

KRITERIJI SIGURNOSTI PRIJEVOZA TEŠKIH TERETA NA VALOVITOM MORU

Safety Criteria of Heavy Cargo Transportation at Rough Sea

UDK 656.073.2
Original scientific paper
Izvorni znanstveni članak

Sažetak

U ovom radu postavljeni su novi kriteriji procjene rizika prijevoza teških tereta na valovitom moru. U svim postavljenim matematičkim modelima osnovna je pretpostavka da je teret moguće smatrati krutim tijelom koje je sustavom elastičnih pripona i veza pričvršćeno za palubu broda. Tereti manje i srednje zapremnine obično su tereti vrlo velike gustoće i krutosti tako da se za njih sa sigurnošću mogu postati modeli njihanja krutih tijela, koji omogućavaju racionalnu procjenu sila u priponama. Njihanja broda određuju se pomoću autorovog programa MARHYDRO koji se zasniva na linearnoj teoriji odsječaka. Njihanje teških tereta prouzročit će velike sile i momente koji se lokalno prenose na konstrukciju palube preko oslonaca i pripona postavljenih na raznim mjestima pričvršćivanja.

Summary

The thesis deals with new criteria of risk estimation in transportation of cargoes on board heavy lift ships in a seaway. It reviews several practical methods of cargo lashing and securing on board ships. It also reviews types and possibilities of various modern heavy lift ships. In all mathematical models, that have been developed, it was which is secured on board ship by means of elastic lashing system. Cargoes of smaller volume are usually very dense and stiff and solid body dynamics prove to be a reliable method that allows a rational estimation of forces in a lashing system. Motions of the ship are calculated by MARHYDRO strip theory program developed by author. Motions of very heavy cargoes could produce significant forces and moments that will be transmitted back to the deck structure at various places of cargo supports and lashings.

1. Uvod

Introduction

Suvremeni tržišni odnosi u pomorskom prijevozu izmijenili su pristup u prijevozu tereta morem. To se posebno odnosi na brodove za teške terete za koje često i krcatelj zahtijeva izvedbu određenih proračuna kako bi se što pouzdanije procijenili i umanjili rizici plovidbe. S obzirom da je teško postići toliku multidisciplinarnost u pomorskoj struci, sve je veća interdisciplinarna povezanost brodograđevne i pomorske struke.

U skladu s tim, u ovom je radu postavljeno i obrađeno nekoliko kriterija procjene sigurnosti u pomorskom prijevozu teških tereta. Kriteriji su obrađeni po važnosti, ujedno i kronološki, i to od najkonzervativnijih i najstarijih do znatno točnijih i suvremenijih. Također, kao jedan od najsuremenijih u radu je obrađen kriterij pouzdanosti prijevoza predstavljen u magistarskom radu prvog od autora [1].

Najvažniji aspekti u prijevozu teških tereta plovnim objektima su:

1. brzina prijevoza (plovidbe);
2. ponašanje plovnog objekta koji plovi s teškim teretima ukranim na palubi, pri njihanju na valovima;
3. pričvršćivanje tereta radi njegovog osiguranja pri njihanjima broda;
4. kvazistatička opterećenja nastala djelovanjem vjetra;
5. udarna opterećenja nastala djelovanjem valova na teret koji često visi preko ruba palube.

Služeći se teorijom pomorstvenosti, moguće je dovoljno kvalitativno procijeniti prva tri aspekta. Četvrti aspekt određuje se približno prema pojednostavljenim i empirijski utvrđenim metodama. Udarna, valna opterećenja tereta predstavljaju posebnu kategoriju proučavanja. Naime, na jednostavan način moguće je

*Mr. sc. Damir Radan, Veleučilište u Dubrovniku
**Mr. sc. Ivan Prce, Veleučilište u Dubrovniku

statistički odrediti učestalost pojavljivanja zalijevanja palube (eng. *shipping green water*), npr. u jednom satu plovidbe po uzburkanom moru. Proračun naprezanja u konstrukciji tereta i sustavu njegovog pričvršćivanja, koja nastaju zbog udarnog opterećenja valova, predstavlja zaseban problem pa stoga neće biti detaljno obrađen u ovom radu. Kao što je spomenuto, u ovom radu analiziraju se prva tri aspekta.

1.1. Definiranje problema i postavljanje cilja *Defining the problem and the purpose*

Budući da je pri prijevozu teških tereta najvažnije odrediti opterećenja u sustavu elastičnih pripona (eng. *lashings*) kojima je teret pričvršćen za palubu, proizlazi da najveći problem predstavlja određivanje opterećenja ili uzbude kojoj je teret izložen za vrijeme plovidbe broda. Prema pojednostavljenim kriterijima načelno se smatra da uzbuda djeluje u težištu mase tereta što odgovara D'Alambertovom zakonu. Međutim, uzbuda djeluje na teret preko njegovih oslonaca i pripona. To znači da je opterećenja koja nastaju u priponama i osloncima moguće najtočnije odrediti promatranjem tereta kao krutog tijela (ili elastičnog tijela koje je diskretizirano na konačan broj krutih tijela) koje je povezano s tijelom broda sustavom elastičnih pripona i nešto krutih oslonaca [2], [3].

Prema tome, postavljanjem matematičkih modela njihanja krutih tijela tereta i broda dolazi se do pouzdanijih determinističkih metoda određivanja sila u pojedinim priponama. Također, određenim pojednostavljenjima u modelu može se doći i do kvalitetnih statističkih linearnih metoda kojima je moguće procijeniti pouzdanost pojedinih pripona u ovisnosti o trenutnom stanju mora. Zbog toga je najlakše zanemariti određene nelinearnosti u modelu. Takvim metodama, osim opterećenja u samim priponama moguće je znatno točnije odrediti i lokalna opterećenja palubne konstrukcije na koju je teret oslonjen u pojedinim točkama. Točnije determinističke metode svakako će se morati zasnivati na nelinearnim modelima njihanja tereta. Međutim, kod statističkih metoda problem predstavlja određivanje autokorelacijske funkcije iz valnog spektra energije. Zbog toga je, barem za sada, povoljnije razvijati linearne metode koje uzimaju u obzir korekciju nelinearnosti nego raditi u vremenskom području s nepouzdanim korelacijskim funkcijama [4].

Krajnji cilj je postavljanje dovoljno pouzdanih metoda procjene sigurnosti prijevoza teških tereta na valovitom moru. Pritom se najpovoljnije služiti dokazanim metodama i teorijama kao što je linearna teorija odsječaka. Računalni program MARHYDRO, koji je izradio prvi od navedenih autora, zasniva se na većem broju teorija odsječaka i pomoću njega je moguće odrediti ubrzanja u bilo kojoj točki na brodu kao i vjerojatnosti pojave određenih maksimalnih vrijednosti [5], [6]. Pritom je važno napomenuti da se koristeći linearne teorije mogu postići vrlo pouzdani rezultati, ali samo za umjerena stanja mora. Ako se uzme u obzir da se u izradi dugoročnog plana putovanja rizik plovidbe nastoji maksimalno umanjiti, te da u slučaju pojave nepredviđenih vremenskih prilika promjena planirane rute

ne bi trebala predstavljati problem, proizlazi da će brod zaista biti izložen umjerenim stanjima mora.

2. Određivanje inercijskih sila u težištu mase tereta

Determining the inertia forces in the cargo centre of gravity

Opterećenje u sustavu pripona najlakše je odrediti poznavajući inercijske sile u težištu mase tereta. Da bi se one odredile potrebno je odrediti apsolutna ubrzanja u težištu mase tereta za sva tri smjera translacijskih njihanja: vertikalno, poprečno i uzdužno. Apsolutna ubrzanja u određenim točkama na brodu moguće je dovoljno pouzdano odrediti samo koristeći neke od suvremenih ili konvencionalnih hidrodinamičkih teorija. Prema tome, potrebno je imati program za procjenu pomorstvenosti broda kao što je napr. MARHYDRO.

2.1. Najjednostavniji kriterij – prema pravilima IMO-a

The simplest criterion - according to the rule of the thumb

S obzirom da su mogućnosti računala u bliskoj prošlosti bile neusporedivo manje nego što su to danas, razvijeno je nekoliko jednostavnih metoda određivanja maksimalnih ubrzanja u težištu mase tereta. Najjednostavniji način određivanja ubrzanja u težištu mase tereta propisuje IMO u svojim pravilima [7]:

$$\begin{aligned}\ddot{x}_{1c} &= 0,3 \cdot g && - \text{uzdužno ubrzanje težišta mase tereta} \\ \ddot{x}_{2c} &= 0,7 \cdot g && - \text{poprečno ubrzanje težišta mase tereta} \\ \ddot{x}_{3c} &= 1,0 \cdot g && - \text{vertikalno ubrzanje težišta mase tereta}\end{aligned}$$

gdje je:

$$g \quad - \text{gravitacijsko ubrzanje koje iznosi } g = 9.81 \text{ m/s}^2.$$

2.2. Pretpostavljeni najnepovoljniji periodi njihanja i amplitude

The assumed most inconvenient motion periods and amplitudes

Sljedeći kriterij dobije se uzevši u obzir neke srednje vrijednosti najvećih amplituda ljuľanja broda (oko uzdužne osi kroz težište mase) [8]. Naime, poznato je da će mali periodi ljuľanja broda prouzročiti velika ubrzanja, dakle velika opterećenja pripona. Ovim kriterijem ne uzima se u obzir apsolutno translacijsko ubrzanje težišta mase broda, ali se uzimaju u obzir najnepovoljnija rotacijska ubrzanja, tj. ljuľanje i posrtanje. Poznavajući koordinate točke mogu se odrediti translacijska ubrzanja u težištu mase tereta T .

- ljuľanje: 20^0 amplituda ljuľanja broda, pri periodu od 10 sekundi

$$x_{40} = 20 \cdot \frac{\pi}{180} \approx 0,35 \quad - \text{maksimalna amplituda}$$

ljuľanja, rad

$$\omega_e = \frac{2 \cdot \pi}{T} = \frac{2 \cdot \pi}{10} \approx 0,628 \text{ - frekvencija njihanja broda,}$$

rad/s

- posrtanje: $12,5^\circ$ amplituda posrtanja broda, pri periodu od 10 sekundi

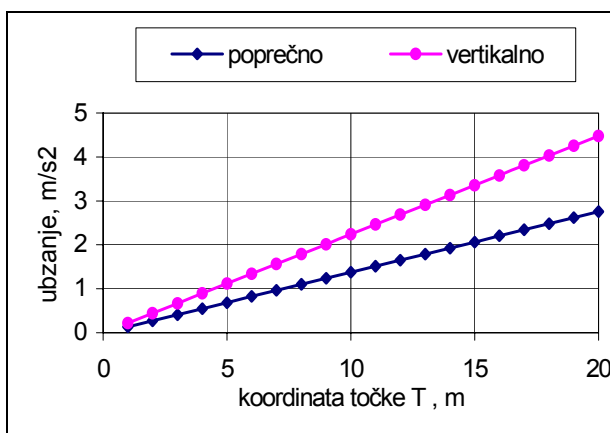
$$x_{50} = 12,5 \cdot \frac{\pi}{180} \approx 0,218 \text{ - maksimalna amplituda}$$

ljudjanja, rad

$$\omega_e = \frac{2 \cdot \pi}{T} = \frac{2 \cdot \pi}{10} \approx 0,628 \text{ - frekvencija njihanja broda,}$$

rad/s

Promatrajući dijagram na slici 1 vidljivo je da su ubrzanja po ovom kriteriju nešto manja nego što su to prema najjednostavnijem kriteriju IMO-a.



Slika 1. Ubrzanja u težištu mase tereta T određena prema kriteriju 20° ljudjanja u 10 sekundi i $12,5^\circ$ posrtanja u 10 sekundi

Figure 1. Cargo centre of gravity accelerations defined following the criterion of 20° rolling within 10 sec. periods and $12,5^\circ$ pitching within the period of 10 sec.

2.3. Pojednostavljeni kriterij Det Norske Veritasa

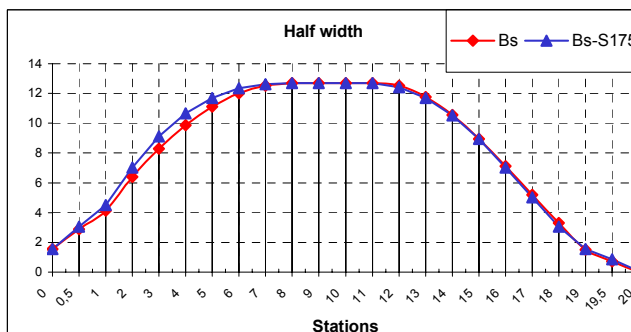
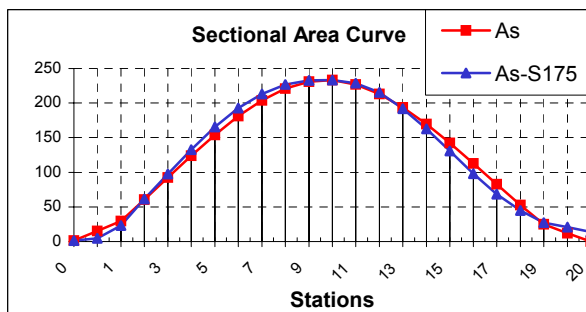
Simplified criterion of Det Norske Veritas

Pojednostavljeni kriterij Det Norske Veritasa (DNV) zasniva se na statističkoj obradi podataka koji su dobiveni korištenjem raznih programa za pomorstvenost ili su izmjereni [9]. Međutim, kriterij je prvenstveno namijenjen kao pomoć pri projektriranju broda što ga uvrštava u grupu konzervativnih metoda s većim faktorom sigurnosti. Ovaj kriterij uzima u obzir veći broj parametara i zbog toga neće biti daljnje obrađivan u ovom radu. Budući da se varijable unutar kriterija određuju statističkim metodama, njegova daljnja obrada ne bi pridonijela daljnjem razumijevanju teorije. S obzirom da predstavlja kompromis između korištenja znatno opsežnijih i kompleksnijih hidrodinamičkih teorija naprama navedenim pojednostavljenim kriterijima, u prijevozu teških tereta pokazao se vrlo prikladnim za korištenje [10], [11].

2.4. Hidrodinamičke teorije njihanja broda na valovima

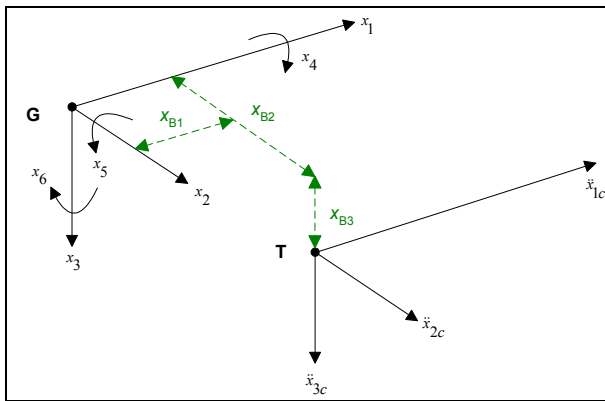
Hydrodynamic theory of ship motions on waves

Korištenjem hidrodinamičkih teorija njihanja broda na valovima mogu se najtočnije procijeniti apsolutna ubrzanja u težištu mase tereta. To dijelom proizlazi iz velikog broja varijabli koje se moraju uzeti u obzir. Tako npr. unos forme broda predstavlja relativno mukotrpan posao, ako se uzme u obzir da je potrebno unijeti podatke o formi za 23 rebra i 10 do 15 točaka po svakom rebro, što ukupno iznosi 350 točaka, ili 700 koordinata. Zbog toga su u računalnom programu MARHYDRO izrađeni potprogrami kojima se matematički može odrediti forma broda u vrlo kratkom vremenu. Iz osnovnih izmjera forme i koeficijenata, program automatski definira formu čije su karakteristike prikazane na sljedećoj slici. Poznavajući krivulju areala rebara i krivulju poluširina teretne vodne linije moguće je odrediti formu Lewisovim konformnim preslikavanjem te odrediti pripadajuće



Slika 2. Usporedba rezultata matematičkog određivanja forme za brod ITTC S-175 sa stvarnim podacima, (As i Bs – izračunata krivulja areala rebara i poluširina vodnih linija As-175 i Bs-175 – krivulja areala rebara i poluširina vodnih linija za formu ITTC S-175)

Figure 2. Results comparison of mathematical form defining with ITTC S-175 form data (As and Bs - calculated sectional area curve and half width, As-175 and Bs-175 sectional area curve and half width for ITTC Y-17)



Slika 3. Određivanje apsolutnih ubrzanja u točki T
Figure 3. Defining the absolute accelerations in the cargo centre of gravity T

hidrodinamičke koeficijente.

Ubrzanja u težištu mase tereta ovisna su o:

- ubrzanjima u težištu mase broda G;
- utjecaju komponente gravitacijskog ubrzanja u težištu mase tereta;
- položaju težišta mase tereta s obzirom na položaj težišta mase broda (x_{B1} , x_{B2} , x_{B3}).

Za inercijski koordinatni sustav, apsolutna ubrzanja u težištu tereta T (x_{B1} , x_{B2} , x_{B3}) su:

$$\ddot{x}_{1c} = \ddot{x}_1 + x_{B3} \cdot \ddot{x}_5 - x_{B2} \cdot \ddot{x}_6 \quad (1)$$

$$\ddot{x}_{2c} = \ddot{x}_2 - x_{B3} \cdot \ddot{x}_4 + x_{B1} \cdot \ddot{x}_6 \quad (2)$$

$$\ddot{x}_{3c} = \ddot{x}_3 + x_{B2} \cdot \ddot{x}_4 - x_{B1} \cdot \ddot{x}_5 \quad (3)$$

Za koordinatni sustav broda, u točki G apsolutna ubrzanja u težištu tereta T (x_{B1} , x_{B2} , x_{B3}) su:

$$\ddot{x}'_{2c} = \ddot{x}_{2c} \cdot \cos x_4 + \ddot{x}_{3c} \cdot \sin x_4 - g \cdot \sin x_4 \quad (4)$$

$$\ddot{x}'_{3c} = -\ddot{x}_{2c} \cdot \sin x_4 + \ddot{x}_{3c} \cdot \cos x_4 - g \cdot \cos x_4 \quad (5)$$

gdje su:

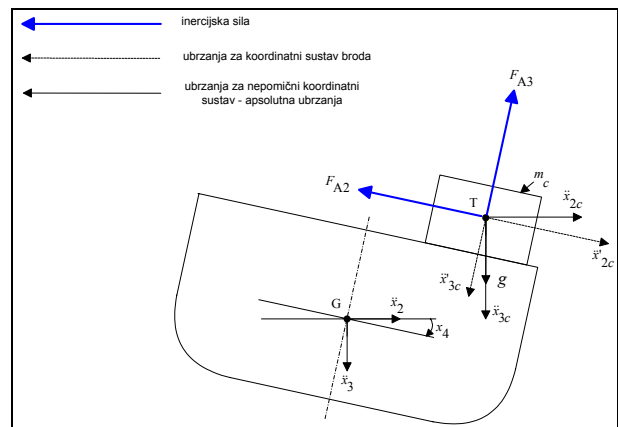
- \ddot{x}_j - apsolutna ubrzanja težišta mase broda G za inercijski koordinatni sustav
- \ddot{x}_{jc} - apsolutna ubrzanja težišta mase tereta T za inercijski koordinatni sustav
- \ddot{x}'_{jc} - apsolutna ubrzanja težišta mase tereta T za koordinatni sustav broda
- j - indeks koji označava dotična translacijska i rotacijska gibanja $j = 1, 2, \dots, 6$

1. - zalijetanje, 2. - zanošenje, 3. - poniranje, 4. - ljuljanje,
5. - posrtanje, 6. - zaošijanje.

Inercijske sile koje djeluju u težištu mase tereta su:

$$\begin{Bmatrix} F_{A2} \\ F_{A3} \end{Bmatrix} = m_c \cdot \begin{Bmatrix} \ddot{x}'_{2c} \\ \ddot{x}'_{3c} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

gdje je m_c - masa tereta.



Slika 4. Djelovanje inercijske sile u težištu mase tereta

Figure 4. Inertia forces acting in the cargo centre of gravity

3. Konvencionalni način procjene sigurnosti tereta

Conventional way of cargo safety estimation

Korištenjem izvedenih jednadžbi za sile inercije u ravnini njihanja tereta paralelnim s ravinom palube mogu se postaviti jednadžbe dinamičke ravnoteže tereta. U praksi je potrebno osigurati da je zbroj komponenti sila u priponama koje djeluju u poprečnom i uzdužnom smjeru i sile trenja veći od inercijske sile. Također je potrebno osigurati da je moment prevrtanja tereta oko točke D koji nastaje zbog djelovanja inercijske sile manji od momenata koji mu se suprotstavljaju.

• prednosti konvencionalnog načina procjene sigurnosti prijevoza tereta

- praktičnost i jednostavnost proračuna – mogućnost diskretizacije tereta na konačan broj krutih tijela koji je moguće dodatno ukrijepiti.

• nedostaci konvencionalnog načina procjene sigurnosti prijevoza tereta

- nemogućnost određivanja njihanja privezanog tereta – dakle niti sila u priponama jer teret privezan u većem broju točaka predstavlja statički neodređen problem

- određuju se ekvivalentne sile za svaki smjer njihanja – one moraju biti manje od komponenti rezultantne dopuštene sile (dopušteno opterećenje ili naprezanje)

- uvodi se deterministički faktor sigurnosti $SF=1,5$ i pripone se nastoje postavljati što ravnomjernije

Iz ravnoteže sila i momenata mogu se postaviti sljedeći kriteriji:

- sprječavanje klizanja:

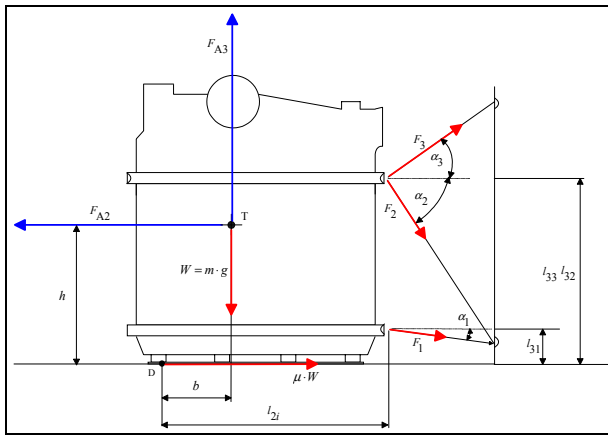
$$\sum_{i=1}^n F_i \cdot \cos \alpha_i > F_{A2} - \mu \cdot (m \cdot g + \sum_{i=1}^n F_i \cdot \sin \alpha_i - F_{A3}), \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n F_i \cdot \sin \alpha_i > F_{A3} - m \cdot g; \quad (8)$$

• sprječavanje prevrtanja oko točke D:

$$\sum_{i=1}^n (F_i \cdot \cos \alpha_i) \cdot l_{3i} + \sum_{i=1}^n (F_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot l_{2i} > F_{A2} \cdot h + F_{A3} \cdot b - m \cdot g \cdot b. \quad (9)$$

Jednadžbe za ravnotežu sila i momenata trebaju poslužiti za određivanje stvarnih sila u pojedinim priponama. Potrebno je naime osigurati da naprezanja u priponama koja se mogu pojaviti u putovanju budu manja od dopuštenih naprezanja.



Slika 5. Određivanje ravnoteže sila i momenata pri opterećenju tereta u poprečnoj ravni

Figure 5. Defining the balance of forces and momentum for loading in transversal plane

4. Matematički modeli njihanja tereta Mathematical models of cargo motions

4.1. Nelinearna njihanja mase tereta s tri stupnja slobode Non-linear cargo motions with three degrees of freedom

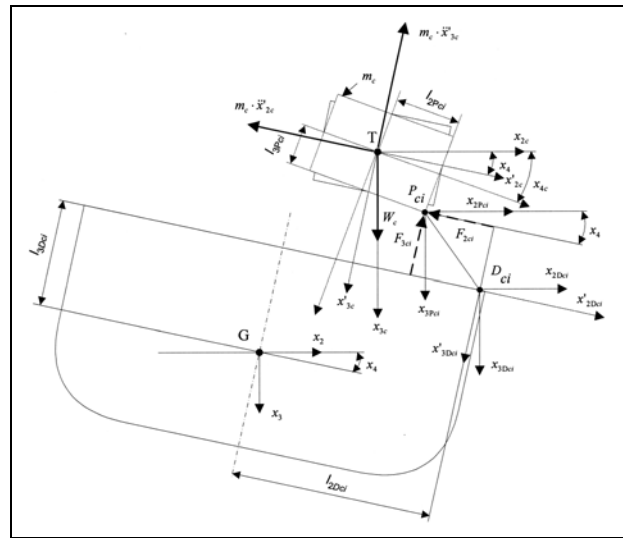
Na slici 6. prikazan je model njihanja sustava s tri stupnja slobode i uzbudom podloge koja djeluje preko elastičnih veza. Na slici je prikazana samo jedna elastična veza u kojoj se javljaju dvije komponente sile reakcije. Sukladno klasičnoj metodi, njihanja je potrebno postaviti za koordinatni sustav koji je vezan za brod.

Da bi se izvele jednadžbe njihanja sustava s tri stupnja slobode, prema slici, potrebno je najprije odrediti njihanja u pojedinim točkama u kojima su pripone pričvršćene za podlogu i teret, P_{ci} i D_{ci} :

$$\begin{cases} X_{2Pci} \\ X_{3Pci} \end{cases} = \begin{cases} X_{2c} \\ X_{3c} \end{cases} + \begin{cases} -l_{3Pci} X_{4c} \\ l_{2Pci} X_{4c} \end{cases}, \quad (10)$$

$$\begin{cases} X_{2Dci} \\ X_{3Dci} \end{cases} = \begin{cases} X_2 \\ X_3 \end{cases} + \begin{cases} -l_{3Dci} X_4 \\ l_{2Dci} X_4 \end{cases}.$$

Dakle apsolutni pomaci u točkama pričvršćivanja pripona za palubu $D_{ci}(X_{2Dci}, X_{3Dci})$ izravna su posljedica njihanja broda u njegovom težištu mase G . Apsolutni pomaci u točkama $P_{ci}(X_{2Pci}, X_{3Pci})$ posljedica su apsolutnih njihanja tereta u njegovom težištu mase T .



Slika 6. Model njihanja sustava s tri stupnja slobode i uzbudom koja djeluje preko pripona
Figure 6. The model of cargo/ship motion system with three degrees of freedom and excitation acting through lashings

Uzbuda njihanja prenosi se s podloge, preko elastičnih veza, na teret pa se zbog njihanja tereta javljaju komponente sile reakcije u priponi za svaki smjer njihanja. Komponente sile reakcije koja nastaje u priponi posljedica su razlike apsolutnih translacijskih njihanja u točkama P_{ci} i D_{ci} . Iz ravnoteže sila i momenata oko težišta mase T izvode se sljedeće jednadžbe njihanja:

$$\begin{bmatrix} m_c & 0 & 0 \\ 0 & m_c & 0 \\ 0 & 0 & l_{44c} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \ddot{X}'_{2c} \\ \ddot{X}'_{3c} \\ \ddot{X}'_{4c} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \sum_i F_{2ci} \\ \sum_i F_{3ci} \\ \sum_i F_{3ci} l_{2Pci} - \sum_i F_{2ci} l_{3Pci} \end{Bmatrix} = 0 \quad (11)$$

Sile u priponama određene su sljedećim jednakostima:

$$\begin{Bmatrix} F_{2ci}(t) \\ F_{3ci}(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{2ci} & 0 \\ 0 & b_{3ci} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} r'_{2ci} \\ r'_{3ci} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{2ci} & 0 \\ 0 & k_{3ci} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} r'_{2ci} \\ r'_{3ci} \end{Bmatrix}, \quad (12)$$

gdje su:

$$\begin{Bmatrix} r'_{2ci} \\ r'_{3ci} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{X}'_{2Pci} \\ \dot{X}'_{3Pci} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \dot{X}'_{2Dci} \\ \dot{X}'_{3Dci} \end{Bmatrix}, \quad (13-a,b)$$

$$\begin{Bmatrix} r'_{2ci} \\ r'_{3ci} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{X}'_{2Pci} \\ \dot{X}'_{3Pci} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \dot{X}'_{2Dci} \\ \dot{X}'_{3Dci} \end{Bmatrix}.$$

Translacijski apsolutni pomaci u točkama P_{ci} i D_{ci} određeni su sljedećim jednakostima:

$$\begin{cases} x'_{2Pci} \\ x'_{3Pci} \end{cases} = \begin{bmatrix} \cos x_4 & \sin x_4 \\ -\sin x_4 & \cos x_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} x_{2Pci} \\ x_{3Pci} \end{cases}, \\ \begin{cases} x'_{2Dci} \\ x'_{3Dci} \end{cases} = \begin{bmatrix} \cos x_4 & \sin x_4 \\ -\sin x_4 & \cos x_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} x_{2Dci} \\ x_{3Dci} \end{cases} \quad (14- a, b)$$

Ovdje je potrebno napomenuti da će zbog promjene položaja točaka u kojima je pripona pričvršćena P_{ci} i D_{ci} , doći i do promjene ekvivalentnih krutosti translacijskih njihanja zbog promjene relativnih kutova koje pripona zatvara s ravninom palube. Ta se promjena može jednostavno izraziti slijedom izvedenih izraza. Najprije je potrebno odrediti duljine stranica pravokutnika (u općem slučaju prizme) čija je dijagonala pripona koja se nalazi između točaka pričvršćivanja:

$$\begin{cases} \Delta l_{2ci}^{(1)} \\ \Delta l_{3ci}^{(1)} \end{cases} = \begin{cases} \Delta l_{2ci}^{(0)} - r'_{2ci} \\ \Delta l_{3ci}^{(0)} - r'_{3Pci} \end{cases} \quad (15)$$

gdje su:

$\Delta l_{2ci}^{(0)}, \Delta l_{3ci}^{(0)}$ - duljine stranica pravokutnika čija je dijagonala pripona koja se nalazi između točaka pričvršćivanja – prije djelovanja opterećenja;

$\Delta l_{2ci}^{(1)}, \Delta l_{3ci}^{(1)}$ - duljine stranica pravokutnika čija je dijagonala pripona koja se nalazi između točaka pričvršćivanja – za vrijeme djelovanja opterećenja, pri vrlo malom pomaku.

Duljine pripone, kao što je objašnjeno u tekstu, određuju se sljedećim jednakostima:

$$l_{ci}^{(0)} = \sqrt{(\Delta l_{2ci}^{(0)})^2 + (\Delta l_{3ci}^{(0)})^2} \quad - \text{duljina pripone prije djelovanja opterećenja}$$

$$l_{ci}^{(1)} = \sqrt{(\Delta l_{2ci}^{(1)})^2 + (\Delta l_{3ci}^{(1)})^2} \quad - \text{duljina pripone za vrijeme djelovanja opterećenja} \quad (16)$$

Ako se uzme da pripone imaju samo po jedan stupanj slobode, dakle mogu se deformirati samo u uzdužnom smjeru, ekvivalentne krutosti se određuju iz sljedeće jednakosti:

$$\begin{cases} k_{2ci} \\ k_{3ci} \end{cases} = \frac{A_{ci} \cdot E_{ci}}{l_{ci}^{(1)}} \cdot \begin{pmatrix} \Delta l_{2ci}^{(1)} & \Delta l_{3ci}^{(1)} \\ 1_{ci}^{(1)} & 1_{ci}^{(1)} \end{pmatrix}^T \quad (17)$$

Nakon uvrštavanja, uz zanemarivanje prigušenja, dobiju se sile u priponama za nelinearna njihanja tereta:

$$\begin{cases} F_{2ci}(t) \\ F_{3ci}(t) \end{cases} = \frac{A_{ci} \cdot E_{ci}}{(l_{ci}^{(1)})^2} \cdot \begin{bmatrix} \Delta l_{2ci}^{(1)} & 0 \\ 0 & \Delta l_{3ci}^{(1)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos x_4 & \sin x_4 \\ -\sin x_4 & \cos x_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} x_{2Pci} - x_{2Dci} \\ x_{3Pci} - x_{3Dci} \end{cases} \quad (18)$$

Jednadžba za ravnotežu sila sadrži ubrzanja tijela za koordinatni sustav koji je vezan uz brod, dakle uzima se u obzir komponenta težine tereta u horizontalnoj ravnini. Prema tome, translacijska ubrzanja su definirana ovako:

$$\begin{cases} \ddot{x}'_{2c} \\ \ddot{x}'_{3c} \end{cases} = \begin{bmatrix} \cos x_4 & \sin x_4 \\ -\sin x_4 & \cos x_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} \ddot{x}_{2c} \\ \ddot{x}_{3c} \end{cases} + \begin{cases} -g \cdot \sin x_4 \\ 0 \end{cases} \quad (19)$$

Rotacijska njihanja su jednaka za oba koordinatna sustava:

$$\ddot{x}'_{4c} = \ddot{x}_{4c} \quad (20)$$

Prema tome izraz za transformaciju apsolutnih ubrzanja za tri stupnja slobode njihanja krutog tijela je:

$$\begin{cases} \ddot{x}'_{2c} \\ \ddot{x}'_{3c} \\ \ddot{x}'_{4c} \end{cases} = \underline{\underline{\lambda}} \cdot \begin{cases} \ddot{x}_{2c} \\ \ddot{x}_{3c} \\ \ddot{x}_{4c} \end{cases} + \begin{cases} -g \cdot \sin x_4 \\ 0 \\ 0 \end{cases}, \quad (21)$$

gdje je:

$$\underline{\underline{\lambda}} = \begin{bmatrix} \cos x_4 & \sin x_4 & 0 \\ -\sin x_4 & \cos x_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Uvrštavanjem izraza za transformaciju apsolutnih ubrzanja u jednadžbe njihanja dobiju se nelinearne jednadžbe njihanja sustava s tri stupnja slobode i uzбудom podloge, koje je potrebno rješavati u vremenskom području.

4.2. Linearizacija jednadžbi njihanja mase tereta s tri stupnja slobode *Linearisation of equations of cargo motions with three degrees of freedom*

Dobiveni izrazi za njihanje sustava s tri stupnja slobode i jednu priponu vrlo su složeni. Međutim, služeći se uhodanim postupcima koji se koriste u pomorstvenosti pri izvodima linearnih teorija, moguće ih je znatno pojednostavniti i linearizirati. Pritom treba naglasiti da je pristup u pojednostavljenju ovakvih problema djelomično

fizikalno opravdan. Naime, neki članovi u diferencijalnim jednadžbama nemaju znatniji utjecaj na njihovo rješenje pa ih je stoga moguće izostaviti.

$$\ddot{x}'_{2c} \approx \ddot{x}_{2c} - g \cdot x_4, \quad (31)$$

$$\ddot{x}'_{3c} \approx \ddot{x}_{3c}. \quad (32)$$

Za male vrijednosti x_4 , članovi matrice transformacije mogu se pojednostavniti na sljedeći način:

$$\underline{\lambda} = \begin{bmatrix} \cos x_4 & \sin x_4 \\ -\sin x_4 & \cos x_4 \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} 1 & x_4 \\ -x_4 & 1 \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Uvrstivši aproksimiranu matricu transformacije, izrazi za apsolutne pomake u točkama P_{ci} i D_{ci} , za zarotirani koordinatni sustav mogu se značajno pojednostavniti:

$$\begin{cases} x'_{2Pci} \\ x'_{3Pci} \end{cases} = \begin{bmatrix} 1 & x_4 \\ -x_4 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} x_{2Pci} \\ x_{3Pci} \end{cases}, \quad (24-a,b)$$

$$\begin{cases} x'_{2Dci} \\ x'_{3Dci} \end{cases} = \begin{bmatrix} 1 & x_4 \\ -x_4 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} x_{2Dci} \\ x_{3Dci} \end{cases}.$$

Krajnja linearizacija može se provesti zanemarujući nedominantne članove, pa proizlazi:

$$x'_{2Pci} = x_{2Pci} + x_{3Pci} \cdot x_4 \approx x_{2Pci}, \quad (25)$$

$$x'_{3Pci} = x_{3Pci} - x_{2Pci} \cdot x_4 \approx x_{3Pci}, \quad (26)$$

$$x'_{2Dci} = x_{2Dci} + x_{3Dci} \cdot x_4 \approx x_{2Dci}, \quad (27)$$

$$x'_{3Dci} = x_{3Dci} - x_{2Dci} \cdot x_4 \approx x_{3Dci}. \quad (28)$$

Za vrlo male kutove ljuljanja broda x_4 , pomaci u točkama P_{ci} i D_{ci} za koordinatni sustav koji je vezan uz brod G mogu se uz dovoljnu točnost uzeti da su jednaki apsolutnim pomacima za inercijski koordinatni sustav O . Time se gubi razlika među koordinatnim sustavima. Na sličan način izvodi se i linearna teorija odsječaka. U ovom slučaju, to znači krajnje pojednostavljene matrice transformacije njihovih:

$$\underline{\lambda} = \begin{bmatrix} \cos x_4 & \sin x_4 \\ -\sin x_4 & \cos x_4 \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} 1 & x_4 \\ -x_4 & 1 \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \underline{\lambda}_L = \underline{I}, \quad (29)$$

gdje indeks L označava lineariziranu matricu transformacije, koja postaje jedinična matrica.

Izrazi za ubrzanja u težištu mase tereta mogu se također linearizirati na jednostavan način:

$$\begin{cases} \ddot{x}'_{2c} \\ \ddot{x}'_{3c} \end{cases} = \begin{bmatrix} \cos x_4 & \sin x_4 \\ -\sin x_4 & \cos x_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} \ddot{x}_{2c} \\ \ddot{x}_{3c} \end{cases} + \begin{cases} -g \cdot \sin x_4 \\ 0 \end{cases}. \quad (30)$$

Krajnje pojednostavljene gornjih izraza moguće je samo za male kutove ljuljanja broda:

Prema tome, mogu se također napisati pojednostavljeni linearizirani izrazi za komponente sila koje se javljaju u priponama:

$$\begin{cases} F_{2ci}(t) \\ F_{3ci}(t) \end{cases} = \begin{bmatrix} b_{2ci} & 0 \\ 0 & b_{3ci} \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} r'_{2ci} \\ r'_{3ci} \end{cases} + \begin{bmatrix} k_{2ci} & 0 \\ 0 & k_{3ci} \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} r_{2ci} \\ r_{3ci} \end{cases}, \quad (33)$$

$$\begin{cases} r'_{2ci} \\ r'_{3ci} \end{cases} = \begin{bmatrix} b_{2ci} & 0 \\ 0 & b_{3ci} \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} r_{2ci} \\ r_{3ci} \end{cases} + \begin{bmatrix} k_{2ci} & 0 \\ 0 & k_{3ci} \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} r_{2ci} \\ r_{3ci} \end{cases}$$

Nelinearne jednadžbe izvedene u prijašnjem poglavlju najprikladnije se lineariziraju uvrštavanjem linearizirane matrice transformacije. Budući da je linearizirana matrica transformacije jedinična matrica moguće ju je izostaviti u svim nelinearnim izrazima. Po uvrštenju izraza za apsolutne pomake u točkama P_{ci} i D_{ci} dobiju se linearizirane jednadžbe njihovih sustava s tri stupnja slobode. Za neograničeni broj pripona, jednadžbe njihovih se mogu napisati u matričnom obliku:

$$\underline{M}_c \cdot \ddot{\underline{\delta}}_c + \underline{B}_c \cdot \dot{\underline{\delta}}_c + \underline{K}_c \cdot \underline{\delta}_c = \underline{F}_{Dc}, \quad (34)$$

gdje su:

$$\underline{M}_c = \begin{bmatrix} m_c & 0 & 0 \\ 0 & m_c & 0 \\ 0 & 0 & I_{44c} \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$\underline{B}_c = \begin{bmatrix} \sum_i b_{2ci} & 0 & -\sum_i b_{2ci} l_{3Pci} \\ 0 & \sum_i b_{3ci} & \sum_i b_{3ci} l_{2Pci} \\ -\sum_i b_{2ci} l_{3Pci} & \sum_i b_{3ci} l_{2Pci} & \sum_i (b_{3ci} l_{2Pci}^2 + b_{2ci} l_{3Pci}^2) \end{bmatrix}, \quad (36)$$

$$\underline{K}_c = \begin{bmatrix} \sum_i k_{2ci} & 0 & -\sum_i k_{2ci} l_{3Pci} \\ 0 & \sum_i k_{3ci} & \sum_i k_{3ci} l_{2Pci} \\ -\sum_i k_{2ci} l_{3Pci} & \sum_i k_{3ci} l_{2Pci} & \sum_i (k_{3ci} l_{2Pci}^2 + k_{2ci} l_{3Pci}^2) \end{bmatrix},$$

$$\underline{F}_{Dc} = \begin{cases} \sum_i F_{2Dci}(t) + m_c \cdot g \cdot x_4 \\ \sum_i F_{3Dci}(t) \\ \sum_i F_{4Dci}(t) \end{cases}, \quad (37, 38)$$

- $\underline{\underline{M}}_c$ - matrica tromosti mase tereta;
 $\underline{\underline{B}}_c$ - matrica prigušenja pripona tereta;
 $\underline{\underline{K}}_c$ - matrica krutosti pripona tereta;
 $\underline{\underline{F}}_{Dc}$ - vektor uzbuđe njihanja tereta.

Članovi vektora uzbuđe su:

$$\begin{cases} F_{2Dci}(t) \\ F_{3Dci}(t) \\ F_{4Dci}(t) \end{cases} = \begin{bmatrix} b_{2ci} & 0 & 0 \\ 0 & b_{3ci} & 0 \\ -b_{2ci|3Pci} & b_{3ci|2Pci} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} \dot{x}_{2Dci} \\ \dot{x}_{3Dci} \\ \dot{x}_{4Dci} \end{cases} + \begin{bmatrix} k_{2ci} & 0 & 0 \\ 0 & k_{3ci} & 0 \\ -k_{2ci|3Pci} & k_{3ci|2Pci} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} x_{2Dci} \\ x_{3Dci} \\ x_{4Dci} \end{cases} \quad (39)$$

Matrica prigušenja pripona tereta i matrica krutosti pripona tereta su simetrične:

$$\underline{\underline{B}}_c = \underline{\underline{B}}_c^T, \quad \underline{\underline{K}}_c = \underline{\underline{K}}_c^T \quad (40-a,b)$$

5. Zaključak Conclusion

Pregledom literature u kojoj je obrađen prijevoz i učvršćivanje komadnih tereta na brodovima može se zaključiti da se korištenjem konvencionalnih kriterija koje predlaže IMO i klasifikacijska društva (DNV) dobiju rezultati koji uvelike premašuju stvarne vrijednosti zabilježene u praksi. Drugim riječima, sasvim je razumljivo da će pojednostavljeni kriteriji koji uzimaju vrlo malo varijabli u obzir imati za posljednju preveliki faktor sigurnosti. To se prvenstveno odnosi na određivanje inercijskih sila odnosno ubrzanja težišta mase tereta koji se nalazi na palubi broda. Osnovni nedostatak konvencionalne procjene sigurnosti tereta je što se iz ravnoteže sila i momenata mogu samo promatrati ukupni odnosi sila i momenata, dok sile odnosno naprezanja u pojedinim priponama ostaju nepoznate. Zbog toga se najčešće uvodi još jedan faktor sigurnosti koji obično iznosi 1,5. Budući da ubrzanja koja djeluju u težištu tereta pripiraju i do nekoliko puta manje vrijednosti od onih

koje se dobiju prema pojednostavljenim kriterijima, preciznijim postavljanjem matematičkih modela njihanja tijela tereta vezanog za palubu broda sustavom elastičnih pripona, povećava se točnost određivanja sila u pojedinim priponama. Bolji kriteriji određivanja inercijskih ubrzanja kao i bolji matematički modeli kojima se pouzdanije mogu procijeniti sile u pojedinim priponama svakako pridonose boljoj preraspodjeli sila kao i manjim lokalnim naprezanjima palubne konstrukcije na koju se oslanja teret. Sve to, kao krajnju posljednju ima ukupno smanjenje troškova prijevoza i omogućava brodaru znatno bolju poziciju na suvremenom pomorskom tržištu.

Literatura

References

- [1] Radan, D.: *Prijevoz teških tereta specijalnim bvdovima na valovitom moru*, Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, studeni 2002.
- [2] Turnbull, S.R.: Dawson, D., *Investigations into the Securing of Cargo with Special Reference to Roll-on-Roll-off Ships*, IMO Conference, London, Feb. 1984.
- [3] Turnbull, S.R.: Dawson, D., *The Dynamic Behaviour of Roll-on Roll-off Trailers On Board Ships*, Proceedings, BSSM Conference, Lancaster, Sept. 1984.
- [4] Hua, J.: *A Probabilistic Study of the Simultaneous Effect of Ship Motions on the Cargo Shifting Onboard*, Marine Technology, Vol. 33, No. 1, 25-34, Jan. 1996.
- [5] Radan, D.: *MARHYDRO – Seakeeping Educational Program*, 15th Symposium on Theory and Practice of Shipbuilding SORTA 2002, Nov. 2002.
- [6] Radan, D.: *LEWIS SOLVER – Računalni program za proračun lokalnih hidrodinamičkih koeficijenata Lewisovim konformnim preslikavanjem*, Tehničko izvješće, Veleučilište u Dubrovniku, 2001.
- [7] IMO, *Code of Safe Practice for Cargo Stowage and Securing*, International Maritime Organisation, 4 Albert Embankment, London, 1992.
- [8] Van Hoorn, F.: *Design Criteria for Self-Propelled Heavy-Lift Transports - And How Theory Correlates with Reality*, 2nd Offshore Symposium on Design Criteria and Codes, Houston, TX, April 4-5, 1991.
- [9] DNV, *Cargo Securing Model Manual*, Det Norske Veritas, Hovik, Norway, 2002.
- [10] Tabain, T., *Studija eksploatacijske pomorstvenosti M.B. Gruž*, Tehničko izvješće, Atlantska Plovidba, Dubrovnik, Hrvatska, 1990.
- [11] Ograsta, D.: *Transport of Two 650 t Container Cranes, Stability & Force Calculation-Simplified Criteria*, Technical Report, Brambles Heavy Contracting, Paseo de la Habana, 28036 Madrid, Spain, April 2000.
- [10] Rao, S.: *Mechanical Vibrations*, ISBN 0-201-59289-4, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Massachusetts, USA, 1995.
- [12] Andersson, P.: *Securing of Road Trailers On Board Ro/Ro Ships*, MariTerm AB, IMO Conference, London, Feb. 1984.

Rukopis primljen: 1.4.2003.

