

Mr Dragan Trifković,
kapetan I klase, dipl. inž.
mr Radosav Nikolić,
pukovnik, dipl. inž.
mr Živojin Petrović,
kapetan I klase, dipl. inž.
Vojna akademija – Odsek logistike,
Beograd

REZULTATI MERENJA TORZIONIH OSCILACIJA U SISTEMU PROPULZIJE BRODSKOG DIZEL MOTORA

UDC: 629.12-843.6 : 531.781

Rezime:

U ovom radu prikazan je postupak merenja, kao i rezultati dobijeni merenjem nivoa torzionih oscilacija u sistemu prenosa snage sa broskog dizel motora na propeler. Prime-njen je princip merenja torzionog napona u funkciji broja obrtaja broskog motora upotre-bom savremene merne opreme. Proveren je položaj kritičnih brojeva obrtaja i nivo napre-zanja propelerskih vratila, i na osnovu toga data ocena tehničkog stanja sistema sa aspekta na-prezanja usled torzionih oscilacija.

Ključne reči: torzione oscilacije merenja, propelersko vratilo, napon, kritičan broj obrtaja.

THE RESULTS OF TORSIONAL VIBRATIONS MEASUREMENT IN THE SYSTEM OF DIESEL ENGINE PROPULSION

Summary:

The measuring treatment, as well as the results of torsional vibrations in the transfer from the ship diesel engine to the propeller are shown in this work. The measuring principle of torsional stress according to the function of rotation number of ship engine is applied by using of modern measurement equipment. The position of critical rotation numbers and the level of propeller shafts stress have been checked, and on the basis of these indices the evaluation of technical condition of the system has been estimated from the aspect of torsional vi-brations strain.

Key words: torsional vibrations, measurement, propeller shaft, stress, critical rotation numbers.

Uvod

U trgovačkoj i ratnoj mornarici za pogon brodava najčešće se koriste dizel motori, čija se snaga na propeler prenosi mehaničkim putem. Mehanički sistem prenosa snage sastoji se od zupčastog reduktora, sistema vratila, elastičnih spoj-nica i ležajeva. Kolenasto vratilo broskog motora, zajedno sa elementima pre-nosa snage, predstavlja elastičan sistem koji torziona osciluje. Torzione oscilacije su, u najvećoj meri, posledica neravno-mernog torzionog momenta na kolena-

stom vratilu broskog motora. U slučaju da se poklopi frekvencija pobude sa frekvencijom slobodnih oscilacija sistema, javljaju se rezonantna oscilovanja. Rad sistema u rezonantnom području može izazvati smetnje i otkaze pojedinih elemenata. Da bi se sistem oslobodio kritič-nih torzionih oscilacija, u radnom pod-ručju broja obrtaja motora, neophodno je izraditi proračun sistema na torzione oscilacije. Proračunom se određuju kri-tični brojevi obrtaja i odgovarajuća na-prezanja čije vrednosti moraju biti manje od dozvoljenih. Ukoliko su izračunata

naprezanja veća od dozvoljenih, konstrukcionim i drugim merama njihove se vrednosti smanjuju. Ovaj proračun radi se u fazi projektovanja brodova, a kako podrazumeva i niz pretpostavki kojima se složen realan sistem pojednostavljuje, njegovi rezultati se proveravaju merenjem na izgrađenom brodu.

U ovom radu prikazan je postupak merenja nivoa torzionih oscilacija upotrebom savremene merne opreme, kao i rezultati koji su dobijeni merenjem na novoizgrađenom brodu Rečne ratne flotile. Kao merena veličina odabran je torzioni moment, koji je meren u funkciji vremena i broja obrtaja brodske motora za različite uslove eksploatacije i režime vožnje. Merenjem su provereni položaji kritičnih brojeva obrtaja, kao i odgovarajuća naprezanja elemenata u sistemu prenosa snage sa brodske motora na propeler. Na osnovu dobijenih rezultata data je ocena tehničkog stanja posmatranog sistema sa aspekta naprezanja na uvijanje usled torzionih oscilacija.

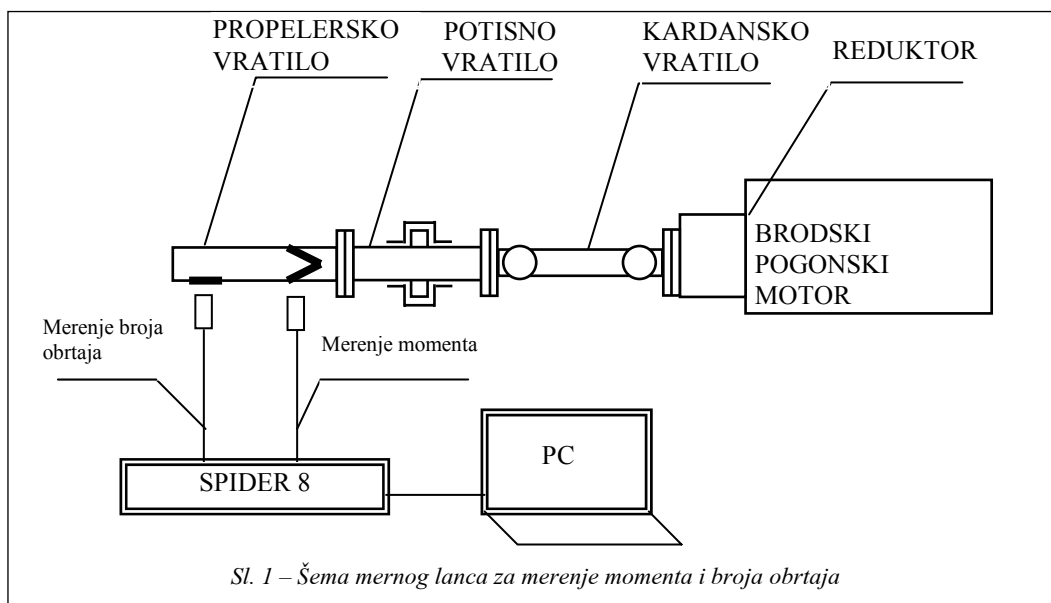
Postupak merenja torzionih oscilacija propelerskog vratila

Nakon izgradnje i porinuća broda u sklopu primopredajnih ispitivanja, pored ostalog, meri se nivo torzionih oscilacija u sistemu prenosa snage sa brodske dizel motora na propeler. Cilj ovog merenja je da se provere stvarni položaji kritičnih brojeva obrtaja motora i stvarna naprezanja elemenata sistema koja odgovaraju kritičnim brojevima obrtaja. Ukoliko se stvarne (izmerene) vrednosti razlikuju za više od 3% u odnosu na proračunate, mora se korigovati proračun. U slučaju da se u radnom području broja

obrtaja motora javljaju nedozvoljena rezonantna naprezanja, to bi u toku eksploatacije sistema moglo izazvati smetnje i otkaze u radu.

Za mehanički sistem prenosa snage sa brodske dizel motora na propeler, koji je instaliran na brodu Rečne ratne flotile tipa RML-341 i prikazan na slici 1, primenjen je princip merenja nivoa torzionih oscilacija na osnovu merenja torzionog momenta. Propulziona postrojenje ovog broda sastoji se od dva dizel motora koji preko elastičnih spojnika, zupčastih reduktora i sistema prenosnih vratila pogone po jedan trokrilni propeler sa fiksnim krilima. Zbog simetrije postrojenja, na slici 1 prikazana je šema sa jednim motorom. Torzioni moment je meren na propelerskim vratilima, imajući u vidu rezultate proračuna torzionih oscilacija, prema kojem se na propelerskom vratilu nalazi čvor oscilacija, za svaki posmatran oblik oscilovanja [4]. Na centralno mesto u formiranom mernom lancu postavljen je višekanalni mobilni merni sistem SPIDER 8 (proizvođač HBM – Hottinger Baldwin Messtechnik), koji je povezan sa odgovarajućim senzorima. Šema mernog lanca prikazana je na slici 1. Preko serijskog porta RS-232 ovaj merni sistem je povezan sa računarom, a instalirani specijalizovani softver CATMAN omogućava obradu i prikaz rezultata merenja u realnom vremenu.

Za merenje momenta korišćene su merne trake tipa 6/120 XY21 (tzv. rozete čiji je k-faktor 2), povezane u pun most, kako bi se što bolje kompenzovao uticaj temperature i savijanja na dilataciju traka. Na jednu dijagonalu mosta dovođen je napon napajanja, a sa druge vođen izlazni naponski signal. Relativnoj dilataciji trake od



1000 mm/m odgovarao je izlazni napon od 2 mV/V. Izlazni naponski signal vođen je na merni sistem SPIDER 8 pomoću beskontaktnog sistema tipa BLM, proizvođača HBM (slika 2).

Merenja su vršena na reci Dunav kod Novog Sada. Tokom merenja brod je plovio najpre nizvodno a zatim uzvodno, istovremeno sa oba motora kako bi se uporedili rezultati za ove dve vožnje.



Sl. 2 – Napajanje mernog mosta i beskontaktni prenos signala

Torzioni moment meren je u funkciji vremena i broja obrtaja motora sa brzinom uzorkovanja od 1200 Hz, i to pri kontinualnoj promeni broja obrtaja (od minimalnog do maksimalnog i obrnuto), i zadatim brojevima obrtaja (1000, 1200, 1400, 1600 o/min i maksimalni).

Prvi način merenja daje nestacionaran signal ($n = \text{const.}$), čijom se analizom proveravaju položaji kritičnih brojeva obrtaja i ponašanje sistema na prelaznim režimima. Od drugog načina merenja očekuje se kvazistacionaran signal ($n = \text{const.}$), na osnovu kojeg se određuju naprezanja vratila na uvijanje usled torzionih oscilacija na zadatom broju obrtaja motora.

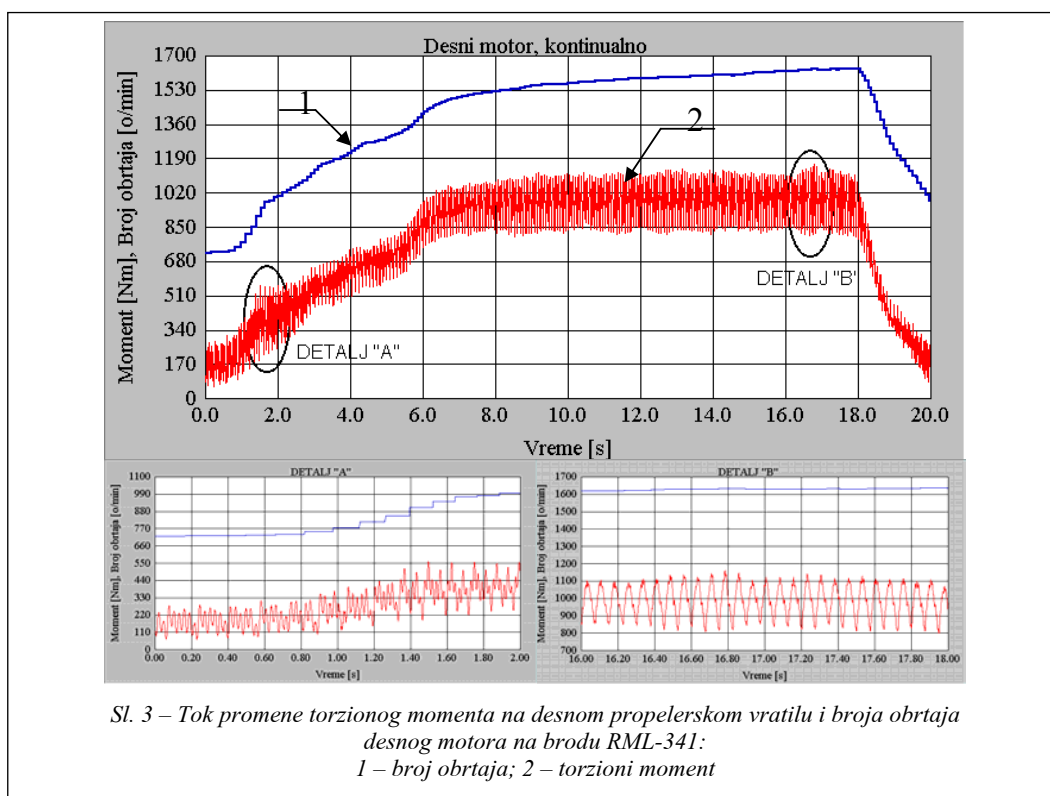
Broj obrtaja meren je pomoću optičkog mernog sistema tipa AO1, sa jedinicom DV2556 istog proizvođača. Izlazni naponski signal je, takode, vođen na merni sistem SPIDER 8.

Rezultati merenja torzionih oscilacija u sistemu propulzije brodskog dizel motora

Na slici 3 prikazani su tok promene torzionog momenta na desnom propelerskom vratilu i tok promene broja obrtaja desnog motora u funkciji vremena. Rezonantne brzine, ukoliko postoje u mernom području, mogu se uočiti na dijagramu torzionog momenta, jer im odgovaraju veće vrednosti amplitude.

Na krivoj promene torzionog momenta može se uočiti da signal poseduje jednu „dinamičku“ komponentu sličnu šumu. Ova pulziranja torzionog momenta posledica su promenljivog karaktera tangencijalnih sila na kolenima kolenastog vratila motora i prisustva torzionih oscilacija u siste-

mu prenosa snage za pogon propelera. Nešto veće amplitude torzionog momenta javljaju se u uzlaznom delu krive (detalj „A“, $n = 775$ o/min) i pri maksimalnom broju obrtaja (detalj „B“, $n_{\max} = 1636$ o/min). Upoređujući levu i desnu polovinu dijagrama (detalj „A“) očigledno je da se javlja veliki porast amplitude sa povećanjem broja obrtaja. Porast srednje vrednosti amplitude na desnoj polovini dijagrama u odnosu na levu polovinu iznosi preko 50%, što znači da se $n = 775$ o/min može smatrati prvim kritičnim brojem obrtaja. Međutim, kako je i brzina promene broja obrtaja na desnoj polovini dijagrama oko četiri puta veća u odnosu na levu polovinu, to na porast amplitude utiču i brže promene inercionog momenta pri ubrzanju torzionih masa. S druge strane, ugaona ubrza-



Sl. 3 – Tok promene torzionog momenta na desnom propelerskom vratilu i broja obrtaja desnog motora na brodu RML-341:
1 – broj obrtaja; 2 – torzioni moment

nja utiču i na promenu momenta otpora propelera u vodi.

Na izmerenom maksimalnom broju obrtaja ($n_{\max} = 1636$ o/min, detalj „B“) porast amplitude torzionog momenta ukazuje na mogućnost da se na tom broju obrtaja javlja rezonanca, pa je ovaj broj obrtaja označen kao drugi kritičan broj obrtaja. Za ova dva uočena kritična broja obrtaja potrebno je snimiti torzione momente i odrediti naprezanja koja im odgovaraju. Zbog nestabilnog rada motora na niskim brojevima obrtaja nije bilo moguće proveriti naprezanje za $n = 775$ o/min.

Dijagram toka torzionog momenta levog propelerskog vratila veoma je sličan dijagramu toka torzionog momenta desnog propelerskog vratila, a položaji kritičnih brojeva obrtaja se zanemarljivo malo razlikuju.

Da bi se proverila naprezanja propelerskih vratila na uvijanje, snimljeni su torzioni momenti pri različitim brojevima obrtaja motora i plovidbi broda uzvodno i nizvodno. Vrednosti maksimalnog tangencijalnog napona (u daljem tek-

stu tangencijalni napon) izračunate su deljenjem izmerenog torzionog momenta sa izračunatim polarnim otpornim momentom [3]:

$$\tau = \frac{M}{W_0} \quad (1)$$

gde je:

τ – tangencijalni napon [N/m^2],

M – torzioni moment propelerskog vratila [Nm],

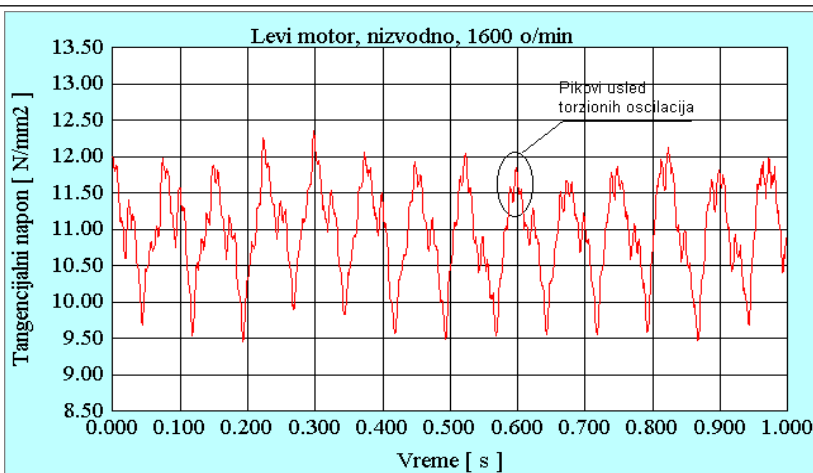
W_0 – polarni otporni moment [m^3].

Polarni otporni moment za propelersko vratilo kružnog poprečnog preseka izračunava se prema formuli:

$$W_0 = \frac{\pi d^3}{16} \approx 0,2d^3 \quad (2)$$

gde je d – prečnik vratila [m].

Na slici 4 prikazan je tok promene tangencijalnog napona na levom propelerskom vratilu, pri 1600 o/min motora i nizvodnoj plovidbi broda.



Sl. 4 – Tok promene tangencijalnog napona na levom propelerskom vratilu pri zadanom broju obrtaja levog motora

Tangencijalni napon na mernom mestu direktno je proporcionalan ukupnoj tangencijalnoj sili na kolenastom vratilu motora:

$$\tau = \frac{M}{W_0} = \frac{M_M \cdot \eta_{sp} \cdot i}{W_0} = \frac{F_T \cdot r \cdot \eta_{sp} \cdot i}{W_0} \quad (3)$$

gde je:

M_M – obrtni moment motora [Nm],
 η_{sp} – koeficijent korisnog dejstva sistema prenosa snage od motora do mernog mesta,
 F_T – ukupna tangencijalna sila na kolenastom vratilu motora [N],

funkcija već blisko periodična i može se predstaviti sumom periodičnih funkcija različitih frekvencija. Na dijagramu 2 može se uočiti da je osnovni (noseći) signal superponiran signalima sličnim šumu, koji su prouzrokovani torzionim oscilacijama.

U tabeli 1 prikazane su uporedne maksimalne vrednosti izmerenog i dozvoljenog tangencijalnog napona na propellerskim vratilima, pri zadatim brojevima obrtaja motora i uzvodnoj i nizvodnoj plovidbi broda.

Tabela 1

Uporedne maksimalne vrednosti izmerenog i dozvoljenog tangencijalnog napona na propellerskim vratilima

Zadat broj obrtaja motora (o/min)	Tangencijalni napon na propellerskim vratilima (N/mm ²)				Dozvoljena maksimalna vrednost
	Izmerene maksimalne vrednosti				
	Levo propellersko vratilo		Desno propellersko vratilo		
	Uzvodno	Nizvodno	Uzvodno	Nizvodno	
1000	6,18	6,48	7,43	7,37	140
1200	7,02	7,31	9,53	9,44	
1400	9,33	9,71	12,48	12,11	
1600	12,10	12,57	15,93	16,52	
maks.	14,07	13,96	17,29	17,28	

i – prenosni odnos zupčastog reduktora,
 r – poluprečnik kolena kolenastog vratila [m].

Kako je u izrazu (3) ukupna tangencijalna sila jedina promenljiva veličina, može se očekivati da karakter promene tangencijalnog napona odgovara karakteru promene ukupne tangencijalne sile na kolenastom vratilu motora. Zbog nejednakosti radnih ciklusa motora, tangencijalna sila, a time i tangencijalni napon, nisu periodične funkcije. Osim toga, na tok torzionog momenta na mernom mestu utiču elastični elementi (elastična spojnica, zupčasti reduktor, kardansko vratilo), kao i oscilacije trupa broda. Prema tome, osnovni signal nije periodična

Iz tabele 1 može se zaključiti da se maksimalna naprezanja propellerskih vratila javljaju na maksimalnim brojevima obrtaja, a iznose oko 10% od dozvoljenih za levo propellersko vratilo. Kod desnog propellerskog vratila ova naprezanja su veća i iznose oko 12% od dozvoljenih. Na srednjim brojevima obrtaja, na kojima inače motori najčešće rade, naprezanja vratila su i do dva puta manja. Veća naprezanja desnog propellerskog vratila posledica su nejednakog rada levog i desnog motora. Izmerene vrednosti torzionog momenta, pri istim zadatim brojevima obrtaja, znatno su veće kod desnog propellerskog vratila. Srednje vrednosti izmerenih brojeva obrtaja levog i desnog

motora, pri istim zadatim brojevima obrtaja, neznatno se razlikuju.

Očekivane razlike u naprezanjima pri plovidbi uzvodno i nizvodno nisu značajne i ne mogu se uočiti nikakve zakonitosti na naprezanje vratila. Sa aspekta naprezanja propelerskih vratila na uviđanje, na mernom mestu i pri zadatim brojevima obrtaja, može se zaključiti da oba propelerska vratila zadovoljavaju.

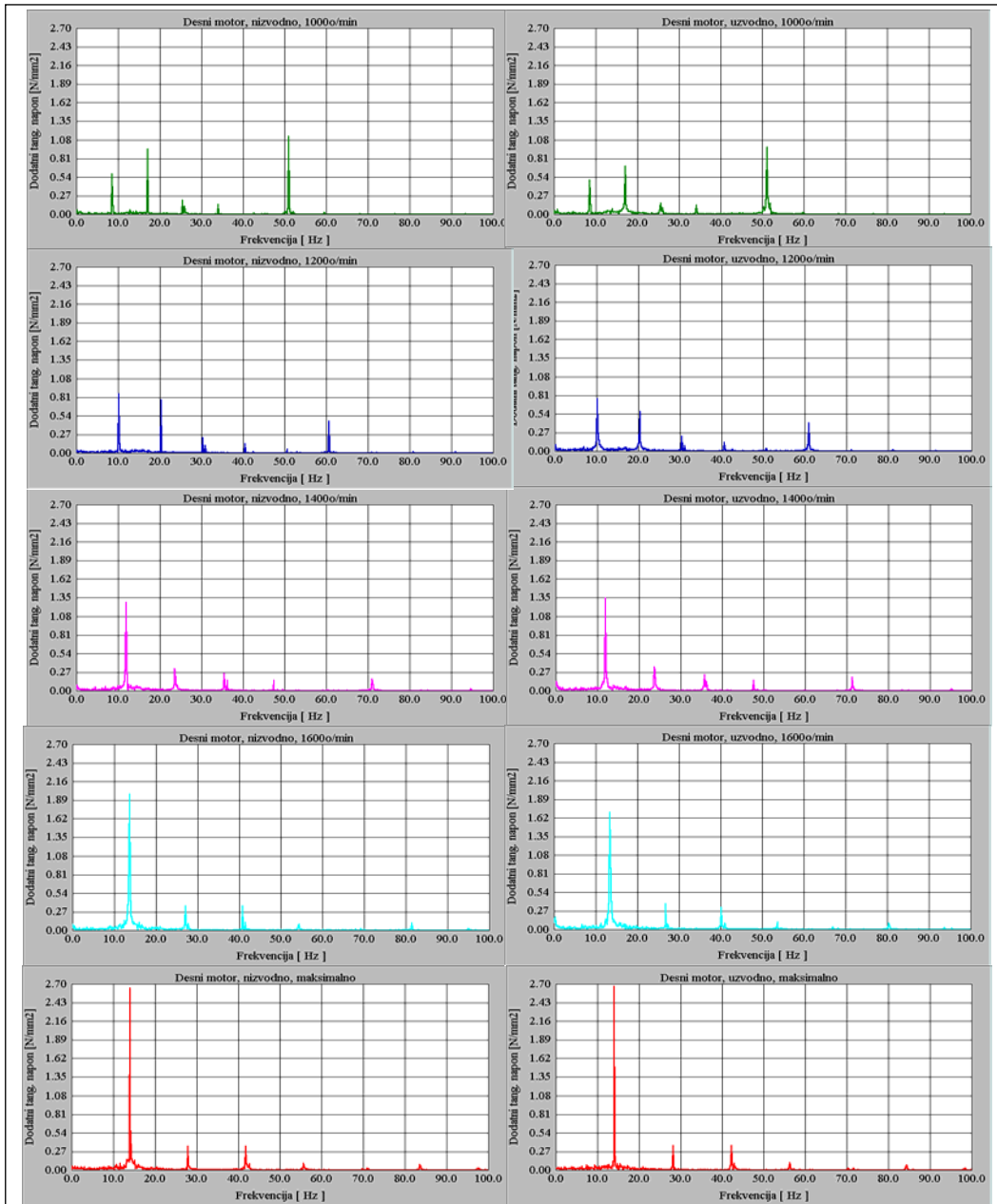
Za potrebe amplitudno-frekventne analize snimljenih signala usrednjene su vrednosti tangencijalnog napona, a razlike trenutnih vrednosti od srednje vrednosti proglašene dodatnim dinamičkim naprezanjem usled promenljivosti tangencijalne sile i prisustva torzionih oscilacija (peak to peak analysis). Za tako dobijene vrednosti dodatnog tangencijalnog napona izvršena je spektralna analiza (auto-power spectrum) u programskom paketu CATMAN. Prelaskom iz vremenskog u frekvencijski domen, složen i blisko periodičan signal rastavlja se na sumu prostoperiodičnih signala različitih amplituda i frekvencija. Rezultati spektralne analize pokazali su da je u nefiltriranim signalima prisutan veliki broj harmonika, čije frekvencije ne prelaze 600 Hz. Od tako velikog broja harmonika za dalju analizu uzeto je samo prvih šest, jer su vrednosti njihovih amplituda oko deset puta veće u odnosu na ostale harmonike. Frekvencije ovih harmonika su celobrojni umnošci osnovne frekvencije. Motorni harmonici (reda $1/2$, $3/2$, ...) imaju zanemarljivo male amplitude, verovatno zbog udaljenosti mernog mesta od kolenastog vratila motora. Amplitudni spektri za oba propelerska vratila, pri zadatim brojevima obrtaja, prikazani su na slikama 3 i 4.

Frekvencije prvih harmonika su dva puta manje od frekvencije kolenastog vratila motora, s obzirom na to da su merenja vršena iza reduktora prenosnog odnosa $i = 2$.

Kod desnog propelerskog vratila, pri nizvodnoj plovidbi broda, amplitude prvog harmonika imaju najveće vrednosti, osim pri 1000 o/min, i rastu sa porastom broja obrtaja (slika 5). Pri maksimalnom broju obrtaja postiže se i najveća vrednost amplitude koja je nekoliko puta veća od amplituda ostalih harmonika.

Ako se na kraju uporede levo i desno propelersko vratilo, može se uočiti da desno ima znatno veću vrednost amplitude prvog harmonika, naročito na maksimalnom režimu. Razlike u vrednosti amplituda, za uzvodni i nizvodni režim plovidbe, kod oba propelerska vratila su neznatne, a kako imaju i različit karakter promene nemoguće je utvrditi bilo kakvu zakonitost. Pri 1000 o/min motora šesti harmonik ima najveću amplitudu koja je skoro dva puta veća od amplitude prvog harmonika. Vrednost amplitude šestog harmonika na 1200 o/min je dva puta manja nego na 1000 o/min, a daljim porastom broja obrtaja još brže opada. Slično se menja i amplituda drugog harmonika. Treći i četvrti harmonik imaju male i ujednačene vrednosti amplitude za sve brojeve obrtaja. Karakteristika petog harmonika je zanemarljivo mala vrednost amplitude na svim režimima.

Upoređujući dijagrame za nizvodnu i uzvodnu plovidbu broda, pri zadatim brojevima obrtaja desnog motora (1000, 1200 i 1600 o/min, slika 5), moguće je uočiti da su amplitude odgovarajućih harmonika neznatno veće za nizvodnu



Sl. 5 – Amplitudni spektri za pojedine brojeve obrtaja desnog motora

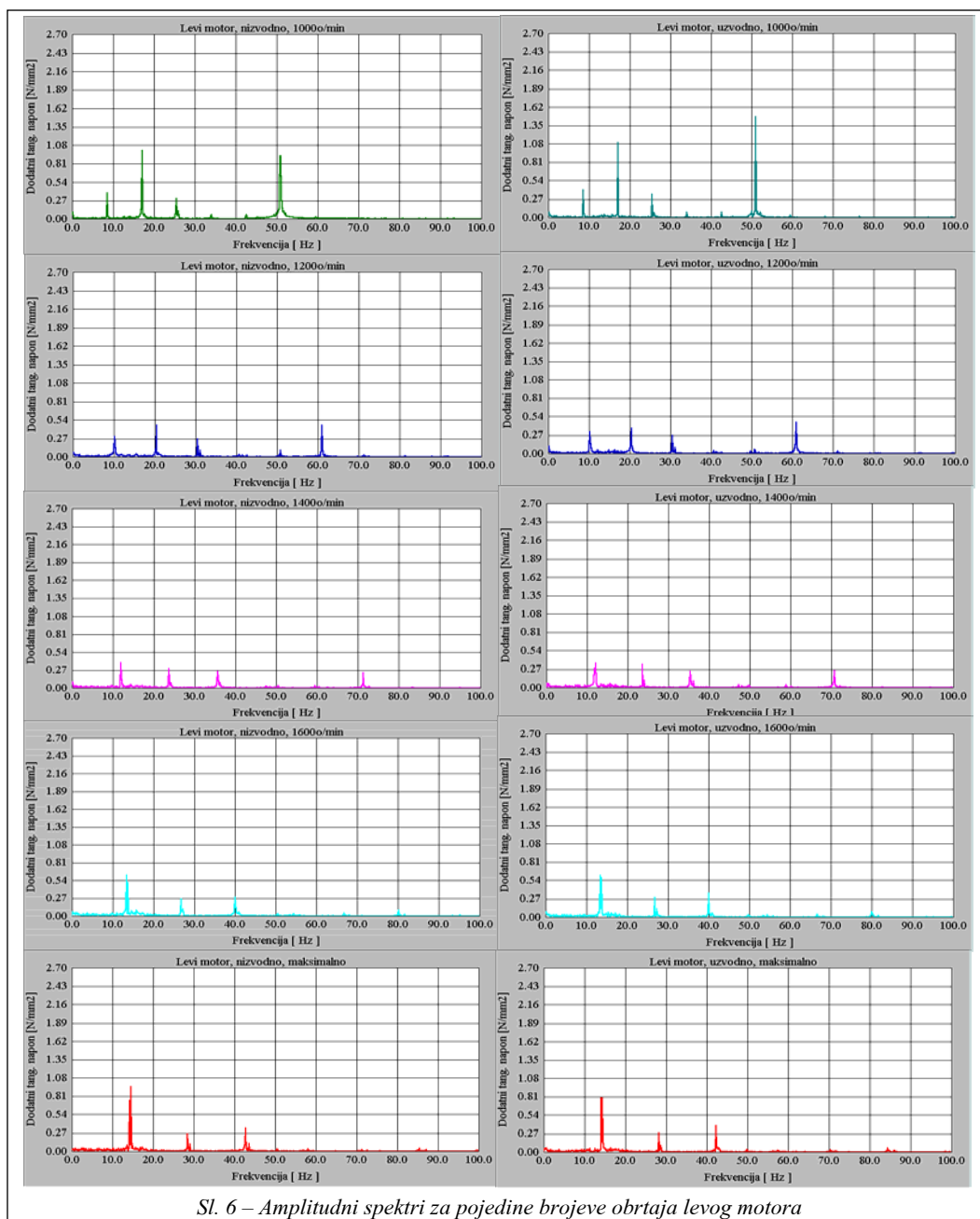
plovidbu. Na ostalim zadatim brojevima obrtaja situacija je obrnuta.

Za levo propelersko vratilo i nizvodni režim (slika 6), generalno gledano, amplitude harmonika su prilično ujedna-

čene i imaju malu vrednost. Najveće amplitude javljaju se pri minimalnom (drugi i šesti harmonik) i maksimalnom broju obrtaja motora (prvi harmonik). Na višim režimima amplitude četvrtog, petog i še-

stog harmonika skoro iščezavaju. Pri uzvodnoj plovidbi, na nižim režimima, dominantan je šesti harmonik, dok je amplituda prvog harmonika mala i značajnije poraste pri maksimalnom režimu.

Pri zadatim brojevima obrtaja (1000, 1200 i 1400 o/min, slika 6) levog motora veće su vrednosti amplituda odgovarajućih harmonika za uzvodnu plovidbu. Na ostalim brojevima obrtaja am-



plitude odgovarajućih harmonika imaju veću vrednost za nizvodnu plovidbu.

Da bi se mogao utvrditi nivo dodatnog naprezanja propelerskih vratila na mernim mestima, kao i uticaj pojedinih harmonika, u tabeli 2 uporedo su prikazane izmerene i izračunate maksimalno dozvoljene vrednosti dodatnog tangencijalnog napona. Maksimalno dozvoljene vrednosti dodatnog tangencijalnog napona τ_{doz} izračunate su prema obrascu za propelerska vratila, izrađena od čelika:

$$\tau_{doz} = \pm \left(45 - 0,4\sqrt{d} - 13 \frac{n}{n_{nom}} \right) \quad (4)$$

gde je:

τ_{doz} – dozvoljeni dodatni tangencijalni napon (N/mm²),

d – prečnik vratila (mm),

n – broj obrtaja motora (o/min),

n_{nom} – nominalan broj obrtaja motora (o/min).

Dozvoljene vrednosti tangencijalnog i dodatnog tangencijalnog napona na brodskim vratilima mogu se naći i u odgovarajućim tablicama koje propisuju registri brodova.

Iz tabele 2 može se zaključiti da su vrednosti amplituda posmatranih harmonika znatno manje od dozvoljenih. Najveću amplitudu kod desnog propelerskog vratila ima prvi harmonik (na maksimalnom režimu), a iznosi oko 9% od maksimalno dozvoljenog dodatnog naprezanja. Kod levog propelerskog vratila najveću amplitudu ima drugi harmonik (1000

Tabela 2

Uporedne vrednosti izmerenog i izračunatog maksimalno dozvoljenog dodatnog tangencijalnog napona

Zadat br. obrtaja motora (o/min)	Izmeren srednji br. obrtaja motora (o/min)	Desni motor, nizvodno							Izračunata maks. doz. vrednost dodatnog tang. napona (N/mm ²)
		Izmerena amplituda harmonika (N/mm ²)							
		I har.	II har.	III har.	IV har.	V har.	VI har.	Σ	
1000	1019	0,584	0,953	0,206	0,146	0,015	1,134	3,038	35,32
1200	1213	0,858	0,768	0,222	0,136	0,055	0,464	2,503	33,92
1400	1424	1,279	0,322	0,251	0,148	0,009	0,165	2,174	32,4
1600	1634	1,974	0,353	0,351	0,087	0,018	0,111	2,89	30,89
maks.	1670	2,646	0,349	0,348	0,101	0,02	0,079	3,543	30,63
Desni motor uzvodno									
1000	1019	0,495	0,703	0,162	0,131	0,022	0,979	2,492	35,32
1200	1213	0,762	0,581	0,209	0,122	0,034	0,412	2,12	33,92
1400	1424	1,343	0,35	0,228	0,148	0,005	0,193	2,267	32,4
1600	1595	1,705	0,371	0,317	0,103	0,034	0,089	2,619	31,17
maks.	1687	2,668	0,359	0,352	0,104	0,023	0,075	3,581	30,51
Levi motor nizvodno									
1000	1019	0,385	1,001	0,303	0,066	0,064	0,919	2,738	35,32
1200	1213	0,299	0,458	0,269	0,036	0,097	0,463	1,622	33,92
1400	1424	0,381	0,295	0,245	0,031	0,039	0,228	1,219	32,4
1600	1599	0,622	0,257	0,285	0,019	0,043	0,093	1,319	31,14
maks.	1740	0,947	0,255	0,34	0,034	0,016	0,026	1,618	30,12
Levi motor uzvodno									
1000	1019	0,398	1,099	0,335	0,083	0,083	1,485	3,483	35,32
1200	1213	0,307	0,363	0,263	0,042	0,054	0,457	1,486	33,92
1400	1441	0,358	0,334	0,239	0,044	0,043	0,249	1,267	32,28
1600	1599	0,609	0,295	0,346	0,031	0,046	0,083	1,41	31,14
maks.	1687	0,792	0,282	0,385	0,021	0,032	0,059	1,571	30,51

o/min), a iznosi oko 3% od maksimalno dozvoljenog dodatnog naprezanja. Da bi se ocenio sumarni uticaj pojedinih harmonika na nivo dodatnih naprezanja, sabrane su amplitude posmatranih harmonika (tabela 2). Na taj način dobijene su rezultujuće amplitude, čije su vrednosti upoređivane sa vrednostima izračunatim prema obrascu (4). Prema tome, izmerena dodatna naprezanja desnog propelerskog vratila kreću se u granicama od 6 do 12% od dozvoljenih, pri čemu najpre opadaju sa porastom broja obrtaja, a zatim rastu i dostižu maksimalnu vrednost na maksimalnom broju obrtaja. Kod levog propelerskog vratila naprezanja su niža i kreću se u granicama od 4 do 10% od dozvoljenih, imaju sličan karakter promene sa brojem obrtaja, ali se maksimalna naprezanja javljaju na najnižem broju obrtaja.

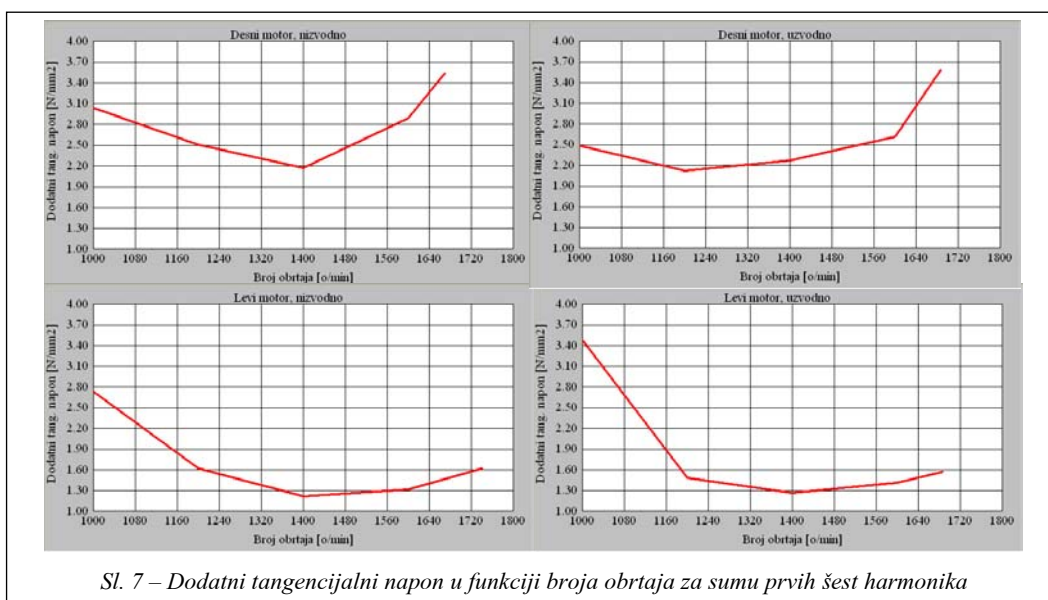
Na osnovu vrednosti iz tabele 2 mogu se nacrtati amplitude sume prvih šest harmonika u funkciji broja obrtaja (slika 7).

Može se uočiti da funkcije dodatnog tangencijalnog napona imaju minimalne vrednosti u području brojeva obrtaja u kojem posmatrani brodski motor najviše radi (od 1000 do 1600 o/min). To znači da je sistem dobro proračunat na torzione oscilacije, tj. kritični brojevi obrtaja nalaze se levo i desno od radnog područja brojeva obrtaja.

Zaključak

Na osnovu izloženog postupka i rezultata merenja naprezanja elemenata sistema prenosa snage, usled prisustva torzionih oscilacija u sistemu propulzije broskog dizel motora, može se konstatovati sledeće:

- merenjem torzionog momenta na propelerskim vratilima, pri kontinualnoj promeni broja obrtaja i pri zadatim brojevima obrtaja motora, uočena su dva kritična broja obrtaja u merenom području;
- ukupna naprezanja propelerskih vratila na uvijanje su u granicama dozvo-



ljenih, uključujući i kritičan broj obrtaja ($n = 1636$ o/min);

– zbog nestabilnog rada motora nisu proverena naprezanja za kritičan broj obrtaja $n = 775$ o/min;

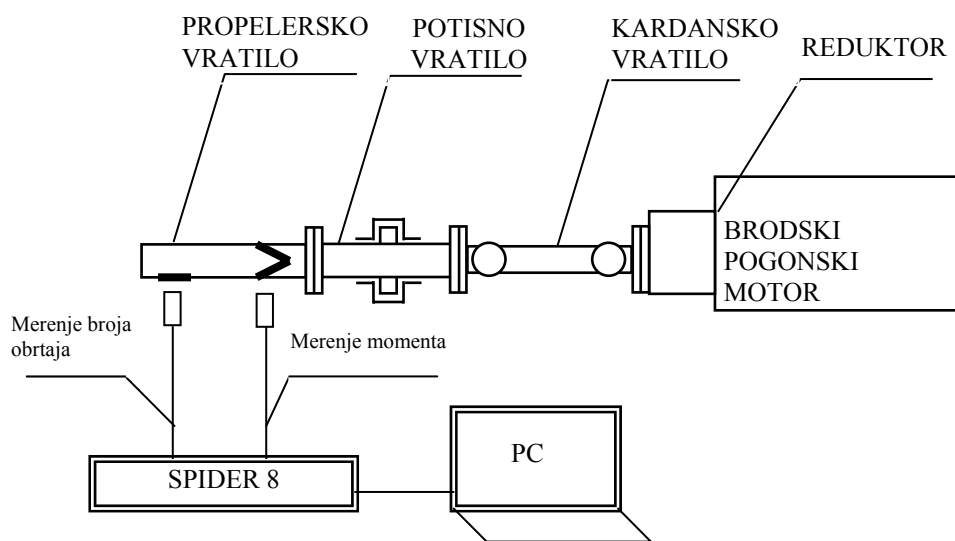
– dodatna naprezanja propelerskih vratila na mernim mestima, usled promenljivosti tangencijalne sile i prisustva torzionih oscilacija, ne predstavljaju nikakvu opasnost za sistem prenosa snage za pogon propelera na brodu RML-341;

– primenjenim načinom merenja dobija se informacija o napreznjima, ali samo na mestu gde su zalepljene merne trake. Zbog toga je potrebno izvršiti merenja, ukoliko je to moguće, i na drugim mestima gde se na osnovu rezultata proračuna sistema mogu očekivati veća naprezanja;

– postupak provere naprezanja elemenata sistema prenosa snage, usled prisustva torzionih oscilacija u sistemu propulzije brodskog dizel motora, moguće je primeniti i na druge torziona oscilatorne sisteme. Moguća ograničenja javljaju se u slučaju nepristupačnosti, prisustva maziva ili vode, kao i zbog visoke temperature na mernom mestu.

Literatura:

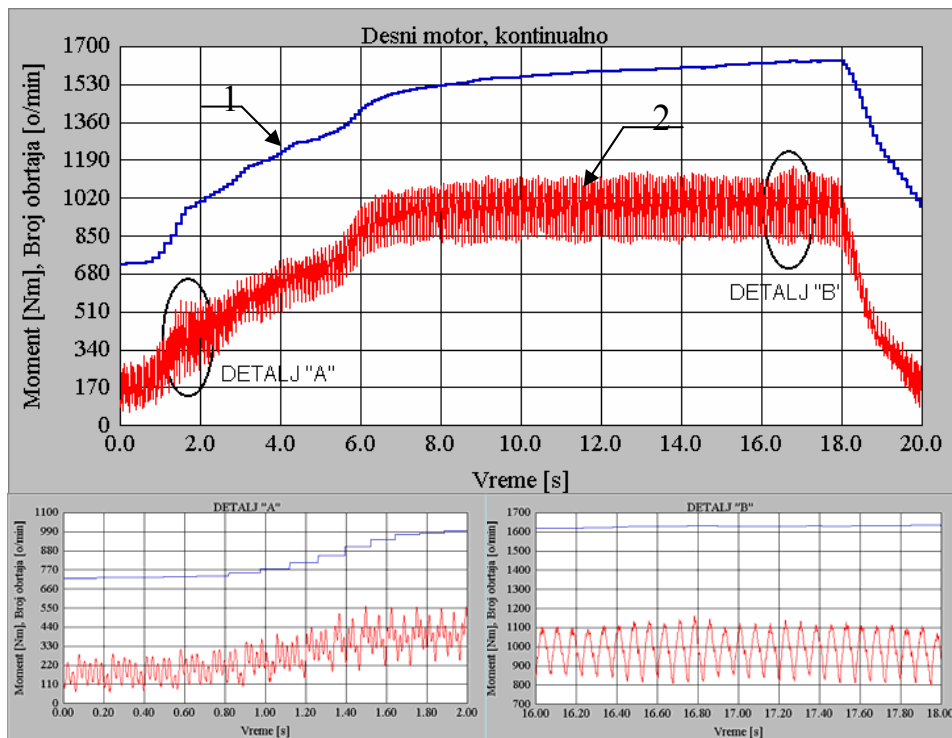
- [1] Jankov, R.: Simulacija i eksperimentalno ispitivanje torzionih oscilacija, Mašinski fakultet, Beograd, 2002.
- [2] Hoffmann, K.: An introduction to measurements using strain gages, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1989.
- [3] Rašković, D.: Otpornost materijala, Građevinska knjiga, Beograd, 1990.
- [4] Trifković, D.: Istraživanje torzionih oscilacija u sistemu prenosa snage sa brodskog dizel motora na propeler, magistrski rad, Mašinski fakultet, Beograd, 2004.



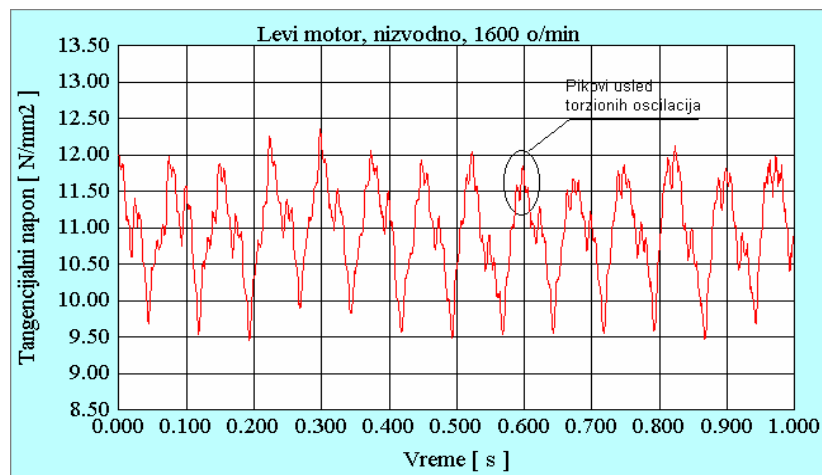
Sl. 1 – Šema mernog lanca za merenje momenta i broja obrtaja



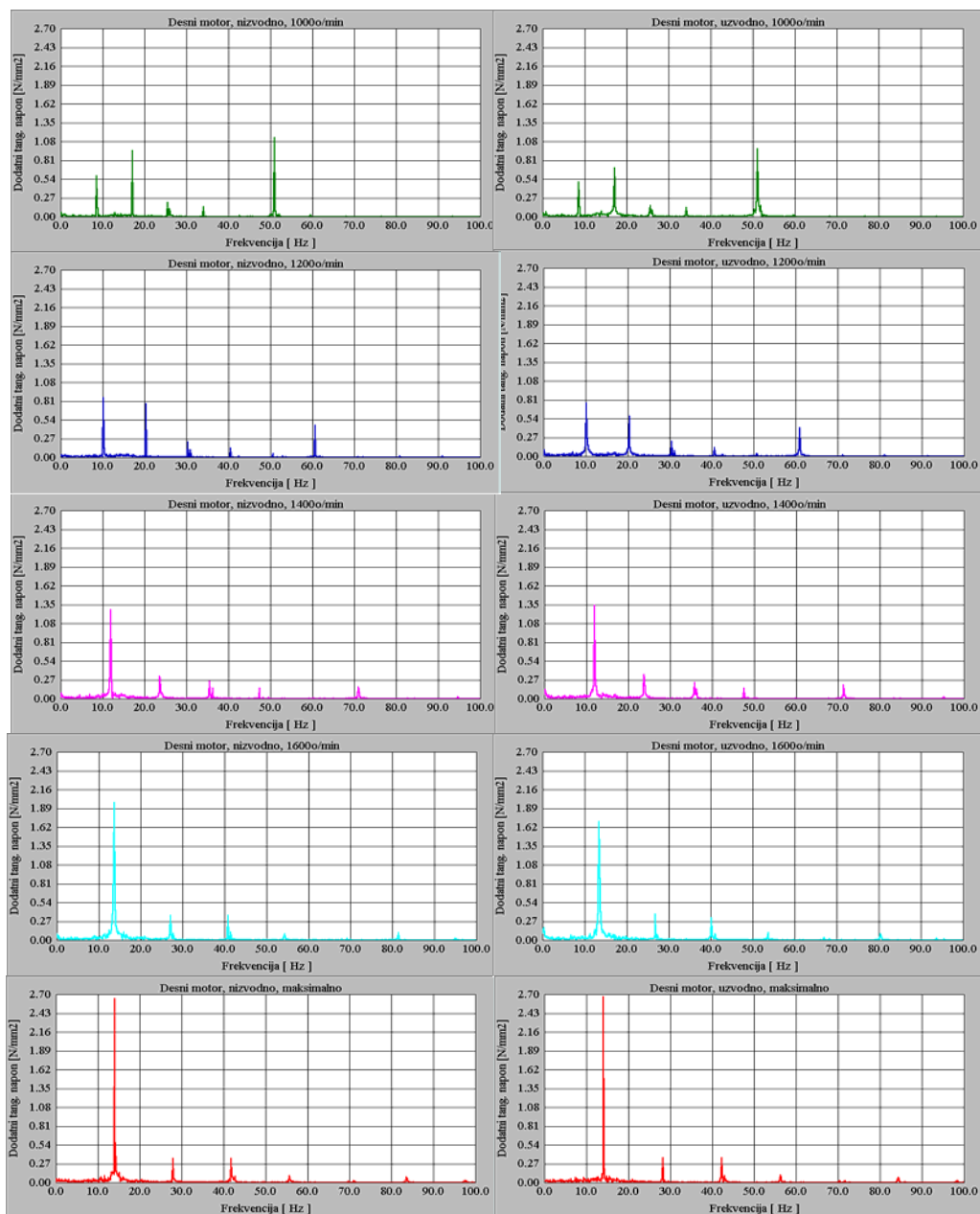
Sl. 2 – Napajanje mernog mosta i beskontaktni prenos signala



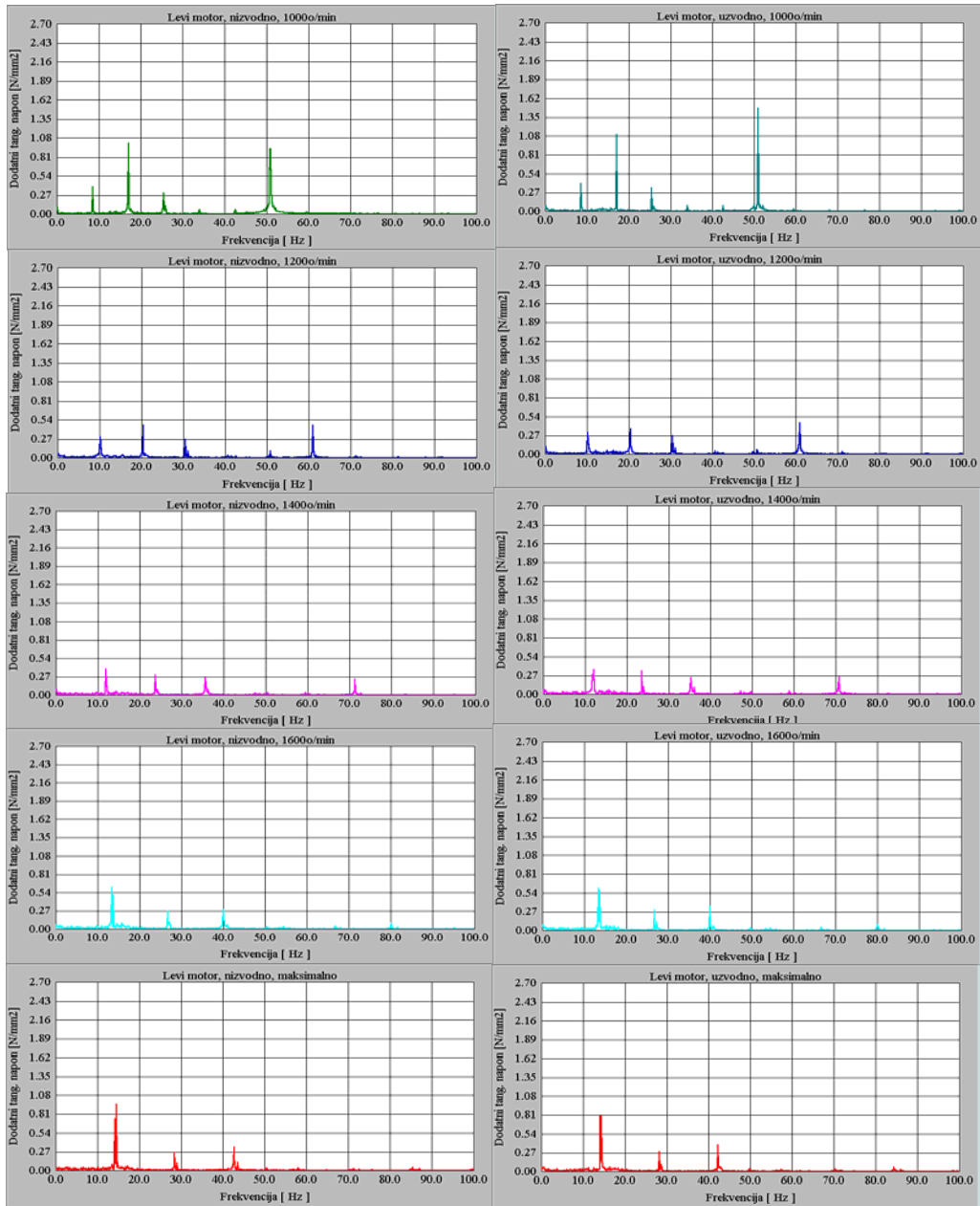
Sl. 3 – Tok promene torzionog momenta na desnom propelerskom vratilu i broja obrtaja desnog motora na brodu RML-341:
1 – broj obrtaja; 2 – torzioni moment



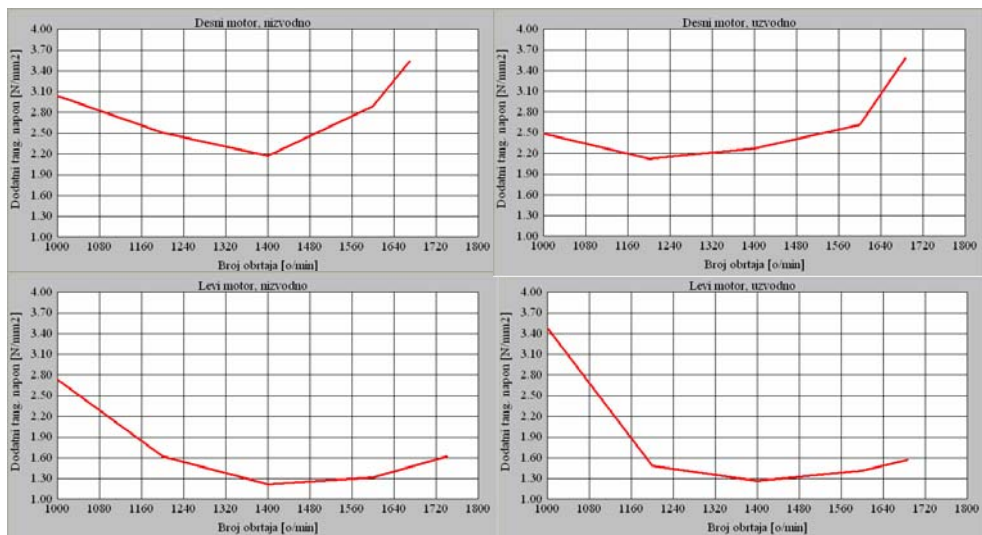
Sl. 4 – Tok promene tangencijalnog napona na levom propellerskom vratilu pri zadanom broju obrtaja levog motora



Sl. 5 – Amplitudni spektri za pojedine brojeve obrtaja desnog motora



Sl. 6 – Amplitudni spektri za pojedine brojeve obrtaja levog motora



Sl. 7 – Dodatni tangencijalni napon u funkciji broja obrtaja za sumu prvih šest harmonika

Tabela 1
Uporedne maksimalne vrednosti izmerenog i dozvoljenog tangencijalnog napona na propelerskim vratilima

Zadat broj obrtaja motora (o/min)	Tangencijalni napon na propelerskim vratilima (N/mm ²)				Dozvoljena maksimalna vrednost
	Izmerene maksimalne vrednosti				
	Levo propelersko vratilo		Desno propelersko vratilo		
	Uzvodno	Nizvodno	Uzvodno	Nizvodno	
1000	6,18	6,48	7,43	7,37	140
1200	7,02	7,31	9,53	9,44	
1400	9,33	9,71	12,48	12,11	
1600	12,10	12,57	15,93	16,52	
maks.	14,07	13,96	17,29	17,28	

Tabela 2

Uporedne vrednosti izmerenog i izračunatog maksimalno dozvoljenog dodatnog tangencijalnog napona

Desni motor, nizvodno									
Zadat br. obrtaja motora (o/min)	Izmeren srednji br. obrtaja motora (o/min)	Izmerena amplituda harmonika (N/mm ²)							Izračunata maks. doz. vrednost dodatnog tang. napona (N/mm ²)
		I har.	II har.	III har.	IV har.	V har.	VI har.	Σ	
1000	1019	0,584	0,953	0,206	0,146	0,015	1,134	3,038	35,32
1200	1213	0,858	0,768	0,222	0,136	0,055	0,464	2,503	33,92
1400	1424	1,279	0,322	0,251	0,148	0,009	0,165	2,174	32,4
1600	1634	1,974	0,353	0,351	0,087	0,018	0,111	2,89	30,89
maks.	1670	2,646	0,349	0,348	0,101	0,02	0,079	3,543	30,63
Desni motor uzvodno									
1000	1019	0,495	0,703	0,162	0,131	0,022	0,979	2,492	35,32
1200	1213	0,762	0,581	0,209	0,122	0,034	0,412	2,12	33,92
1400	1424	1,343	0,35	0,228	0,148	0,005	0,193	2,267	32,4
1600	1595	1,705	0,371	0,317	0,103	0,034	0,089	2,619	31,17
maks.	1687	2,668	0,359	0,352	0,104	0,023	0,075	3,581	30,51
Levi motor nizvodno									
1000	1019	0,385	1,001	0,303	0,066	0,064	0,919	2,738	35,32
1200	1213	0,299	0,458	0,269	0,036	0,097	0,463	1,622	33,92
1400	1424	0,381	0,295	0,245	0,031	0,039	0,228	1,219	32,4
1600	1599	0,622	0,257	0,285	0,019	0,043	0,093	1,319	31,14
maks.	1740	0,947	0,255	0,34	0,034	0,016	0,026	1,618	30,12
Levi motor uzvodno									
1000	1019	0,398	1,099	0,335	0,083	0,083	1,485	3,483	35,32
1200	1213	0,307	0,363	0,263	0,042	0,054	0,457	1,486	33,92
1400	1441	0,358	0,334	0,239	0,044	0,043	0,249	1,267	32,28
1600	1599	0,609	0,295	0,346	0,031	0,046	0,083	1,41	31,14
maks.	1687	0,792	0,282	0,385	0,021	0,032	0,059	1,571	30,51