



Jani Barlé*

Željko Domazet**

Predrag Đukić***

ISSN 0469 - 6255

(185 - 190)

EKSPERIMENTALNA PROCJENA KONSTRUKCIJE BRODSKIH MOTORA

EXPERIMENTAL ASSESMENT OF THE SHIP ENGINE STRUCTURES

UDK 69.057.5:621.436

Prethodno priopćenje

Preliminary communication

Sažetak

Mjerenja pomoću elektrootporničkih traka primijenjena su kod analize ključnih dijelova novih brodskih motora. Prikazana su dva karakteristična primjera i to: analize naprezanja i uzroka oštećenja na bočnim uporama glavnog motora te analize naprezanja i procjene vijeka trajanja temeljne ploče glavnog motora brodova za rasuti teret.

Summary

The strain gage measurements are successfully applied to analyze the critical structural details of new ship engines. Two typical examples are shown: analysis of stresses and causes of damages on the lateral supports of the main engine, and analysis of stresses and service life estimation of the bulk carrier main engine.

1. Uvod

Introduction

Posljednjih godina Brodograđevna industrija Split u suradnji s Fakultetom elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu provela je niz ispitivanja konstrukcije glavnih motora. U ovome članku prikazana su dva karakteristična primjera. Prvi je primjer analiza zamornih oštećenja bočnih upora

glavnog motora gdje su mjerenja provedena za vrijeme probne vožnje. Drugim primjerom, gdje su mjerenja provedena na ispitnom stolu, prikazana su ispitivanja maksimalnih naprezanja na kritičnim mjestima za temeljne ploče motora.

2.1. Prvi primjer: Procjena vijeka trajanja bočnih upora glavnog motora *The first example: Fatigue life assesment of lateral supports*

Lomovi izazvani zamorom bočnih upora glavnog motora pojavili su se na nizu novih brodova za rasute terete (38100 DWT, $L_{BP} \times B \times D=179.00 \times 30.80 \times 15.45$ m, snage 7150 kW). Posljedica toga bila je velika materijalna šteta. Kvarovi su se dogodili na više brodova i to nakon kratkog vremena uporabe. Provedena je detaljna analiza sljedećih parametara koji su mogli dovesti do preranog zamora:

- opterećenje svih upora pojedinačno,
- izvedba zavarenih spojeva,
- konstrukcijski oblik zavarenog spoja.

2.2. Opis oštećenja *Failure description*

Prema izvješćima s plovidbe, upore sa slike 1 su pukle ili su na njima pronađene pukotine na mjestima označenim na slici 2. Pri tome, nije bilo poznato mjesto inicijalizacije i smjer širenja pukotine. Pukotina je mogla započeti na sredini upore i širiti se prema krajevima ili obrnuto. Nakon pucanja jedne od upora, vjerojatno je došlo do preraspodjele opterećenja, i to kod svakog oštećenja na drukčiji način.

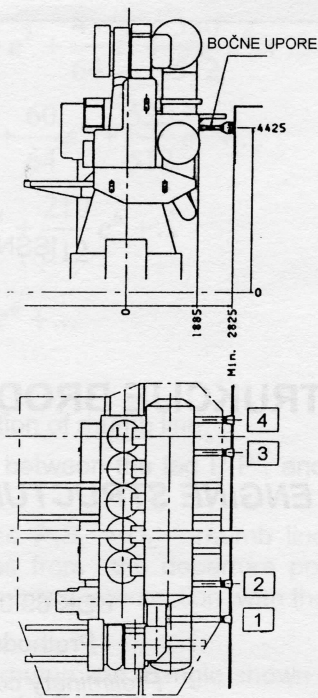
*Dr.sc. Jani Barlé

**Prof. dr. Željko Domazet

Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu, R. Boškovića b.b.; HR-21000 Split

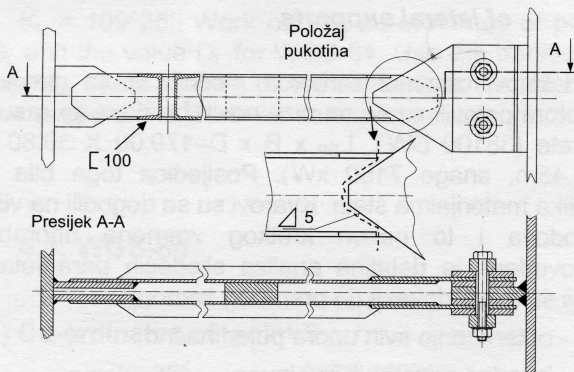
***Mr.sc. Predrag Đukić

Veleučilište u Splitu, Livanjska 5; 21000 HR-Split



Slika 1. Skica glavnog motora
Figure 1. Main engine setup

Posljedica pucanja bočnih upora je zaustavljanje rada glavnog motora. Nakon toga posada bi na upore, preko pukotine, navarila ojačanja i koristila motor sve dok se stare upore ne bi zamijenile novima. Nakon nekoliko sličnih lomova zaključeno je da je nužno provesti detaljnu analizu uzroka oštećenja. Zbog brojnih izvora opterećenja i složene konstrukcije provedena je detaljna eksperimentalna analiza.

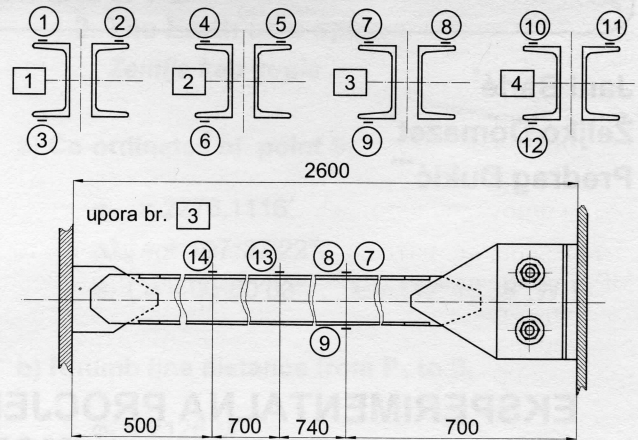


Slika 2. Pukotine na bočnim uporama
Figure 2. Lateral engine supports with failures observed

2.3. Analiza naprezanja

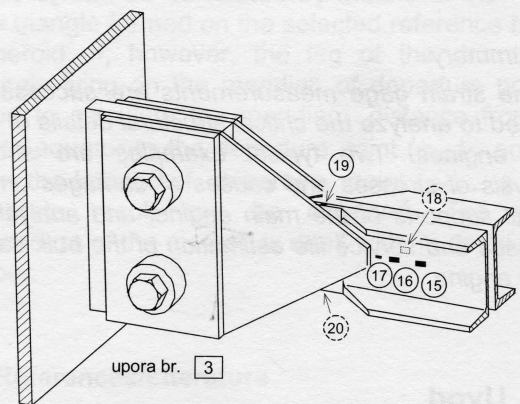
Stress analysis

Kako je problem dinamičkog karaktera, za eksperimentalnu su analizu korištene elektro-otporničke mjerne trake (tenzometri). Zbog određivanja nazivnog opterećenja (uzdužne sile i momenti savijanja), tenzometri su postavljeni na sve četiri upore, slika 3.



Slika 3. Tenzometri korišteni za određivanje nazivnih opterećenja
Figure 3. Setup of the measurements for nominal loads

Mjerenja lokalnih naprezanja su provedena na mjestima maksimalnih naprezanja, tj. na mjestima gdje je vjerojatna inicijacija pukotine. Kako je nakon prvih mjerenja zaključeno da je moment savijanja zanemariv, posebna je pažnja posvećena sredini zavarenog spoja gdje su postavljena tri tenzometra, na slici 4 označena sa 15-17. Kod svih je upora nakon zavarivanja postojala razlika u geometriji zavarenog spoja, pa je na suprotnoj strani upore br. 3 postavljen tenzometar 18. Zbog dodatne provjere na istim mjestima na uporama br. 1 2 i 4 postavljeni su tenzometri.



Slika 4. Tenzometri korišteni za određivanje lokalnih naprezanja
Figure 4. Setup of the measurements for local stress determination

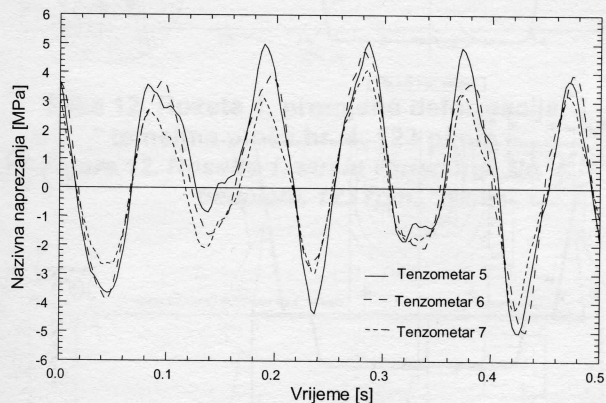
2.4. Rezultari eskperimenta

Experiment results

Iako je uočena značajna razlika među uzdužnim silama koje se pojavljuju u različitim uporama (i do 50%), iz vršnih vrijednosti nazivnih naprezanja izračunata je maksimalna uzdužna sila od $F=20\text{kN}$, što odgovara proračunskim vrijednostima

proizvođača. Zbog približno jednakih vrijednosti izmjerenih deformacija po dužini pojedine upore i jednakog predznaka za tenzometre na gornjoj i donjoj strani, slika 5, potvrđeno je da su momenti savijanja zanemarivi. Iz toga slijedi zaključak da su opterećenja koja se pojavljuju u potpunosti jednaka onima predviđenim projektom.

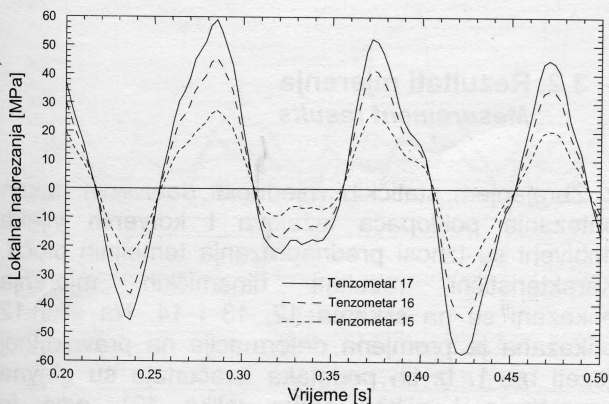
Maksimalna nazivna naprezanja od $\sigma=10\pm 15$ MPa zbog malog iznosa nisu mogla uzrokovati zamorne pukotine, bez obzira što je postojala neravnomjerna raspodjela opterećenja među različitim uporama.



Slika 5. Karakteristični vremenski tijek nazivnih naprezanja

Figure 5. Nominal stresses in time domain (Sample of recorded data)

Za provjeru kvalitete geometrije zavarenog spoja pristupilo se određivanju lokalnih naprezanja. Lokalna naprezanja nije moguće odrediti izravnim mjerenjem, pa su tenzometri 15+17 (slika 4), postavljeni na pravcu u neposrednoj blizini zavora. Na slici 6 prikazani su karakteristični rezultati izmjerenih vrijednosti za tenzometre korištene za određivanje lokalnih naprezanja. Iznos naprezanja na rubu zavora dobiven je ekstrapolacijom maksimalnih vrijednosti (slika 7). Amplituda maksimalnih vrijednosti naprezanja ovisila je o režimu rada.



Slika 6. Karakteristični vremenski tijek lokalnih naprezanja

Figure 6. Local stresses in time domain (Sample of recorded data)

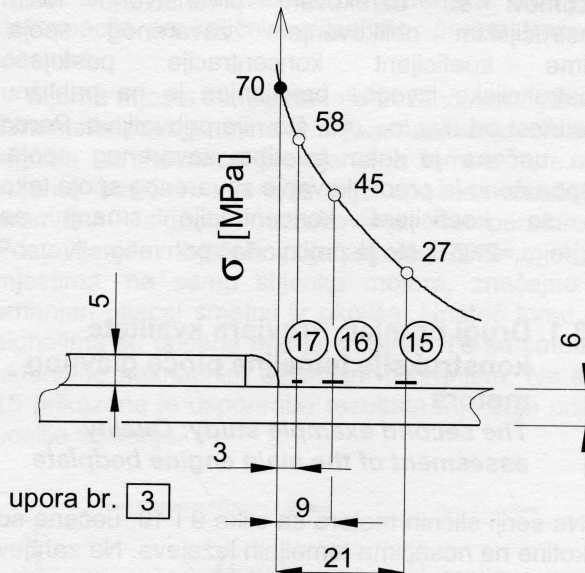


Figure 7. Određivanje maksimalnih lokalnih naprezanja

Figure 7. Determination of maximal local stresses

Analizom rezultata utvrđene su maksimalna naprezanja u stopi zavora od 70 MPa. Pored toga pretpostavlja se da bi se na drugim uporama mogla pojaviti naprezanja i većeg intenziteta.

2.5. Komentar rezultata

Discussion on the results

Prema odgovarajućim Wöhlerovim dijagramima [1] i izmjerenim maksimalnim napreanjima, za očekivati je vijek trajanja od približno $5 \cdot 10^6$ ciklusa, što preračunato daje nekoliko tjedana uporabe. To je premali životni vijek u odnosu na očekivanih 20 godina rada. Pored toga procijenjeni životni vijek je približno jednak vremenu nakon kojega su pucale upore na prethodnim brodovima iz iste serije.

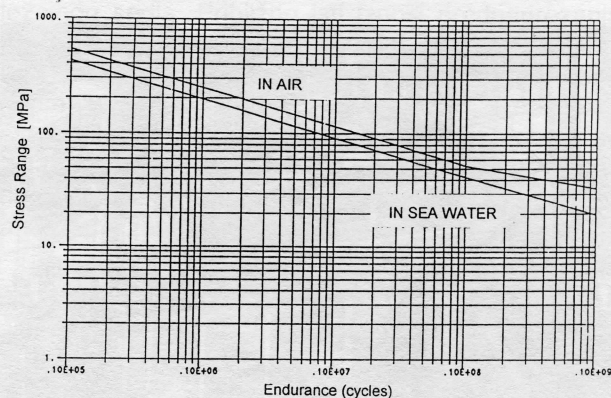


Figure 8. Wöhlerove krivulje za preklopni zavareni spoj [1].

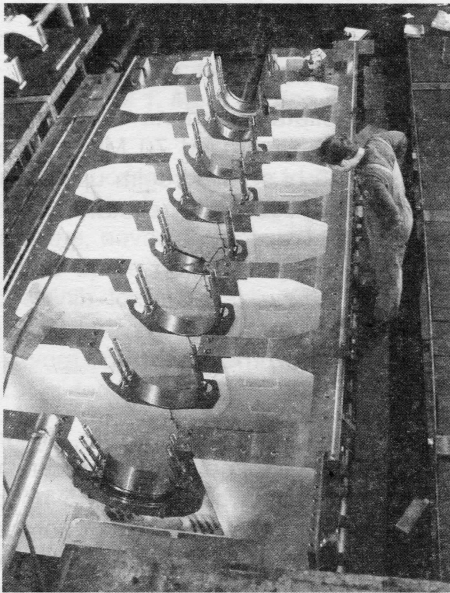
Figure 8. S-N Curves for over lap weldments [1].

Lomovi su uzrokovani prvenstveno lošim konstrukcijskim oblikovanjem zavarenog spoja. Naime koeficijent koncentracije postojeće konstrukcijske izvedbe procijenjen je na približnu vrijednost od $\sigma_{\max}/\sigma_{\text{nom}}=5$, što nije prihvatljivo. Pored toga uočena je loša izvedba zavarenog spoja. Preporučeno je preoblikovanje zavarenog spoja tako da se koeficijent koncentracije smanji na $\sigma_{\max}/\sigma_{\text{nom}}=2\div 2.5$, što je proizvođač prihvatio.

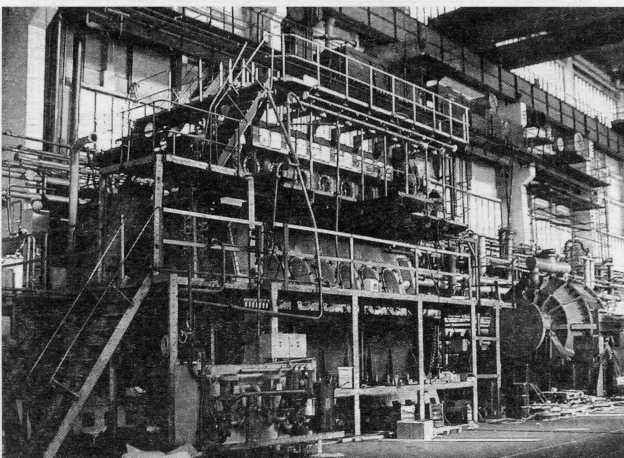
3.1. Drugi primjer: Provjera kvalitete konstrukcije temeljne ploče glavnog motora

The second example study: Quality assesment of the main engine bedplate

Na seriji sličnih motora sa slike 9 i 10, uočene su pukotine na nosačima temeljnih ležajeva. Na zahtjev vlasnika broda provedena su mjerenja naprezanja na svim kritičnim mjestima.

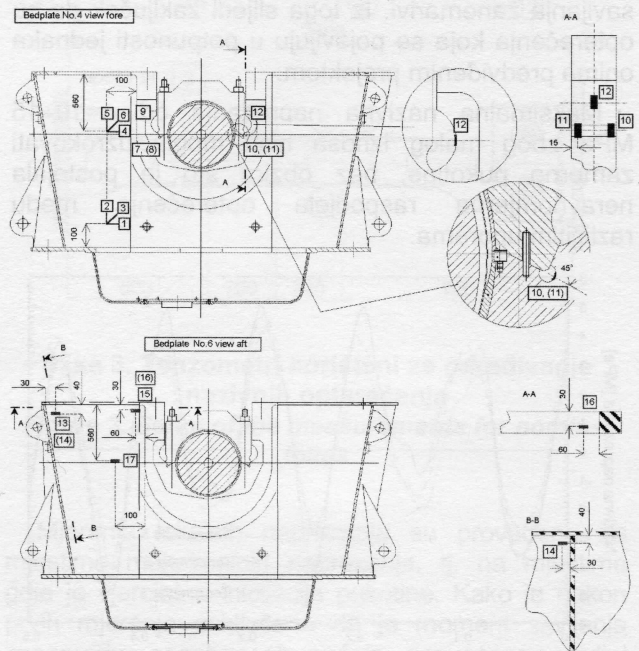


Slika 9. Glavni motor (9400 kW)
Figure 9. Main engine (9400 kW)



Slika 10. Temeljni ležajevi
Figure 10. Bearing housing

U skladu s rezultatima numeričkih analiza naprezanja i zahtjevima vlasnika, mjerenja su provedena na mjestima označenim prema slici 11.



Slika 11. Temeljne ploče 4 i 6, s označeni mjernim mjestima
Figure 11. Bedplates No. 4 and 6, with strain gage application

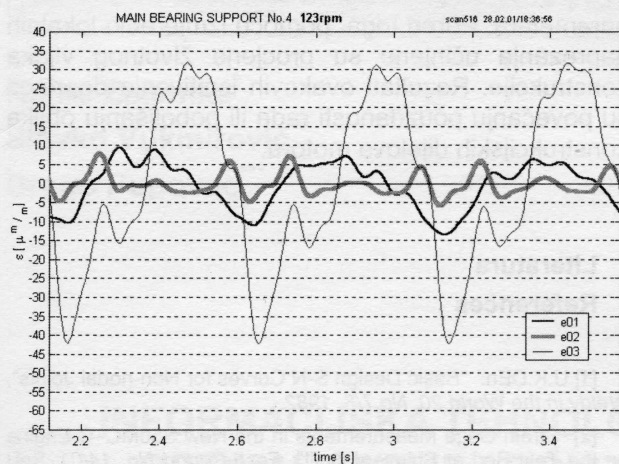
Mjerenja su provedena u tri faze na ispitnom stolu u brodogradilištu:

1. za vrijeme pritezanja poklopaca ležajeva,
2. za vrijeme pritezanja kotvenih vijaka,
3. za vrijeme ispitivanja motora.

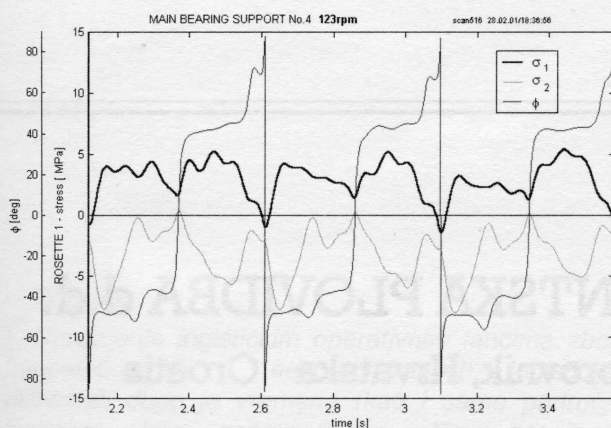
Prva su dva mjerenja trebala dati statička naprezanja u temeljnoj ploči, koja bi superponirana na dinamička naprezanja, izmjerena u trećoj fazi, dala ukupno opterećenje koje utječe na zamor materijala.

3.2. Rezultati mjerenja *Mesurement results*

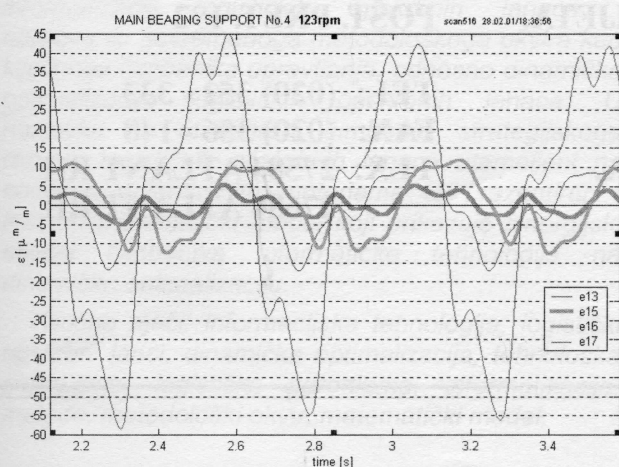
Zbrajanjem statičkih vrijednosti dobivenih nakon pritezanja poklopaca ležajeva i kotvenih vijaka dobiveni su iznosi prednaprezanja temeljnih ploča. Karakteristični rezultati dinamičkih mjerenja prikazani su na slikama 12, 13 i 14. Na slici 12 prikazana je promjena deformacija na pravokutnoj rozeti br. 1. Iz tih podataka izračunata su glavna naprezanja i njihov smjer (slika 13), gdje je naznačeni kut obrnut od smjera kazaljke na satu počevši od smjera tenzometra 1 (horizontale).



Slika 12. Rozeta 1, promjena deformacija, temeljna ploča br. 4, 123 o/min
Figure 12. Rosette 1, strain variations, No. 4 bedplate, 123 rpm



Slika 13. Rozeta 1, promjena glavnih napreznja, temeljna ploča br. 4, 123 o/min.
Figure 13. Rosette 1, principal stress variations, bedplate No. 4, 123 rpm.



Slika 14. Tenzometri 13, 15, 16 i 17, promjena deformacija, temeljna ploča br. 6, 123 o/min
Figure 14. Gages 13, 15, 16 and 17, strain variations, bedplate No. 6, 123 rpm

Na slici 14 prikazana je vremenska promjena deformacija na kritičnim mjestima, prema traženju vlasnika.

Mjerna mjesta su izvedena u trožilnoj konfiguraciji Wheatstoneovog mosta u cilju smanjivanja klizanja signala uzrokovanog promjenama temperature. Za vrijeme statičkih mjerenja nije opažena značajna promjena signala uzrokovana temperaturom. Postavljanjem mjernih pojačala što bliže mjernim mjestima, na samu stijenku motora, značajno je smanjen utjecaj smetnji iz okoliša. Unatoč tome na signalima su uočene manje smetnje. Te su smetnje uklonjene naknadnim digitalnim filtriranjem. Na slici 15 prikazana je usporedba rezultata mjerenja prije i poslije filtriranja.

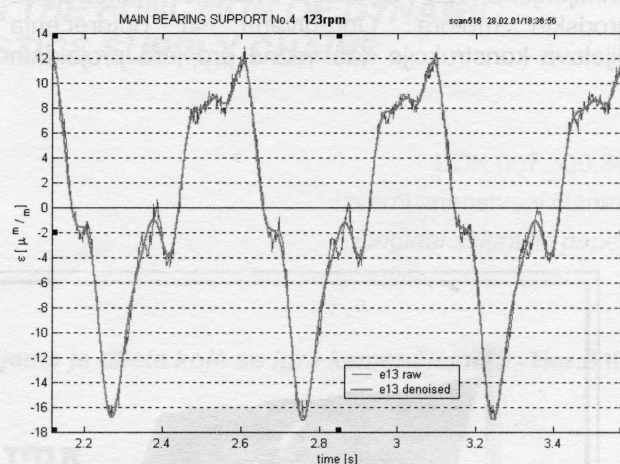


Figure 15. Filtriranje šuma
Figure 15. Noise filtering

3.3. Komentar rezultata

Discussion on the results

Izmjerena prednapreznja temeljne ploče (statičke vrijednosti) izazvana pritezanjem poklopaca temeljnih ležajeva bila su maksimalne vrijednosti do 66 MPa. Mjesta maksimalnih napreznja su utori ležajnog sedla. Približno isti iznosi prednapreznja od maksimalno 61 MPa izmjerena su kod priteznja kotvenih vijaka. U ovom slučaju izmjerena napreznja su bila obrnutog predznaka. Oduzimanjem tih statičkih vrijednosti dobije se ukupno prednapreznje koje neće značajno utjecati na dinamičku čvrstoću, te je ono u daljnjim analizama zanemareno.

Dinamičkim su mjerenjima izmjerena maksimalna napreznja raspona 26 MPa, ili drugim riječima amplitude ± 13 MPa.

Napreznja izmjerena na rozetama 1 i 2 zbog svog malog iznosa mogu se zanemariti. Pored toga, iznosi napreznja izmjerenih na tim mjestima podudaraju se s rezultatima numeričke analize što ju je proveo proizvođač. Mali iznos izmjerenih napreznja tumači se time što su mjerna mjesta na ravnome dijelu ploče gdje u blizini nema zavara niti

drugih koncentrata. Izmjerene vrijednosti na mjestima 13-17 (slika 14) su povišene ali još uvijek ispod dopuštene trajne dinamičke čvrstoće materijala. Time je dokazano da naprezanja na kritičnim mjestima pri normalnoj uporabi neće prouzročiti pucanje materijala za radnog vijeka trajanja broda.

4. Zaključak Conclusion

Određivanje naprezanja pomoću elektrootporničkih mjernih traka uspješno je primijenjeno za analizu kvalitete konstrukcije brodskih motora. Određivana su opterećenja dijelova konstrukcije kao važna provjera projektnih

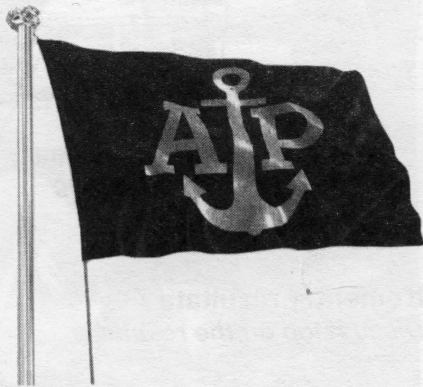
parametara. Pored toga, pomoću izmjerenih lokalnih naprezanja učinjene su procjene životnog vijeka konstrukcije. Rezultati ovakvih ispitivanja doprinose povećanju pouzdanosti rada ili poboljšanju oblika konstrukcijskih dijelova motora.

Literatura References

[1] U.K.DEn: "Basic Design S-N Curves for Non-nodal Joints", *Weldy in the World* 20, No.7/8, 1982.

[2] "Strain Gage Measurements in the New S50MC-C Engine on the Test Bed at Shipyard Split"; *Fesb-Report No. 14/01*, Split 2001.

Rukopis primljen: 23.4.2001.



ATLANT'SKA PLOVIDBA d.d.

Dubrovnik, Hrvatska - Croatia

**PREVOZI ROBU U SLOBODNOJ
PLOVIDBI PO SVIM MORIMA SVIJETA.**

**OBAVLJA PRIJEVOZ TEŠKIH I
IZVANGABARITNIH TERETA
SPECIJALIZIRANIM BRODOVIMA.**

**PREVOZI ROBU U MALOJ
OBALNOJ PLOVIDBI.**

**OD SV. MIHAJLA 1
POŠT. PRET. 192**

**TEL: (020) 352 - 333
FAX: (020) 356 - 148
TLX: 27584 ATLANT RH
27684 ATLANT RH**