним погоном (ДЕП) на броду „КОЗАРА” изведен је 2012. године у бродоградилшту Апатин, а комплетна модернизација брода завршена је 2013. године.

И поред одступања од програма испитивања (наведних у тач. 7.2) резултати испитивања су довољни да се донесе комплетан закључак о побољшању маневарских карактеристика брода методом дизел електричног погона.

Резултати извршених испитивања [54, 55] су потврдили следећа побољшања пловних и маневарских карактеристика брода „КОЗАРА” са ДЕП-ом:

1. Средња брзина брода у слободној пловидби износи **22,25 km/h** што је **повећање за 5%** у односу на измерену средњу брзину пловидбе са класичним дизел погоном.
2. Побољшане маневарске карактеристике брода потврђене су резултатима мерења зауставног пута и пречника круга окрета брода.

Измерени зауставни пут са ДЕП-ом износи **191 m** што је **смањење за 47%** у односу на пловидбу са класичним погоном. Ово је резултат могућности брзог пребацивања режима погонских ЕМ из пловидбе напред у пловидбу крмом.

3. Како се не располаже са подацима о пречнику круга окрета брода са старим дизел погоном претпоставља се да је пречник круга окрета брода са тим погоном био једнак пречнику круга окрета брода са ДЕП-ом у режиму када брод плови са оба ЕМ напред и кормило се отклони у једну страну.

У наведеном режиму пловидбе, за број обртаја ЕМ  $1.000 \text{ min}^{-1}$  измерен је пречник круга окрета **234 m**, а измерени пречник круга окрета у маневру са употребом спрега погонских ЕМ, отклоном кормила у једну страну и употребом прамчаног потисника, на истом броју обртаја ЕМ износи **73 m** што представља **смањење пречника круга окрета до 3 пута**. Више је него очигледно колико је побољшан маневар окрета брода употребом спрега и прамчаног потисника.

4. Употреба спрега погонских ЕМ, без употребе прамчаног потисника, доприноси смањењу радијуса окрета. У маневру са спрегом погонских ЕМ на броју обртаја  $1.000 \text{ min}^{-1}$  и отклоном кормила у једну страну измерен је пречник окрета **102 m**, што представља **смањење пречника окрета и до 2 пута** у односу на стари дизел погон.
5. Резултат испитивања пречника круга окрета када се користио само спрег пропелера, без закрета кормила и употребе прамчаног потисника, када окрет брода није остварен је од важности за посаду брода која треба да зна са којим маневарским могућностима брод располаже.
6. Као закључак намеће се да на значајно побољшање маневарских карактеристика брода највећи утицај имају могућност једноставног и брзог реверзирања погона и уградња прамчаног потисника.
7. Уградња прамчаног потисника, поред доприноса смањењу пречника круга окрета, на мањим брзинама брода, омогућава много лакши и бржи маневар упловљења и испловљења брода, као и пловидбу у преводницама. На основу резултата мерења пречника круга окрета у маневру са употребом спрега и прамчаног потисника без употребе кормила, реална је претпоставка да би се, у случају квара кормиларског

уређаја, са прамчаним потисником и употребом спрега погонских ЕМ могло привремено управљати са пловидбом брода.

Поред побољшања пловних и маневарских карактеристика брода уградњом ДЕП-а остварени су следећи пројектовани захтеви из програма реализације (ПР):

1. Уградња нове електричне централе на брод, са великом расположивом снагом, обезбедила је високу расположивост погонском силом и квалитетније напајање свих бродских уређаја са електричном енергијом, као и опремање брода новим системима, (нпр. системом климатизације). Поред тога омогућена је уградња нове опреме са наизменичним напоном у даљној експлоатацији брода.
2. Измерене торзионе вибрације на пропелерском вратилу потврдиле су хипотезу да погонски електромотори, због мирног рада, имају **знатно мање торзионе осцилације** од погонских дизел мотора.
3. Електрични погон брода поседује и више других, значајних предности над класичним дизел погоном [62]:
  - Могућност смањења потрошње горива из разлога што погонски дизел агрегати раде са константним брзинама обртања у подручју око оптималног оптерећења код свих брзина пловидбе и могућности коришћења оптималног броја агрегата у узводној и низводној пловидби.
  - Повећање живавости брода са дезинтегрисаношћу погона (формирањем новог машинског простора омогућено је да погонски електромотори и дизел агрегати буду смештени у одвојене просторе) и уградњом система за сигнализацију продора воде и појаву пожара и видео надзора.
  - Допринос екологији животне средине услед смањења и ефикасне потрошње горива што значи боље очување енергетских ресурса и мању емисију штетних гасова код истог технолошког учинка. Поред тога, брзоходни дизел мотори, који су намењени за погон генератора на бродовима с дизел електричним погоном, раде с константним брзинама обртања па имају знатно нижу емисију штетних гасова од мотора у систему дизел механичког погона,
  - Комфор посаде је повећан уградњом система климатизације, вентилације машинских простора као и демонтажом међувратила вратилних водова, који су пролазили кроз кабине бродске посаде. Поред тога, комфор посаде је повећан и уградњом нових неструктурних танкова питке воде укупне запремине 21.100 l, што је омогућено уклањањем опреме старог дизел погона из машинског простора.
1. Дизел електрични погон на броду „КОЗАРА” је поуздано објединио кроз савремено техничко решење два највећа и најсложенија система из усвојеног ПР-а: погонско-пропулзивни систем и систем електроенергетике. Ово је први војни брод са уграђеном дизел-електричном погоном не само у Србији него и у региону. Модернизацијом је добијено **повећање оперативних способности брода** (поуздан, економичан и перспективан погон за наредних 25 до 30 година), **побољшање маневарске способности** брода са уградњом електричног погона и прамчаног тунелског потисника и **могућност повећане економичности у експлоатацији**.
2. Оригинално решење модернизације брода „КОЗАРА” са ДЕП-ом омогућило је знатне економске ефекте у поређењу са ценом новог брода приближно истих карактеристика, због коришћења постојеће структуре брода.

У периоду почетне експлоатације модерновог брода „КОЗАРА”, у трајању од две године, констатована су мања одступања од очекиваних захтева из ПР-а:

1. По питању потрошње горива ДЕП није у потпуности испунио пројектни задатак. Према подацима о експлоатацији брода, након модернизације, може се закључити да потрошња брода доста варира и да је у просеку приближно иста као и потрошња са старим дизел погоном. Ипак, резултати потрошње горива за 2014. годину указују на могућност мање потрошње горива.
2. На већу потрошњу горива, од очекиване, у првом реду утиче **немогућност укључивања лучког генератора на главну разводну таблу** из разлога што је приликом пристајања брода у току пловидбе, у луке у којима брод није могуће спојити на напајање са обале, неопходно да ради један од основних генератора.
3. У дисертацији је поменуто и да би се уградњом више основних генератора мање снаге, уместо два велике снаге смањила укупна потрошња горива.
4. Почетни кварови и откази указују на незадовољавајући квалитет изабраних делова опреме, што доводи у питање поузданост система.
5. Због недостатка обучених чланова посаде и необезбеђене логистичке подршке брода, са потребним резервним деловима и склоповима, неопходно је ангажовање овлашћених сервисера за одржавање опреме, у првом реду електронских склопова и за мање кварове.

**На основу свих приказаних резултата истраживања у овој дисертацији може се закључити да је дизел електрични погон веома добар метод за побољшање маневарских карактеристика брода.** Основни разлог за то јесте чињеница да је код ове врсте погона могућа брза промена смера обртања погонских електромотора што омогућава ефикасну употребу спрега, а поред тога бродска електрична централа велике снаге омогућила је уградњу прамчаног потисника. Због овога ДЕП има предности у односу на друге методе побољшања маневарских карактеристика брода, као што је нпр. систем заклетних пропелера.

На приказана мања одступања од очекиваних захтева из ПР-а највећи утицај су имала **ограничена новчана средства** одобрена за модернизацију, због којих није било могуће набавити опрему од реномираних произвођача. Најбољи пример за то су напонско френквентни претварачи који нису набављени од фирме АББ већ их је призвала фирма ЕЛМЕХ Ријека. Поред тога није била могућа и уградња већег броја дизел агрегата мање снаге. Због ограничених новчаних средстава није било могући ни уговарање сетова резервних склопова, модула и делова који су неопходни за текуће одржавање уграђене опреме.

## 11. ПРЕПОРУКЕ ЗА ДАЉА ИСТРАЖИВАЊА

У дисертацији је приказана методологија истраживања примене ДЕП-а на војним речним бродовима као метода побољшања маневарских карактеристика брода, са конкретном применом при модернизацији брода „КОЗАРА”. Први пут је на једном месту приказан начин замене врсте погона на једном од бродова Речне флотиле и резултати испитивања брода у пловидби на основу којих су назначене предности ове врсте погона на бродовима.

Идеја за овакав пројекат је заснована на чињеници да електрична енергија представља вероватно најквалитетнији извор енергије која се лако преноси до потрошача, која се лако користи и да постоје уређаји који могу да раде само ако се напајају електричном енергијом. Како су обављена испитивања показала да електрични погон има карактеристике које су у највећој мери задовољиле пројектни задатак могло би се закључити да треба тежити свеобухватној примени електричне енергије на војним речним бродовима.

Предлог будућих истраживања треба усмерити на:

1. Праћење рада ДЕП-а уграђеног на брод „КОЗАРА” у експлатацији и појаве кварова са праћењем поузданости ове врсте погона.
2. Испитивање ефикасности прамчаног потисника у односу на брзину пловидбе брода, односно да се утврди брзина пловидбе на којој прамчани потисник престаје бити ефикасан. Поред тога ова испитивања би требала дати одговор и на претпоставку да при малим брзинама брода прамчани потисник може преузети улогу кормиларског уређаја.
3. Испитивање утицаја депласмана на брзину брода и ефикасност прамчаног потисника. Овим испитивањима треба употпунити резултате мерења брзине брода у току испитивања брода „КОЗАРА” и одредити минимални депласман при коме употреба прамчаног потисника има ефекат.
4. Праћење рада уграђеног ДЕП-а на броду „КОЗАРА” ради потврде претпостављене економичности тог облика погона која се, у првом реду, огледа у уштеди горива. Нужан предуслов је сређивање могућности напајања бродске мреже лучким дизел електричним агрегатом.
5. Дефинисање модела одржавања ДЕП-а. Истраживања у тој области треба да имају тежиште на дефинисању одржавања савремених система управљања и надзора ДЕП-а (напонско френквентни претварачи, систем за управљање погоном, алармни аутоматизовани систем).
6. Могућности примене методологије савремене техничке дијагностике у оцени стања опреме ДЕП-а, на основу чега би се вршило одржавање опреме према стању.
7. Могућности примене ДЕП-а како на пловним објектима Речне флотиле, тако и на осталим пловним објектима у Републици Србији, заснованим на резултатима испитивања приказаним у овом раду. Уградњу ДЕП-а потребно је разматрати првенствено ради побољшања маневарских и пловних карактеристика пловних објеката.
8. Могућности примене новијих облика дизел електричних погона као што су нпр. подтрупни потисници (AZIPOD)

9. Израду софтверског пакета за теоретско одређивање путање брода у маневрима (у првом реду у маневру окрета), на основу израза за брзину и радијус брода у окрету и за путању брода у окрету који су дати у глави 6 дисертације и његова имплементација у савремене навигационе системе за пловидбу на реци, што би било од велике користи за све учеснике речног саобраћаја.
10. Стварање могућности извођења сличних модела брода са ДЕП-ом за домаће потребе и иностране наручиоце.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Д. Вучетић, И. Чекада, Експлоатацијске предности електричне пропулзије, Поморство, год. 20, бр. 1, стр. 129-145, Ријека 2006.
- [2] А. Маринчић, Електрични погон ратних бродова, Чланци, , Завод за уџбенике и наставна средства, Београд, 1995, 432-441.
- [3] ИО. М. Гилерович, В. С. Спешилов, В. А. Туманов, Перспективби развитна гребних електрических установак, Судостроение 4, 1997, 51 – 54.
- [4] З. Николић, Б. Билен, Дизел-електрични погон речних бродова, Зборник радова Другог Југословенског научно-стручног скупа “Водни саобраћај у 21. веку”, Београд, (2.002), 63 – 69.
- [5] Z. Nikolić, P. Miljanić, Nikola Tesla and Electric Drive for Battle Ships, Proceedings of the Sixth International Symposium Nikola Tesla, Belgrade, (2006), 85 - 88. ISBN/ISSN 978-86-7466-264-9.
- [6] L. Chapman, The Marine Power Plant, New York, McGraw-Hill Book Company Inc, 1942.
- [7] M. Aprianen, “Naval Architecture of Electric Ships – past, Present and Future,” SNAME Trans, vol. 101, pp. 583-607, 1993.
- [8] T. Gibbons, The encyclopaedia of Ships, New York, Silverdale Books, 2001.
- [9] Брод посебне намене БПН-30 „КОЗАРА“, Студија заштите, Војска Србије, Музеј науке и технике, Београд 2009.
- [10] [http://www.polpi.net/etwas\\_zu\\_lesen\\_und\\_schauen.htm](http://www.polpi.net/etwas_zu_lesen_und_schauen.htm).
- [11] Решење пов.бр. 1460 од 31.08.1960. године, Материјално планска управа ЈНА, Државни секретаријат за послове одбране, Федеративна народна република Југославија.
- [12] Команда 2.ратне речне флотиле, Комисијски извештај о прегледу брода „Криемхилд“ пов.бр. 977 од 21.06.1960. године, Нови Сад 1960.
- [13] Речна флотила, Основна бродска књига БПН-30 “Козара”, ДСНО, број евиденције 786, Нови Сад 1967.
- [14] Навигациони информациони системи за бродове Речне флотиле - Програм реализације, Војнотехнички институт, рег.бр. 027-01-0177, Београд 2009.
- [15] Резултати испитивања брода „Козара“, Речна флотила, ВП Нови Сад 1963.
- [16] Конкурсна документација за спровођење поверљиве набавке радова и услуге, Ремоторизација БПН-30 "КОЗАРА", Министарство одбране, Београд, Март 2011.
- [17] C. Dymarski, R. Rolbiecki, Comparative analysis of selected design variants of propulsion system for an inland waterways ship, Polish Maritime Research, No 1(47) 2006 Vol 13, 3-7.
- [18] [http://www.pfri.uniri.hr/~vucetic/BEES\\_BS\\_2011.pdf](http://www.pfri.uniri.hr/~vucetic/BEES_BS_2011.pdf)
- [19] P. Pospiech, World's First' Electric Car Ferry, January 29, 2013, <http://articles.maritimepropulsion.com/article/Siemens-and-Norled-Announce-Worlds-First-Electric-Car-Ferry93892.aspx>.
- [20] Y. Hideki, M. Hiroaki, S. Aiichiro, Energy Saving Technology of the Diesel-Electric Propulsion System for Japanese Coastal Vessels, Engineering Review, Vol. 44, No. 1, pp. 12-16, 2011.
- [21] [http://commons.wikimedia.org/wiki/Viking\\_River\\_Cruises](http://commons.wikimedia.org/wiki/Viking_River_Cruises).



- [22] L. Matuszewski, K. Falkowski, An electric ring thruster as auxiliary manoeuvring propulsion system for watercraft –construction analysis, Polish Maritime Research, Special Issue 2007/S1, pp. 62-66, 2007.
- [23] Пројекат БПН-30 “Козара“, ДЕП, БЕОЛИНЕ ГРОУП, Београд, 2011.
- [24] М. Krčum; Ship electrical Propulsion, XII simpozij Teorija i praksa brodogradnje, Sorta 1996., p.p. 371 – 377.
- [25] З. Николић, Г. Почуча, Бродске електричне машине и уређаји, Институт техничких наука САНУ, Београд, (2003), 262. ИСБН 86-80321-06-0, ЦИП 629.5.035:621.313/-314.
- [26] Д. Вучетић, Д. Турковић Успоредба бродских поривних електромотора, Поморство, год. 23, бр. 1 (2009), стр. 183-198
- [27] Правило за градњу бродова унутрашње пловидбе, Југословенски регистар бродова, Београд 1994
- [28] ЕЕС, Zbornik rezolucije osnovne radne grupe za saobraćaj na unutrašnjim plovним putevima, OUN, Njujork, 1993
- [29] Пројекат број С 1744, М/В КОЗАРА Технички опис, ЕЛМЕН GIU, Ријека, 2011
- [30] Germanischer Lloyd, Rules & Guidelines 2005, Hamburg 2005
- [31] Модификација бродских система у оквиру генералног ремонта БПН - 30 „КОЗАРА“, Тактичко-технички захтеви, број 2788-82, Управа за одбрамбене технологије, Министарство одбране, Београд 2010
- [32] Брод посебне намене БПН-30 “Козара“, Технички опис ремоторизације, БЕОЛИНЕ ГРОУП, Београд, 2011
- [33] Д. Вучетић, Д. Турковић, Успоредба бродских поривних електромотора, Поморство, год. 23, бр. 1 (2009), стр. 183-198
- [34] Д. Радан, Увод у хидродинамику брода, Свеучилиште у Дубровнику, Дубровник 2004.
- [35] М. М. Јовановић, Пројектовање брода, Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет, Београд, 2002.
- [36] A. F. Molland\_ S. R. Turnock, D. A. Hudson, Ship resistance and propulsion \_ practical estimation of ship propulsive power-Cambridge University Press (2011)
- [37] С. Росић, Пловидба унутрашњим пловним путевима, Београд 2010, 394 стр.
- [38] Ж. Куртела, Основе бродостројарства, Велеучилиште у Дубровнику, Дубровник 2000С.,
- [39] А. Шестан, Н. Владимир, Поривни сујави малих бродова, Загреб, 2010.
- [40] А. К. Adnanes, Maritime Electrical Installations, and Diesel Electric Propulsion, Oslo, ABB AS Marine, 2003.
- [41] USNA, Principles of Ship Performance, EN200 Course Notes, USNA, 2003.
- [42] V. J. Gitis, V. L. Bondarenko, T. P. Jefimov, J. G. Poljakov, B. M. Ćurbanov: Teorijske osnove eksploatacije brodskih dizel motora (prevod s ruskog), SSNO, Beograd, 1973
- [43] Б. Билен, З. Николић, З. Шоваговић, Д. Булован, Побољшање погонских карактеристика бродова са електричним преносом, Институт Техничких Наука САНУ, Београд.
- [44] НВМ - An Introduction to Measurements using Strain Gages.
- [45] Упутство за мерење обртног момента на пропелерским вратилима брода, ТОЦ, Ц.33.003.
- [46] Louis – Philippe M. Menard, Prediction of Performance and Maneuvering Dynamics for Marine Vehicles Applied to DDG – 1000, Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [47] С. Јецић, Механика II (Кинематика и динамика), Техничка књига Загреб, 1989.
- [48] Програм и план верификационих испитивања бродских система модификованих у оквиру генералног ремонта брода БПН-30 „КОЗАРА“, ТОЦ-12-3507/П, Технички опитни центар, Београд 2012.
- [49] Х. Калиновчић, Управљивост брода, Скрипта уз предавања, Свеучилиште у Загребу, Факултет стојарства и бродоградње, Загреб, 2004.

- [50] Full Scale Measurements Manoeuvrability Full Scale Manoeuvring Trials Procedure, ITTC – Recommended Procedures Effective Date 2002, Page 18.
- [51] Vibrameter VIB-10, Vibration Monitoring Instruction Manual, Sweden 1983.
- [52] SPM INSTRUMENT. Ges.m.b.H, SPM Instruction Manual System 43, Sweden 1981.
- [53] P. Michalpwski, J. Wolniak: „Practical measurement of trajectory in open water model tests“, Polish Maritime Research Special Issue 2007/S2, p. 42-48.
- [54] Резултати испитивања брода, Примопредајни записник, Министарство одбране, Београд 2012.
- [55] Извештај о верификационом испитивању бродских система модификованих у оквиру генералног ремонта брода БПН-30 „КОЗАРА“, ТОЦ-12-3507, Технички опитни центар, Београд 2013.
- [56] Д. Вучетић, И. Влахињић, Утјецај серијског индуктивитета на смањење хармоничке дисторзије струје мрежно комутираних претварача фреквенције у суставу електричне пропулзије брода“, Поморство, год. 19. 2005, п. 65-75.
- [57] Д. Трифковић, Р. Николић, Ж. Петровић, Резултати мерења торзионих осцилација у систему пропулзије бродског дизел мотора, Војнотехнички гласник, 06/2005.
- [58] Машински дневник за бродове на моторни погон, број 79, ВП 2827, Нови Сад 2013.
- [59] Машински дневник за бродове на моторни погон, број 35/4, ВП 2827, Нови Сад 2014.
- [60] Машински дневник за бродове на моторни погон, број 46/63, ВП 2827, Нови Сад 2015.
- [61] Машински дневник за бродове на моторни погон, број 252/65 – 54/19, ВП 2827 – 6, Нови Сад 1999.
- [62] J. Dautović, Z. Nikolić, D. Trifković, Advanced features of the reconstructed special purpose river ship "Kozara" with a diesel electric drive (DED), Brodogradnja/Shipbuilding, Zagreb, 2014. UDC 629.5.