

VOJNOTEHNIČKI
glasnik

STRUČNI
I NAUČNI ČASOPIS
MINISTARSTVA ODBRANE
REPUBLIKE SRBIJE

ISSN 0042-8469

3

UDC 623 + 355/359

GODINA LVI JUL-SEPTEMBAR 2008.

MINISTARSTVO ODBRANE REPUBLIKE SRBIJE

DIREKCIJA
ZA IZDAVAČKU I BIBLIOTEČKO-INFORMACIONU DELATNOST

DIREKTOR

Pukovnik
Milan Crnoglavac

VOJNOIZDAVAČKI ZAVOD

Načelnik
Potpukovnik
mr *Aleksandar* Bukvić, dipl. inž.

GLAVNI UREDNIK REDAKCIJE VOJNIH ČASOPISA

Potpukovnik
Dragan Hajduković

UREĐIVAČKI ODBOR

Brigadni general dr *Danko* Jovanović, dipl. inž. (predsednik Odbora); general-major *Ljubomir* Samardžić, dipl. inž.; pukovnik dr *Miljko* Erić, dipl. inž. (zamenik predsednika Odbora); dr *Branko* Kovačević, dipl. inž.; dr *Slobodan* Jaramaz, dipl. inž.; dr *Lazar* Petrović, dipl. inž.; dr *Vasilije* Mišković, dipl. inž.; pukovnik dr *Ljubiša* Tančić, dipl. inž.; pukovnik dr *Branislav* Jakić, dipl. inž.; pukovnik dr *Jugoslav* Radulović, dipl. inž.; pukovnik dr *Zoran* Filipović, dipl. inž.; pukovnik dr *Dragoslav* Ugarak, dipl. inž.; pukovnik *Vojislav* Milinković, dipl. inž.; potpukovnik mr *Nebojša* Gaćeša, dipl. inž. (sekretar Odbora)

REDAKCIJA

Odgovorni urednik

Potpukovnik
mr *Nebojša* Gaćeša, dipl. inž.
(tel.: 3006-023, vojni: 23-493)

Sekretar redakcije

Zora Pavličević
(tel.: 3201-497, vojni: 23-497)

Adresa redakcije:
VOJNOTEHNIČKI GLASNIK – BEOGRAD,
Balkanska 53

www.mod.gov.yu/04publikacije/04-glasnik.htm

Pretplata tel.-fax: 3612-506, tekući račun: 840-19540845

Rukopisi se ne vraćaju.

Štampa: Vojna štamparija – Beograd, Resavska 40b

S A D R Ź A J

Major mr <i>Slaviša Vlačić</i> Neki aspekti razvoja i modernizacije višenamenskih borbenih aviona	5
<i>Aleksandar Vitić</i> , dipl. inž. mr <i>Marija Samardžić</i> , dipl. inž. Merenje prelaznih opterećenja na dva modela u aerotunelu T-38	16
Pukovnik mr <i>Zoran Rajić</i> , dipl. inž. Optimizacija oblika komandnih površina rakete	28
Kapetan mr <i>Bojan Milanović</i> , dipl. inž. Ometanje radarskih glava za samonavođenje amplitudno modulisanom „Cross eye“ metodom ometanja	44
Pukovnik dr <i>Miroslav Radosavljević</i> , dipl. inž. Hidrodinamički model podvodnog projektila	61
Major mr <i>Sreten Perić</i> , dipl. inž. Procene fizičko-hemijskih karakteristika sredstava za hlađenje motora tokom eksploatacije vozila	81
Major mr <i>Dragan Trifković</i> , dipl. inž. major mr <i>Živojin Petrović</i> , dipl. inž. poručnik <i>Predrag Dobratić</i> , dipl. inž. Rezultati proračuna torzionih oscilacija u sistemu brodske dizel-motorne propulzije	102
Potpukovnik <i>Aca Ranđelović</i> Primena metoda operacionih istraživanja u rešavanju problema snabdevanja municijom protivoklopne čete	120

SAVREMENO NAORUŽANJE I VOJNA OPREMA

Prilagođavanje lakih oklopnih vozila novim opasnostima – M. K. ... 134

NEKI ASPEKTI RAZVOJA I MODERNIZACIJE VIŠENAMENSKIH BORBENIH AVIONA

Major mr *Slaviša Vlačić*, Tehnički opitni centar,
Sektor za letna ispitivanja

Rezime:

Težište rada predstavljaju određeni aspekti razvoja i modernizacije savremenih višenamenskih borbenih aviona. Shodno velikom broju noviteta koje nosi razvoj svake nove generacije višenamenskih borbenih aviona, kao i obimne modernizacije postojećih, izdvojeni su samo najbitniji aspekti koji ih suštinski određuju i međusobno povezuju.

Ključne reči: višenamenski borbeni avion, konstrukcija, performanse, elektronska oprema, pogonska grupa, vatrena moć.

SEVERAL ASPECTS OF DEVELOPMENT AND MODERNIZATION OF CONTEMPORARY MULTIROLE COMBAT AIRCRAFT

Summary:

This paper focuses on some aspects of development and modernization of contemporary multirole combat aircraft. In compliance with a large number of innovations developed in every generation of multirole combat aircraft as well as comprehensive modernization of existing types, the main essential and interactive aspects are emphasized here.

Key words: Multirole combat aircraft, construction, performance, avionics, power group, fire power.

Uvod

Značaj, uloga i procentualna zastupljenost višenamenskih borbenih aviona u borbenim efektivima savremenih vazduhoplovnih snaga glavni su faktori koji ovu kategoriju borbenih letelica opredeljuju kao najdinamičniju po pitanju razvoja i modernizacije. Shodno tome, odvajaju se enormna finansijska sredstva za programe koji, po pravilu, spadaju u red najskupljih vojnih programa.

Usavršavanje višenamenskih borbenih aviona odvija se, načelno, u dva pravca: jedan je razvoj potpuno novih vazduhoplova, svrstanih u petu generaciju višenamenskih borbenih aviona, dok je drugi pravac radikalna modernizacija postojećih tipova, uglavnom predstavnika četvrte generacije.

Premda se radi o dve različite generacije borbenih aviona, njihov razvoj, odnosno modernizaciju, potrebno je razmatrati jedinstveno, zbog međusobne povezanosti i uslovljenosti.

Pored određenih specifičnosti zapaža se da oba pravca karakteriše niz krupnih promena i to u različitim aspektima, od kojih su najbitniji aspekti konstrukcije, performansi, elektronske opreme, pogonskih grupa i vatrene moći/naoružanja. Ovi aspekti razvoja i modernizacije podudaraju se i na Istoku i na Zapadu, ali sa različito izraženim težištima.

Imajući to u vidu, u radu su prikazani i delimično analizirani prethodno navedeni aspekti.

Višenamenski borbeni avioni

Višenamenski borbeni avioni predstavljaju osnovnu udarnu komponentu savremenih vazduhoplovnih snaga, uključujući i one najveće. Oni objedinjavaju niz karakteristika koje ih čine podesnim za podjednako uspešno izvođenje lovačkih, bombarderskih, jurišnih i izviđačkih zadataka.

Višenamenski borbeni avion nastao je od lovačkog aviona, koji je, po pravilu, tokom istorije vojnog vazduhoplovstva bio nosilac tehnološkog progressa. Njihova pojava vezana je za sedamdesete godine prošlog veka, a kao svojevrsni rodonačelnik navodi se američki *F-4 Fantom II* u kasnijim proizvodnim verzijama, koji pripada trećoj generaciji borbenih aviona. Pri bližem određenju pripadnosti aviona nekoj generaciji potrebno je imati u vidu postojanje mnoštva različitih podela, koje iste tipove aviona svrstavaju u različite generacije. Za potrebe ovog rada prihvaćena je podela u tabeli 1.

Tabela 1

Generacije borbenih aviona						
1. generacija	2. generacija	3. generacija	4. generacija	4.5 gen. (Zapad)	4+ / ++ gen. (Istok)	5. generacija
P-80, F-84, F-86 Sejbr, MiG-15, MiG-17, J29, Me-262, Gloster Meteor, Daso Uragan	Daso Miraž III, Draken, MiG-21, F-102, F-104, Lajtning	F-4 Fantom II, F-5, Herijer, MiG-23, MiG-25, Miraž F-1	Miraž 2000, F/A-18 C/D, Su-27, MiG-29, MiG-31, F-16 C/D i F-15 C/D	JAS 39 Gripen, Rafale, Eurofighter, F/A-18 E/F, Su-30 MKI, Su-35BM, F-16 E/F, MiG-29 K, MiG-35 i F-15 K	MiG-29M, Su-30 MKI, Su-33, Su-37/ MiG-35, Su-35 BM	PAK-FA (T-50), F-35, F/A-22

Iz tabele 1 uočava se specifičnost ruskog sistema označavanja po kojem se avioni „4.5“ generacije dele na avione koji pripadaju „4+“ generaciji (MiG-29M, Su-30 MKI, Su-33, Su-37) i njihove poboljšane varijante koje spadaju u „4++“ generaciju (MiG-35, Su-35 BM), dok se ti isti avioni po zapadnoj klasifikaciji svrstavaju u „4.5“ generaciju.

Aspekti razvoja višenamenskih borbenih aviona

Razvoj kompleksnog borbenog sistema, kao što je višenamenski borbeni avion, odvija se kroz mnogobrojne aspekte koji su povezani i međusobno uslovljeni. Najbitniji aspekti razvoja su konstrukcija, performanse, pogonske grupe, elektronska oprema i vatrena moć, odnosno naoružanje.

Konstrukcija. Na svim savremenim borbenim avionima koji danas lete ili će uskoro poleteti, radi osetnijeg smanjenja mase i radarskog odraza znatan deo osnovne (noseće) strukture izrađen je od savremenih kompozita. Današnje stanje tehnike diktira da se dinamički najopterećeniji delovi strukture (koji iz eksploatacionih razloga treba da poseduju i veliki broj otvora, a time i koncentracije opterećenja), kao i delovi strukture izloženi visokim temperaturama i temperaturnim promenama, još uvek grade od metala, ali sa tendencijom da se i oni u bliskoj budućnosti zamene savremenim kompozitima. S obzirom na oštre zahteve u pogledu izdržljivosti i performansi savremenih vazduhoplova, kao i ograničenja u pogledu mase, glavni imperativ osvajanja novih konstrukcionih materijala jeste postizanje kompromisnog rešenja između zahteva za lakom konstrukcijom i visokim mehaničkim i manevarskim karakteristikama savremenog borbenog aviona. Radi usavršavanja procesa proizvodnje, lakše ponovljivosti proizvodnje pojedinih sklopova i delova strukture aviona i motora, lakše zamenljivosti delova, kao i poboljšanja pogodnosti za održavanje, u projektovanju novih letelica sve više se primenjuje princip modularne gradnje. To znači da se avion i motor sastoje od određenog broja većih sklopova ili modula koji se zasebno montiraju, a u eksploataciji zamenjuju kao celina bez naknadnih provera tolerancija ili ispitivanja [1]. Navedene karakteristike umnogome utiču na produžavanje životnog veka savremenih višenamenskih borbenih aviona koji će uveliko prevazići granicu od 30 godina.

Stelt osobina, uopšteno posmatrano, podrazumeva otežano otkrivanje i praćenje letelice radarskim i drugim sredstvima. Načelno se ostvaruje kompleksnim konstruktivnim merama na polju aerodinamičkog oblikovanja letelica radi smanjenja efektivne refleksne površine, kao i primenom specijalnih materijala i premaza za smanjenu refleksiju i upijanje radarskih signala. Stelt osobine obuhvataju i otežano vizuelno uočavanje (maskirno farbanje), smanjenje buke, redukovanje IC emisije, kao i efikasno upravljanje radio, radarskim i ostalim vrstama elektronske emisije kao demaskirajućim faktorima.

Konstrukcije savremenih borbenih aviona pete generacije podrazumevaju i unutrašnji prostor za smeštaj naoružanja, što je u uskoj vezi sa stelt osobinama i performansama.

Prvi serijski proizvedeni stelt avioni, F-117 i B-2, nisu bili nadzvučni niti su posedovali pogonsku grupu sa dopunskim sagorevanjem. Vrste radarski apsorbujućih premaza koji su tada primenjivani nisu dozvoljavali letenje po kiši niti držanje letelica van hangara. Ovi nedostaci prevaziđeni su razvojem aviona pete generacije.

Performanse. Osnovne performanse vezane za razvoj višenamenskih borbenih aviona odnose se na ostvarivanje karakteristika *superkrstarenja* i *supermanevrabilnosti*. *Superkrstarenje* predstavlja osobinu aviona da ekonomično krstari nadzvučnim brzinama bez upotrebe uređaja za dopunsko sagorevanje (forsaž). Uz odgovarajući aerodinamički oblik i upotrebu snažne i ekonomične pogonske grupe ova osobina olakšano se ostvaruje i smeštajem ubojnih sredstava u unutrašnjim spremnicima. Američki F/A-22 Raptor, predstavnik pete generacije (slika 1) dostigao je maksimalnu brzinu leta bez upotrebe forsaža od $V_{\max} = 1,72$ Maha. Jedini avion 4.5 generacije koji je demonstrirao ovu osobinu i to u konfiguraciji sa šest raketa vazduh-vazduh je evropski Evrofajter/Tajfun ($V_{\max} = 1,2$ Maha).

Sl. 1 – Američki F/A-22 Raptor je prvi avion pete generacije koji se nalazi u operativnoj upotrebi (izvor fotografije: USAF)



Supermanevrabilnost je definisana kao mogućnost borbenog aviona da izvede taktičke manevre sa kontrolisanim klizanjem, na napadnim uglovima koji se nalaze iznad napadnog ugla na kojem se ostvaruje maksimalna sila uzgona [2].

Ključni preduslovi za ostvarivanje *supermanevrabilnosti* na savremenim višenamenskim borbenim avionima su uređaj za otklanjanje vektora potiska i veliki odnos potisak/masa.

Osobina *superkrstarenja* je jedan od imperativa u razvoju višenamenskih borbenih aviona pete generacije. Sa druge strane, osobina *supermanevrabilnosti* se različito posmatra u konstrukcionim biroima na Istoku i Zapadu. Svi ruski avioni 4+, 4++ i 5. generacije (u razvoju) opremljeni su uređajima za otklanjanje vektora potiska, sa tendencijom da to uskoro budu isključivo uređaji sa mogućnošću vektorisanja potiska u svim pravcima. Jedini avion na Zapadu koji je opremljen uređajem za otklanjanje vektora potiska (dvodimenzionalnog tipa) danas je F/A-22 Raptor, dok se za osnovnu verziju aviona F-35 ovaj uređaj ne razmatra. Smatra se [3] da zapadna vazduhoplovstva prednost daju razvoju uređaja i sredstava za borbu u BVR (Beyond Visual Range – izvan vizuelnog dometa) uslovima, dok je ostvarivanje *supermanevrabilnosti* od sekundarnog značaja.

Pogonska grupa. Preovlađujući tip pogonske grupe savremenih višenamenskih borbenih aviona su turboventilatorski mlazni motori niskog i srednjeg stepena dvostrujnosti, opremljeni komorom dopunskog sagorevanja. Razvoj novih pogonskih grupa danas je retkost, a vezan je isključivo za projekte razvoja borbenih aviona novih generacija. Najnaprednije pogonske grupe današnjice predstavljaju motori Pratt & Whitney F119-PW-100 i F-136 (SAD, serijska proizvodnja), odnosno Saturn AL-41F (Rusija, predserijska proizvodnja).

U odnosu na motore prethodne generacije koje reprezentuje F100-pw-200, motor F119-pw-100 obezbeđuje 100% veći potisak bez dopunskog sagorevanja, 50% više potiska sa dopunskim sagorevanjem i ima za 10–15% manju specifičnu potrošnju goriva. To je ostvareno uz 40% manje delova, uz dodatnih 75% radova manje na redovnom održavanju.

Zahtev za postizanje visokog odnosa potisak/masa realizovan je sa manjim brojem stepeni kompresora i turbine. Performansa *superkrstarenja* postignuta je na račun povećanja radne temperature na turbini, pri čemu nije smanjen radni vek motora [4].

Uopšteno posmatrano, dalji razvoj pogonskih grupa odvija se u pravcu povećanja potiska, smanjenja mase motora, niže potrošnje, dužih resursa, smanjenih operativnih troškova i integracije uređaja za vektorisanje potiska. Ovaj razvoj uslovljen je ne samo novim konstruktivnim rešenjima i daljom digitalizacijom upravljanja i kontrole rada motora već, pre svega, napretkom na polju tehnologije materijala.

Elektronska oprema. Razvoj i implementacija nove elektronske opreme na avionima pete generacije predstavlja najprogresivniji aspekt razvoja višenamenskih borbenih aviona.

Prvi i najznačajniji element je pojava AESA radara (AESA – Active Electronically Scanned Array), odnosno radara koji poseduju antensku rešetku sa aktivnim elektronskim skeniranjem, što se smatra jednom od najznačajnijih prekretnica u istoriji razvoja radara [5].

Glavne prednosti AESA radara su: manja masa, veći domet radara (≥ 300 km), poboljšana rezolucija pri mapiranju terena, mogućnost istovremenog rada u više različitih modova (vazduh-vazduh, vazduh-zemlja), veći broj ciljeva koji se mogu pratiti i istovremeno na njih dejstvovati (≈ 30 praćenje/8 dejstvo), veća pouzdanost rada. Kao mana se, osim cene, navodi otežano hlađenje radara.

Radarska slika ostvarena AESA radarom je vrlo visoke rezolucije i omogućava prepoznavanje zemaljskih ciljeva na daljinama većim od 100 km.

Sa 5. generacijom izvršena je dalja integracija i usavršavanje optoelektronskih senzora – laserskog označavača/daljinomera, termovizijske i TV kamere, koji omogućavaju pasivno pretraživanje, otkrivanje, praćenje i označavanje ciljeva u vazдушnom prostoru i na zemlji, na daljinama i do 45 km, kako u dnevnim, tako i u noćnim uslovima.

Senzorska tehnika za otkrivanje radarskog ili laserskog ozračenja, kao i lansiranja protivničkih raketa, omogućava automatsku samozaštitu aviona primenom aktivnog elektronskog i pasivnog ometanja.

Primena inercijalnog i globalnog pozicionog navigacionog sistema (INS/GPS) i trodimenzionalne pokretne mape obezbeđuje preciznu autonomnu navigaciju do cilja [6].

Jedan od ciljeva koji je, takođe, ostvaren sa avionima 5. generacije jeste i postizanje visokog nivoa integracije pilot–letelica. Pilotska kabina je zamišljena kao radno mesto, na kojem visokointegrirani sistem avionike umnogome rasterećuje pilota tokom leta i omogućuje mnogo veći učinak sprege čovek–letelica. Naime, samo postojanje gornjeg i donjih prikazivača visoke rezolucije sa velikim brojem prezentovanih informacija prikupljenih putem avionskih senzora stvara opasnost od zagušenja informacijama. Zato se danas uvode digitalni sistemi upravljanja sa brzim procesorima koji na osnovu potrebe pilota za precizno određenim informacijama obezbeđuju njihov optimalan broj. Pomenuti sistemi imaju mogućnost da, i bez intervencije pilota, samostalno procenjuju taktičku situaciju i predlažu donošenje odluke o upotrebi oružja [4].

Naročito značajan element razvoja višenamenskih borbenih aviona sa aspekta elektronske opreme jeste i pojava operativnih mrežnih sistema – veza za prenos podataka (data-linkova). Time se ostvaruje informacijska superiornost i visok nivo svesnosti o okruženju, realizovan putem umrežavanja višenamenskih borbenih aviona. Mrežni sistemi omogućava-

vaju brzu i zaštićenu razmenu velikog broja raznih informacija i to između borbenih aviona, AWACS-a, komandnih mesta, radarskih stanica, kao i ostalih zainteresovanih učesnika u borbenim dejstvima.

Dosadašnja praksa pokazala je da je takav jedan podsistem složen za ometanje i da umnogome smanjuje radno opterećenje pilota, istovremeno doprinoseći ukupnoj optimizaciji celog sistema. Danas se u operativnoj upotrebi nalazi više različitih mrežnih sistema koji se primenjuju na višenamenskim borbenim avionima [7]. Oni se razlikuju po nizu karakteristika, od kojih su najbitnije:

- količina podataka koja može da se prenese u jedinici vremena,
- broj umreženih učesnika,
- brzina protoka informacija,
- domet, i
- otpornost na ometanje.

Vatrena moć/naoružanje. Prethodno navedeni aspekti razvoja višenamenskih borbenih aviona povezani su jednim zajedničkim ciljem, a to je efikasno ispoljavanje vatrene moći višenamenskog borbenog aviona.

Razvoj i napredak sa aspekta vatrene moći usko je vezan za razvoj i optimalnu primenu vazduhoplovnih ubojnih sredstava, što je u uskoj funkcionalnoj vezi sa razvojem na polju konstrukcija, pogonskih grupa, performansi i naročito elektronske opreme višenamenskih borbenih aviona.

Savremena vazduhoplovna ubojna sredstva najdinamičniji razvoj doživljavaju na poljima raketnog i bombarderskog naoružanja za dejstvo po ciljevima na kopnu i moru, te raketnog naoružanja za dejstvo po ciljevima u vazdušnom prostoru. U domenu dejstva po površinskim ciljevima progres je ostvaren i ostvaruje se na temeljima GPS/INS sistema navođenja i razvoju tehnologije senzora (TV, laser, termovizija). Težište je na povećanju razorne moći, otpornosti na ometanje i većem dometu. Radi ostvarenja većeg dometa i izbegavanja zone efikasnog dejstva sistema PVO zapaža se pojava većeg broja mini krstarećih raketa za dejstva sa većih daljina (50 do 200 km) po značajnim i jako branjenim objektima, kao i rakete za dejstvo po plovnim objektima i radarskim stanicama [6].

Nezaobilazni imperativ predstavlja sposobnost potpuno autonomnog dejstva sa samostalnim laserskim označavanjem ciljeva na zemlji ili preciznim određivanjem njihovih koordinata tokom samog napada, kao i sposobnost dejstva protiv više različitih fiksnih i pokretnih ciljeva u okviru jednog leta.

U domenu dejstva po ciljevima u vazdušnom prostoru kvalitativan pomak i novu dimenziju borbe u vazdušnom prostoru pružaju mogućnosti AESA radara. U vezi s tim, u razvoju se nalazi više tipova raketa velikog dometa sa aktivnim radarskim samonavođenjem, u čemu prednjači Rusija. Ruskim raketama R-37 i R-172, okvirnog dometa 300 km, u potencijalnim borbenim scenarijima više nego ikada ugroženi su elementi borbenog poretka, kao što su avioni AWACS ili avio-cisterne.

Za dejstvo na malim udaljenostima, odnosno za blisku manevarsku vazдушnu borbu, razvijene su i konstantno se usavršavaju rakete R-73, AIM-9X, ASRAAM, Iris-T, Piton 5, sa IC glavama za samonavođenje povećane osetljivosti i širokog ugla zahvata cilja, koje omogućuju lansiranje raketa iz svih rakursa i položaja aviona, dok im novi sistem upravljanja sa usmeravanjem potiska obezbeđuje izuzetnu agilnost tokom leta ka cilju. Radi maksimalnog iskorišćenja potencijala raketa ove klase, pilotska kacija sa nišanom predstavlja neizostavan deo opreme na savremenim višenamenskim borbenim avionima.

Aspekti modernizacije višenamenskih borbenih aviona

Modernizacija postojećih višenamenskih borbenih aviona danas se težišno odvija na temeljima tehničkih i tehnoloških dostignuća ostvarenih u razvoju poslednje, 5. generacije višenamenskih borbenih aviona. To je posebno izraženo u aspektima elektronske opreme i vatrene moći/naoružanja, a u manjoj meri performansi, konstrukcija i pogonskih grupa.

Sve ono što se razvija za 5. generaciju parcijalno se ugrađuje na avione 4. i 4.5 generacije. Tako se sa novim verzijama starijih aviona povećava procenat primene kompozitnih materijala. Osim benefita u konstruktivnoj masi aviona, koji stvaraju prostor za ugradnju nove opreme i integraciju naoružanja i unutrašnjih, kao i profilisanih gorivnih rezervoara (CFT – *Conformal Fuel Tanks*) veće mase, povećava se i resurs strukture aviona. Kako ne postoje mogućnosti za velike konstruktivne izmene koje bi smanjile radarsku uočljivost upotreba stela premaza je primarni element modernizacije u ovom aspektu.

Razvojem tehnologije materijala, koja je bila ključna za razvoj pogonskih grupa nove generacije bilo je moguće poboljšati i osobine postojećih tipova motora, što se reprezentuje kroz veći potisak i duže resurse. Ipak, i pored značajnih dobitaka u sili potiska, modernizovani avioni 4. generacije u najvećem broju slučajeva neće moći da postignu režim superkrstarenja inherentan 5. generaciji. Ugradnja izduvnika sa mogućnošću vektorisanja potiska i ostvarenja supermanevarabilnosti je realan proces, naročito u slučaju aviona ruske proizvodnje (MiG-35, Su-35BM).

Implementacija nove elektronske opreme identične onoj projektovanoj za avione 5. generacije čini postojeće tipove borbenih aviona 4. generacije i dalje aktuelnim i perspektivnim na tržištu, čime se njihova serijska proizvodnja produžava još najmanje jednu deceniju.

Ugradnjom AESA radara, mrežne, navigacijske i komunikacijske opreme, širokog spektra senzora novih generacija, opreme za elektronsko ratovanje i daljom digitalizacijom kabinskih prostora modernizovani avioni su u velikoj meri kompatibilni sa avionima 5. generacije.

Uz navedena poboljšanja ostvareni su i osnovni preduslovi efikasne integracije vazduhoplovnih ubojnih sredstava poslednje generacije. Zato danas praktično ne postoje razlike u asortimanu ubojnih sredstava modernizovanih aviona i aviona 5. generacije.

Modernizacija današnjih višenamenskih borbenih aviona više nije proces koji se odnosi samo na avione koji se duže vremena nalaze u operativnoj upotrebi. Brz razvoj elektronske opreme i naoružanja zahteva i odgovarajuću, brzu reakciju proizvođača i korisnika–naručioca zbog čega svaka naredna proizvodna serija aviona koji se nalaze u fazi proizvodnje uključuje niz novih karakteristika i mogućnosti. Tipični primeri su avioni Eurofajter, zajednički evropski proizvod, i francuski Rafal.

U tabeli 2 predstavljene su osnovne karakteristike savremenih višenamenskih borbenih aviona 4.5 i 5. generacije.

Tabela 2

Osnovne karakteristike savremenih višenamenskih borbenih aviona 4.5 i 5. generacije

	Evrofajter/ Tajfun	F-35	F/A-18E Super Hornet	SU-30MKI Flanker	MiG-35	F-16C Blok 50	Rafal	F/A-22 Raptor	JAS39C Gripen
Raspon krila	11,28 m	10,70 m	13,62 m	14,70 m	12,00 m	10,95 m	10,90 m	13,56 m	8,40 m
Dužina	15,99 m	15,70 m	18,38 m	21,90 m	17,32 m	15,96 m	15,30 m	18,92 m	14,10 m
Površina krila	51,20 m ²	42,70 m ²	46,45 m ²	62,00 m ²	38,00 m ²	50,00 m ²	46,00 m ²	78,04 m ²	25,54 m ²
Pogonska grupa	2 x 90 kN	178 kN	2 x 97,9 kN	2 x 125 kN	2 x 86,3 kN	130 kN	2x 75 kN	2x 169 kN	80,5 kN
Masa praznog	10,000 kg	12,020 kg	13,835 kg	17,000 kg	11,000 kg	10,500 kg	9,500 kg	19,500 kg	6,800 kg
Maks. poletna masa	21,000 kg	27,215 kg	29,938 kg	34,500 kg	22,700 kg	18,000 kg	26,000 kg	36,300 kg	14,000 kg
Masa u varijanti vazduh-vazduh	15,300 kg	16,500 kg	18,700 kg	24,900 kg	17,800 kg	13,200 kg	15,500 kg	26,000 kg	–
Performanse									
Maks. brzina (na visini)	Mah 2,0	Mah 1,6	Mah 1,8	Mah 2,3	Mah 2,4	Mah 1,9	Mah 1,8	Mah 2,0	Mah 2,0
Maks. brzina (na nivou mora)	Mah 1,0	Mah 1,0	Mah 1,0	Mah 1,2	Mah 1,2	Mah 1,2	Mah 1,0	Mah 1,2	Mah 1,1
Faktor opterećenja	+9/-3g	+9/-3g	+7,5/-3g	+9/-3g	+9/-3g	+9/-3g	+9/-3g	+9/-3g	+9/-3g
Unutrašnje gorivo	4,500 kg	8,165 kg	6,780 kg	9,640 kg	4,500 kg	3,500 kg	4,700 kg	8,300 kg	2,600 kg
Podvesne tačke	13	11	11	11	9	9	11	12	7
Rakete srednjeg dometa (MRAAM)	6	4	12	6	6	4	6	10	4
Rakete malog dometa (SRAAM)	4	2	2	4	4	4	2	2	2

Zaključak

Unapređenje višenamenskih borbenih aviona, kao najmasovnije i najbitnije kategorije borbenih aviona današnjice, odvija se putem razvoja novih tipova višenamenskih borbenih aviona i modernizacije postojećih tipova.

Oba procesa su podudarna u temeljnim aspektima i odvijaju se na istim tehničko-tehnološkim osnovama. Principijelno su isti i na Istoku i na Zapadu i realizuju se kroz aspekte konstrukcije, performansi, pogonskih grupa, elektronske opreme i vatrene moći/naoružanja. U okviru ovih aspekata izdvajaju se sledeće najbitnije karakteristike: povećanje udela primene kompozita, modularnost gradnje, stela osobine (konstrukcija), režim superkrstarenja, supermanevrabilnost (performanse), povećanje potiska, vektorisani potisak (pogonska grupa), ugradnja AESA radara, data-linkova, senzorske tehnike naprednih generacija (elektronska oprema), kao i razvoj i integracija ubojnih sredstava većeg dometa, preciznosti i razorne moći.

Navedeni aspekti su međusobno povezani i uslovljeni, jer poboljšanja u jednom aspektu impliciraju i omogućavaju napredak u drugom.

Sličan odnos uočava se i u relaciji 5. generacije borbenih aviona i aviona 4. i 4.5 generacije. Tehnička i tehnološka rešenja ostvarena u razvoju 5. generacije neizostavno i obavezno nalaze svoju primenu u programima modernizacije aviona prethodne generacije, čime se amortizuju i opravdavaju izuzetno visoki troškovi razvoja novih aviona.

Zbog ispoljenog visokog stepena kompatibilnosti novorazvijenih i modernizovanih aviona i posledično sličnih borbenih mogućnosti, aktuelizovano je pitanje opravdanosti nabavke prvobitno poručenog broja aviona 5. generacije.

Već sada veliki resursi postojećih višenamenskih borbenih aviona i stepen njihove pogodnosti za modernizaciju tokom životnog veka navode veliki broj korisnika na odluku o modernizaciji ili kupovini radikalno modernizovanih aviona istog tipa. Zato se može očekivati da će do razvoja novih višenamenskih borbenih aviona dolaziti više radi tehnološkog prodora nego radi potrebe za njihovim masovnim uvođenjem. Broj novih tipova višenamenskih borbenih aviona, koji će se pojaviti u narednoj deceniji, imaće tendenciju daljeg opadanja, nasuprot programima modernizacije koji će doživeti dodatnu ekspanziju.

Literatura

[1] Siladić, M.: Upravljanje resursima i vekom aviona i motora, BB Soft, Beograd, 2007.

[2] Herbst, W.: Supermaneuverability, Messerschmitt-Boelkow-Blohm GmbH Munich, 1984.

[3] Golan, J.: Thrust Vectoring, Air Forces Monthly, March 2008.

[4] Maoduš, D., Memon, G.: F-22 Raptor, Američki lovac za naredni vek, Aeromagazin, 4/98.

[5] Holpp, W.: The future of radar has begun, Military Technology, July 2006.

[6] Rendulić, Z., Mikić, A.: Razvoj savremenih borbenih aviona i aviona za obuku i njihova međusobna uslovljenost, Zbornik radova OTEH 2007.

[7] Vlačić, S.: Suštinske karakteristike višenamenskih borbenih aviona četvrte generacije, Zbornik radova OTEH 2007.

MERENJE PRELAZNIH OPTEREĆENJA NA DVA MODELA U AEROTUNELU T-38

Aleksandar Vitić, dipl. inž.
mr Marija Samardžić, dipl. inž.
Vojnotehnički institut

Rezime:

Pri ispitivanju modela u „rafalnom“ aerotunelu sa prekidnim dejstvom T-38, na Mahovim brojevima većim od 2, moraju se uzeti u obzir prelazne pojave koje se javljaju na početku i na kraju rada aerotunela. To su stanja kada su model i aerovaga izloženi velikim aerodinamičkim silama i momentima. Ova kombinovana opterećenja mogu oštetiti modele i aerovage, pa bi bilo potrebno unapred znati kolike se vrednosti očekuju za pojedine konfiguracije modela, kako bi se izvršio pravilan izbor aerovage i odgovarajućih materijala za izradu modela. U tu svrhu postoje dijagrami koji pružaju mogućnost procene ovih opterećenja. Dijagrami su dobijeni na osnovu ispitivanja nekoliko različitih modela na Mahovim brojevima većim od 2.

U radu su prikazana merenja prelaznih opterećenja na još dva modela, a rezultati su upoređeni sa već postojećim dijagramima.

Ključne reči: rafalni aerotunel, prelazna opterećenja, aerotunelski modeli, aerovage, šliren sistem.

MEASUREMENT OF TRANSIENT LOADS ON TWO MODELS

Summary:

The T-38 wind tunnel is a blowdown, intermittent-run type of wind tunnels. During model testing in the this type of wind tunnels, at Mach numbers higher than 2, transient loads which appear during the starting and stopping of the wind tunnel runs must be taken into consideration. These are the conditions when a model and the wind tunnel balance are exposed to large aerodynamic forces and moments. These combined loads can damage models and wind tunnel balances, and, for this reason, it is very important to determine them in advance for any particular model configuration so that an appropriate wind tunnel balance and materials for model manufacturing can be chosen. For that purpose there are graphs which give possibilities to estimate these loads. The graphs are based on experiments with a number of different models at Mach numbers higher than 2.

This paper gives the measurements of transient loads on two more models and the results are compared with the already existing graphs.

Key words: blowdown wind tunnel, transient loads, wind tunnel models, wind tunnel balances, Schlieren system.

Uvod

U toku primopredajnih ispitivanja u aerotunelu T-38 Vojnotehničkog instituta u Beogradu uočene su izvesne pojave koje se javljaju pri startu i zaustavljanju rada aerotunela na Mahovim brojevima većim od $M = 2$. Te pojave nazvane su „prelazna stanja“ u kojima se aerodinamičke sile i momenti znatno povećavaju u odnosu na kasnije vrednosti pri stacionarnim režimima strujanja. Ova stanja izazvana su pojavom normalnog udarnog talasa koji se iz „grla“ mlaznika premešta iza modela i koji, nažalost, nije normalan na osu modela već zaklapa izvestan ugao. To je razlog što dolazi do razlike u pritiscima na gornjaci i donjaci modela koja generiše sile i momente, a oni snažno pomeraju model iz njegove početne pozicije. Ova kombinovana opterećenja javljaju se i u ravni propinjanja i u ravni skretanja i toliko su velika da se moraju ozbiljno uzeti u obzir pri dizajniranju modela i izbora aerovage.

U radu su prikazani rezultati merenja prelaznih opterećenja na dva različita modela u aerotunelu T-38 na brzinama većim od $M = 2$. Dobijeni rezultati upoređeni su sa rezultatima dobijenim u ranijim ispitivanjima prelaznih opterećenja sa drugim modelima [1–4].

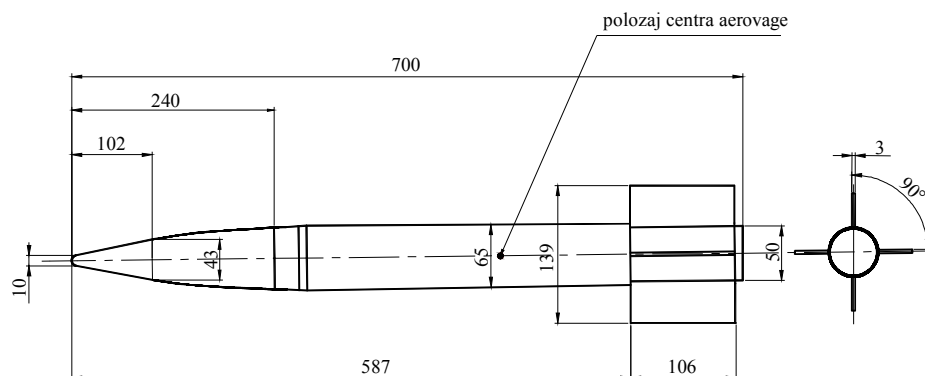
Eksperiment

Opis modela i aerovaga

U eksperimentu su korišćena dva modela: Model 1 iz test-programa GE2000 [5] i Model 2 iz test-programa GRAN40 [6].

Model 1 bio je montiran na aerovagu VTI40B i preko stinga prečnika 40 mm vezan za sistem koji služi za promenu napadnog ugla. Na slici 1 prikazana je skica ovog modela, a na slici 2 slika modela u radnom delu aerotunela T-38. Model je cilindričnog oblika sa oživalnim vrhom. Dužina modela je 700 mm, a prečnik 65 mm. Na kraju modela nalaze se pravougaona ili olučasta krila. Ispitivano je nekoliko različitih konfiguracija ovih krila.

Sl. 1 – Skica Modela 1 iz test-programa GE2000

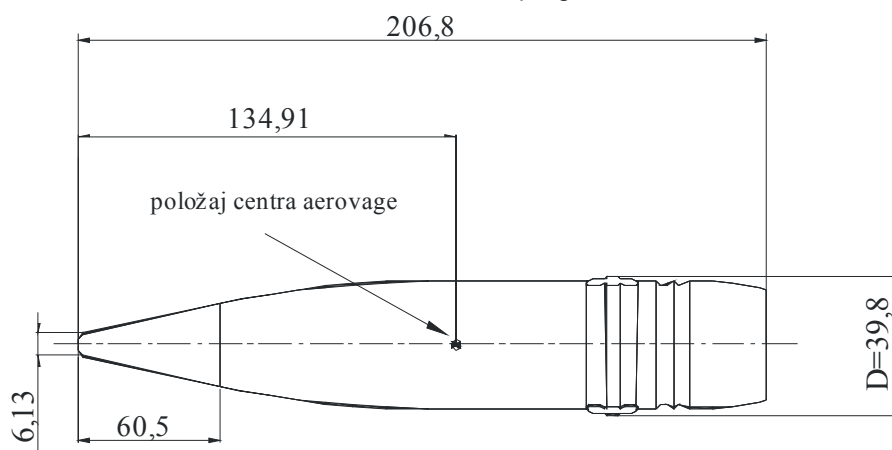


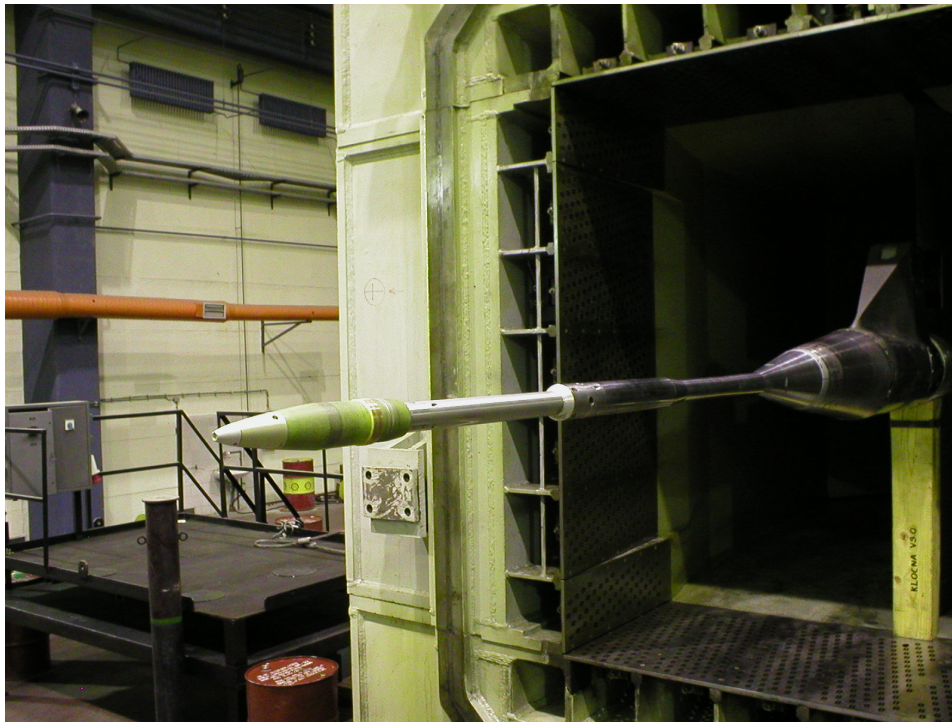


Sl. 2 – Model 1 sa olučastim krilima u radnom delu aerotunela T-38

Model 2 bio je montiran na aerovagu *ABLE 1" MK XXIII A* i preko stinga prečnika 32 mm vezan za sistem koji služi za promenu napadnog ugla. Skica modela sa osnovnim dimenzijama prikazana je na slici 3. Model je cilindričnog oblika sa oživalnim vrhom. Dužina modela je 206,8 mm, a prečnik 39,8 mm. Položaj centra aerovage smešten je na 134,91 mm od vrha modela.

Sl. 3 – Skica Modela 2 iz test-programa GRAN40





Sl. 4 – Model 2 u radnom delu aerotunela T-38

Opis aerotunela T-38

Aerotunel T-38 u VTI-u je prekidnog dejstva sa natpritiskom i radnim delom kvadratnog poprečnog preseka dimenzija 1,5 m x 1,5 m [7]. Opseg Mahovih brojeva koji se može postići u radnom delu je od 0,2 do 4,0 sa maksimalnim Reynoldsovim brojem do 115 miliona po metru. Regulacija i održavanje Mahovog broja je $\pm 0,3\%$ od zadate nominalne vrednosti. Zaustavni pritisak u radnom delu može biti održavan između 1,1 bar i 15 bara, što zavisi od Mahovog broja, dok je tačnost regulacije $\pm 0,3\%$ nominalne vrednosti. Dužina trajanja jednog ispitivanja (jednog "rafala") iznosi od 6 s do 60 s i zavisi od Mahovog broja i pritiska duvanja.

Instrumentacija i prikupljanje podataka

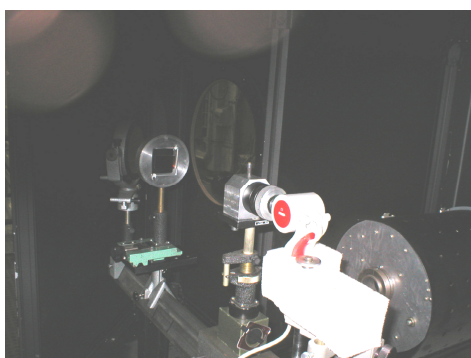
Potrebni pritisci mere se apsolutnim i diferencijalnim davačima tipa *Mensor* i *Druck* različitog opsega. Nelinearnost i histerezis ovih davača je oko 0,02% punog opsega.

Precizni davači pozicije, tzv. rizolveri, montirani su u mehanizam za promenu napadnog ugla i ugla valjanja. Tačnost sistema za očitavanje napadnog ugla je $\pm 0,05^\circ$, a za ugao valjanja $\pm 0,25^\circ$. Za merenje aerodinamičkih sila i momenata na Modelu 1 korišćena je šestokomponentna aerovaga *VTI40B*, koja je montirana na sting prečnika 40 mm. Njena tačnost je 0,25% punog opsega. Aerovaga je baždarena pre ovog ispitivanja. Za merenje aerodinamičkih sila i momenata na Modelu 2 korišćena je šestokomponentna aerovaga *ABLE 1" MK XXIIIA*, montirana na sting prečnika 32 mm, čija tačnost iznosi 0,3% punog opsega. Aerovaga je, takođe, baždarena pre testa. Sistem za prikupljanje podataka sastoji se od 64-kanalnog sistema tipa *Teledyne* pod kontrolom računara *PC Compaq*. Na svim analognim kanalima izabrano je odgovarajuće pojačanje i postavljeni su filteri odgovarajuće granične učestanosti. Podaci sa svih analognih kanala se digitalizuju *A/D* konvertorom rezolucije 16 bita. Svi kanali su očitavani istom brzinom od 400 podataka u sekundi.

Digitalizovani podaci primaju se na računar *Compaq Alpha Server DS20E* i zapisuju na disk za kasniju obradu.

Vizualizacija strujanja

Vizualizacija strujanja obavljena je sistemom Šliren, a slike su prikupljene na PC računaru koji se nalazi u kontrolnom centru aerotunela [8]. Sistem je takozvanog tipa Z sa paralelnim snopom svetlosti prečnika 900 mm. U svetlosnom kabinetu nalazi se ksenon lampa sa procepom i dva ravna ogledala, koji služe da usmere snop svetlosti na prvo kolimatorsko ogledalo žižne



Sl. 5 – Minijaturna Web kamera u prijemnom kabinetu sistema Šliren

daljine 7200 mm. Na drugoj strani aerotunela nalazi se veliko ravno skretno ogledalo prečnika 1300 mm i drugo kolimatorsko ogledalo iste žižne daljine kao i prvo. U prijemnom delu sistema nalaze se malo ravno ogledalo, filter u boji, mali teleskop za suženje snopa svetlosti i minijaturna Web kamera. Na slici 5 prikazana je Web kamera u prijemnom kabinetu sistema Šliren koji je instaliran u hali aerotunela T-38.

Obrada rezultata merenja

Obrada rezultata merenja u stacionarnom režimu strujanja

Obrada podataka u stacionarnom režimu strujanja vrši se posle svakog „rafala“, pri čemu se koristi standardni softverski paket *T38-APS* za obradu merenja u aerotunelima *VTI*. Obrada se izvodi u nekoliko faza:

- čitanje zabeleženih sirovih podataka, normalizacija i prevođenje u standardni format;
- određivanje parametara strujanja, tj. primarni merni sistem;
- određivanje položaja modela;
- određivanje aerodinamičkih koeficijenata u stacionarnom režimu strujanja.

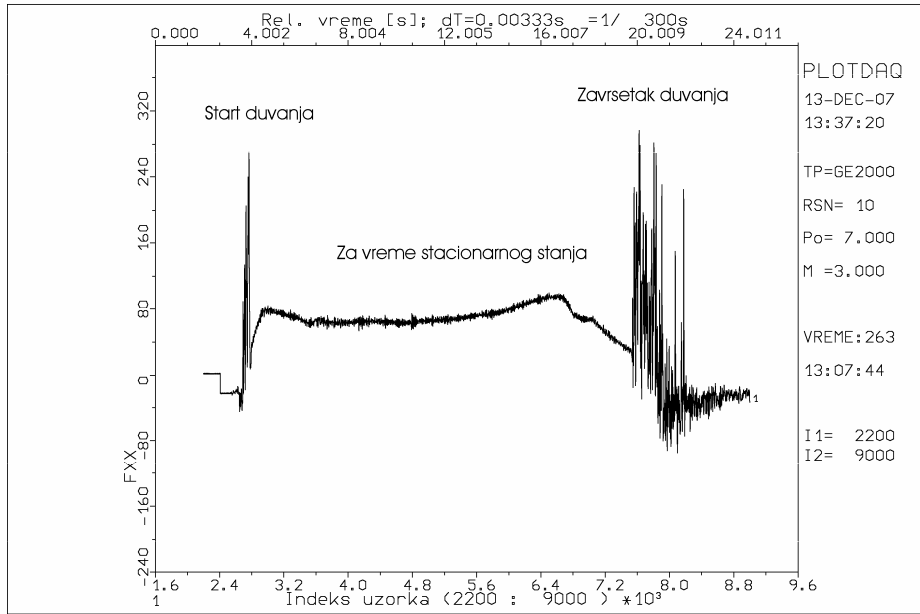
Svaka faza obrade izvodi se posebnim softverskim modulom.

Obrada rezultata merenja aerodinamičkih sila i momenata u prelaznom režimu

Obrada podataka u prelaznom režimu strujanja izvršena je na kraju celokupnog predviđenog test-programa. Na osnovu zabeleženih „sirovih“ podataka izrađeni su dijagrami, prikazani u primerima na slikama 6 i 7, gde se vide vrednosti sila i momenata u prelaznom, kao i u stacionarnom režimu strujanja izmereni aerovagom. Za svaki pojedinačni „rafal“, za oba modela, pročitane su vrednosti sila i momenata, a zatim su, korišćenjem jednačine 1–6, izračunati normalizovani koeficijenti. Svi podaci zapisani su u tabelama 1 i 2.

$$k_x = \frac{FXX}{S_x} \dots\dots 1) \quad k_y = \frac{FYY}{S_y} \dots\dots 2) \quad k_z = \frac{FZZ}{S_z} \dots\dots 3)$$

$$k_l = \frac{MXX}{BS_z} \dots\dots 4) \quad k_m = \frac{MYY}{LS_y} \dots\dots 5) \quad k_n = \frac{MZZ}{LS_z} \dots\dots 6)$$



Sl. 6 – Sila otpora (FXX) na Modelu 1 za vreme prelaznih i stacionarnih režima strujanja pri M = 3,0

Sl. 7 – Moment skretanja (MZZ) na Modelu 1 za vreme prelaznih i stacionarnih režima strujanja pri M = 3,0

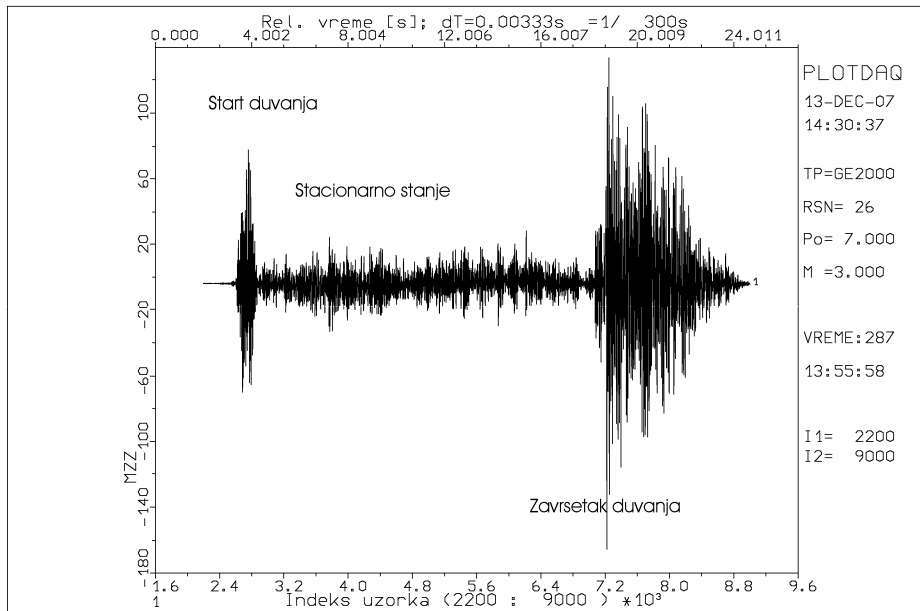


Tabela 1
Pregled sakupljenih podataka za merenje prelaznih opterećenja na Modelu 1

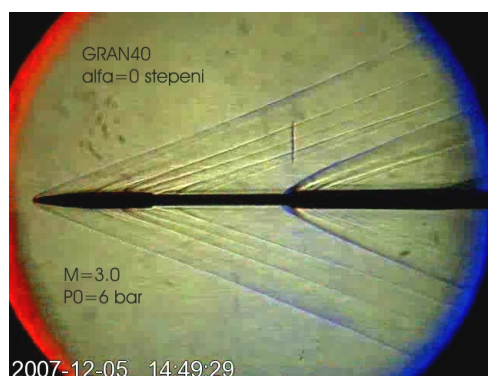
Redni broj	M	P ₀ [bar]	FXX [N]	FYY [N]	FZZ [N]	MXX [Nm]	MYZ [Nm]	MZZ [Nm]	k _x	k _y	k _z	k _i	k _m	k _n
8	2,5	4,0	320	1000	650	8	120	140	9,65	2,16	1,4	1,2	3,7	4,3
10	3,0	7,0	315	1200	1800	10	200	170	9,57	2,59	3,88	1,6	6,2	5,2
15	2,5	4,0	360	1200	1350	10	150	200	10,9	2,59	2,91	1,6	4,6	6,2
16	3,0	7,0	365	1200	2400	10	200	200	11,0	2,59	5,17	1,6	6,2	6,2
25	2,5	4,0	380	1650	800	18	140	120	11,5	3,56	1,73	2,8	4,3	3,7
26	3,0	7,0	470	1650	1600	16	180	170	14,2	3,56	3,45	2,5	6,2	3,2
28	2,5	4,0	360	1350	1000	12	160	140	10,9	2,90	2,20	1,9	4,9	4,3
27	3,0	7,0	400	1200	1300	10	200	200	12,1	2,59	2,80	1,6	6,2	6,2
40	2,5	4,0	370	1100	1600	16	120	140	11,2	2,37	3,45	2,5	3,7	4,3
41	3,0	7,0	360	1700	1600	12	160	200	10,9	3,66	3,45	1,9	4,9	6,2
48	2,5	4,0	420	1200	1400	10	120	200	12,7	2,59	3,02	1,6	3,7	6,2
47	3,0	7,0	320	1700	2000	12	160	200	9,65	3,66	4,30	1,9	4,9	6,2
56	2,5	4,0	380	1500	1200	12	140	120	11,5	3,23	2,59	1,9	4,3	3,7
57	3,0	7,0	320	1600	2400	12	200	170	9,65	3,45	5,17	1,9	6,2	5,2

Tabela 2
Pregled sakupljenih podataka za merenje prelaznih opterećenja na Modelu 2

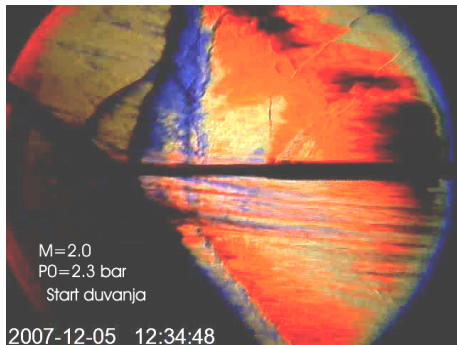
Red. broj	M	P ₀ [bar]	FXX [N]	FYY [N]	FZZ [N]	MYZ [Nm]	MZZ [Nm]	k _x	k _y	k _z	k _m	k _n
5	2,0	2,3	54	148	102	2,8	4,6	4,34	2,3	1,63	2,17	3,6
8	2,5	4,0	100	204	290	9,571	6,37	8,04	3,27	4,64	7,41	4,93
9	3,0	6,0	71	184	240	14,13	5,3	5,71	2,9	3,8	10,9	4,01
17	2,0	2,3	56	51	48	1,6	1,63	4,5	0,82	0,77	1,24	1,26
18	2,5	4,0	96	260	200	8,72	7,54	7,72	4,16	3,2	6,75	5,86
19	3,0	6,0	133	185	250	13,4	5,67	10,69	2,96	4,01	10,4	4,39

Analiza snimaka efekata vizualizacije strujanja

Prikazano je nekoliko snimaka Modela 2 snimljenih metodom Širen za vreme ispitivanja u aerotunelu T-38. Na slici 8 prikazan je snimak uzet za vreme strujanja u stacionarnom režimu strujanja kada je već bio uspostavljen Mahov broj $M=3$. U pitanju je Model 2 koji se u tom trenutku nalazio pri napadnom uglu od 0 stepeni. Na snimku se jasno vidi kosi udarni talas formiran i vezan za vrh modela. Izvan polja ovog talasa strujanje je uniformno bez ikakvog poremećaja.



Sl. 8 – Model 2 za vreme stacionarnog režima

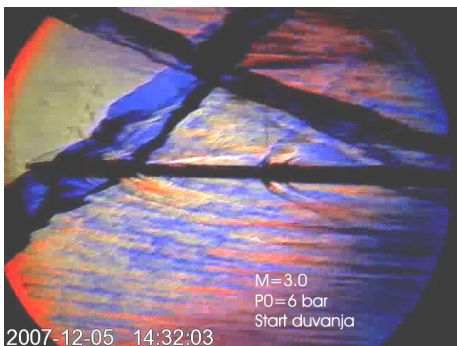


Sl. 9 – Model 2 za vreme prelaznog režima strujanja $M = 2$

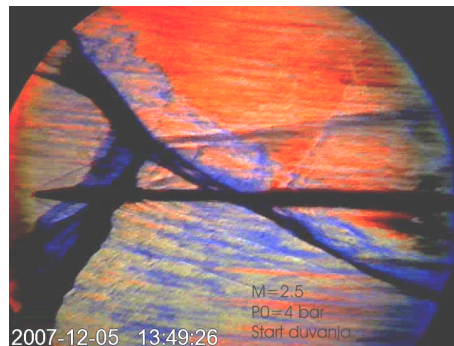
Na slici 9 prikazan je snimak iz rane faze formiranja strujanja u radnom delu aerotunela T-38 na Mahovom broju $M = 2$. Na snimku se uočava nadolazeći normalni udarni talas pod uglom koji zahvata model i unosi razliku u pritiscima na gornjaci i donjaci modela. Svuda oko modela strujanje je jako turbulentno.

Slika 10 i slika 11 takođe prikazuju Model 2 u ranoj fazi uspostavljanja strujanja, ali ovog puta pri Mahovim brojevima $M = 2,5$ i $M = 3$. Na slikama

se još jasnije uočavaju normalni udarni talasi koji nose diskontinuitet u pritiscima i koji zbog toga pomeraju model na jednu, odnosno drugu stranu.



Sl. 10 – Model 2 za vreme prelaznog režima strujanja pri $M = 2,5$



Sl. 11 – Model 2 za vreme prelaznog režima strujanja pri $M = 3,0$

Rezultati ispitivanja

Rezultati ispitivanja prikazani su na dijagramu na slici 12. Punom linijom su prikazani rezultati iz ranijih ispitivanja prelaznih opterećenja, a kvadratičima i kružićima rezultati dobijeni ispitivanjem Modela 1 i Modela 2.

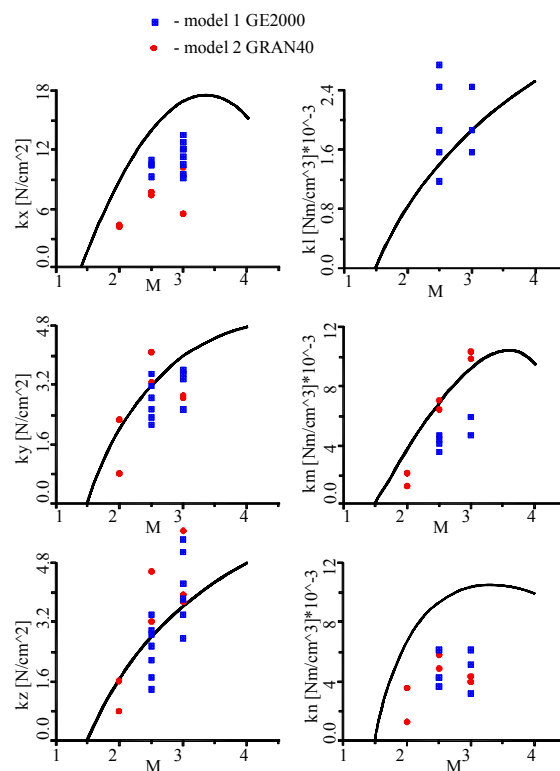
Za koeficijente normalizovane sile otpora može se reći da su, za oba modela i sve Mahove brojeve, u području očekivanih vrednosti. Isto važi i za normalizovane koeficijente momenta skretanja.

Izmereni normalizovani koeficijenti bočne sile i momenta propinjanja se, sa izuzetkom nekoliko tačaka, nalaze, takođe, u području gde se i očekuju.

Jedna polovina koeficijenata normalne sile nalazi se izvan očekivanog područja, dok je druga polovina unutar njega. Za naredne modele

koji se budu ispitivali pri supersoničnim brzinama izvan 2 Maha ovi dobijeni podaci se moraju ozbiljno uzeti u obzir.

Normalizovan koeficijent momenta valjanja za Model 2 bio je nula, jer taj model nije imao krila. Dobijeni rezultati za Model 1 pokazuju da su veći od očekivanih, što se može objasniti činjenicom da su kod ovog modela krila, olučasta ili pravougaona, bila dosta velika.



Sl. 12 – Rezultati ispitivanja Modela 1 i Modela 2 u aerotunelu T-38

Zaključak

Kao i ranija ispitivanja prelaznih opterećenja i ova su dala vrlo korisne kvalitativne i kvantitativne podatke u razjašnjavanju pojava koje se javljaju pri startu i zaustavljanju rada aerotunela na Mahovim brojevima preko 2. U pripremljivoj fazi, pri izboru aerovage i veličine modela koji treba da bude ispitan na velikim supersoničnim brzinama, dobijeni podaci se moraju vrlo ozbiljno uzeti u obzir.

Korišćene oznake

M_∞		Mahov broj u radnom delu aerotunela
V	m/s	Brzina neporemećene struje
P_o	bar	Zaustavni pritisak u radnom delu aerotunela
P_{st}	bar	Statički pritisak u radnom delu aerotunela
T_o	K	Zaustavna temperatura u radnom delu aerotunela
k_x	$\frac{N}{cm^2}$	Normalizovana vrednost sile otpora u prelaznom režimu strujanja
k_y	$\frac{N}{cm^2}$	Normalizovana vrednost bočne sile u prelaznom režimu strujanja
k_z	$\frac{N}{cm^2}$	Normalizovana vrednost normalne sile u prelaznom režimu strujanja
k_l	$\frac{Nm}{cm^3} \cdot 10^{-3}$	Normalizovana vrednost momenta valjanja u prelaznom režimu strujanja
k_m	$\frac{Nm}{cm^3} \cdot 10^{-3}$	Normalizovana vrednost momenta propinjanja u prelaznom režimu strujanja
k_n	$\frac{Nm}{cm^3} \cdot 10^{-3}$	Normalizovana vrednost momenta skretanja u prelaznom režimu strujanja
F_{XX}	N	Vrednost aksijalne sile u prelaznom režimu strujanja
F_{YY}	N	Vrednost bočne sile u prelaznom režimu strujanja
F_{ZZ}	N	Vrednost normalne sile u prelaznom režimu strujanja
M_{XX}	Nm	Vrednost momenta valjanja u prelaznom režimu strujanja
M_{YY}	Nm	Vrednost momenta propinjanja u prelaznom režimu strujanja
M_{ZZ}	Nm	Vrednost momenta skretanja u prelaznom režimu strujanja
S_X	cm^2	Frontalna površina modela
S_Y	cm^2	Bočna površina modela
S_Z	cm^2	Površina u planu modela
L	cm	Ukupna dužina modela
B	cm	Razmah modela
RSN		Redni broj duvanja
∞		Oznaka za parametre neporemećenog strujanja

Literatura

- [1] Vuković, Đ.: Definisane prelaznih opterećenja pri ispitivanju u aerotunelu T-38 VTI, interni izveštaj V3-2264-O, Vojnotehnički institut, Beograd, 1984.
- [2] Vuković, Đ.: Ispitivanje prelaznih opterećenja u aerotunelu T-38 VTI, interni izveštaj V3-2404-I, Vojnotehnički institut, Beograd, 1986.
- [3] Vuković, Đ.: Istraživanje prelaznih opterećenja u aerotunelu T-38 koničnim modelom i aerovagom ABLE MK XXV, VTI interni izveštaj V3-2464-I, Vojnotehnički institut, Beograd, 1986.
- [4] Vuković, Đ.: Analiza rezultata ispitivanja prelaznih opterećenja u aerotunelu T-38 VTI, interni izveštaj V3-2550-O, Vojnotehnički institut, Beograd, 1988.
- [5] Vitić, A.: Ispitivanje olučastih krila na modelu GE2000 pri brzinama od 0,5 do 3,0 Maha u aerotunelu T-38 VTI, interni izveštaj V3-2873-I, Vojnotehnički institut, Beograd.
- [6] Samardžić, M.: Ispitivanje granate prečnika 40 mm u aerotunelu T-38 VTI, interni izveštaj V3-2982-I, Vojnotehnički institut, Beograd.
- [7] Elfstrom, G.M., Medved, B.: The Yugoslav 1,5 m Trisonic Blowdown Wind Tunnel, AIAA Paper 86-0746-CP.
- [8] Vuković, Đ., Vitić A.: Modernizacija Šliren sistema u aerotunelu T-38 VTI, interni izveštaj V3-2981-A, Vojnotehnički institut, Beograd.

OPTIMIZACIJA OBLIKA KOMANDNIH POVRŠINA RAKETE

Pukovnik mr *Zoran Rajić*, dipl. inž.
Uprava za odbrambene tehnologije MO

Rezime:

U radu je prikazan jedan od rezultata istraživanja u oblasti optimizacije procesa preliminarnog aerodinamičkog proračuna raketa. Opisana je proces dobijanja optimalnog oblika komandnih površina rakete, u okviru preliminarnog aerodinamičkog proračuna raketa.

Posebna pažnja posvećena je definisanju funkcije cilja na nov način, tako da svako odstupanje od njene maksimalne vrednosti nedvosmisleno i očigledno ukazuje na to koja se od zadatih ciljnih veličina i u kojoj meri ne dostiže, odnosno da izabrani oblik rakete ne obezbeđuje u potpunosti sve unapred postavljene ciljeve.

Ključne reči: raketa, preliminarni aerodinamički proračun, aerodinamički koeficijent, optimizacija, funkcija cilja.

OPTIMIZATION OF THE ROCKET COMMANDING SURFACES

Summary:

The paper presents one of the author's research results in the field of the preliminary aerodynamic optimization process.

The optimal shape of commanding surfaces is obtained and described within the preliminary rocket aerodynamic estimation.

Special attention is paid to defining the target function in a new manner, such that every deviation from the target function maximum value clearly and obviously points out which of target values is not attained and to what extent, i.e. that the chosen rocket shape does not completely provide for all previously set goals.

Key words: blowdown wind tunnel, transient loads, wind tunnel models, wind tunnel balances, Schlieren system.

Uvod

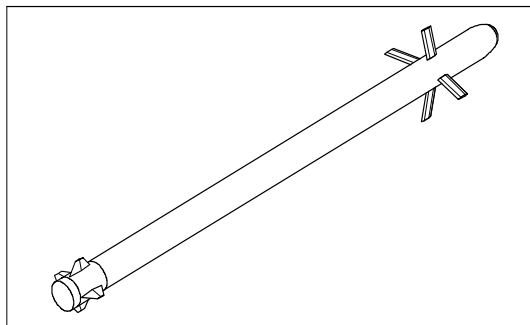
Realizacija projekta podrazumeva realizaciju niza različitih aktivnosti, počevši od istraživanja, projektovanja, proizvodnje funkcionalnog modela, prototipa, nulte serije, serijske proizvodnje, ispitivanja, kontrole kvaliteta, uvođenja u eksploataciju, do obezbeđenja u toku eksploatacije.

Projektovanje, kao jedna od aktivnosti u procesu realizacije projekta, obuhvata realizaciju čitavog niza podaktivnosti koje treba na skladan na-

čin povezati radi postizanja vrhunskih performansi tehničkih sistema koji su predmet projektovanja.

Preliminarno aerodinamičko projektovanje, kao podaktivnost u fazi projektovanja, jeste iterativan proces koji počinje inicijalnim definisanjem oblika (geometrije), a završava se postizanjem unapred zadatih aerodinamičkih ciljeva, uz istovremeno zadovoljenje svih postavljenih ograničenja. Sa aspekta ekonomičnosti poželjno je da traje što kraće.

Predmet ovog rada je optimizacija procesa preliminarnog aerodinamičkog projektovanja usvojenog koncepta komandnih površina rakete (slika 1).



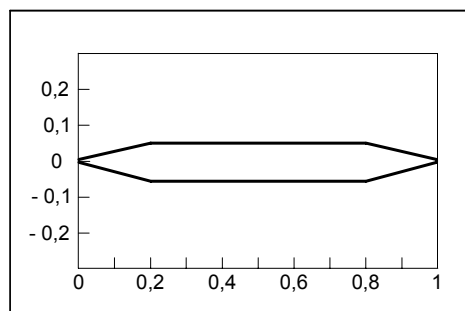
Sl. 1 – Usvojeni koncept rakete

Početo definisanje geometrije

Početo definisanje geometrije komandnih površina rakete sledi odmah nakon usvajanja koncepta rakete i predstavlja ulaznu veličinu u proces aerodinamičkog proračuna.

Početa geometrija je, radi optimizacije, definisana tako što su za pojedine geometrijske veličine a priori usvojene dimenzije, a ostale veličine su tretirane kao promenljive (varijabilne).

U slučaju komandnih površina rakete prva dilema jeste izbor najpogodnijeg aeroprofila, koji predstavlja kompromis između aerodinamičkih i konstrukcionih zahteva. U konkretnom slučaju, za izabranu konfiguraciju rakete i predviđene uslove leta ($0 \leq M \leq 1,8$) optimalni oblik aeroprofila komandnih površina prikazan je na slici 2.



Sl. 2 – Aeoprofil komandne površine

Ovi aeroprofilu obezbeđuju strujanje kroz kose i ekspanzione udarne talase, čime smanjuju talasni otpor u nadzvučnom strujnom polju i daju manji doprinos ukupnom aerodinamičkom otporu rakete. Zbog smanjenja talasnog otpora i izravnavanja krive uzgona u transsoničnim uslovima leta izabrane su komandne povr-

šine rakete sa pozitivnim uglom strele (θ). Vrednost ugla strele, kao i suženje komandne površine ($\frac{c_t}{c_r}$), nije a priori određena, nego će biti razmatrana u okviru aerodinamičkog proračuna.

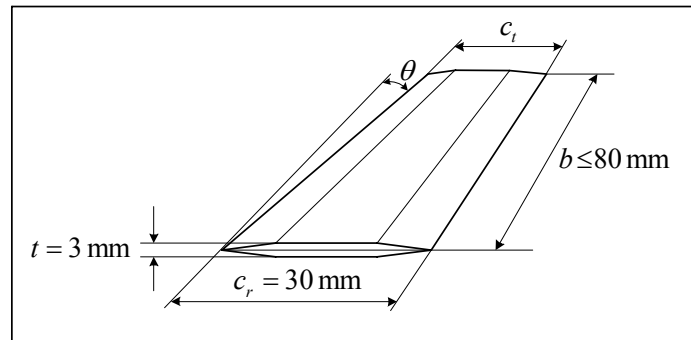
Radi optimizacije procesa preliminarnog aerodinamičkog proračuna rakete dužina tetive aeroprofila u korenu komandne površine određena je na osnovu iskustva, $(c_r)_c = 30$ mm. Kako se radi o malim uzgonskim površinama, radi fabrikacije, ograničena je i maksimalna relativna debljina aeroprofila

komandnih površina na $\left(\frac{t}{c_r}\right)_{\max}^c = 0,1$, a radijus napadnih i izlaznih ivica komandnih površina je limitiran na $r_l = r_i = 0,3$ mm. Radi zadovoljenja uslova

stabilnosti rakete u zadatom dijapazonu brzina ($M \leq 1,8$), pomeranje centra pritiska na komandnoj površini biće ograničeno na $\left(\frac{x_{CP}}{c_r}\right)_{\Delta} \leq 0,25$.

Zbog smeštaja komandnih površina u trupu rakete u sklopljenom položaju polurazmah jedne komandne površine može maksimalno da iznosi $b = 80$ mm.

Pregled unapred definisanih geometrijskih veličina (fiksni) i geometrijskih veličina koje proračunom treba da se odrede kako bi se zadovoljili unapred postavljeni ciljevi prikazan je na slici 3.



Sl. 3 – Početne geometrijske veličine komandnih površina

Aerodinamički proračun

Aerodinamički proračun vrši se raspoloživim, pogodno izabranim kompjuterskim programima, radi dobijanja željenih izlaznih veličina zadovoljavajuće tačnosti. Izlazne veličine najčešće su: koeficijenti uzgona, ot-

pora, momenata, pritiska, zatim raspored aerodinamičkog opterećenja po površini tela, relativno pomeranje centra pritiska, parametri strujanja u željenim tačkama strujnog polja, itd.

Na osnovu definisanih geometrijskih parametara komandnih površina, varijacijom promenljivih θ , b i c_t , biće izvršen njihov aerodinamički proračun upotrebom kompjuterskog programa WAC, razvijenog u Vojnotehničkom institutu.

Ulazni podaci u ovaj program su: geometrijske veličine tela, Mahov broj leta, broj napadnih uglova i korak za napadni ugao. Izlazni podaci iz programa WAC, značajni za ovaj rad, jesu: koeficijent normalne sile C_N i relativno pomeranje centra pritiska $\frac{x_{CP}}{c_r}$, u funkciji napadnog ugla. Izlazni

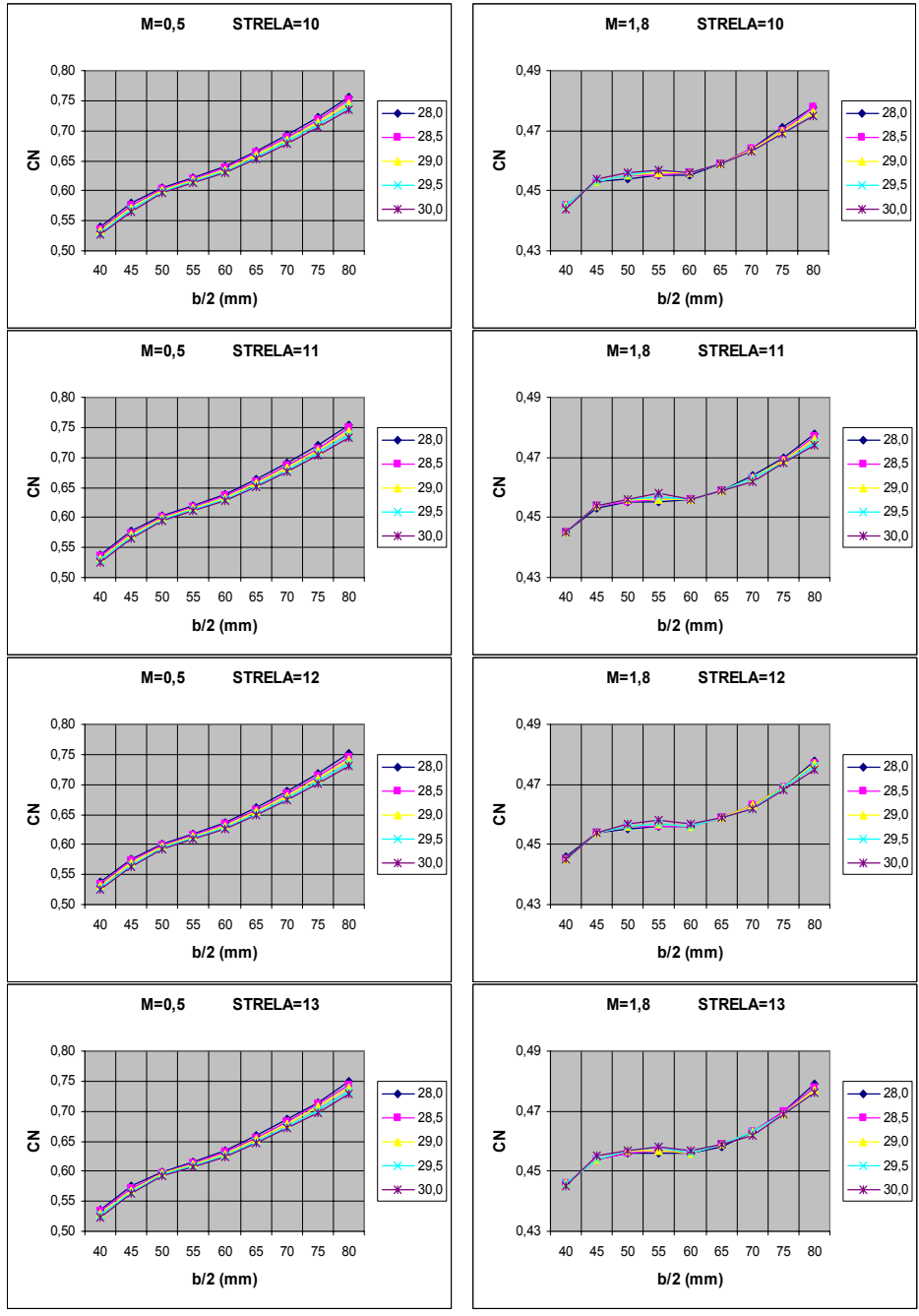
podaci i njima odgovarajući ulazni podaci formiraju bazu podataka.

Zbog malih dimenzija komandnih površina i male relativne debljine aeroprofila, kao i ispunjenja uslova čvrstoće konstrukcije, vrednost dužine tetive na kraju komandnih površina c_t limitirana je na 28 mm. Kako se sa povećanjem strele komandnih površina smanjuje maksimalni koeficijent uzgona, a zbog potrebe da koeficijent uzgona bude dovoljno veliki zbog efikasnosti komandnih površina, ugao strele (θ) ograničen je na 13° . Ugao strele napadne ivice komandnih površina ograničen je i zbog izbegavanja mogućnosti preopterećenja konstrukcije krajeva komandnih površina, pošto se sa povećanjem strele povećava i opterećenje na krajevima (tabela 1).

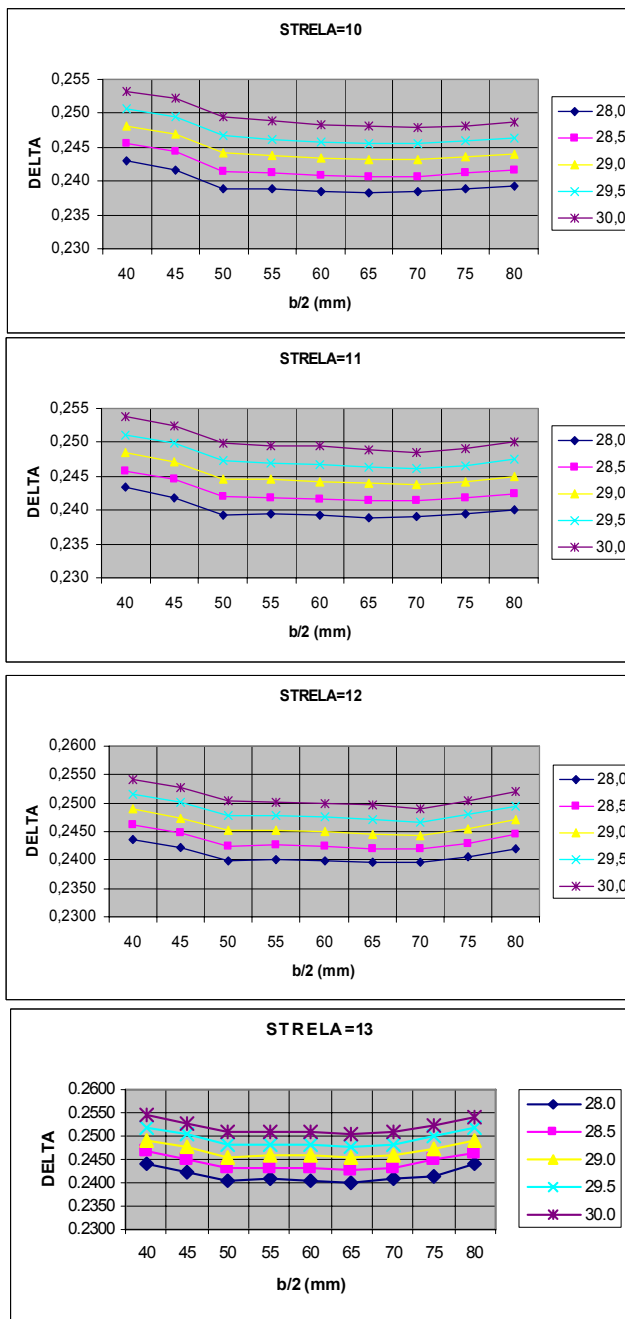
Tabela 1

Veličina	Fiksna	Promenljiva
θ		$0^\circ-13^\circ$
b		0,040–0,080 m
S		0,002320–0,004640 m ²
λ		2,759–5,517
c_r	0,030 m	
c_t		0,028–0,030 m
c_t/c_r		0,9333–1,0
t	0,003 m	
t/c_r	0,1	

Grafička interpretacija rezultata proračuna u okolini optimalnog rešenja prikazana je na dijagramima 1 i 2. Koeficijent normalne sile je C_N , a Δ je relativno pomeranje centra pritiska (x_{cp}/c_r) u dijapazonu brzina $0,5 \leq M \leq 1,8$.



Dijagram 1 – Promena C_N u funkciji $b/2$, M , θ i c_t



Dijagram 2 – Promena Δ u funkciji $b/2$, θ i c_t

Optimizacija oblika – definisanje funkcije cilja

Sledeći korak je izbor optimalnog rešenja, tj. optimalnog oblika komandnih površina, koji zadovoljava funkciju cilja. Radi njegovog pojednostavljenja funkcija cilja je definisana na nov način, kao parabolična funkcija geometrijskih parametara, proračunom dobijenih adekvatnih aerodinamičkih veličina i pogodno izabranih koeficijenata. Vrednost funkcije cilja (f) izračunata je za nadzvučni režim leta ($M = 1,8$).

Funkcija cilja definisana je u sledećem obliku:

$$f\left(M, C_N, \frac{b}{2}, \Delta\right) = f_1(C_N) + f_2\left(\frac{b}{2}\right) + f_3(\Delta) \quad (1)$$

gde su f_1 , f_2 , i f_3 komponente funkcije cilja koje predstavljaju doprinos koeficijenta normalne sile (C_N), polurazmaha $\left(\frac{b}{2}\right)$ i relativnog pomeranja centra pritiska (Δ) ukupnoj vrednosti funkcije cilja, respektivno:

$$f = -\omega_1 \tau_{C_N} (C_N^* - C_N)^2 - \omega_2 \tau_b \left(\left(\frac{b}{2}\right)^* - \frac{b}{2} \right)^2 - \omega_3 \tau_\Delta (\Delta^* - \Delta)^2 \quad (2)$$

Maksimalna vrednost funkcije cilja odgovara optimalnom rešenju, odnosno optimalnom obliku komandne površine. Veličine označene zvezdicom (*) jesu ciljne veličine, određene na osnovu eksperimentalnih i teorijskih saznanja:

$$C_N^*(M = 1,8) = 0,48, \left(\frac{b}{2}\right)^* = 0,05 \text{ m}, \Delta^* = \left(\frac{x_{CP}}{c_r}\right)^* = 0,244 \quad (3)$$

Odstupanje f_1 , f_2 i f_3 od maksimalne vrednosti (0,00) ukazuje na stepen odstupanja $C_N, \frac{b}{2}, \Delta$ od ciljnih vrednosti $C_N^*, \left(\frac{b}{2}\right)^*, \Delta^*$, respektivno.

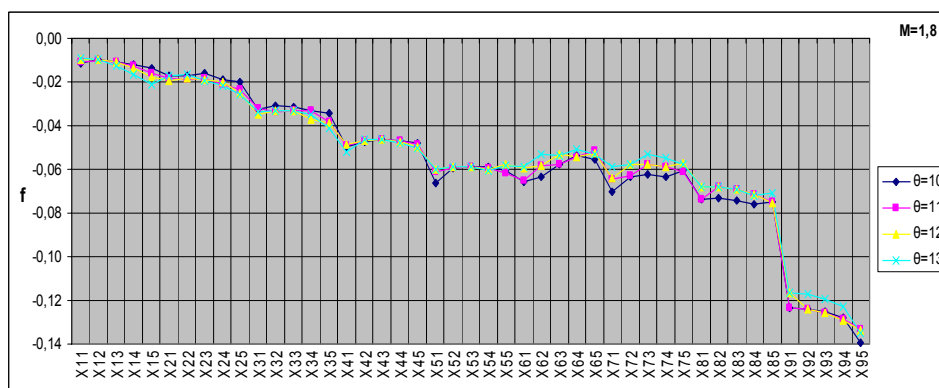
Proizvoljnim izborom težinskih koeficijenata $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = 100$ obezbeđuje se željeni red veličina pojedinih komponenti funkcije cilja (f_1, f_2, f_3), a samim tim i cele funkcije cilja.

Izborom koeficijenta značajnosti $\tau_{CN}, \tau_b, \tau_\Delta$ definiše se značaj (uti-caj) pojedinačnih komponenti funkcije cilja (f_1, f_2, f_3) na ukupnu vred-nost funkcije cilja (f) i time svesno daje prioritet pojedinim promenljivim u dostizanju željenih vrednosti.

S obzirom na to da je podjednako značajno da izabrana geometrija komandne površine rakete obezbedi relativno pomeranje centra pritiska manje od 0,25 (izabrano je ciljno pomeranje $\Delta^* = 0,244$) i dostizanje cilj-ne vrednosti koeficijenta normalne sile ($C_N^* = 0,48$), a kako nije neop-hodno da polurazmah bude $\left(\frac{b}{2}\right)^* = 50$ mm (jedino je potrebno da bude manji ili jednak 80 mm), definisane su sledeće vrednosti koeficijenta značajnosti:

$$\tau_\Delta = 1, \quad \tau_{CN} = 1, \quad \tau_b = 0,1 \quad (4)$$

Koristeći vrednosti (3), (4) i podatke iz baze podataka, upotrebom iz-raza (2), za zadata ograničenja, izračunate su vrednosti funkcije cilja, čija je grafička interpretacija prikazana na dijagramu 3.

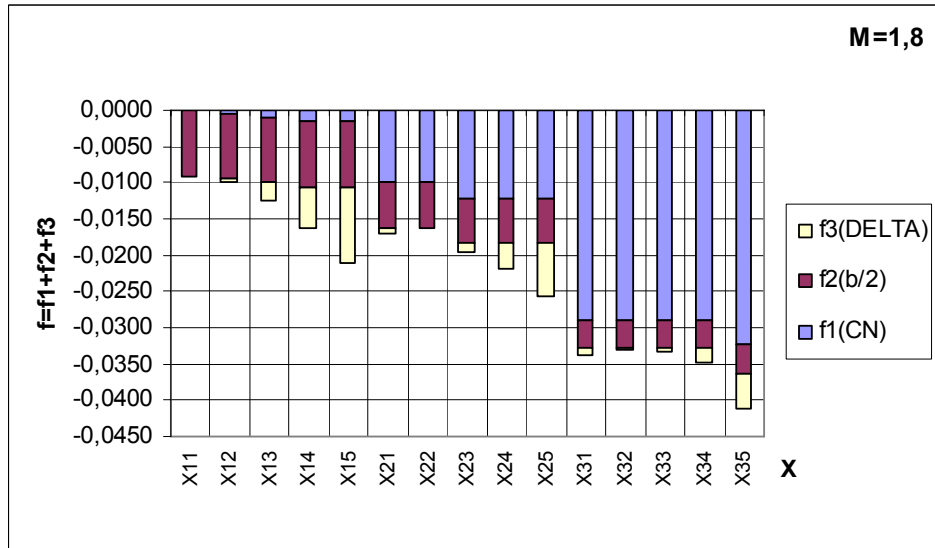


Dijagram 3 – Promena funkcije cilja u funkciji X i θ

S obzirom na oblik funkcije, svrsishodno je analizirati funkciju cilja u okolini promenljive X12 (dijagram 4).

Za uvedena ograničenja $\frac{b}{2} \leq 80$ mm i $c_t \geq 28$ mm, maksimalna vrednost funkcije cilja ($f_{\max} = -0,0091$) odgovara promenljivoj $X_{11} = X_{OPT}$, za koju je:

$$c_r = 30 \text{ mm}, c_t = 28 \text{ mm}, \frac{b}{2} = 80 \text{ mm}, \theta = 13^\circ, \frac{t}{c_r} = 0,1 \quad (5)$$



Dijagram 4 – Dopinos komponenata funkcije cilja njenoj ukupnoj vrednosti

Dobijeno rešenje obezbeđuje relativno pomeranje centra pritiska $\Delta = 0,2439$ (željeno pomeranje je $\Delta^* = 0,2440$) i koeficijent uzgona $C_N = 0,479$ pri $M = 1,8$, što je skoro jednako željenom $C_N^* = 0,48$ (tabela 2).

Tabela 2

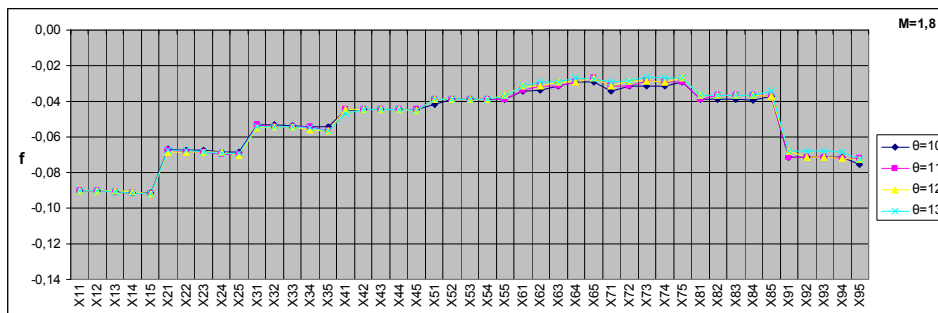
Ograničenja	Željene vrednosti	Koeficijenti značajnosti	Optimalno rešenje (X_{11})	Dobijene vrednosti
$\frac{b}{2} \leq 80 \text{ mm}$ $c_t \geq 28 \text{ mm}$ $\theta \leq 13^\circ$ $\frac{t}{c_r} = 0,1$ $c_r = 30 \text{ mm}$ $\Delta \leq 0,25$	$\left(\frac{b}{2}\right)^* = 50 \text{ mm}$ $C_N^* = 0,48$ $\Delta^* = 0,244$	$\tau_b = 0,1$ $\tau_{CN} = 1$ $\tau_\Delta = 1$	$\frac{b}{2} = 80 \text{ mm}$ $c_t = 28 \text{ mm}$ $\theta = 13^\circ$ $\frac{t}{c_r} = 0,1$ $c_r = 30 \text{ mm}$	$C_N = 0,479$ $\Delta = 0,2439$

Upravo zbog toga što nisu u potpunosti dostignute sve željene vrednosti, funkcija cilja nema svoju maksimalnu vrednost (0), nego nešto manju (-0,0091).

Sa dijagrama 4 se vidi da najvećeg udela u odstupanju vrednosti funkcije cilja od svoje maksimalne vrednosti ima polurazmah ($b/2$), dok je uticaj relativnog pomeranja centra pritiska (Δ) i koeficijenta normalne sile (C_N) skoro zanemarljiv. To je logičan rezultat s obzirom na to da je unapred definisan željeni polurazmah bio $\left(\frac{b}{2}\right)^* = 0,05$ m, a dobijeno je optimalno rešenje $b/2 = 0,08$ m. Ovoliko odstupanje od željenog rešenja nije greška, jer je značaj dostizanja $\left(\frac{b}{2}\right)^*$ bio samo 10% u odnosu na C_N^* i Δ^* (100%).

Radi analize funkcije cilja biće razmotreno još nekoliko slučajeva.

Da je, na primer, favorizovan značaj polurazmaha $\left(\frac{b}{2}\right)^* = 0,05$ m (100%), zatim $C_N^* = 0,48$ (50%) i $\Delta^* = 0,244$ (10%), maksimalna vrednost funkcije cilja bila bi $\max f(X_{73}) = -0,0053$, za $X_{73} = X_{OPT}$ (dijagram 5).



Dijagram 5 – Promena funkcije cilja u funkciji X i θ

Dobijeno optimalno rešenje ($\frac{b}{2} = 50$ mm i $c_t = 29$ mm) i vrednosti za $C_N = 0,457$ i $\Delta = 0,2456$ logična su posledica definisanih koeficijentata značajnosti i željenih vrednosti. S obzirom na to da je prioritet dat

dostizanju željenog polurazmaha ($\tau_b = 1$), a da je od sekundarnog značaja bilo dostizanje željenog koeficijenta normalne sile C_N ($\tau_{CN} = 0,5$) i relativnog pomeranja centra pritiska Δ ($\tau_\Delta = 0,1$), rezultat je očekivan (tabela 3).

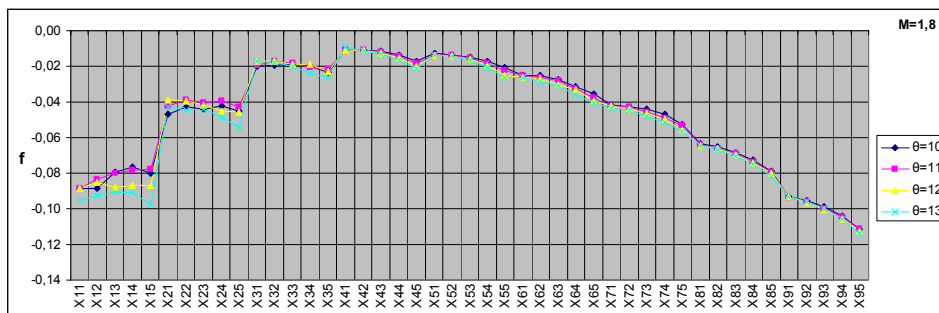
Tabela 3

Ograničenja	Željene vrednosti	Koeficijenti značajnosti	Optimalno rešenje (X_{73})	Dobijene vrednosti
$\frac{b}{2} \leq 80 \text{ mm}$ $c_t \geq 28 \text{ mm}$ $\theta \leq 13^\circ$ $\frac{t}{c_r} = 0,1$ $c_r = 30 \text{ mm}$	$\left(\frac{b}{2}\right)^* = 50 \text{ mm}$ $C_N^* = 0,48$ $\Delta^* = 0,244$	$\tau_b = 1$ $\tau_{CN} = 0,5$ $\tau_\Delta = 0,1$	$\frac{b}{2} = 50 \text{ mm}$ $c_t = 29 \text{ mm}$ $\theta \leq 13^\circ$ $\frac{t}{c_r} = 0,1$ $c_r = 30 \text{ mm}$	$C_N = 0,457$ $\Delta = 0,2456$

U slučaju da su sve željene vrednosti istog prioriteta i da su definisane kao u tabeli 4, funkcija cilja imala bi svoj maksimum $\max f(X_{41}) = -0,0089$ (dijagram 6), a optimalno rešenje bilo bi $X_{41} = X_{OPT}$.

Tabela 4

Ograničenja	Željene vrednosti	Koeficijenti značajnosti	Optimalno rešenje (X_{41})	Dobijene vrednosti
$\frac{b}{2} \leq 80 \text{ mm}$ $c_t \geq 28 \text{ mm}$ $\theta \leq 13^\circ$ $\frac{t}{c_r} = 0,1$ $c_r = 30 \text{ mm}$	$\left(\frac{b}{2}\right)^* = 70 \text{ mm}$ $C_N^* = 0,45$ $\Delta^* = 0,24$	$\tau_b = 1$ $\tau_{CN} = 1$ $\tau_\Delta = 1$	$\frac{b}{2} = 65 \text{ mm}$ $c_t = 28 \text{ mm}$ $\theta \leq 13^\circ$ $\frac{t}{c_r} = 0,1$ $c_r = 30 \text{ mm}$	$C_N = 0,458$ $\Delta = 0,2401$

Dijagram 6 – Promena funkcije cilja u funkciji X i θ

Zbirni pregled promenljivih i njima odgovarajućih rezultata proračuna u okolini optimalnog rešenja prikazan je u tabeli 5.

Tabela 5

Promenljiva	Geometrijski parametri komandnih površina rakete					
	$b/2$	ct	cr	ct/cr	S	λ
X_{11}	0,0800	0,0280	0,0300	0,9333	0,004640	5,517
X_{12}	0,0800	0,0285	0,0300	0,9500	0,004680	5,470
X_{13}	0,0800	0,0290	0,0300	0,9667	0,004720	5,424
X_{41}	0,0650	0,0280	0,0300	0,9333	0,003770	4,483
X_{42}	0,0650	0,0285	0,0300	0,9500	0,003803	4,444
X_{43}	0,0650	0,0290	0,0300	0,9667	0,003835	4,407
X_{72}	0,0500	0,0285	0,0300	0,9500	0,002925	3,419
X_{73}	0,0500	0,0290	0,0300	0,9667	0,002950	3,390
X_{74}	0,0500	0,0295	0,0300	0,9833	0,002975	3,361

Sličnom varijacijom ograničenja, željenih vrednosti i koeficijenata značajnosti može se zaključiti da se upotrebom izraza za funkciju cilja, u obliku (2), lako dolazi do optimalnog rešenja.

Ukoliko postoji odstupanje maksimuma funkcije cilja od nule, jednostavnom analizom pojedinačnih komponenti funkcije cilja i odgovarajućom korekcijom obezbeđuje se brza konvergencija ka optimalnom rešenju.

Rezultati proračuna komandnih površina rakete programom WAC:

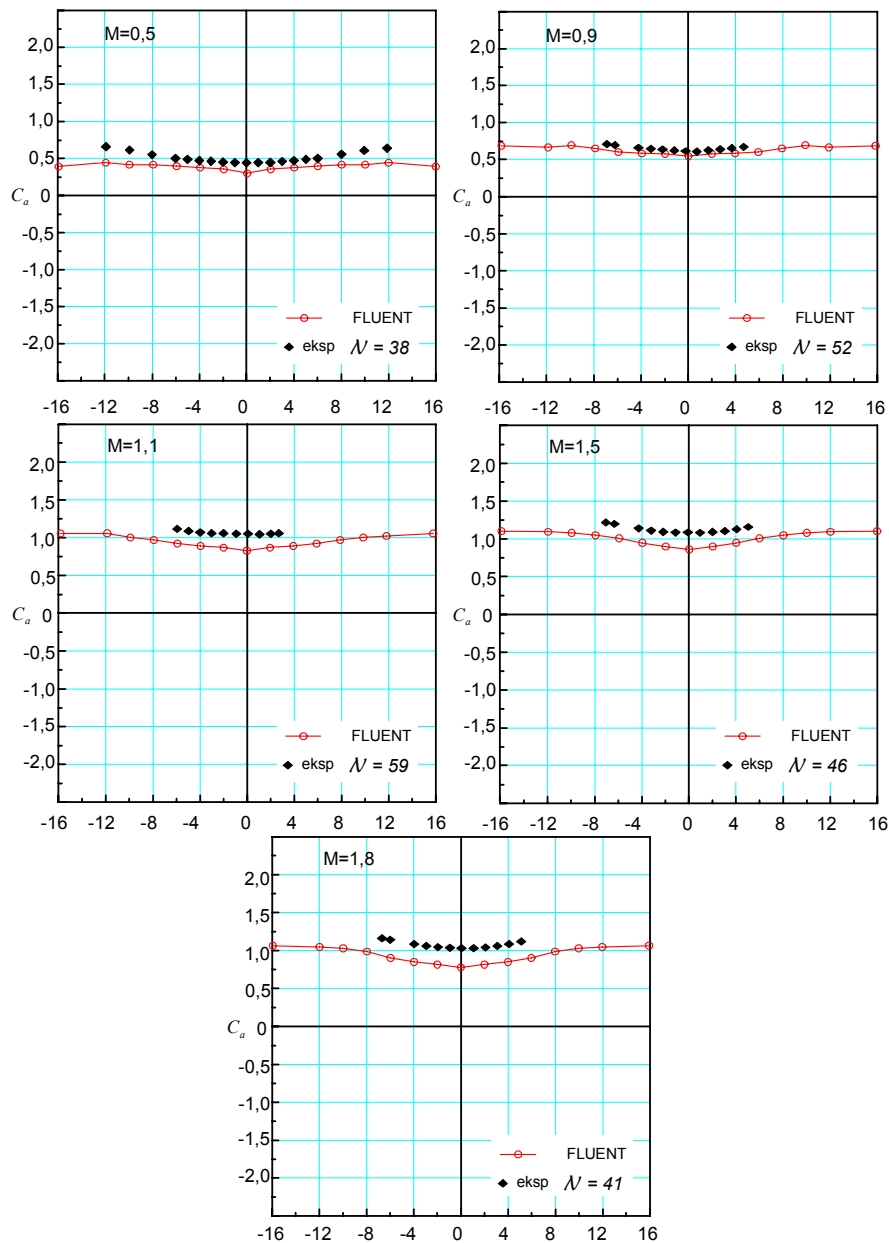
Promenljiva	$\theta=10$					$\theta=11$				
	$M=0,5$		$M=1,8$		Δ	$M=0,5$		$M=1,8$		Δ
	CN	xcp/cr	CN	xcp/cr		CN	xcp/cr	CN	xcp/cr	
X ₁₁	0,756	0,4470	0,478	0,6863	0,2393	0,754	0,4700	0,478	0,7100	0,2400
X ₁₂	0,751	0,4492	0,478	0,6908	0,2416	0,749	0,4722	0,477	0,7147	0,2425
X ₁₃	0,745	0,4514	0,476	0,6954	0,2440	0,743	0,4745	0,476	0,7195	0,2450
X ₄₁	0,666	0,4048	0,459	0,6431	0,2383	0,664	0,4234	0,459	0,6623	0,2389
X ₄₂	0,663	0,4067	0,459	0,6474	0,2407	0,660	0,4253	0,459	0,6667	0,2414
X ₄₃	0,659	0,4087	0,459	0,6519	0,2432	0,657	0,4273	0,459	0,6712	0,2439
X ₇₂	0,602	0,3620	0,455	0,6034	0,2414	0,600	0,3761	0,455	0,6181	0,2420
X ₇₃	0,600	0,3635	0,455	0,6076	0,2441	0,599	0,3777	0,456	0,6223	0,2446
X ₇₄	0,598	0,3649	0,455	0,6117	0,2468	0,597	0,3791	0,456	0,6264	0,2473
Promenljiva	$\theta=12$					$\theta=13$				
	$M=0,5$		$M=1,8$		Δ	$M=0,5$		$M=1,8$		Δ
	CN	xcp/cr	CN	xcp/cr		CN	xcp/cr	CN	xcp/cr	
X ₁₁	0,752	0,4936	0,478	0,7355	0,2419	0,749	0,5174	0,479	0,7613	0,2439
X ₁₂	0,746	0,4959	0,477	0,7404	0,2445	0,744	0,5198	0,478	0,7662	0,2464
X ₁₃	0,741	0,4982	0,477	0,7452	0,2470	0,739	0,5221	0,477	0,7711	0,2490
X ₄₁	0,662	0,4420	0,459	0,6816	0,2396	0,660	0,4609	0,458	0,7010	0,2401
X ₄₂	0,658	0,4440	0,459	0,6860	0,2420	0,656	0,4629	0,459	0,7056	0,2427
X ₄₃	0,655	0,4461	0,459	0,6906	0,2445	0,653	0,4649	0,459	0,7102	0,2453
X ₇₂	0,599	0,3904	0,456	0,6328	0,2424	0,597	0,4047	0,456	0,6477	0,2430
X ₇₃	0,597	0,3919	0,456	0,6371	0,2452	0,596	0,4063	0,457	0,6519	0,2456
X ₇₄	0,595	0,3935	0,456	0,6412	0,2477	0,594	0,4079	0,457	0,6561	0,2482

Na sličan, kao i za komandne površine rakete, izvršen je proračun krila rakete i izbor njihovog optimalnog oblika. Ovako dobijene komandne površine i krila rakete, kao i prethodno usvojeno telo rakete, činili su kompletnu konfiguraciju rakete, koja je bila predmet aerodinamičkog proračuna i validacije rezultata komparativnom metodom, poređenjem proračunom dobijenih rezultata sa eksperimentalnim podacima, dobijenim ispitivanjem modela rakete u aerotunelu T-38 Vojnotehničkog instituta.

Validacija rezultata

Radi provere i ocene valjanosti prethodno opisane procedure i izbora optimalnog oblika komandnih površina rakete, primenom programa NLMAC, razvijenog u Vojnotehničkom institutu, i licencnog programa FLUENT, izračunati su aerodinamički koeficijenti kompletne konfiguracije rakete i, na kraju, realizovan eksperiment, kada je odgovarajući model

rakete [3] izrađen na bazi rezultata aerodinamičkog proračuna. Model je ispitan u trisoničnom aerotunelu T-38 Vojnotehničkog instituta.



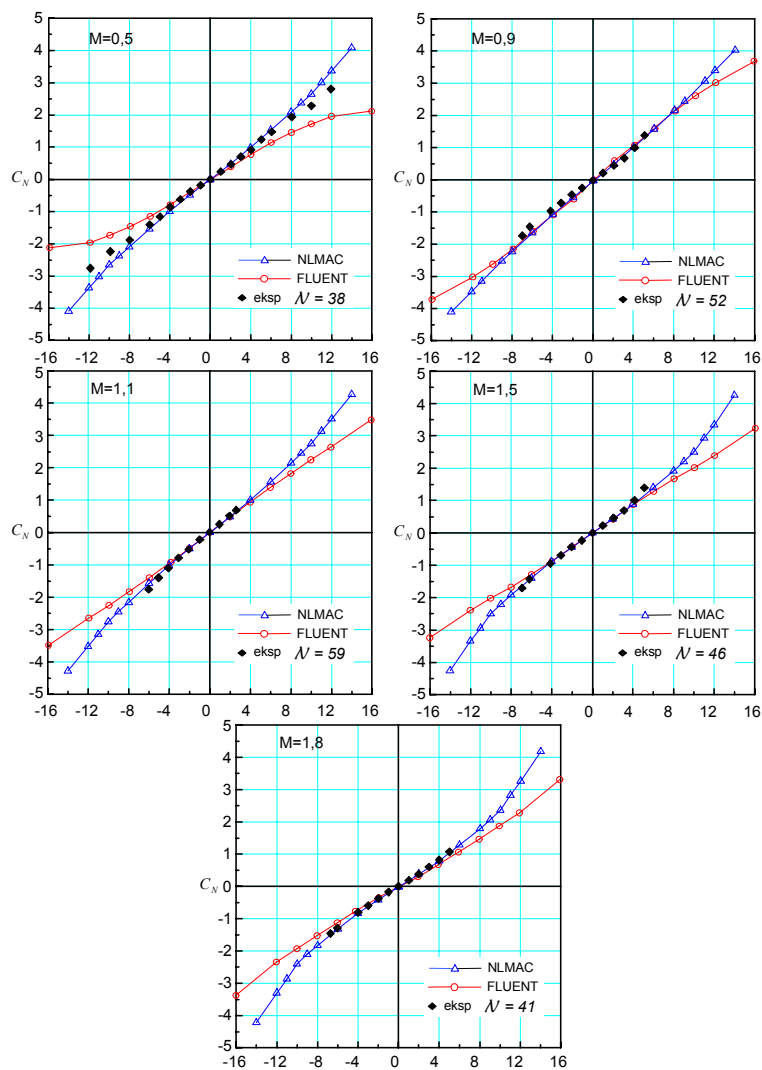
Dijagram 7 – Poređenje rezultata proračuna (C_α u funkciji α i M) sa eksperimentalnim podacima

Uporedni prikaz nekih od rezultata aerodinamičkog proračuna i dobijenih eksperimentalnih rezultata prikazan je na dijagramima 7 i 8. Podaci se odnose na raketu sa neotklonjenim komandnim površinama.

Detaljniji i potpuni rezultati ispitivanja modela rakete mogu se naći u [4] i [5].

Oznaka N na dijagramima predstavlja redni broj eksperimenta u aerotunelu.

Dijagram 8 – Poređenje rezultata proračuna (C_N u funkciji α i M) sa eksperimentalnim podacima



Poređenjem rezultata aerodinamičkog proračuna (izabranog optimalnog rešenja) sa eksperimentalnim podacima dobijenim ispitivanjem modela rakete uočava se međusobna saglasnost, što navodi na zaključak da je opisana procedura preliminarnog aerodinamičkog proračuna prihvatljiva i da može biti primenjivana pri preliminarnim aerodinamičkim projektovanjima sličnih sistema.

Zaključak

Optimizacija procesa preliminarnog aerodinamičkog proračuna raketa je moguća. Na brži i relativno lakši način dolazi se do oblika rakete koji zadovoljava unapred postavljene ciljeve i zadata ograničenja.

Ako je početno definisanje geometrije tela urađeno kvalitetno i ako su funkcije cilja definisane korektno, prethodno optimizovane komandne površine i krila rakete „uklapaju“ se u celu konfiguraciju rakete, tako da proračun kompletne konfiguracije ne zahteva veliki broj iteracija.

Pokazano je da je u aerodinamičkom proračunu korišćeni pristup u definisanju početne geometrije komponenata rakete prihvatljiv i sa aspekta efikasnosti koristan, kao i da je funkcija cilja, definisana na predstavljeni način, efikasna i da umnogome doprinosi optimizaciji procesa preliminarnog aerodinamičkog proračuna rakete, jer omogućava efikasnu analizu odstupanja pojedinih aerodinamičkih i geometrijskih veličina od željenih (ciljnih) vrednosti i time dozvoljava blagovremenu korekciju oblika komponenti rakete.

Literatura

[1] Nelson A., Nemeć M., Aftosmis M.J., Pulliam T.X.: Aerodynamic Optimization of Rocket Control Surfaces Using Cartesian Methods and CAD Geometry, 23rd AIAA Applied Aerodynamics Conference, Toronto, 2005.

[2] Carpentieri G., Van Tooren M.J.L., Koren B.: Aerodynamic Shape Optimization by Means of Sequential Linear Programming Techniques, European Conference on CFD, Netherlands, 2006.

[3] V3-2892-P-025, Vojnotehnički institut, Beograd, 2006.

[4] VTI-2936-A-025, Vojnotehnički institut, Beograd, 2006.

[5] V3-2965-I-025, Vojnotehnički institut, 2007.

OMETANJE RADARSKIH GLAVA ZA SAMONAVOĐENJE AMPLITUDNO MODULISANOM METODOM OMETANJA „CROSS EYE“

Kapetan mr *Bojan* Milanović, dipl. inž.
Vojna akademija

Rezime:

U radu je prikazan uticaj metode ometanja „Cross eye“ na uspešno vođenje rakete monoimpulsnom radarskom glavom za samonavođenje. Analiza dobijenih rezultata pokazala je: da se maksimalna greška određivanja položaja cilja postiže kada ometači emituju koherentne signale čija je fazna razlika 180° , da je greška veća što je međusobno rastojanje između antena ometača veće, da je, suprotno očekivanju, efikasnost ometanja veća što je rastojanje između ometača i rakete koja se ometa manje.

Ključne reči: monoimpulsni radar, amplitudna modulacija, proporcionalno približavanje, samonavođena raketa, metoda ometanja „Cross eye“, ometanje monoimpulsnih radara.

MONOPULSE HOMING MISSILE JAMMING WITH THE AMPLITUDE MODULATED CROSS EYE METHODE

Summary:

This article shows the effect of the “Cross eye” jamming method on successful guidance of monopulse homing missiles. The analysis of the results has shown that the maximal tracking error is made if the jamming signals are coherent and out of phase, that a larger distance between jamming antennas causes a greater error, and that, opposite to expectations, a smaller distance between the jammer and the missile results in better jamming effects.

Key words: monopulse radar, amplitude modulation, proportional guidance, homing missile, “Cross eye” jamming, monopulse radar jamming

Uvod

Samonavođene rakete su deo savremenog vojnog koncepta „pametnog“ oružja koje radi prema principu „ispali i zaboravi“. Na osnovu energije koja nosi informaciju o položaju i kretanju cilja sistemi samonavođenja mogu se podeliti na: radio (radarski), toplotne (infracrveni), optičke (TV i

laserski), akustičke (zvučni) i kombinovane. Nesumnjivo najveće iskorišćenje borbenih mogućnosti sistema za navođenje rakete ostvaruje se u radarskom režimu rada, u kojem su i najveće daljine otkrivanja i praćenja cilja.

Među radarskim sistema samonavođenja monoimpulsni radarski sistemi pokazali su najbolje performanse po pitanju preciznosti i osetljivosti na vremenske fluktuacije signala. Narušavanje normalnog rada monoimpulsne radarske glave za samonavođenje moguće je ometanjem kanala za vođenje po uglovnim koordinatama ili kanala za automatsko praćenje po daljini. Osnovni pristup ometanja kanala za vođenje po uglovnim koordinatama jeste korišćenje prostorno razdvojenih izvora ometanja. Fazna karakteristika tako postavljenih ometača može biti koherentna (međusobno zavisna) ili nekoherentna (međusobno nezavisna). Kod nekoherentnih ometača, usled greške u vođenju, raketa prolazi kroz prostor (bazu) između dva ometača. Zato se kod ove metode ometači nalaze na dve različite letelice od kojih je jedna manje važnosti (npr. bespilotna letelica). Ona će odvlačiti raketu na sebe kako bi zaštitila letelicu veće važnosti (npr. bombarder). Kod koherentnih ometača greška vođenja je takva da raketa ne prolazi između antena ometača. To znači da je moguće postaviti antene na istoj letelici, što je od velikog značaja za ostvarivanje koherentnosti signala.

Kada se raketa vodi metodom proporcionalnog navođenja, u toku leta rakete prema cilju, ugaona brzina θ obrtanja vektora brzine rakete \vec{V}_R treba da bude srazmerna ugaonoj brzini ($\dot{\varepsilon}$) obrtanja linije cilja (slika 1):

$$\frac{d\theta}{dt} = c \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (1)$$

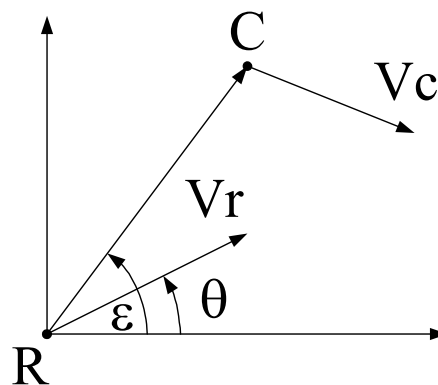
gde je c – navigaciona konstanta.

Kako je normalno ubrzanje rakete a_y povezano sa ugaonom brzinom odnosom:

$$a_y = V_R \cdot \dot{\theta} \quad (2)$$

jednačina (1) može se napisati u obliku:

$$a_y = c \cdot V_R \cdot \dot{\varepsilon} \quad (3)$$



Sl. 1 – Vođenje rakete metodom proporcionalnog navođenja

što znači da kod ove metode navođenja normalno ubrzanje rakete treba da bude srazmerno brzini rakete i ugaonoj brzini linije cilja.

Ugao linije cilja ε , koji je određen koordinatom, biće:

$$\varepsilon = \varepsilon' + \Theta, \quad (4)$$

gde je ε' – stvarni ugao, a Θ – uneta greška usled ometanja.

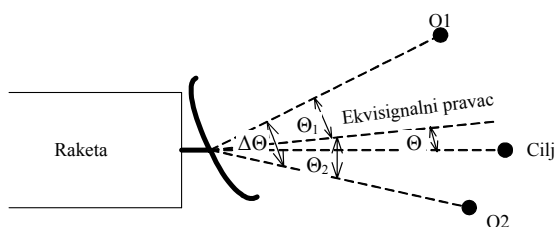
Jednačina proporcionalnog navođenja tada se može napisati u obliku:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d(\varepsilon' + \Theta)}{dt} = \frac{d\varepsilon'}{dt} + \frac{d\Theta}{dt} \quad (5)$$

Iz izraza (5) vidi se da, ukoliko je uneta greška pri određivanju položaja cilja prouzrokovana ometanjem, konstantna u vremenu, ometanje neće uticati na vođenje rakete, odnosno raketa će biti u mogućnosti da pogodi cilj. Da bi se ostvario efekat ometanja, ugaona greška nastala usled ometanja mora biti promenljiva u vremenu.

Ometanje nekorelisanim signalima

Pod nemodulisanim, nekoherentnim ometajućim signalima podrazumevaju se signali koji potiču od dva prostorno razdvojena izvora zračenja, čije faze nisu korelisane. Uticaj ovih signala, koji dolaze iz različitih



pravaca na monoimpulsni sistem sa amplitudnom komparacijom, prikazan je na slici 2. Neka signal koji potiče od ometača 1 dolazi pod uglom Θ_1 , a signal koji potiče od ometača 2 pod uglom Θ_2 . Neka je ugao pod kojim se vide antene ometača označen sa $\Delta\Theta$. Signali detektovani na ulazu koordinatora tada se mogu napisati u obliku:

Sl. 2 – Položaj ekvisignalnog pravca antene u slučaju praćenja dva izvora zračenja

$$u_1 = U_1 \cdot F(\Theta_0 - \Theta_1) \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) + U_2 \cdot F(\Theta_0 - \Theta_2) \cdot \cos(\omega_2 \cdot t), \quad (6)$$

$$u_2 = U_1 \cdot F(\Theta_0 + \Theta_1) \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) + U_2 \cdot F(\Theta_0 + \Theta_2) \cdot \cos(\omega_2 \cdot t), \quad (7)$$

gde su U_i i ω_i amplituda i učestanost detektovanog napona signala koji dolazi od odgovarajućeg ometača.

Na izlazu sumarnog kanala (u_s) i kanala razlike (u_d) dobija se:

$$u_s = U_1 \cdot [F(\Theta_0 - \Theta_1)] + F(\Theta_0 - \Theta_1) \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) + U_2 [F(\Theta_0 - \Theta_2) + F(\Theta_0 - \Theta_2)] \cdot \cos(\omega_2 \cdot t) \quad (8)$$

$$u_d = U_1 \cdot [F(\Theta_0 - \Theta_1)] + F(\Theta_0 - \Theta_1) \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) + U_2 [F(\Theta_0 - \Theta_2) + F(\Theta_0 - \Theta_2)] \cdot \cos(\omega_2 \cdot t) \quad (9)$$

Na izlazu faznog detektora dobiće se signal:

$$u_{fd} = k_{fd} \cdot \overline{u_s \cdot u_d} \quad (10)$$

gde je k_{fd} – konstanta faznog detektora, odnosno:

$$u_{fd} = k_1 \cdot \left\{ \beta^2 \cdot [F^2(\Theta_0 - \Theta) - F^2(\Theta_0 + \Theta)] + [F^2(\Theta_0 - \Theta + \Delta\Theta) - F^2(\Theta_0 + \Theta - \Delta\Theta)] \right\} \quad (11)$$

gde je k_1 – konstanta, $\Theta = \Theta_1$, a $\Theta + \Delta\Theta = \Theta_2$, $\beta = \frac{U_1}{U_2}$.

Izraz (11) određuje opštu pelengacionu karakteristiku, koja predstavlja zavisnost napona na izlazu faznog detektora od ugaaonog položaja antena ometača.

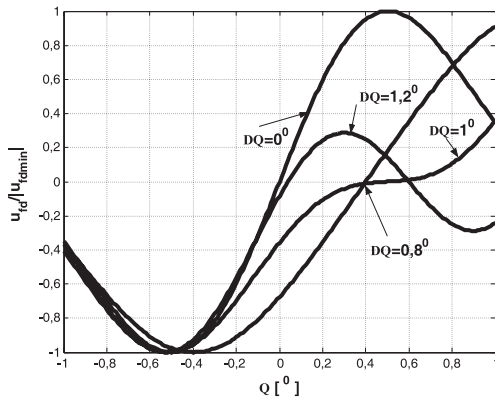
Analiza pelengacione karakteristike biće izvršena grafički i linearizacijom funkcije dijagrama zračenja. Cilj analize usmeren je ka prikazu uticaja rastojanja i snage signala koji emituju ometači na izgled pelengacione karakteristike.

Grafička analiza nekoherentnih ometača

Ukoliko se za funkciju dijagrama zračenja uzme funkcija oblika

$$F(\Theta) = \frac{\sin(k \cdot \Theta)}{k \cdot \Theta}, \text{ gde je za } k \text{ uzeto } k = 160, \text{ kako bi se dobio dijagram}$$

zračenja širine 1° (što se često dešava kod nišanskih radara) i neka je $\Theta_0 = 0,4^\circ$, $\beta = 1$ (signali sa oba ometača održavaju se na jednakim nivoima snaga, a menja se ugao pod kojim se vide antene ometača), za napon na izlazu faznog detektora, prema izrazu (11), dobiće se krive kao na slici 3. Sa slike 3 vidi se da će u slučaju nekoherentnih smetnji pri dejstvu jednakim snagama ometača $\beta=1$ ekvisignalni pravac biti usmeren u pravcu središta baze ometača (za ugao pod kojim se vide antene ometača od $\Delta\Theta=0^\circ$, ekvisignalni pravac je usmeren u pravcu ugla $\Theta = 0^\circ$, za

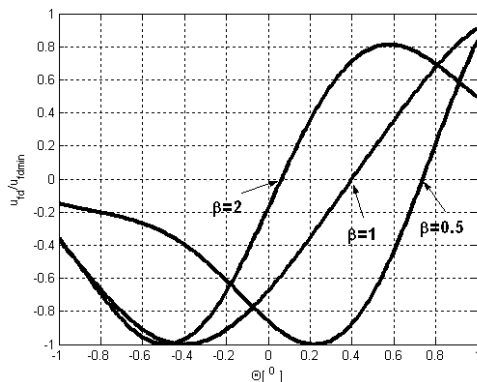


Sl. 3 – Normalizovana vrednost napona faznog detektora u funkciji položaja ometača ($\beta = 1$)

ugao pod kojim se vide antene ometača od $\Delta\Theta = 0,8^\circ$, ekvisignalni pravac je usmeren u pravcu ugla $\Theta = 0,4^\circ$). Sa slike se, takođe, može uočiti da se sa porastom rastojanja između ometača smanjuje nagib pelengacione karakteristike. Pri nekoj kritičnoj vrednosti ugla pod kojim raketa „vidi“ antene ometača $-\Delta\Theta_r$, koeficijent nagiba pelengacione karakteristike biće jednak nuli (kriva označena sa $\Delta\Theta = 1^\circ$), pa će pod dejstvom slučajnih faktora antena koordinatora početi da se okreće ka jednom od ometača. Ukoliko se nastavi povećanje rastojanja između antena ometača tako da ugao pod kojim raketa „vidi“ antene ometača bude iznad vrednosti kritičnog ugla, pojaviće se dve tačke ravnoteže (kriva označena sa $\Delta\Theta = 1,2^\circ$).

Za uglove veće od kritičnog ugla antena će preći na praćenje jednog od ometača. Vrednost kritičnog ugla dobija se izjednačavanjem izvoda funkcije napona faznog detektora u okolini tačke $\Theta = \Delta\Theta/2$ sa nulom.

$$\left. \frac{\partial u_{fd}}{\partial \Theta} \right|_{\Theta = \frac{\Delta\Theta}{2}} = 0 \tag{12}$$



Sl. 4 – Normalizovana vrednost napona faznog detektora u funkciji odnosa snaga ometača ($\Delta\Theta = 0,8$)

Ukoliko se položaj ometača drži konstantnim, a menja se snaga ometača, dobija se karakteristika prikazana na slici 4. Sa slike 4 može se videti da će ekvisignalni pravac biti usmeren ka energetsom težištu ometača, odnosno da će biti pomeren ka ometaču koji emituje veću snagu ($\beta = \frac{U_1}{U_2}$).

Na osnovu slika 3 i 4 može se doći do zaključka da će pri ometanju monoimpulsnog radar-

skog sistema nekoherentnim ometačima ekvisignalni pravac, bez obzira na rastojanje ometača i odnos njegovih snaga, biti usmeren u pravcu unutar baze ometača. S obzirom na tu činjenicu, pri ometanju nekoherentnim ometačima potrebne su dve letelice koje će nositi ometače.

Analiza linearizacijom funkcije dijagrama zračenja

Približna vrednost ugla za koji je izlaz detektora jednak nuli može se odrediti ukoliko se funkcija $F(\Theta)$ linearizuje u okolini ekvisignalnog pravca. To se može učiniti ukoliko je ugaono rastojanje $\Delta\Theta$ između ometača malo u odnosu na ugao Θ_0 . Tada su:

$$F(\Theta_0 \pm \Theta) = F(\Theta_0) \mp |F'(\Theta_0)| \cdot \Theta \quad (13)$$

$$F[\Theta_0 \mp (\Theta - \Delta\Theta)] = F(\Theta_0) \pm |F'(\Theta_0)| \cdot (\Theta - \Delta\Theta) \quad (14)$$

pa se izraz (11) može napisati u obliku:

$$u_{fd} = 4 \cdot k_1 \cdot F'(\Theta_0) \cdot [\Theta \cdot (1 + \beta^2) - \Delta\Theta] \quad (15)$$

Iz uslova $u_{fd} = 0$, dobija se:

$$\Theta = \frac{\Delta\Theta}{1 + \beta^2} \quad (16)$$

Iz izraza (16) vidi se da će ekvisignalni pravac biti usmeren u energetski centar ometača. Za odnos snaga signala $\beta = 1$ ekvisignalni pravac biće usmeren u pravcu središta između ometača, ukoliko je $\beta > 1$ biće usmeren u pravcu bliže prvom ometaču, a u slučaju $\beta < 1$ – u pravcu bliže drugom ometaču.

Ometanje koherentnim ometačima

Kada izvori ometanja emituju nekoherentne signale, sistem samonavođenja rakete vodiće raketu u pravcu energetskog centra izvora zračenja, dakle između antena ometača. Ukoliko na ulaz antene dođu dva koherentna signala, ekvisignalni pravac antene pod odgovarajućim uslovima biće usmeren van baze (zamišljene linije koja spaja antene) ometača.

Pravac na kojem je signal na izlazu detektora jednak nuli, u slučaju da postoje dva koherentna izvora zračenja, određuje se iz uslova da je signal kanala razlike jednak nuli. Posmatrajmo polja u otvoru antene ko-

ordinatora. Neka se antene koherentnih ometača nalaze pod uglom $\Delta\theta$, a ugao između ekvisignalnog pravca i središta baze ometača Θ . Pretpostavka je da je amplituda polja (u otvoru antene) koje potiče od ometača C_2 jednaka 1, a amplituda polja koje potiče od ometača C_1 jednaka β . Mogu se analizirati dva slučaja: $\varphi = 0$ i $\varphi = \pi$.

Slučaj kada je fazna razlika signala $\varphi=0$

Signali koji su detektovani na anteni koordinatora mogu se napisati u obliku:

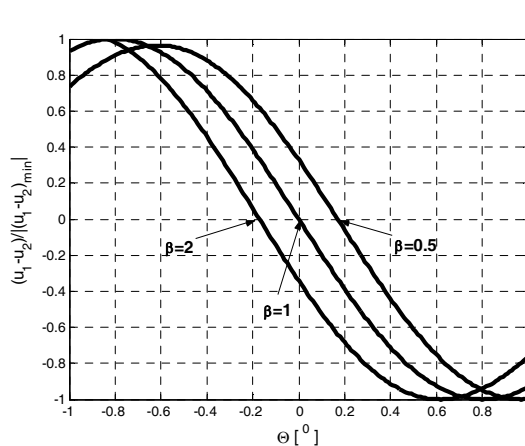
$$u_1 = \beta \cdot F\left(\Theta_0 + \frac{\Delta\Theta}{2} + \Theta\right) + F\left(\Theta_0 - \frac{\Delta\Theta}{2} + \Theta\right) \quad (17)$$

$$u_2 = \beta \cdot F\left(\Theta_0 - \frac{\Delta\Theta}{2} - \Theta\right) + F\left(\Theta_0 + \frac{\Delta\Theta}{2} - \Theta\right) \quad (18)$$

gde je $F(\Theta)$ funkcija dijagrama zračenja antene (ugao Θ se čita od maksimuma dijagrama zračenja).

Na slici 5 prikazan je grafik normalizovane vrednosti napona kanala razlike u zavisnosti od položaja ekvisignalnog pravca. Za funkciju dijagrama zračenja uzeto je $F(\Theta) = \frac{\sin(k \cdot \Theta)}{k \cdot \Theta}$, gde je $k=160$ i $\Theta_0 = 0,4^\circ$. Na grafiku

su date tri krive za tri različita odnosa snaga ometača ($\beta = 0,5$, $\beta = 1$, $\beta = 2$).



Sl. 5 – Normalizovana vrednost signala razlike koherentnih ometača za različite snage ometača ($\Delta\Theta = 0,8$)

Ugao $\Theta = 0$ odgovara sredini baze ometača. Sa slike se vidi da će u slučaju jednakih snaga signala ometača ($\beta = 1$) ekvisignalni pravac biti usmeren u pravcu sredine baze ometača. U slučaju da je snaga jednog od ometača veća od snage drugog ometača, ekvisignalni pravac biće usmeren u pravcu bliže jačem izvoru ometanja.

Pravac na kojem je izlaz detektora jednak nuli može se odrediti bilo zame-nom izraza funkcije dijagrama zračenja u jednačine (17) i (18)

i rešavanjem sistema, bilo grafički (slika 5). Međutim, približna vrednost ugla za koji je izlaz detektora jednak nuli može se odrediti ukoliko se funkcija $F(\Theta)$ linearizuje u okolini ekvisignalnog pravca (to se može uraditi ukoliko su $\Delta\Theta/2$ i Θ , male vrednosti u odnosu na ugao Θ_0). Tada je:

$$u_1 = \beta \left[F(\Theta_0) - |F'(\Theta_0)| \cdot \left(\frac{\Delta\Theta}{2} + \Theta \right) \right] + F(\Theta_0) + |F'(\Theta_0)| \cdot \left(\frac{\Delta\Theta}{2} - \Theta \right) \quad (19)$$

$$u_2 = \beta \left[F(\Theta_0) + |F'(\Theta_0)| \cdot \left(\frac{\Delta\Theta}{2} + \Theta \right) \right] + F(\Theta_0) - |F'(\Theta_0)| \cdot \left(\frac{\Delta\Theta}{2} - \Theta \right) \quad (20)$$

$$u_1 - u_2 = -2 \cdot \beta |F'(\Theta_0)| \cdot \left(\frac{\Delta\Theta}{2} + \Theta \right) + 2 \cdot |F'(\Theta_0)| \cdot \left(\frac{\Delta\Theta}{2} - \Theta \right) \quad (21)$$

Iz uslova $u_1 - u_2 = 0$, dobija se:

$$\Theta = \frac{\Delta\Theta}{2} \cdot \frac{1 - \beta}{1 + \beta} \quad (22)$$

Imajući u vidu da $\Theta = 0^\circ$ predstavlja pravac sredine između antena ometača, iz poslednjeg izraza se vidi da će ekvisignalni pravac biti usmeren u tačku koja se nalazi između izvora ometajućih signala. U slučaju da je $\beta = 1$, ekvisignalni pravac se usmerava ka sredini baze između antena ometača. U slučaju da $\beta \rightarrow \infty$ ili $\beta \rightarrow 0$, ekvisignalni pravac biće usmeren ka jednom od ometača.

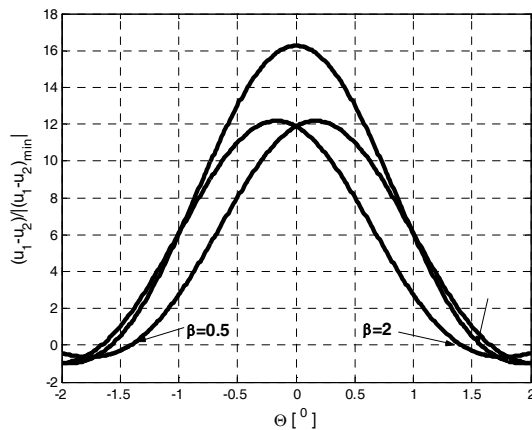
Slučaj kada je fazna razlika signala $\varphi = \pi$

U slučaju kada je fazna razlika signala $\varphi = \pi$ polja koja potiču od antena ometača u centru otvora antene koordinatora nalaze se u „protivfazi“. Tada su:

$$u_1 = \beta \cdot F\left(\Theta_0 + \frac{\Delta\Theta}{2} + \Theta\right) - F\left(\Theta_0 - \frac{\Delta\Theta}{2} + \Theta\right) \quad (23)$$

$$u_2 = \beta \cdot F\left(\Theta_0 - \frac{\Delta\Theta}{2} - \Theta\right) - F\left(\Theta_0 + \frac{\Delta\Theta}{2} - \Theta\right) \quad (24)$$

Grafičko rešenje izraza ($u_1 - u_2 = 0$) u slučaju koherentnih izvora ometanja fazno pomerenih za ugao $\varphi = \pi$ prikazano je na slici 6. Za funkciju dijagrama zračenja uzeta je $F(\Theta) = \frac{\sin(k \cdot \Theta)}{k \cdot \Theta}$, gde je $k = 160$ i $\Theta_0 = 0,4^\circ$. Ugao $\Theta = 0$ odgovara pravcu središta baze ometača.



Sl. 6 – Normalizovana vrednost signala razlike koherentnih ometača fazno pomerenih za ugao $\varphi = \pi$ za različite snage ometača ($\Delta\Theta = 0,8$)

budu smeštena na istoj letelici, što olakšava uspostavljanje koherentnosti signala i održavanje konstantne vrednosti fazne razlike.

Sa slike 6 vidi se da će pri ometanju koherentnim ometačima, fazno pomerenim za ugao $\varphi = \pi$, signal u kanalu razlike biti jednak nuli za uglove koji su veći od ugaonog rastojanja ometača ($\Delta\Theta/2 = 0,4^\circ$). To znači da će ekvisignalni pravac biti usmeren van baze ometača. Ova osobina ima niz prednosti. Pri izvršenju zadatka ni jedna od letelica ne mora biti žrtvovana radi zaštite one druge. Pored toga, činjenica da će ekvisignalni pravac biti usmeren van baze ometača daje mogućnost da oba ometača

Analiza uticaja metode ometanja „Cross eye“

Matematička analiza uticaja metoda ometanja „Cross eye“ na određivanje ugla ekvisignalnog pravca ostvarena je linearizacijom funkcije dijagrama zračenja. Polja koja potiču od antena ometača u centru otvora antene koordinatora nalaze se u protivfazi. Pošto su:

$$u_1 = \beta \cdot F\left(\Theta_0 + \frac{\Delta\Theta}{2} + \Theta\right) - F\left(\Theta_0 - \frac{\Delta\Theta}{2} + \Theta\right) \quad (25)$$

$$u_2 = \beta \cdot F\left(\Theta_0 - \frac{\Delta\Theta}{2} - \Theta\right) - F\left(\Theta_0 + \frac{\Delta\Theta}{2} - \Theta\right) \quad (26)$$

Linearizacijom funkcije dijagrama zračenja u okolini ekvisignalnog pravca dobija se:

$$u_1 = \beta \left[F(\Theta_0) - |F'(\Theta_0)| \cdot \left(\frac{\Delta\Theta}{2} + \Theta \right) \right] - F(\Theta_0) - |F'(\Theta_0)| \cdot \left(\frac{\Delta\Theta}{2} - \Theta \right) \quad (27)$$

$$u_2 = \beta \left[F(\Theta_0) + |F'(\Theta_0)| \cdot \left(\frac{\Delta\Theta}{2} + \Theta \right) \right] - F(\Theta_0) + |F'(\Theta_0)| \cdot \left(\frac{\Delta\Theta}{2} - \Theta \right) \quad (28)$$

$$u_1 - u_2 = -2 \cdot \beta |F'(\Theta_0)| \cdot \left(\frac{\Delta\Theta}{2} + \Theta \right) - 2 \cdot |F'(\Theta_0)| \cdot \left(\frac{\Delta\Theta}{2} - \Theta \right) \quad (29)$$

Odnosno, iz $u_1 - u_2 = 0$, sledi da je:

$$\Theta = \frac{\Delta\Theta}{2} \cdot \frac{1 + \beta}{1 - \beta} \quad (30)$$

Treba imati u vidu da su ovi izrazi približni, jer su dobijeni linearizacijom funkcije dijagrama zračenja antene. Poslednji izraz daje pogrešan rezultat za $\beta = 1$. Granice primerljivosti formula mogu se odrediti iz sledećih nejednčina:

$$\frac{\Delta\Theta}{\Theta_{0.5}} \leq 0,02 - 0,04 \quad (31)$$

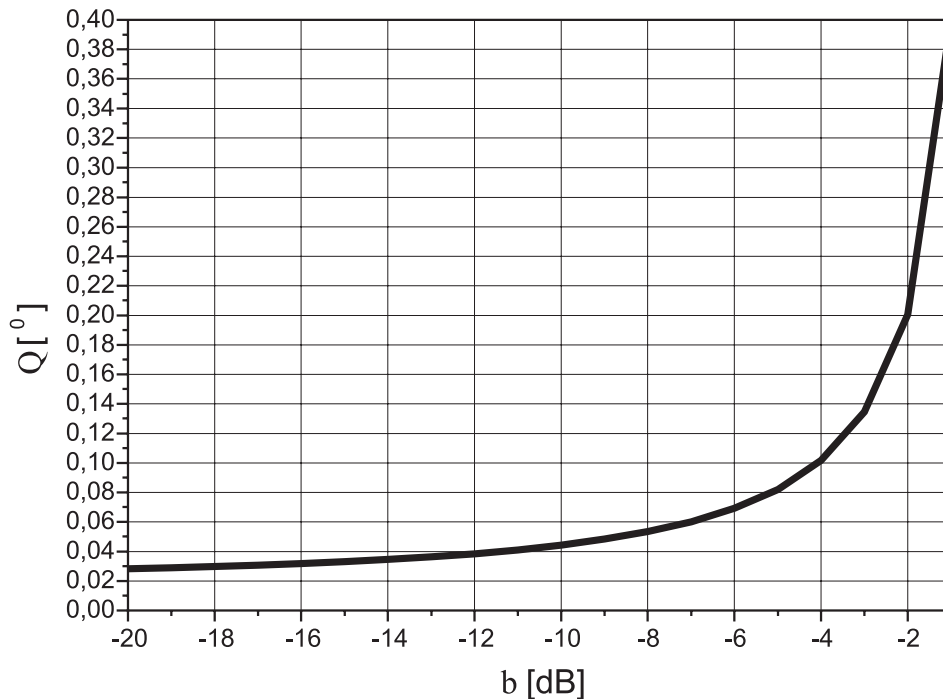
$$\beta \leq 0,9 \quad (32)$$

Iz izraza (30) $\left(\frac{1 + \beta}{1 - \beta} > 1 \right)$ vidi se da će u slučaju dejstva koherentnih signala koji su fazno pomereni za 180° ekvisignalni pravac biti usmeren u pravcu koji se nalazi van baze antena ometača $\left(\Theta > \frac{\Delta\Theta}{2} \right)$.

U tabeli 1 date su vrednosti ugla ekvisignalnog pravca dobijenih na osnovu izraza (30). Na osnovu podataka iz tabele 1 nacrtan je grafik na slici 7.

Tabela 1
Vrednosti ugla ekvisignalnog pravca kada nema eho signala ($\Delta\Theta = 0,046^\circ$)

β [dB]	-20	-19	-18	-17	-16	-15	-14	-13	-12	-11
β	0,1	0,1122	0,1259	0,1413	0,1585	0,1778	0,1995	0,2239	0,2512	0,2818
Θ [°]	0,0281	0,0288	0,0296	0,0306	0,0317	0,0329	0,0345	0,0363	0,0384	0,0411
β [dB]	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1
β	0,3162	0,3548	0,3981	0,4467	0,5012	0,5623	0,6309	0,7079	0,7943	0,8913
Θ [°]	0,0443	0,0483	0,0534	0,0601	0,0692	0,0821	0,1016	0,1345	0,2007	0,3999



Sl. 7 – Ugao ekvisignalnog pravca u funkciji odnosa snaga ometača

Sa slike 7 i iz tabele 1 može se uočiti da je za bilo koji odnos snaga signala ometanja ekvisignalni pravac usmeren van baze ometača. Osim toga, na slici 7 se može uočiti da sa promenom odnosa snaga ometača (amplitudna modulacija signala zračenja) dolazi do promene vrednosti ugla ekvisignalnog pravca.

Ukoliko je odnos snaga ometača konstantan, metodom ometanja „Cross eye“ se uneće se greška pri određivanju položaja cilja koja je veća od ugla pod kojim se vide antene ometača. Međutim, s obzirom na to da je ova vrednost konstantna ometanje neće imati uticaja na vođenje rakete. Ukoliko se odnos snaga signala ometanja menja, doći će i do promene vrednosti ugla Θ , što znači da izvod neće biti jednak nuli, odnosno metoda će imati uticaja na vođenje, što može dovesti do promašaja cilja.

Ometanje u prisustvu korisnog signala

Uticaj korisnog signala može se uključiti na više načina, ali najbolji način je kada koristan signal i signali ometanja nisu koherentni.

Kao najinteresantniji, sa stanovišta ometanja, biće analiziran slučaj protivfaznih signala. Dva ometača se u takvoj situaciji mogu zameniti jed-

nim ekvivalentnim ometačem koji se, prema izrazu (30), nalazi van baze ometača i čija je ekvivalentna snaga:

$$P_{ek} = P_2 \cdot (1 - \beta)^2 \quad (33)$$

gde je P_2 – snaga zračenja drugog ometača.

Ako se pretpostavi da koristan signal snage P_c nije koherentan sa signalima ometanja i da dolazi iz centra baze ometača, uslov ravnoteže sistema u slučaju kvadratnog detektora sa linearnom pelengacionom karakteristikom u čitavom intervalu dobija se iz:

$$P_c \cdot \Theta_r = P_{ek} \cdot (\Theta - \Theta_r) \quad (34)$$

gde je Θ_r – rezultujući ugao ekvisignalnog pravca, a Θ – ugao ekvivalentnog ometača iz (30).

Odnosno:

$$\Theta_r = \Theta \cdot \frac{P_{ek}}{P_{ek} + P_c} \quad (35)$$

Ako je $k = \frac{P_{ek}}{P_c}$, tada se (35) može napisati u obliku:

$$\Theta_r = \Theta \cdot \frac{k}{1+k} \quad (36)$$

Iz izraza (33) može se odrediti optimalan odnos snaga ometača i korisnog signala. Ukoliko se sa k' označi odnos snage ometača 2 i korisnog signala ($k' = \frac{P_2}{P_c}$) iz (30), (33) i (35) dobija se:

$$\Theta_r = \frac{\Delta\Theta}{2} \cdot \frac{k' \cdot (1 - \beta^2)}{1 + k' \cdot (1 - \beta)^2} \quad (37)$$

odnosno:

$$\Theta_r = \frac{\Delta\Theta}{2} \cdot \frac{(1 - \beta^2)}{\frac{1}{k'} + (1 - \beta)^2} \quad (38)$$

Optimalna vrednost β određuje najveću vrednost Θ_r pri zadanom k' i može se naći diferenciranjem izraza (38) po β i izjednačavanjem sa nulom:

$$\beta^2 - \left(2 + \frac{1}{k'}\right) \cdot \beta + 1 = 0 \quad (39)$$

Odavde se dobija:

$$\beta_{opt} = 1 + \frac{1}{2 \cdot k'} \pm \sqrt{\left(1 + \frac{1}{2 \cdot k'}\right)^2 - 1} \quad (40)$$

Iz izraza (37) vidi se da pri povećanju snage ometača ($k' \rightarrow \infty$) efikasnost koherentnih smetnji raste, a iz izraza (40) dobija se da u tom slučaju optimalan odnos signala ometača $\beta_{opt} \rightarrow 1$.

U slučaju signala velike amplitude (linearno detektovanih) uslov ravnoteže može se napisati u obliku:

$$\sqrt{P_c} \cdot \Theta_r = \sqrt{P_{ek}} \cdot (\Theta - \Theta_r) \quad (41)$$

Odavde je:

$$\Theta_r = \Theta \cdot \frac{\sqrt{k}}{1 + \sqrt{k}} \quad (42)$$

odnosno:

$$\Theta_r = \frac{\Delta\Theta}{2} \cdot \frac{(1 + \beta) \cdot \sqrt{k'}}{(1 - \beta) \cdot \sqrt{k'} + \sqrt{1 - \beta}} \quad (43)$$

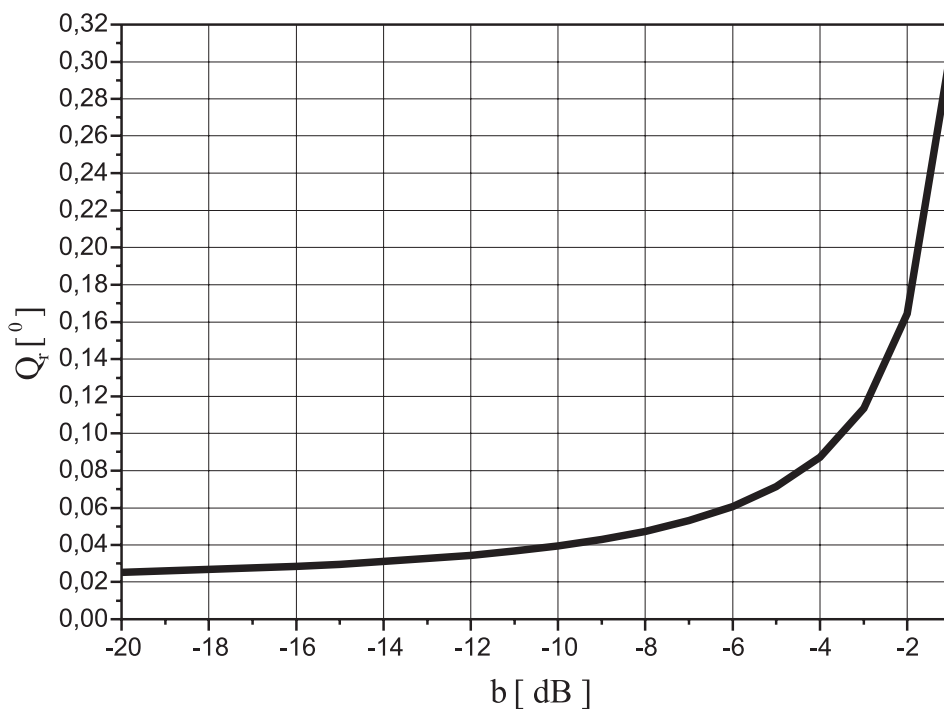
ili

$$\Theta_r = \frac{\Delta\Theta}{2} \cdot \frac{1 + \beta}{1 - \beta + \frac{\sqrt{1 - \beta}}{\sqrt{k'}}} \quad (44)$$

Na osnovu izraza (44) u tabeli 2 su izračunate vrednosti ugla ekvisignalnog pravca u funkciji od odnosa snaga signala ometanja. Na osnovu tabele 2 nacrtan je grafik na slici 8.

Tabela 2
Vrednosti ugla ekvisignalnog pravca u prisustvu eho signala ($k'=20$, $\Delta \Theta=0,046^\circ$)

β [dB]	-20	-19	-18	-17	-16	-15	-14	-13	-12	-11
β	0,1	0,1122	0,1259	0,1413	0,1585	0,1778	0,1995	0,2239	0,2512	0,2818
Θ_r [°]	0,0254	0,0260	0,0268	0,0276	0,0286	0,0297	0,0310	0,0326	0,0344	0,0367
β [dB]	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1
β	0,3162	0,3548	0,3981	0,4467	0,5012	0,5623	0,6309	0,7079	0,7943	0,8913
Θ_r [°]	0,0395	0,0429	0,0473	0,0530	0,0606	0,0713	0,0873	0,1135	0,1644	0,3069

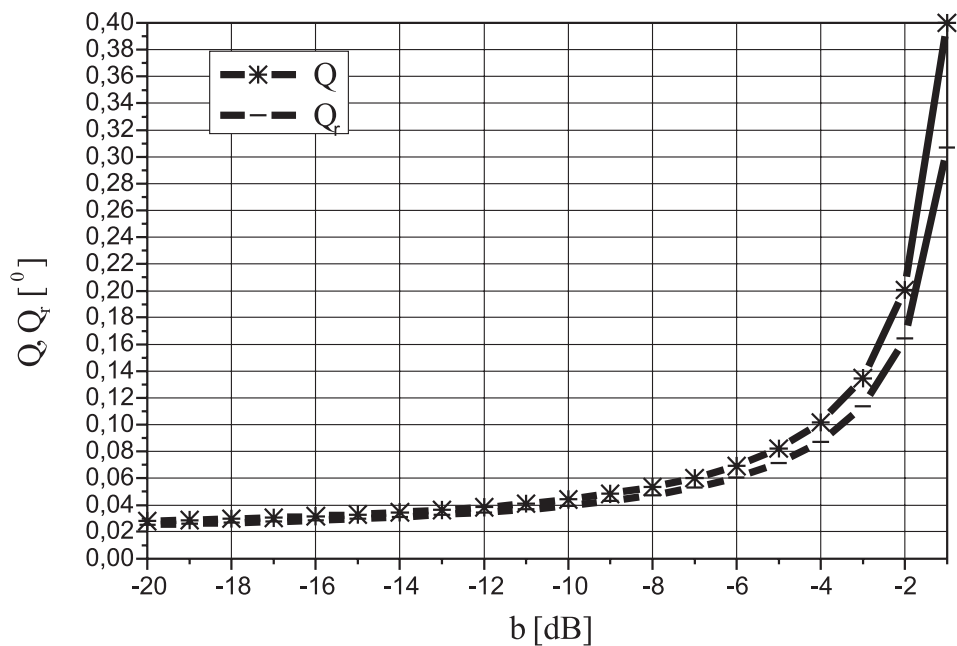


Sl. 8 – Ugao ekvisignalnog pravca u funkciji odnosa snaga ometača u prisustvu eho signala

Iz tabele 2 i sa slike 8 može se videti da je pri bilo kom odnosu snaga signala ometanja ekvisignalni pravac usmeren van baze ometača ($\Theta > \frac{\Delta \Theta}{2}$). Takođe, na slici 8 može se uočiti da se promenom odnosa

snaga signala ometanja menja položaj ekvisignalnog pravca. Ova osobina koristi se kao efikasno sredstvo za borbu protiv sistema sa metodom navođenja proporcionalnim približavanjem.

Na slici 9 date su uporedne vrednosti ugla ekvisignalnog pravca za slučajeve kada je eho signal prisutan i kada ga nema.



Sl. 9 – Ugao ekvisignalnog pravca u prisustvu eho signala i bez njega

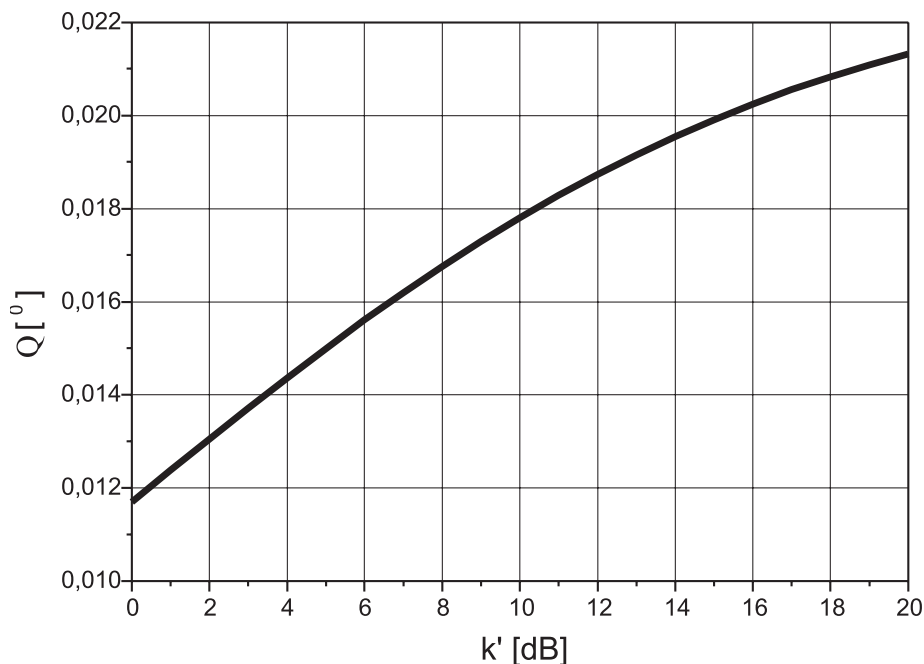
Sa slike 9 može se videti da za velike odnose snaga signala ometanja nije bitno da li je eho signal prisutan ili ne (krive se gotovo poklapaju), dok se za manje odnose snaga signala ($\beta > -5$) može primetiti veći nagib krive kada nema eho signala, što navodi na zaključak da će i efekat ometanja biti veći.

Ako se posmatra uticaj jačine snaga signala ometanja u odnosu na koristan signal na osnovu izraza (44) dobijaju se vrednosti date u tabeli 3.

Tabela 3
Vrednosti ugla ekvisignalnog pravca u prisustvu eho signala ($\beta = -20$, $\Delta \Theta = 0,046^\circ$)

k' [dB]	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11
k'	100	79,43	63,09	50,12	39,81	31,62	25,12	19,95	15,85	12,59
Θ_r [°]	0,0254	0,0251	0,0248	0,0245	0,0241	0,0237	0,0232	0,0227	0,0222	0,0217
k' [dB]	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
k'	10	7,94	6,31	5,01	3,98	3,16	2,51	1,99	1,58	1,26
Θ_r [°]	0,0217	0,0211	0,0205	0,0198	0,0191	0,0184	0,0176	0,0169	0,0161	0,0153

Na osnovu podataka iz tabele 3 nacrtan je grafik na slici 10. Sa slike se vidi da u prisustvu eho signala vrednost ugla ekvisignalnog pravca zavisi od snage signala ometanja. Što je signal ometanja jači u odnosu na eho signal, to je greška u određivanju položaja cilja veća.



Sl. 10 – Ugao ekvisignalnog pravca u funkciji odnosa snage ometača i eho signala

Zaključak

Urađena analiza pokazala je da se maksimalna vrednost ugaone greške ostvaruje kada je fazna razlika između signala 180° . Pošto se ugao $\Delta\theta$ pod kojim se vide antene ometača može aproksimirati sa d/r (u radijanima), dolazi se do zaključka da je greška proporcionalna rastojanju između antena ometača (d), a inverzno proporcionalna rastojanju između radara i letelice koja vrši protivelektronsko dejstvo (r). Kako je greška koja je uneta pri ometanju srazmerna uglu $\Delta\theta$ (izraz 30), to znači da je poželjno da antene koje se koriste za ometanje budu na najvećem mogućem rastojanju dokle god su obe antene unutar glavnog loba dijagrama zračenja antene radara koji se ometa. Zato se najčešće postavljaju na krajevima krila letelice. Zbog toga efikasnost ometanja raste sa smanjenjem rastojanja između ometača, što je suprotno od onoga što bi se očekivalo u sukobu radara i uređaja za ometanje. Za fiksno rastoja-

nje između antena ometača problem je da se ostvari i održi željeno rastojanje nula koje se, takođe, smanjuje sa smanjenjem rastojanja između radara i ometača, jer su i zahtevi faznog praćenja, takođe, redukovani.

Ukoliko je odnos snaga ometača konstantan, metodom ometanja „Cross eye“, bez prisustva eho signala, uneće se greška u određivanju položaja cilja koja je veća od ugla pod kojim se vide antene ometača. Međutim, s obzirom na jednačinu proporcionalnog navođenja, izraz (5), u kojoj navođenje zavisi od brzine obrtanja linije cilja, na kraju vođenja, bez obzira na to što je uneta greška ometanja, raketa će ipak biti u mogućnosti da pogodi cilj. Ukoliko se odnos snaga signala ometanja menja, odnosno ukoliko se vrši amplitudna modulacija signala ometanja, doći će i do promene vrednosti ugla Θ , što znači da izvod neće biti jednak nuli, odnosno ometanje će imati uticaja na vođenje.

Ukoliko se metoda ometanja „Cross eye“ primeni u prisustvu eho signala, pri bilo kom odnosu snaga signala ometanja, ekvisignalni pravac biće usmeren van baze ometača $\left(\Theta > \frac{\Delta\Theta}{2}\right)$. Promenom odnosa snaga signala

ometanja menja se položaj ekvisignalnog pravca, što znači da će amplitudna modulacija signala ometanja imati isti efekat kao i kada nema eho signala,

Ukoliko se uporede efekti metode ometanja „Cross eye“ u prisustvu eho signala i bez njega, može se zaključiti da je za velike odnose snaga signala ometača manje bitno da li je eho signal prisutan ili ne, dok je za manje odnose snaga signala ($\beta > -5$) nagib krive veći kada nema eho signala, što navodi na zaključak da će i efekat ometanja biti veći.

Ukoliko se posmatra uticaj odnosa snage signala ometanja i korisnog signala može se doći do zaključka da u prisustvu eho signala vrednost određenog ugla ekvisignalnog pravca zavisi od snage signala ometanja. Što je signal ometanja jači od korisnog signala, to je greška u određivanju vrednosti ugla ekvisignalnog pravca veća.

Može se zaključiti da će se u slučaju ometanja metodom ometanja „Cross eye“ najbolji rezultati postići ukoliko se primeni amplitudna modulacija eho signala i ako je istovremeno izvršeno ometanje odvođenjem stroba daljine.

Literatura

- [1] Van Brunt, Leroy, B.: „Applied ECM Volume 1“ EW Engineering, Washington, 1980.
- [2] Gacović, Č.: „Raketni sistemi PVO u protivelektronskoj borbi“, Vojnoizdavački novinski centar, Beograd, 1988.
- [3] Tirmanić, S., Bursać, S.: „Raketni sistemi“, VIZ, Beograd, 2001.
- [4] Lothes, R. N.: „Radar Vulnerability to Jamming“, Artech House, New York, 1990.

HIDRODINAMIČKI MODEL PODVODNOG PROJEKTILA

Pukovnik dr *Miroslav Radosavljević*, dipl. inž.
Vojna akademija

Rezime:

Radi dobijanja kvalitetnog matematičkog modela podvodnog projektila u radu su definisane ulazne i izlazne veličine, brzine i ubrzanje projektila. Uz zadate uslove mogućeg kretanja projektila definisan je model podvodnog projektila sa šest jednačina.

Ključne reči: podvodni projektil, koordinatni sistemi, sile i momenti.

HIDRODINAMICAL MODEL OF AN UNDERWATER PROJECTILE

Summary:

The paper analyzes an underwater projectile. The input and output values, the projectile speed and acceleration are defined for a quality definition of the projectile mathematical model. With the conditions of the projectile potential movement previously set out, the torpedo model is defined by six equations.

Key words: Underwater projectile, coordinate systems, forces and moments.

Uvod

Moderni podvodni projektili su kompleksni tehnički sistemi kojima upravljaju računari ugrađeni u njih. Upravljanje takvim projektilima je zahtevno, a sinteza sistema zahteva kvalitetne matematičke modele.

Analiza performansi dobro upravljivih podvodnih projektila neminovno zahteva detaljno poznavanje njihove dinamike, akustičkih senzora, uređaja za merenje pojedinih veličina koje direktno ili indirektno definišu dinamiku podvodnog projektila, kao i poznavanje poremećaja i uslova u kojima projektil izvršava svoju misiju.

Osnovu formiranja matematičkog modela podvodnog projektila čini analiza uslova i energetskog bilansa koji vladaju pri kretanju podvodnog projektila kroz vodu. Na osnovu poznatih zakona hidrodinamike i energetskih bilansa sistema projektila i voda, dolazi se do matematičkog modela dinamike podvodnog projektila. Rešavanjem ovako dobijenih sistema jednačina dobija se stanje podvodnog projektila u vodenom prostoru u svakom momentu.



Sl. 1 – Izgled tipičnog podvodnog projektila

Ulazne i izlazne promenljive

Ulazne promenljive

Posmatrani podvodni projektil je multivarijabilni sistem upravljanja. Broj ulaznih promenljivih je različit i zavisi od tipa upravljanja. Klasični podvodni projektili imaju tri grupe upravljačkih organa: kormila (horizontalna i vertikalna), elerone i pogon.

Mada promene pojedinih ulaznih promenljivih deluju dominantno na neku od izlaznih veličina, ne može se zanemariti njihov uticaj na ostale izlazne veličine. Štaviše, jedna ulazna promenljiva može, u određenom režimu rada, delovati značajno na više izlaza. Drugim rečima, sinteza kvalitetnog sistema upravljanja zahteva analizu dinamičkog ponašanja podvodnog projektila kao multivarijabilnog sistema.



Sl. 2 – Izgled izvršnih organa kojima se ostvaruju ulazne veličine

Kormila su klasični upravljački organi podvodnog projektila. Postoje od momenta kada se zna za ovu vrstu projektila i u najvećem broju su zadržali svoju ulogu i u današnje vreme. Kormila predstavljaju krute površine koje se ugrađuju na samom kraju (po krmu) podvodnog projektila. Postavljaju se u horizontalnu i vertikalnu (međusobno normalne) ravan podvodnog projektila. Otklon kormila u jednu ili drugu stranu, u odnosu na ravan simetrije, generiše sile i momente pod čijim uticajem se menjaju izlazne veličine.

Kormila se postavljaju u parovima – simetrično u odnosu na referentnu ravan projektila. Ovako postavljena, omogućavaju zauzimanje bilo kog položaja tačke u vodenom prostranstvu, što određuje manevarske osobine podvodnog projektila.

U horizontalnoj ravni postavljaju se horizontalna kormila, po jedno sa svake strane u odnosu na vertikalnu ravan. Njihovim otklonom ostvaruje se upravljanje u vertikalnoj ravni – zauzimanje određene dubine. Vertikalna kormila ugrađuju se u vertikalnoj ravni podvodnog projektila čijim otklonom se dostiže bilo koja tačka u horizontalnoj ravni.

Ulazne promenljive u modelu dinamike projektila označavaju se sa: otklon smernog kormila $\delta_{RV} [^{\circ}]$ i otklon dubinskog kormila $\delta_{RH} [^{\circ}]$.

Otklon kormila od nultog položaja može biti veoma različit. Pri određivanju predznaka otklona kormila najvažniji kriterijum predstavlja izbor odgovarajućih koordinatnih sistema. Među torpedistima je uobičajeno da je otklon vertikalnih kormila ulevo pozitivan, gledajući smer kretanja projektila. Kod horizontalnih kormila pozitivan otklon kormila je prema dole.

Eleroni su upravljački organi podvodnog projektila namenjeni za ograničavanje ugla nagiba u vertikalno-poprečnoj ravni. Svojim zakretanjem generišu silu i moment čijim delovanjem se vrši stabilizacija projektila u poprečnoj vertikalnoj ravni u željene okvire. Izrađuju se u vidu dve krute površine i postavljaju u horizontalnoj ravni. Otklon jedne krute površine elerona je u suprotnu stranu u odnosu na drugu kormilnu površinu. Otklon elerona u modelu podvodnog projektila obeležavaće se sa $\delta_e [^{\circ}]$. Pozitivan otklon je otklon leve površine nadole, a desne nagore, gledajući u smeru kretanja projektila.

Pogon podvodnog projektila je upravljački organ. Svojim radom generiše silu poriva koja, pretežno, obezbeđuje projektilu kretanje u pravcu njegove uzdužne ose. Osnovni element sile poriva je broj obrtaja propelera $n [o/s]$. Vektor ulaznih promenljivih dat je sledećim izrazom:

$$\bar{u}(t) = [n, \delta_v, \delta_h, \delta_e]^T \quad (1)$$

Izlazne promenljive

Izlazne promenljive podvodnog projektila jednoznačno određuju poziciju u vodenom prostranstvu. Predstavljaju meru delovanja ulaznih promenljivih i neželjenih spoljnih, poremećajnih, sila. Izlazne veličine su: kurs podvodnog projektila $-\Psi [^{\circ}]$, ugao trima $\Theta [^{\circ}]$, ugao nagiba $-\varphi [^{\circ}]$, ugaone brzine $-p [^{\circ}/s]$, $q [^{\circ}/s]$ i $r [^{\circ}/s]$ i brzine podvodnog

projektila $-V_x$, V_y i V_z na odgovarajućim osama i koordinate podvodnog projektila u vodenom prostoru – x , y i z .

Kurs podvodnog projektila $\Psi \left[^0 \right]$ predstavlja tradicionalno navigacijski kvantifikator, meru zakretanja podvodnog projektila, u horizontalnoj ravni. Definiše se uglom zakretanja uzdužnice podvodnog projektila od ravni pravog meridijana na poziciji podvodnog projektila.

U ovom radu kurs podvodnog projektila označava zakretanje ulevo ili udesno od uzdužnice broda gađača, koja se predstavlja x -osom inercijskog koordinatnog sistema. Pozitivni ugao je zakretanje podvodnog projektila u desnu stranu gledano u odnosu na smer kretanja podvodnog projektila ili u smeru kretanja kazaljke na satu.

Ugao trima $\Theta \left[^0 \right]$ jeste mera kojom se izražava zakretanje podvodnog projektila u vertikalnoj $x-z$ ravni. Ova ravan leži u uzdužnici podvodnog projektila i normalna je na horizontalnu $x-y$ ravan u kojoj, takođe, leži uzdužnica podvodnog projektila. Ove dve ravni su ravni simetrije podvodnog projektila.¹ Pozitivni ugao zaokreta trima je „na pliche“ ili kretanje u vertikalnoj ravni u smeru suprotnom od kretanja kazaljke na satu.

Ugao bočnog nagiba $\varphi \left[^0 \right]$ meri se odstupanjem poprečne ose podvodnog projektila u poprečnoj vertikalnoj ravni od horizontalne ravni. Pozitivno zakretanje je otklon z -ose u odnosu na $x-y$ ravan nadesno.

Brzina podvodnog projektila predstavlja napredovanje težišta podvodnog projektila u smerovima odgovarajućih osa inercijskog koordinatnog sistema. Za ispravnu definiciju kretanja podvodnog projektila mora se uzeti ukupna brzina koja se dobija izrazom:

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \quad (2)$$

a smer sabiranjem vektorskih komponenti brzine.

Koordinate položaja podvodnog projektila u prostoru označavaju dostignuti nivo centra mase u inercijskom koordinatnom sistemu. Iznos vektora \vec{R} određuje se sledećim izrazom:

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (3)$$

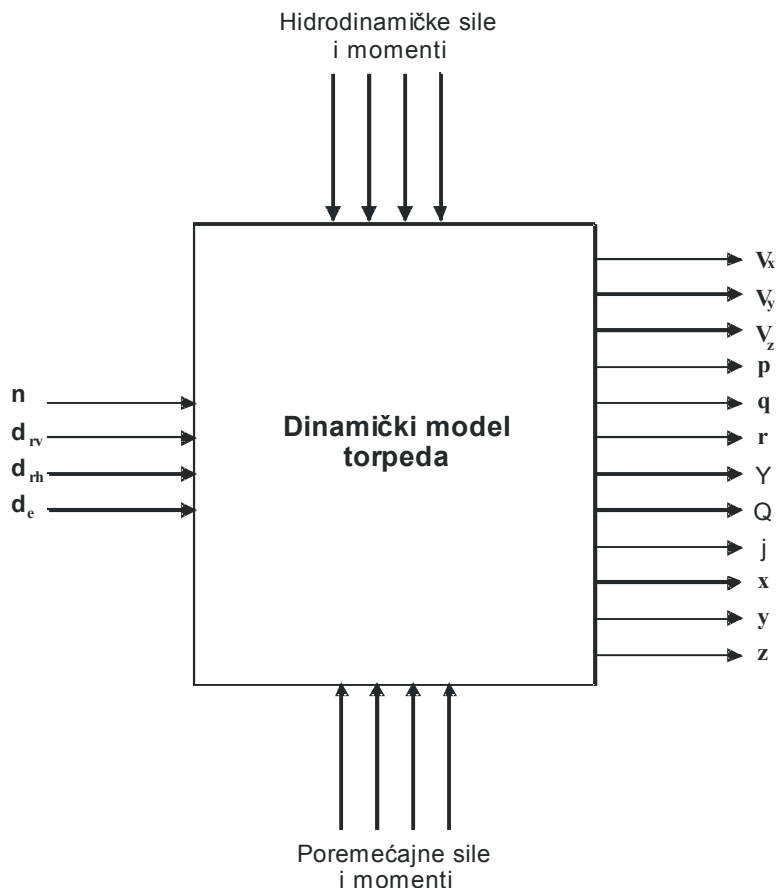
a smer se dobija smerom vektorskog zbira komponenti x , y i z .

Izlazni vektor ima dvanaest promenljivih prikazanih relacijom:

$$\vec{y} = [V_x, V_y, V_z, p, q, r, \Psi, \Theta, \varphi, x, y, z]^T \quad (4)$$

¹ Projektil je dvoosno simetrično telo.

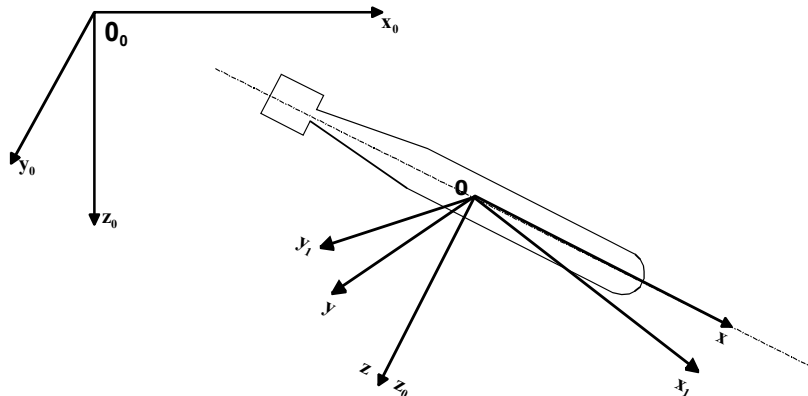
Na slici 3. šematski su prikazane ulazne i izlazne promenljive tipičnog podvodnog projektila – torpeda.



Sl. 3 – Blok-šema podvodnog projektila kao multivarijabilnog sistema

Koordinatni sistemi

Za rešavanje različitih problema upravljanja podvodnog projektila korišće se različiti koordinatni sistemi. Pravilan izbor koordinatnih sistema omogućuje dobijanje pogodnog oblika rešavanja matematičkog modela kretanja i upravljanja podvodnog projektila. U ovom radu korišćeni su: inercijalni (nepokretni), vezani i brzinski koordinatni sistemi. Pored navedenih mogu se koristiti i polubrzinski i poluvezani. Na slici 4 prikazana su tri koordinatna sistema koji će se primenjivati u radu.



Sl. 4 – Izgled inercijalnog, vezanog i brzinskog koordinatnog sistema

Inercijalni koordinatni sistem

Pravougli koordinatni sistem $O_0x_0y_0z_0$ nepomičan je u prostoru. Koordinatni početak se vezuje za neku proizvoljno izabranu tačku u prostoru. Osa O_0x_0 leži u smeru početnog kretanja podvodnog projektila, O_0z_0 usmerena je vertikalno naniže ka centru gravitacije Zemlje, a osa O_0y_0 je postavljena tako da čini pozitivno kretanje u smeru kretanja kazaljke na satu.

Zanemarivanjem rotacije Zemlje i kretanje broda gađača ovaj sistem se smatra inercijalnim. U navedenom koordinatnom sistemu prikazuju se putanje centra težišta mase podvodnog projektila.

Vezani koordinatni sistem

Vezani koordinatni sistem $Oxyz$ čvrsto je vezan za centar mase podvodnog projektila. Podužna i Oz -osa leže u ravni simetrije, pri čemu je Ox -osa usmerena u pravcu kretanja, a Oy -osa normalna je na $x-z$ ravan i usmerena je udesno. Položaj vezanog koordinatnog sistema prema inercijalnom određen je Ojlerovim uglovima Ψ, Θ, φ .

Vezani koordinatni sistem često se naziva dinamički koordinatni sistem, a koristi se pri proučavanju i simulaciji samonavođenja podvodnog projektila.

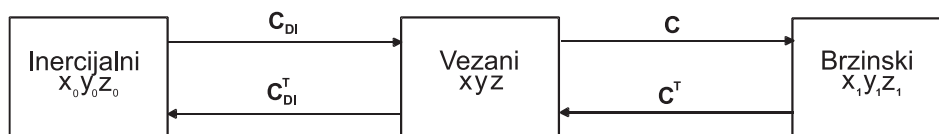
Brzinski koordinatni sistem

Brzinski koordinatni sistem vezan je za putanju podvodnog projektila i koristi se pri definisanju i proučavanju hidrodinamičkih sila i momenata koji deluju na projektil. Definiše se osama $O_1x_1y_1z_1$. Koordinatni početak leži u centru mase podvodnog projektila. Osa O_1x_1 kolinearna je sa vektorom brzine podvodnog projektila, osa O_1y_1 pomaknuta je za ugao β u odnosu na Oy -osu, a O_1z_1 -osa za ugao α u odnosu na Oz osu vezanog koordinatnog sistema.

Transformacija koordinatnih sistema

Položaj vezanog koordinatnog sistema u odnosu na inercijalni određuje se međusobnim položajem odgovarajućih osa.

Položaj vezanog koordinatnog sistema u odnosu na inercijalni određuje se uglovima Ψ, Θ, φ .



Sl. 5 – Prelazak iz inercijalnog u vezani koordinatni sistem

Pretpostavimo da se ose vezanog koordinatnog sistema $Oxyz$ u određenom trenutku poklapaju sa osama $O_0x_0y_0z_0$ inercijalnog koordinatnog sistema. Transformacija iz inercijalnog u vezani koordinatni sistem ostvaruje se preko tri sukcesivne jednoosne rotacije, i to: rotacijom oko ose Oz_0 inercijalnog koordinatnog sistema za ugao Ψ , rotacijom oko ose Oy_0 inercijalnog koordinatnog sistema za ugao Θ , rotacijom oko ose Ox_0 inercijalnog koordinatnog sistema za ugao φ , pri čemu su matrice sukcesivnih jednoosnih rotacija $[\Psi], [\Theta], [\varphi]$ definisane na sledeći način:

$$[\Psi] = \begin{bmatrix} \cos \Psi & \sin \Psi & 0 \\ -\sin \Psi & \cos \Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[\Theta] = \begin{bmatrix} \cos \Theta & 0 & -\sin \Theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \Theta & 0 & \cos \Theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[\varphi] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (7)$$

Nakon množenja matrica sukcesivnih jednoosnih rotacija dobija se transformacija iz inercijalnog u vezani koordinatni sistem.

$$C_{iD} = [\Psi] \cdot [\Theta] \cdot [\varphi] \quad (8)$$

Ova transformaciona matrica je ortogonalna, pa je transformacija iz vezanog u inercijalni koordinatni sistem definisana sledećom relacijom:

$$C_{Di} = C_{iD}^T \quad (9)$$

$$C_{iD} = \begin{bmatrix} \cos \Psi \cos \Theta & \sin \Psi \cos \Theta & -\sin \Theta \\ \sin \varphi \cos \Psi \sin \Theta - \cos \varphi \sin \Psi & \sin \varphi \sin \Psi \sin \Theta + \cos \varphi \cos \Psi & \sin \Psi \sin \Theta \\ \cos \varphi \cos \Psi \sin \Theta + \sin \varphi \sin \Psi & \cos \varphi \sin \Psi \sin \Theta - \sin \varphi \cos \Psi & \cos \varphi \cos \Theta \end{bmatrix} \quad (10)$$

Ugao Ψ predstavlja ugao skretanja u horizontalnoj ravni i smatra se pozitivnim pri skretanju osa od $x \rightarrow y$, odnosno skretanju u smeru obrtanja kazaljke na satu. Ugao Θ je ugao trima ili propinjanja, a pozitivan smer mu je pri zakretanju ose $z \rightarrow x$ ili zakretanju koje je suprotno kretanju kazaljke na satu. Ugao φ je ugao nagiba i smatra se pozitivnim pri skretanju ose $y \rightarrow z$, odnosno zakretanju koje je suprotno kretanju kazaljke na satu.

Položaj brzinskog koordinatnog sistema u odnosu na vezani koordinatni sistem definiše se uglovima α, β . Brzinski koordinatni sistem se prevodi iz vezanog obrtanjem određenih osa, kao što je prikazano na slici 4.

Transformacija iz brzinskog u vezani koordinatni sistem ostvaruje se preko dve sukcesivne jednoosne rotacije, i to: rotacijom oko ose Oz inercijskog koordinatnog sistema za ugao α i rotacijom oko ose Oy inercijskog koordinatnog sistema za ugao β .

$$[\beta] = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$[\alpha] = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (12)$$

Nakon množenja matrica sukcesivnih jednoosnih rotacija dobija se matrica transformacija iz brzinskog u vezani koordinatni sistem.

$$C = [\alpha] \cdot [\beta] = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & -\cos \alpha \sin \beta & -\sin \alpha \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ \sin \alpha \cos \beta & -\sin \alpha \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (13)$$

Pošto je matrica ortogonalna matrici transformacije, tada se transformacija iz vezanog u brzinski koordinatni sistem može predstaviti sledećim izrazom:

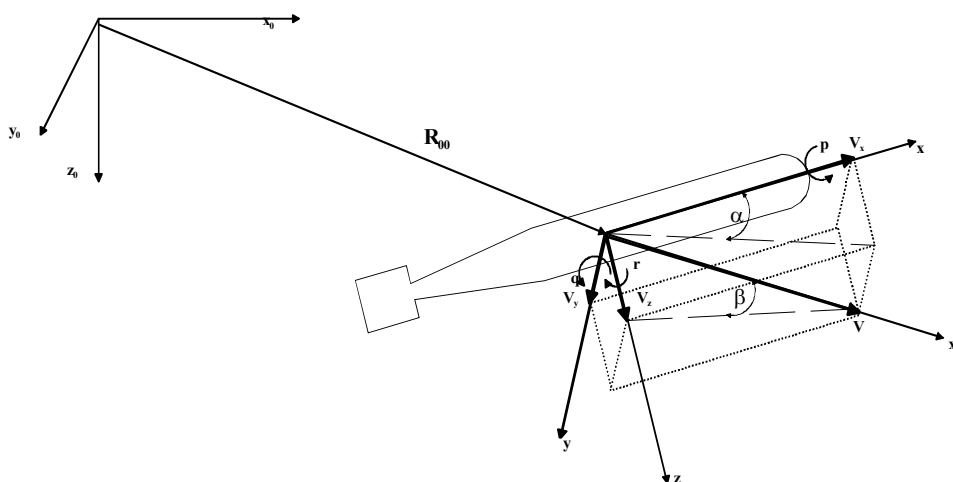
$$C_b = C^T \quad (14)$$

Ugao α je napadni ugao podvodnog projektila i smatra se pozitivnim kada je prednji deo podvodnog projektila usmeren prema površini mora. Ugao β je ugao klizanja, a smatra se pozitivnim kada struja vode dolazi prvo na repni deo podvodnog projektila, pa na prednji.

Brzine i ubrzanja podvodnog projektila

Za određivanje apsolutne brzine i ubrzanja podvodnog projektila u vezanom koordinatnom sistemu pretpostavlja se uopšteno kretanje krutog tela sa šest stepeni slobode. Koordinatni početak inercijalnog i vezanog koordinatnog sistema se, u principu, ne podudaraju (sem u momentu lansiranja). Vezani koordinatni sistem leži u centru mase podvodnog projektila. Kretanje podvodnog projektila predstavlja se kretanjem tačke težišta njegovog centra mase. Na slici 6. prikazani su smerovi komponenta vektora brzine $\vec{V}(V_x, V_y, V_z)$ i ubrzanja $\vec{\Omega}(p, q, r)$ podvodnog projektila, kao i uglovi koji daju smer brzini i ubrzanju podvodnog projektila.

Sl. 6 – Grafički prikaz smerova i položaja vektora brzine i ubrzanja podvodnog projektila



U nekom trenutku položaj težišta mase podvodnog projektila u inercijalnom koordinatnom sistemu određen je radijusom vektora \vec{R}_{OG} , a u dinamičkom koordinatnom sistemu sa \vec{R}_G . Iz slike 6 se vidi da vredi sledeća relacija:

$$\vec{R}_{OG} = \vec{R}_{OO} + \vec{R}_G \quad (15)$$

ili ako se primeni matrica transformacije vezanog koordinatnog sistema u inercijalni:

$$\vec{R}_{OG} - \vec{R}_{OO} = C_{DI} \cdot \vec{R}_G \quad (16)$$

Izraz (16) može se napisati i u sledećoj formi:

$$\vec{R}_G = C_{DI} \cdot (\vec{R}_{OG} - \vec{R}_{OO}) \quad (17)$$

Ukoliko težište podvodnog projektila ima koordinate x_G, y_G, z_G , a zna se da su $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ jedinični vektori vezanog koordinatnog sistema, onda se izraz (15) može napisati u sledećem obliku:

$$\vec{R}_{OG} = \vec{R}_{OO} + \vec{R}_G = \vec{R}_{OO} + x_G \cdot \vec{i} + y_G \cdot \vec{j} + z_G \cdot \vec{k} \quad (18)$$

Kretanje podvodnog projektila podrazumeva translatorno i rotaciono kretanje centra mase u odnosu na inercijalni koordinatni sistem. Ovako definisano kretanje zove se apsolutno kretanje.

Ukoliko se za izraz (18) nađe prvi izvod, dobija se sledeći oblik brzine kretanja centra mase podvodnog projektila:

$$\frac{d\vec{R}_{OG}}{dt} = \frac{dy}{dt} \vec{R}_{OO} + x_G \cdot \frac{d\vec{i}}{dt} + y_G \cdot \frac{d\vec{j}}{dt} + z_G \cdot \frac{d\vec{k}}{dt} \quad (19)$$

Primenom Poissonovog izraza za prvi izvod po vremenu izraza (19) na jedinične vektore vezanog koordinatnog sistema, i ako se zameni:

$$\vec{\Omega} = p \cdot \vec{i} + q \cdot \vec{j} + r \cdot \vec{k} \quad (20)$$

dobija se sledeći izraz:

$$\vec{V}_{OG} = \vec{V}_{OO} + \vec{\Omega} \times \vec{R}_G \quad (21)$$

Analizom dobijenih brzina proizilazi da je brzina podvodnog projektila jednaka $\vec{V} \equiv \vec{V}_{OO}$. Izraz (21) se u matricnom obliku može napisati:

$$\vec{V} = \begin{bmatrix} V_x \cdot \vec{i} \\ V_y \cdot \vec{j} \\ V_z \cdot \vec{k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ p & q & r \\ x_G & y_G & z_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_x & -r \cdot y_G & q \cdot z_G \\ V_y & -r \cdot x_G & p \cdot z_G \\ V_z & q \cdot x_G & p \cdot y_G \end{bmatrix} \quad (22)$$

Apsolutno ubrzanje težište mase podvodnog projektila u vektorskom obliku dobija se iz izraza (21) i poprima sledeći oblik:

$$\vec{a} = \vec{a}_{OO} + \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{R}_G) + \frac{d\vec{\Omega}}{dt} \times \vec{R}_G \quad (23)$$

Izraz (23) može se predstaviti u matricnom obliku na sledeći način:

$$\vec{a} = \begin{bmatrix} \dot{V}_x \\ \dot{V}_y \\ \dot{V}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ p & q & r \\ V_x - r \cdot y_G + q \cdot z_G & V_y + r \cdot x_G - p \cdot z_G & V_z - q \cdot x_G + p \cdot y_G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{p} & \dot{q} & \dot{r} \\ x_G & y_G & z_G \end{bmatrix} \quad (24)$$

ili u matricnom obliku:

$$\vec{a} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_x - rV_y + qV_z - (q^2 + r^2)x_G + (pq - \dot{r})y_G + (rp + \dot{q})z_G \\ \dot{V}_y - pV_z + rV_x - (p^2 + r^2)y_G + (rq - \dot{p})z_G + (qp + \dot{r})x_G \\ \dot{V}_z - qV_x + pV_y - (r^2 + q^2)z_G + (pr - \dot{q})x_G + (rq + \dot{p})z_G \end{bmatrix} \quad (25)$$

Hidrodinamički model podvodnog projektila

Osnovna pretpostavka za određivanje matematičkog modela podvodnog projektila jeste da se njegovo kretanje može dovoljno tačno predstaviti modelom krutog tela u kvazistacionarnom strujnom polju vode. Pored navedene, uvode se i sledeće pretpostavke: kretanje okružujuće vode podvodnog projektila nastaje jedino usled kretanja podvodnog projektila; kretanje vode je bezvrtložno; oko projektila postoji beskonačna tečnost; projektil poseduje dve međusobno normalne ravni simetrije; projektilu se u odnosu na pravac kretanja mogu razlikovati prednji, zadnji, gornji i donji deo; projektil predstavlja kruto telo sa šest stepeni slobode kreta-

nja; sistem projektila i okružujuća voda ima isto toliko stepeni slobode kao i samo kruto telo; za projektil je čvrsto vezan dinamički koordinatni sistem; hidrodinamički koeficijenti sila i momenata zavise od Rejnoldsovog broja, vektora brzine, ubrzanja, ugaone brzine i otklona komandnih površina; projektil i hidrodinamički efekti na trup podvodnog projektila u kretanju potiču od sila i momenata koje nastaju usled kretanja vode i spoljne sile i momenata tih sila koje podrazumevaju neinercijalne sile.

Kretanje u idealnoj vodi

Karakteristike idealne vode su nestišljivost, homogenost i bezviskoznošć. Za kretanje podvodnog projektila i vode postoji potencijal $\varphi_p(x_0, y_0, z_0, t)$ brzine kretanja vode \vec{u}_s . Projekcija ove brzine na ose inercijalnog koordinatnog sistema date su u sledećem obliku:

$$u_{sx_0} = \frac{\partial \varphi_p}{\partial x_0}; u_{sy_0} = \frac{\partial \varphi_p}{\partial y_0}; u_{sz_0} = \frac{\partial \varphi_p}{\partial z_0} \quad (26)$$

U hidrodinamici je poznato da potencijal φ_p mora da zadovolji Laplasovu jednačinu:

$$\Delta \varphi_p = \frac{\partial^2 \varphi_p}{\partial x_0^2} + \frac{\partial^2 \varphi_p}{\partial y_0^2} + \frac{\partial^2 \varphi_p}{\partial z_0^2} = 0 \quad (27)$$

Granični uslovi ovog izraza su:

– na dovoljno velikim rastojanjima voda miruje, što se matematički može predstaviti izrazom:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\partial^2 \varphi_p}{\partial x_0^2} = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\partial^2 \varphi_p}{\partial y_0^2} = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\partial^2 \varphi_p}{\partial z_0^2} = 0 \quad (28)$$

– voda ne prolazi kroz površinu podvodnog projektila (ne ulazi u unutrašnjost podvodnog projektila):

$$V_n = \left. \frac{d\varphi_n}{dn} \right|_s \quad (29)$$

gde je:

V_n – brzina vode u smeru normale na površinu tela,

$\frac{d\varphi_n}{dn}$ – normalna brzina čestica u dodiru sa projektilima u istoj tački,

n – spoljna normala na element površine podvodnog projektila dS ,
 $V = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \rightarrow \infty$.

Potencijal φ_p moguće je odrediti samo ako se poznaju komponente brzine pojedinih tačaka površine podvodnog projektila S .

Za centar mase podvodnog projektila vezan je koordinatni početak vezanog koordinatnog sistema koji se kreće brzinom V i ugaonom brzinom $\vec{\Omega}$. Brzina bilo koje tačke M , proizvoljno izabrane na površini podvodnog projektila S , u inercijalnom koordinatnom sistemu se u vektorskom obliku može predstaviti:

$$\vec{V}_M = \vec{V} + \vec{\Omega} \times \vec{R} \quad (30)$$

Izraz $\vec{R} = x_0 \cdot \vec{i} + y_0 \cdot \vec{j} + z_0 \cdot \vec{k}$ predstavlja udaljenost izabrane tačke M na površini podvodnog projektila S od koordinatnog početka inercijalnog koordinatnog sistema.

Normalna komponenta brzine bilo koje tačke na površini podvodnog projektila može se izraziti sledećim izrazom :

$$V_n = \left. \frac{d\varphi_n}{dn} \right|_S = \vec{V} \circ \vec{n} = \vec{V}_0 \circ \vec{n} + (\vec{\Omega} \times \vec{R}) \circ \vec{n} \quad (31)$$

Veličina brzine u pravcu normale na površinu prema izrazu (32) je:

$$\begin{aligned} V_n = & V_{x_0} \cos(n, x) + V_{y_0} \cos(n, y) + V_{z_0} \cos(n, z) + \\ & + p \left[y \cos(n, z) - y \cos(n, y) \right] + q \left[z \cos(n, x) - x \cos(n, z) \right] + \\ & + r \left[x \cos(n, y) - y \cos(n, x) \right]. \end{aligned} \quad (32)$$

Komponente translatorne i ugaone brzine su funkcije vremena, dok koordinate x, y, z to nisu. Iz izraza (32) proizilazi da se granični uslovi, dati izrazima (28) i (29), na površini tela podvodnog projektila S mogu izraziti u obliku zbira od šest članova, pri čemu je:

$$\frac{\partial \varphi_p}{\partial n} = V_x \frac{\partial \varphi_{p1}}{\partial n} + V_y \frac{\partial \varphi_{p2}}{\partial n} + V_z \frac{\partial \varphi_{p3}}{\partial n} + p \frac{\partial \varphi_{p4}}{\partial n} + q \frac{\partial \varphi_{p5}}{\partial n} + r \frac{\partial \varphi_{p6}}{\partial n} \quad (33)$$

gde su φ_{pi} ($i = 1, 2, \dots, 6$) pojedini potencijali koji zadovoljavaju Laplasovu jednačinu i uslov da je u beskonačnosti $\varphi_{pi} \rightarrow 0$, a na površini tela važe sledeći granični uslovi:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \varphi_{p1}}{\partial n} &= \cos(n, x); \frac{\partial \varphi_{p2}}{\partial n} = \cos(n, y); \frac{\partial \varphi_{p3}}{\partial n} = \cos(n, z); \\
\frac{\partial \varphi_{p4}}{\partial n} &= y \cdot \cos(n, z) - y \cos(n, y); \\
\frac{\partial \varphi_{p5}}{\partial n} &= z \cos(n, x) - x \cos(n, z) \\
\frac{\partial \varphi_{p6}}{\partial n} &= x \cos(n, y) - y \cos(n, x)
\end{aligned} \tag{34}$$

Granični uslovi na površini tela ne zavise od vremena, što navodi na zaključak da potencijal φ_{pi} ($i = 1, 2, \dots, 6$) zavisi samo od oblika tela. Radi jednostavnijeg pisanja uvode se sledeće smene:

$$v_1 = V_x; v_2 = V_y; v_3 = V_z; v_4 = p; v_5 = q; v_6 = r \tag{35}$$

Korišćenjem izraza (2.35) potencijal φ_{pi} može se predstaviti sledećim izrazom:

$$\varphi_p(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^6 v_i(t) \cdot \varphi_{pi}(x, y, z) = \sum_{i=1}^6 v_i \varphi_{pi} \tag{36}$$

Kinetička energija sistema projektil – okružujuća voda

Kinetička energija sistema definiše se kao zbir kinetičkih energija podvodnog projektila i okružujuće sredine vode, odnosno:

$$T_s = \frac{1}{2} \cdot C^T \cdot D_s \cdot C \tag{37}$$

gde je:

$$C = [V_x, V_y, V_z, p, q, r]^T \text{ – vektor opštih brzina,}$$

D_s – matrica inercije sistema koja se izračunava kao:

$$D_s = D_L + D \tag{38}$$

Iz hidrodinamike je poznato da se kinetička energija tečnosti može predstaviti u obliku površinskog integrala površine podvodnog projektila S s potencijalom φ_p ,

$$T_L = -\frac{\rho}{2} \cdot \iint_S \varphi_p \frac{\partial \varphi_p}{\partial n} dS \tag{39}$$

Izraz (39) izvodi se uzimajući spoljnu normalu na kontrolnu površinu posmatrane zapremine. Negativni predznak potiče od spoljne normale na površinu tela u kretanju, što je suprotno od prethodno uzimanih. Ukoliko se izraz (36) uvrsti u izraz (39) izraz za kinetičku energiju vode može se prikazati u sledećem obliku:

$$T_L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 \sum_{k=1}^6 v_i v_k \left(-\rho \cdot \iint_S \varphi_{pi} \frac{\partial \varphi_{pk}}{\partial n} dS \right) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 \sum_{k=1}^6 v_i v_k \lambda_{ik} \quad (40)$$

gde je:

$\lambda_{ik} = -\rho \cdot \iint_S \varphi_{pi} \frac{\partial \varphi_{pk}}{\partial n} dS$ koja se zove pridruženim masama¹ u širem smislu reči.

$$D_L = [\lambda_{ik}] = [\lambda_{ki}], \quad (i = 1, 2, \dots, 6; k = 1, 2, \dots, 6) \quad (41)$$

Zbog simetričnosti članova matrice od 36 elemenata, matrica D_L može se predstaviti sa 21 elementom. Ravni simetrije dalje smanjuju broj članova $\lambda_{ik} \neq 0$. Za projektil koji ima dve ravni simetrije (xy) i (xz) potrebno je odrediti samo 8 elemenata $-\lambda_{ik}$: $(\lambda_{ik})_{ik=1,2,3}$ ima dimenziju mase [kg]; $\lambda_{26}, \lambda_{35}$ ima dimenziju statičkog momenta [kgm] i $(\lambda_{ik})_{ik=4,5,6}$ ima dimenziju momenta inercije [kgm^2].

S obzirom na postojanje ravnine simetrije (xy) i (xy), te postavljanjem koordinatnog početka u težište mase podvodnog projektila i postavljanjem koordinatnih osa tako da predstavljaju ose inercije ($I_{xy} = I_{yz} = I_{xz} = 0$), matrica inercije podvodnog projektila je:

$$D = \begin{bmatrix} m & & & & & \\ & m & & & & 0 \\ & & m & & & \\ & & & I_{xx} & & \\ 0 & & & & I_{yy} & \\ & & & & & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (42)$$

¹ Na osnovu Kirhovljeve i Lambove teorije za određivanje hidrodinamičkih sila pri kretanju krutog tela u idealnoj homogenoj tečnosti javlja se pojam o pridruženoj vodi. Pridružena masa je neka zamišljena masa vode sa svojstvom da se njena kinetička energija pri kretanju brzinom jednakoj brzini tela jednaka kinetičkoj energiji celokupne tekućine koja okružuje telo. Inercijsko delovanje vode na telo jednako je povećanju mase tela u odgovarajućem smeru za određeni iznos.

Uvrštavanjem (41) i (42) u (43) dobija se matrica inercije sistema:

$$D = \begin{bmatrix} m + \lambda_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m + \lambda_{22} & 0 & 0 & 0 & \lambda_{26} \\ 0 & 0 & m + \lambda_{33} & 0 & \lambda_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{xx} + \lambda_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{53} & 0 & I_{yy} + \lambda_{55} & 0 \\ 0 & \lambda_{62} & 0 & 0 & 0 & I_{zz} + \lambda_{66} \end{bmatrix} \quad (43)$$

Uvrštavanjem izraza (43) u (37) dobija se izraz za kinetičku energiju:

$$T_S = \frac{1}{2} \left[(m + \lambda_{11}) \cdot V_x^2 + (m + \lambda_{22}) \cdot V_y^2 + (m + \lambda_{33}) \cdot V_z^2 + (I_{xx} + \lambda_{44}) \cdot p^2 + (I_{yy} + \lambda_{55}) \cdot q^2 + (I_{zz} + \lambda_{66}) \cdot r^2 \right] \quad (44)$$

Opšti oblik jednačine kretanja podvodnog projektila

Za inercijalni prostor u kojem razmatramo inercijalni koordinatni sistem, poznati zakon dinamike (zakon količine kretanja i momenta količine kretanja) u neograničenom vodenom prostranstvu može se napisati u obliku:

$$\frac{d_s \vec{R}}{dt} = \frac{d_s (\vec{Q} + \vec{B})}{dt} = \vec{F} \quad (45)$$

$$\frac{d_s \vec{L}}{dt} = \frac{d_s (\vec{K} + \vec{I})}{dt} = \vec{M} \quad (46)$$

gde su:

\vec{R} – glavni vektor količine kretanja težišta mase podvodnog projektila,

\vec{Q} – glavni vektor količine kretanja tela,

\vec{B} – glavni vektor količine kretanja vode,

\vec{F} – glavni vektor spoljašnjih sila,

\vec{L} – moment količine kretanja s obzirom na težište,

\vec{K} – glavni momenat količine kretanja tela,

\vec{I} – glavni momenat količine kretanja vode,

\vec{M} – glavni momenat spoljnih sila,

$\frac{d_s}{dt}$ – označava prvi izvod po vremenu u inercijalnom koordinatnom sistemu.

Jednačina kretanja tela s hidrodinamičkim karakteristikama najčešće se razvija u vezanom koordinatnom sistemu. Njegova primena zahteva niz transformacija. Imajući u vidu osobine prvog izvoda vektorske funkcije u vezanom i inercijalnom prostranstvu zakoni dinamike su napisani u prikladnoj formi u sledećem izrazu:

$$\frac{d_s \vec{R}}{dt} = \frac{d\vec{R}}{dt} + (\vec{\Omega} \times \vec{R}) \quad (47)$$

$$\frac{d_s \vec{L}}{dt} = \frac{d\vec{L}}{dt} + (\vec{\Omega} \times \vec{L}) + (\vec{V} \times \vec{R}) \quad (48)$$

gde su:

$\vec{\Omega}$ – ugaona brzina zakretanja podvodnog projektila,

\vec{V} – translacijska brzina kretanja podvodnog projektila.

Izrazi su pisani za opšti slučaj, kada težište centra mase i težište tela ne leže u istoj tački. Prvi član u izrazu (47) predstavlja relativnu brzinu vrha vektora \vec{R} u vezanom koordinatnom sistemu, a drugi član je prenosna brzina. Treći član u izrazu (48) posledica je kretanja koordinatnog početka vezanog koordinatnog sistema u odnosu na inercijalan.

Pomoću izraza (49) mogu se izraziti jednačine kretanja u vezanom koordinatnom sistemu:

$$\frac{d\vec{R}}{dt} + (\vec{\Omega} \times \vec{R}) = \vec{F} \quad (49)$$

$$\frac{d\vec{L}}{dt} + (\vec{\Omega} \times \vec{L}) + (\vec{V} \times \vec{R}) = \vec{M} \quad (50)$$

Iz teorijske mehanike poznate su projekcije impulsne sile $\vec{R} = \vec{Q} + \vec{B}$ i impulsnog momenta $\vec{L} = \vec{K} + \vec{I}$ na osama vezanog koordinatnog sistema. Određene su parcijalnim izvodima ukupne kinetičke energije sistema voda + projektil, po odgovarajućim komponentama brzine, odnosno ugaone brzine:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \frac{\partial T_s}{\partial V_x} \\ \frac{\partial T_s}{\partial V_y} \\ \frac{\partial T_s}{\partial V_z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} q \cdot \frac{\partial T_s}{\partial V_z} - r \cdot \frac{\partial T_s}{\partial V_y} \\ r \cdot \frac{\partial T_s}{\partial V_x} - p \cdot \frac{\partial T_s}{\partial V_z} \\ p \cdot \frac{\partial T_s}{\partial V_z} - q \cdot \frac{\partial T_s}{\partial V_x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \quad (51)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \frac{\partial T_s}{\partial p} \\ \frac{\partial T_s}{\partial q} \\ \frac{\partial T_s}{\partial r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} q \cdot \frac{\partial T_s}{\partial r} - r \cdot \frac{\partial T_s}{\partial q} \\ r \cdot \frac{\partial T_s}{\partial p} - p \cdot \frac{\partial T_s}{\partial r} \\ p \cdot \frac{\partial T_s}{\partial q} - q \cdot \frac{\partial T_s}{\partial p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_y \cdot \frac{\partial T_s}{\partial V_z} - V_z \cdot \frac{\partial T_s}{\partial V_y} \\ V_z \cdot \frac{\partial T_s}{\partial V_x} - V_x \cdot \frac{\partial T_s}{\partial V_z} \\ V_x \cdot \frac{\partial T_s}{\partial V_z} - V_y \cdot \frac{\partial T_s}{\partial V_x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (52)$$

gde su:

F_x, F_y, F_z – uzdužna, bočna i poprečna spoljašnja sila na telo podvodnog projektila,

M_x, M_y, M_z – momenti bočnog nagiba, posrtanja i zakretanja izazvani spoljnim silama.

Nakon jednostavnijih transformacija izrazi (51) i (52) mogu se jednostavnije napisati na sledeći način:

$$\vec{D}_s \cdot \frac{d\vec{C}}{dt} + \vec{B} \cdot \vec{D}_s \cdot \vec{C} = \vec{P} \quad (53)$$

gde je:

$P = [F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z]^T$ – vektor spoljnih sila i momenata,

B – kvadratna matrica opštih brzina oblika:

$$B = \begin{bmatrix} 0 & -r & q & 0 & 0 & 0 \\ r & 0 & -p & 0 & 0 & 0 \\ -q & p & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -V_z & V_y & 0 & -r & p \\ V_z & 0 & -V_x & r & 0 & q \\ -V_y & V_x & 0 & -q & p & 0 \end{bmatrix} \quad (54)$$

Nakon svih množenja vektorske jednačine (53) dolazi se do šest skalarnih jednačina kretanja podvodnog projektila u vezanom koordinatnom sistemu:

$$\begin{bmatrix} (m + \lambda_{11}) \cdot \dot{V}_x - (m + \lambda_{22}) \cdot V_y \cdot r - \lambda_{26} \cdot r^2 + (m + \lambda_{33}) \cdot V_z \cdot q + \lambda_{35} \cdot q^2 \\ (m + \lambda_{22}) \cdot \dot{V}_y + \lambda_{26} \cdot \dot{r} + (m + \lambda_{11}) \cdot V_x \cdot r - (m + \lambda_{33}) \cdot V_z \cdot p - \lambda_{35} \cdot p \cdot q \\ (m + \lambda_{33}) \cdot \dot{V}_z + \lambda_{35} \cdot \dot{q} - (m + \lambda_{11}) \cdot V_x \cdot q + (m + \lambda_{22}) \cdot V_y \cdot p + \lambda_{26} \cdot p \cdot r \\ (I_{xx} + \lambda_{44}) \cdot \dot{p} - (m + \lambda_{22}) \cdot V_x \cdot V_z - \lambda_{26} \cdot V_z \cdot r + (m + \lambda_{33}) \cdot V_y \cdot V_z + \lambda_{35} \cdot V_y \cdot q - \\ (I_{yy} + \lambda_{55}) \cdot q \cdot r - \lambda_{35} \cdot V_z \cdot r + (I_{zz} + \lambda_{66}) \cdot q \cdot r + \lambda_{26} \cdot V_y \cdot q \\ (I_{yy} + \lambda_{55}) \cdot \dot{q} + \lambda_{35} \cdot \dot{V}_z + (m + \lambda_{11}) \cdot V_x \cdot V_z - (m + \lambda_{33}) \cdot V_x \cdot V_z - \lambda_{35} \cdot V_x \cdot q + \\ (I_{xx} + \lambda_{44}) \cdot p \cdot r + (I_{zz} + \lambda_{66}) \cdot p \cdot r - \lambda_{26} \cdot V_y \cdot p \\ (I_{zz} + \lambda_{66}) \cdot \dot{r} + \lambda_{26} \cdot \dot{V}_y - (m + \lambda_{11}) \cdot V_x \cdot V_y + (m + \lambda_{22}) \cdot V_x \cdot V_y + \lambda_{26} \cdot V_x \cdot r - \\ (I_{xx} + \lambda_{44}) \cdot p \cdot q + (I_{zz} + \lambda_{55}) \cdot p \cdot q + \lambda_{35} \cdot V_z \cdot p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (55)$$

Zaključak

Sprovedenim modelovanjem podvodnog projektila pokazano je da se radi o multivarijabilnom objektu sa šest stepeni slobode. Analizom objekta definisane su ulazne i izlazne veličine i njihove mere. Kvalitetnim izborom koordinatnih sistema omogućeno je dobijanje matematičkog modela za rešavanje na računaru.

Uvažavanjem osnovnih zakona mehanike i uslova koji vladaju pri kretanju projektila kroz vodu uspostavljena je statička i dinamička ravnoteža na osnovu kojih je formiran sistem od šest diferencijalnih jednačina.

Sagledavanjem karakteristika tipičnih projektila broj jednačina sveden je na potrebni (minimalni). U sistem jednačina uključena je masa vode (pridružene mase) koja se javlja pri kretanju projektila kroz vodu. Na desnoj strani sistema jednačina date su sile i momenti koji uravnotežuju sistem. Navedene sile, momenti i pridružene mase, svakako, traže dalje istraživanje.

Literatura

[1] Podobrij, G.M. i dr.: Teoričeskije osnovi torpednogo oružija, Boennoe izdatelstvo Ministarstva oboroni SSSR, 1969.

[2] Patrašev, A.N. i dr.: Prikladnaja gidromehanika, Ministrastvo oboroni SSSR, Moskva, 1970.

[3] Voronjec, K., Obradović, N.: Mehanika fluida, Građevinska knjiga, Beograd, 1979.

- [4] Grupa autora: Podmornički trener, matematički model podmornice, Brodarski institut Zagreb, 1980.
- [5] Nenadović, M.: Stabilnost i upravljivost letelica, prvi deo, SSNO, Beograd, 1981.
- [6] Stojić, R.: Prilog sintezi dinamičkog upravljanja letom aviona, doktorska teza, Tehnička vojna akademija, Beograd, 1984.
- [7] Zabnev, A. F.: Torpednoe oružje, M. Boenoizdat, Moskva, 1984.
- [8] Neimark J. I. i dr.: Dinamičeskie modeli teoriji upravljenja, Nauka, Glavnaja redakcija fiziko-matematičeskoj literaturi, Moskva, 1985.
- [9] Dorodni, V. P.: Torpedi, DOSAAF SSSR, Moskva, 1986.
- [10] Marinković, M.: Dinamička analiza torpeda, Doktorska disertacija, Zagreb, 1987.
- [11] Minović, S.: Osnovi teorije samonavođenih raketa, VINC, Beograd, 1987.
- [12] Lazarević, Ž.: Tehnička hidroakustika, MT Uprava GŠ JNA, Beograd, 1987.
- [13] Rusov, L.: Mehanika - Dinamika Naučna knjiga, Beograd, 1988.
- [14] Radosavljević, M., Milovanović, M., Mataušek, M.: Softversko i softversko-hardverska simulacija samonavođenja akustičkog torpeda na brazdu broda, XLII konferencija ETRAN-a, Vrnjačka banja, 1998.
- [15] Radosavljević, M.: Računarska realizacija sistema samonavođenja torpeda na trag broda, Vojnotehnički glasnik, juli-avgust, 432-438, 1998.
- [16] Radosavljević, M. Modelovanje i softversko-hardverska simulacija upravljanja akustičkim torpedom, magistarki rad, ETF Beograd, 1998.
- [17] Milovanović, M., Radosavljević, M.: HIL simulacija samonavođenja akustičkog torpeda na brazdu broda, Naučnotehnički pregled, br. 4, str. 15-23, Beograd, 1999.
- [18] Radosavljević, M.: Teorijski i eksperimentalni načini određivanja pridruženih masa vode pri kretanju podvodnih projektila, Naučnotehnički pregled, br. 5, str. 81-86, Beograd, 2001.
- [19] Tomašević, N.: Matematika 3 – udžbenik, GŠVSCG, Uprava za školstvo i obuku, VA, Beograd, 2002.

PROMENA FIZIČKO-HEMIJSKIH KARAKTERISTIKA SREDSTAVA ZA HLAĐENJE MOTORA TOKOM EKSPLOATACIJE VOZILA

Major mr *Sreten Perić*, Vojna akademija

Rezime:

Identifikacija stanja sistema hlađenja bez narušavanja njegove funkcije, u uslovima kada do otkaza dolazi, pre svega, usled promene fizičko-hemijskih svojstava rashladnog sredstva motora, ima velike tehničke i ekonomske efekte. Kako se promena funkcionalnosti složenog sistema hlađenja najčešće ogleda u promenama karakteristika sredstva za hlađenje, promena fizičko-hemijskih karakteristika sredstva za hlađenje može se usvojiti kao parametar za ocenu stanja sistema hlađenja. Za ocenu i analizu fizičko-hemijskih karakteristika sredstva za hlađenje danas postoji veoma razvijena merna oprema.

Ključne reči: tečnost za hlađenje, antifriz, sistem za hlađenje, aditiv – inhibitor korozije

CHANGE IN PHYSICO-CHEMICAL CHARACTERISTICS OF ENGINE COOLANTS DURING VEHICLE EXPLOITATION

Summary:

Identification of the condition of a cooling system without disturbing its function, when failures primarily occur due to changes in physico-chemical characteristics of engine cooling agents, has considerable technical and economical effects. Since change in functionality of complex cooling systems is most often a consequence of changes in the characteristics of cooling agents, the change of physico-chemical characteristics of coolants can be accepted as a parameter for evaluating cooling system conditions. There is nowadays a wide range of sophisticated measuring equipment for evaluation and analysis of physico-chemical characteristics of coolants.

Key words: coolant, antifreeze, cooling system, additive- corrosion inhibitor.

Uvod

Zimi i u vreme kada su temperature ispod 0°C i kada se voda kao sredstvo za hlađenje ne može upotrebiti primenjuju se tečnosti zvane antifrizi (*anti* protiv i *freeze* (friz) mraz, smrzavanje).

Destilovana voda, koja se primenjuje u sistemu hlađenja, na temperaturi 0°C prelazi iz tečnog u čvrsto agregatno stanje. Pri tome se povećava njena zapremina za oko 9%. Da bi sprečili oštećenje delova motora koje bi nastalo smrzavanjem destilovane vode na temperaturi ispod 0°C (pucanje glave i bloka motora, te oštećenje ostalih elemenata sistema hlađenja), čistoj vodi se dodaju odgovarajuće tečnosti koje prvenstveno imaju niske tačke mržnjenja, pa se dobijaju mešavine čije su tačke mržnjenja mnogo ispod 0°C. Ove mešavine (antifriz) moraju imati koeficijent provodljivosti toplote i specifičnu toplotu približno kao voda, kako bi se postigao isti efekat hlađenja radi održavanja optimalne radne temperature motora u zimskoj eksploataciji. Naravno da i antifrizi kao tečnosti za hlađenje moraju ispuniti i sve druge prethodno navedene zahteve.

Sve do sredine 1930. godine kao sredstvo za hlađenje primenjivan je metanol. On je dobro obavljao funkciju u pogledu tačke mržnjenja, dok su vrednosti tačke ključanja i specifični toplotni kapacitet bili ispod vrednosti koje je imala voda. Nedostatak metanola bio je i njegova velika isparljivost, pa se nova količina morala češće dodavati u sistem za hlađenje.

Od 1937. godine u vozilima počinje da se koristi novo sredstvo za hlađenje sa boljim hemijskim karakteristikama od metanola. Zbog njegovih dobrih fizičko-hemijskih karakteristika ovo novo sredstvo okarakterisano je kao stalni antifriz. Sredstvo se zasnivalo na mešavini vode i etilen-glikola. Etilen glikol ima visoku temperaturu ključanja, pa je pogodan da se koristi i u letnjem periodu, dok njegova tačka mržnjenja omogućava njegovu upotrebu na vrlo niskim temperaturama koje dostižu vrednosti i do 40°C. Etilen-glikol je otrovan.

Najvažnija komponenta antifrizu jesu inhibitori korozije. Korozioni inhibitor je hemijsko jedinjenje koje, kada se doda u maloj koncentraciji, zaustavlja ili usporava koroziju metala i legura.

Dobar korozioni inhibitor usporava koroziju za 95% kada je u koncentraciji od 80 ppm, a kada je u koncentraciji od 40 ppm usporenje je 90%. Mehanizmi kojim deluju korozioni inhibitori su: formiranje pasivnog sloja (tanak film na površini materijala koji onemogućava dodir sa korozivnim supstancama), usporavanje oksidacionog ili redukcionog dela redoks korozionog sistema, te čišćenje od kiseonika.

Neki korozioni inhibitori su heksamin, fenilendiamin, dimetiletanolamin, natrijumnitrat, cinamaldehyd, i dr. Upotrebljivost bilo koje hemikalije u konkretnom slučaju zavisi od mnogih faktora, od materijala sistema koji treba da zaštite, do prirode supstanci u koje se dodaju i njihove radne temperature.

Primer anodnog inhibitora je hromat, koji stvara pasivni sloj na površini aluminijuma i čelika, i sprečava oksidaciju metala. Upotreba hidrazina i hromata za zaštitu metalnih površina je ograničena. Nitrati su anodni inhibitori. Ako se anodni inhibitori koriste u suviše malim koncentracijama može doći do piting korozije. Piting (jamica, rupica) nastaje periodičnim variranjem vrlo visokih napreznja materijala od nule do maksimuma, što ima za posledicu zamor materijala koji je vidljiv kroz oštećenja materijala po površini i neposredno ispod nje, što izaziva uklanjanje (odlamanje) delića materijala sa površina i stvaranja karakterističnog reljefa u obliku manjih ili većih pukotina (jamica) veličine od nekoliko desetina μm do približno 0,2 mm.

Primer katodnog inhibitora je cink-oksidi, koji usporava koroziju usporavajući redukciju vode u vodonik. Kako svaka oksidacija zahteva istovremenu redukciju on usporava i oksidaciju metala. Dobar primer katodnih inhibitora su amini, koji se koriste u kotlovima koji pokreću turbine da bi se zaštitili cevovodi kojima prolazi kondenzovana voda. Ovde se amini pokreću parom. Amini povećavaju pH vrednost i time smanjuju verovatnoću redukcije protona. Inhibitor koji deluje i kao anodni i kao katodni inhibitor jeste mešoviti inhibitor.

Korozioni inhibitori često se dodaju rashladnim tečnostima, gorivima, hidrauličnim fluidima, kotlovskim vodama i mnogim drugim fluidima koji se koriste u industriji.

Antifrizi kao sredstvo za hlađenje motora

Antifrizi na bazi jednovalentnih alkohola

Od jednovalentnih alkohola kao antifrizi mogu se upotrebiti:

- metanol (metil-alkohol) + voda,
- etanol (etil-alkohol) + voda,
- izopropanol (izopropil-alkohol) +voda.

Za jednovalentne alkohole kao antifrizi karakteristično je da imaju nisku tačku mržnjenja, koja proporcionalno raste s povećanjem procenta vode u smeši vode i alkohola. Tačka mržnjenja proporcionalno se snižava ako se smanjuje procenat vode u smeši. Međutim, povećanjem procenta jednovalentnog alkohola u smeši smanjuju se: efekat hlađenja, koeficijent provodljivosti toplote i specifična toplota, kao i tačka ključanja. Kako svi jednovalentni alkoholi imaju nižu tačku ključanja od vode, tokom eksploatacije antifrizi dolazi do isparavanja alkohola, a time i povećanja tačke mržnjenja.

Tabela 1 – Promena tačke mržnjenja jednovalentnih alkohola u smeši sa vodom

Procenat alkohola u vodi	Temperatura mržnjenja		
	Metil alkohol	Etil alkohol	Izo propil alkohol
od 10 do 20%	od 5 do 12°C	od 3 do 12°C	2°C
od 30 do 40%	od 20 do 34°C	od 20 do 50°C	7°C
od 50 do 60%	40°C	od 52 do 65°C	od 12 do 18°C
od 70 do 80%	97,1°C	114,15°C	od 22 do 25°C
100%			od 26 do 32°C

Iz tabele 1 se vidi da temperatura mržnjenja kod smeše metil alkohola i vode u odnosu 30:70% iznosi 20°C. Metil alkohol intenzivno isparava na 70°C, a ključa na 81°C pri normalnom pritisku, što dovodi do opadanja koncentracije metanola u mešavini, čime se povećava tačka mržnjenja mešavine, pa je to negativna pojava.

Metilni alkohol koji ima najnižu tačku ključanja (64,5°C) otrovan je, dok su svi ostali zapaljivi. Za vreme „toplih“ zima, zbog smanjenja koeficijenta provodljivosti toplote i smanjenja specifične toplote, a naročito pri većoj koncentraciji alkohola može doći do ključanja antifrizna, odnosno do pregrevavanja motora sa poznatim posledicama. Izopropilni alkohol je sklon penušanju, što smanjuje odvođenje toplote. Ipak, od svih jednovalentnih alkohola najpovoljniji je etilni alkohol. Međutim, zbog svojih nedostataka danas se ovi alkoholi manje koriste za hlađenje motora.

Antifrizi na bazi viševalentnih alkohola

U ovu grupu antifrizna spadaju etilen-glikol i glicerol. Etilen-glikolni antifriz se kod nas, a i u ostalim zemljama, najviše primenjuje zbog svojih višestrukih prednosti u odnosu na ostale jednovalentne i viševalentne alkohole.

Prednosti etilen-glikolnog antifrizna ili glikola su:

visoka tačka ključanja, tj. 197,5°C, pa nema bojazni da će pri normalnim, a i povišenim radnim temperaturama, doći do njegovog isparavanja,

u mešavini sa vodom moguće je postići vrlo niske tačke mržnjenja, iako čist glikol ima relativno visoku tačku mržnjenja (-17,4°C),

ako bi zbog niskih temperatura došlo do mržnjenja mešavine glikola i vode, tada nema nikakve opasnosti za blok i hladnjak motora, jer mešavina prelazi u oblik kašaste mase.

Nedostaci glikola su: u većim koncentracijama je otrovan, ali samo ako se unosi u unutrašnjost organizma (kroz usta i slično) i relativno je skup, jer se uvozi.

Karakteristike antifrizna na bazi glikola (GA 60) date su po standardu JUS H.Z2.010. Uzimanje uzoraka i priprema vodenih rastvora glikolnog antifrizna za ispitivanje predviđeno je JUS-om H.Z8.050. Budući da čist glikol ima visoku tačku mržnjenja, dodatkom vode tačka mržnjenja se snižava do donje granice, a zatim počinje ponovo da raste.

Tabela 2
Zavisnost specifične težine i temperature stinjavanja od koncentracije tehničkog etilen-glikola u vodenim rastvorima

Koncentrac. etilen-glikola %	Specifična težina na 20°C	Temperatura stinjavanja °C	Koncentrac. etilen-glikola %	Specifična težina 20°C	Temperat. stinjavanja
26,4	1,0340	10	65	1,0853	65
27,2	1,0376	12	65,3	1,0855	65
29,6	1,0410	14	65,6	1,0860	67
32	1,0443	16	66	1,0863	68
34,2	1,0480	18	66,3	1,0866	66
36,4	1,0560	20	68,5	1,0888	64
38,4	1,0533	22	69,6	1,0900	62
40,4	1,0560	24	70,8	1,0910	60
42,2	1,0586	26	72,1	1,0923	68
44	1,0606	30	74,5	1,0960	56
45,6	1,0627	32	75,8	1,0973	54
47	1,0643	34	77	1,0983	52
48,2	1,0663	36	78,4	1,0997	50
49,6	1,0680	38	79,6	1,1007	48
51	1,0696	40	81,2	1,1023	46
52,6	1,0173	42	82,5	1,1033	44
53,6	1,0726	44	83,9	1,1043	42
54,6	1,0740	46	85,4	1,1054	40
55,6	1,0753	48	86,9	1,1066	38
56,8	1,0766	50	88,4	1,1077	36
58	1,0780	52	90	1,1087	34
59,1	1,0790	54	91,5	1,1096	32
60,2	1,0803	56	93	1,1103	30
61,2	1,0813	58	94,4	1,1105	28
62,2	1,0823	60	95,5	1,1107	27
63,1	1,0833	62	96,4	1,1110	26
64	1,0843	64	97	1,1116	24
64,8	1,0850	66	97,8	1,1120	22

Iz tabele 2 se vidi da se najniža tačka mržnjenja postiže pri koncentraciji od 72,1% tehničkog glikola, kada je tačka mržnjenja 68°C, a specifična težina 1,0923. Pošto glikol ima veću tačku ključanja od vode, pri povišenim radnim temperaturama doći će do isparavanja vode i do povećanja koncentracije glikola i još većeg sniženja temperature mržnjenja. Zbog ove pojave kod glikolnih antifrizna doliva se voda, a kod antifrizna na bazi jednovalentnih alkohola alkohol.

Antifrizi na bazi glicerina danas se kod nas vrlo retko koriste, prevashodno zbog njihove visoke cene. Za glicerina je karakteristično da ima veću specifičnu težinu (1,261) i tačku ključanja (290°C) od jednovalentnih alkohola i čiste vode. Isto tako, čist glicerina ima i veću tačku mržnjenja (17,9°C), ali malu specifičnu toplotu. Koeficijent provodljivosti toplote je veći nego kod ostalih alkohola; jedino voda ima veći. Glicerina ima, takođe, najveći viskozitet.

Glicerinski antifrizi su manje hemijski stabilni od glikolnog antifriza. I kod glicerinskog i kod glikolnog antifriza mora da se prati pH vrednost, koja treba da se kreće u granicama od 6,8 do 8,5.

Tabela 3 – Tačka mržnjenja u funkciji koncentracije glicerina

Procenat glicerina	Temperatura mržnjenja u °C
10	1,6
20	4,8
30	9,5
40	18,8
50	28,2
60	41,5
70	38,9
80	20,3
90	1,6
100	+17

Tabela 4 – Najvažnije osobine pojedinih tečnosti za hlađenje

Osobine	Metanol	Etanol	Etilen-glikol	Glicerol	Čista voda
Hemijska formula	CH ₃ OH	C ₂ H ₅ OH	C ₂ H ₄ /OH/ ₂	C ₃ H ₅ /OH/ ₂	H ₂ O
Specifična težina na 20°C	0,792	0,798	1,113	1,261	0,998
Temperatura mržnjenja °C	97,8	117,3	17,4	+17,9	0
Temperatura ključanja pri 1 atmosferi (101325 Pa)	64,5	78,5	197,2	290	100
Viskozitet pri 25°C u cPs	0,55	1,10	18,09	954	0,89
Koeficijent provođenja toplote na 30°C u Kcal/m, h °C	0,180	0,147	0,241	0,245	0,522
Toplota isparavanja pri vreli. u Kcal/kg	262,8	204	191	197,5	538,7
Temperatura paljenja °C	9	12	116–127	174	nesagoriva
Specifična toplota Kcal/kg, °C	0,600 /20°C/	0,581 /25°C/	0,571 /15°C/	0,554 /15°C/	1,000 /15°C/

Za vozilo obavezno treba koristiti antifriz izrađen na bazi etilen-gliokla koji zadovoljava standard JUS H.Z2.010. Na tržištu srećemo dva tipa antifrizu TIP 1 i TIP 3.

TIP 1 predstavlja koncentrat koji pre punjenja rashladnog sistema (hladnjaka motora) treba razblažiti, odnosno pomešati sa omekšalom vodom (kišnica, destilovana voda, prokuvana voda) do željene tačke mržnjenja.

Tabela 5 – Tačka mržnjenja u zavisnosti od smeše glikola i vode

Koncentrovani antifriz %	Voda %	Temperatura mržnjenja °C
50	50	35
45	55	30
40	60	25
35	65	18
30	70	14
25	75	11

TIP 3 jeste antifriz koji je već razblažen vodom, pa se direktno sipa u hladnjak motora. Temperatura mržnjenja iznosi najmanje 35°C.

Tabela 6 – Mešanje antifrizu i vode u hladnjaku

Do 20 °C			Do 25 °C			Do 30 °C		
Hladnjak (l)	Antifriz (l)	Voda (l)	Hladnjak (l)	Antifriz (l)	Voda (l)	Hladnjak (l)	Antifriz (l)	Voda (l)
3,0	1,0	2,0	3,0	1,2	1,8	3,0	1,3	1,7
3,5	1,3	2,2	3,5	1,4	2,1	3,5	1,5	2,0
4,0	1,4	2,6	4,0	1,6	2,4	4,1	1,8	2,3
4,5	1,6	2,9	4,5	1,8	2,7	4,5	2,0	2,5
5,0	1,8	3,2	5,0	2,0	3,0	5,0	2,2	2,8
5,5	1,9		5,5	2,2	3,3	5,5	2,4	3,1
6,0	2,1	3,9	6,0	2,4	3,6	6,0	2,6	3,4
6,5	2,3	4,2	6,5	2,6	3,9	6,5	2,9	3,6
7,0	2,5	4,5	7,0	2,8	4,2	7,0	3,1	3,9
8,0	2,8	5,2	8,0	3,2	4,8	8,0	3,5	4,5
8,5	3,0	5,5	8,5	3,4	5,1	8,5	3,7	4,8
9,0	3,2	5,8	9,0	3,6	5,4	9,0	4,0	5,0
9,5	3,3	6,2	9,5	3,8	5,7	9,5	4,2	5,3
10,0	3,5	6,5	10,0	4,0	6,0	10,0	4,4	5,6
10,5	3,7	6,8	10,5	4,2	6,3	10,5	4,6	5,9
11,0	3,9	7,1	11,0	4,4	6,6	11,0	4,8	6,2
11,5	4,0	7,5	11,5	4,6	6,9	11,5	5,1	6,4
12,0	4,3	7,7	12,0	4,8	7,2	12,0	5,3	6,7

Kontrola tečnosti za hlađenje

S obzirom na veliku zastupljenost motornih vozila u Vojski Srbije potrebno je vršiti redovnu i kvalitetnu kontrolu, kako samih sklopova, tako i pogonskih sredstava koja se koriste u sistemima za hlađenje i podmazivanje.

Sredstvo za hlađenje mora da obezbedi zadovoljavajuću tačku mržnjenja, i da spreči pojavu korozije na vitalnim delovima motora. Kako bi imali adekvatnu sliku o karakteristikama sredstva za hlađenje potrebno je izvršiti kontrolu tog sredstva kako pri njegovoj upotrebi ne bi došlo do neispravnosti na motoru. Kontrola sredstva za hlađenje može da bude *organoleptička* i *kontrola sa instrumentima*. Obimnija kontrola obavlja se u laboratoriji Vojnotehničkog instituta.

Organoleptička kontrola obuhvata kontrolu: mirisa, boje, prisustva vode, gustine, procenu viskoznosti, mehaničkih nečistoća, moguće raslojavanje.

Kontrola boje podrazumeva da se vizuelnim putem utvrdi boja rashladnog sredstva koja može da bude: plava, zelena ili narandžastocrvena, ako se radi o rashladnim sredstvima koja imaju inhibitore korozije na bazi organskih kiselina.

Kontrola mehaničkih nečistoća je, takođe, vizuelna kontrola kojom se može utvrditi prisustvo nečistoća koje mogu da dovedu do lošeg kvaliteta sredstva za hlađenje.

Kontrola raslojavanja može da pokaže izdvajanje aditiva koji treba da spreče pojavu korozije, a njihovim izdvajanjem sredstvo za hlađenje postaje neupotrebljivo, jer aditivi nisu kompaktni sa sredstvom.

Kontrola antifrizava obavlja se i odgovarajućim instrumentima, kao što su: aerometar i hidrometar.

Kontrola tačke mržnjenja obavlja se pomoću aerometra tako što se meri specifična težina kojoj odgovara određena koncentracija glikola u vodi.

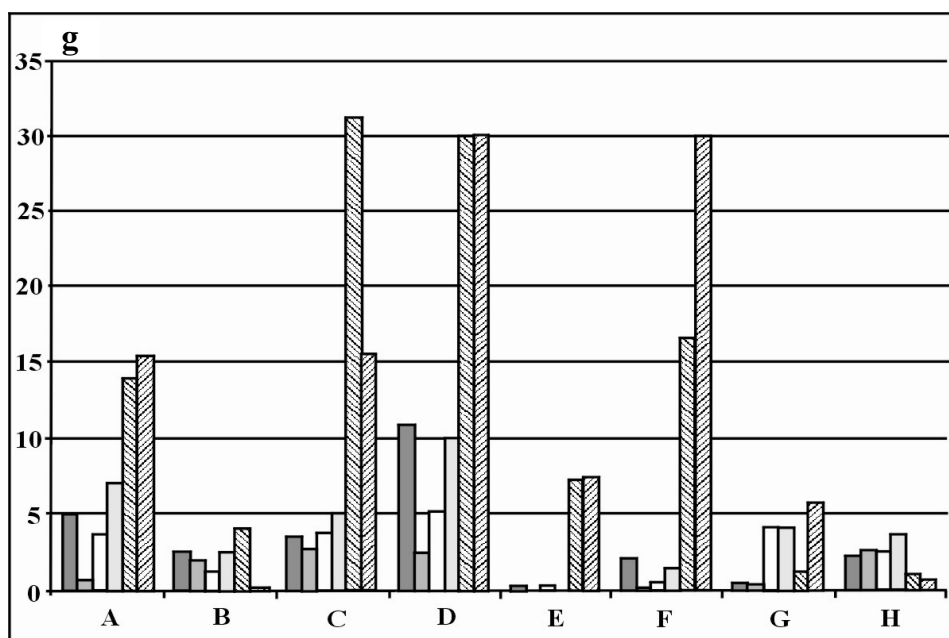
Kontrola tačke mržnjenja pomoću hidrometra vrši se preko neimenovane specifične težine. Zavisno od koncentracije glikola menja se i specifična težina, a između specifične težine smeše i tačke mržnjenja postoji zavisnost, na kojoj se bazira konstrukcija hidrometra.

Pri pravljenju rastvora mora se voditi računa da tačka mržnjenja bude zadovoljavajuća. Ako sredstvo nije razblaženo, razblažuje se prema tablici koju je dostavio proizvođač.

Pri punjenju hladnjaka antifrizom potrebno je proveriti da li je sistem prazan i čist. Nikada se hladnjak ne sme puniti do vrha, jer se mešavina vode i glikola širi više nego čista voda. Zbog toga nivo mešavine glikola i vode mora biti za oko 5 cm niži od vrha hladnjaka.

Ako dođe do curenja antifrizna zbog oštećenja hladnjaka gubitak antifrizna nadoknađuje se mešavinom istog odnosa, kakav je bio pri punjenju praznog hladnjaka. Međutim, ako gubici nastaju zbog isparavanja, to se nadoknađuje dodatkom čiste vode u hladnjak, jer ne isparavaju glikoli već voda.

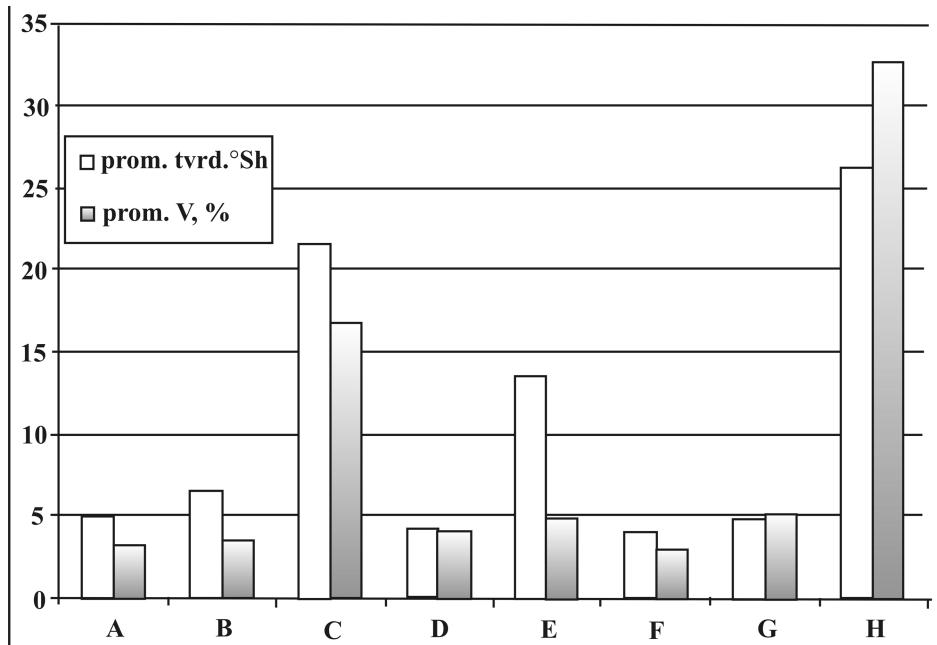
Na slikama 1, 2 i 3 prikazani su rezultati analize većeg broja antifrizna koji mogu da se nađu na našem tržištu. Razmatrane su funkcionalne karakteristike (zaštita od korozije i inertnost na zaptivne materijale) i rezervna alkalnost, kao mera mogućnosti duže upotrebe antifrizna u sistemu za hlađenje. Ispitivanja su vršena u laboratoriji NIS Rafinerije nafte Beograd.



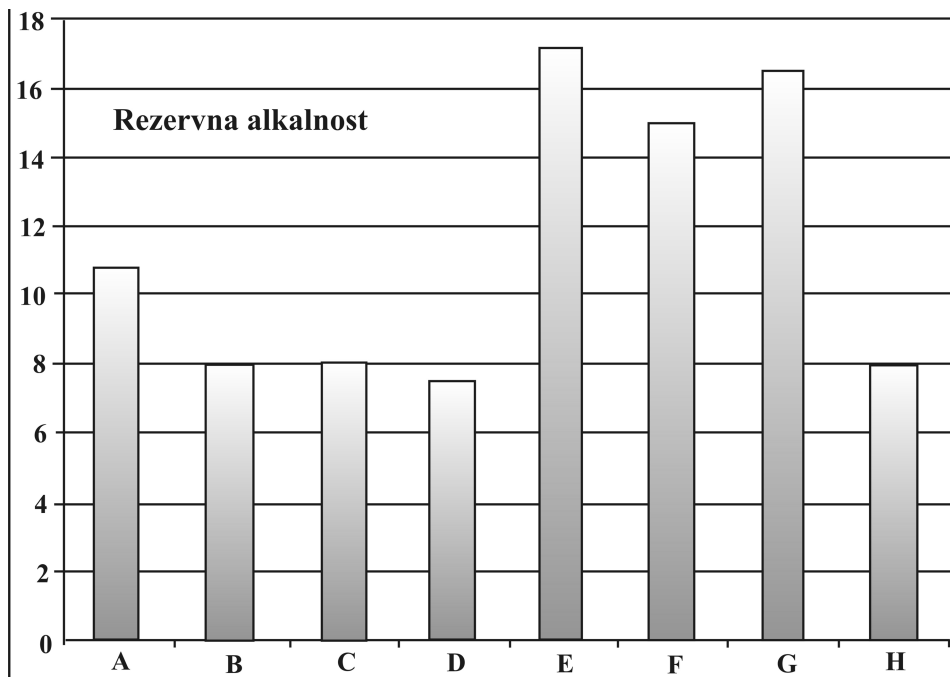
Sl. 1 – Rezultati ispitivanja korozije na različitim komercijalnim uzorcima antifrizna

Na slici 1 prikazana je analiza antikorozijskih zaštitnih svojstava komercijalnih antifrizna. Ispitivanja su vršena po standardu JUS.Z2.010. Kako se vidi sa slike, samo tri (B, G i H) od osam vrsta antifrizna zadovoljavaju minimalne zahteve u pogledu antikorozijskih karakteristika.

Sa slike 2 jasno se vidi da dva antifrizna (C, H) nisu kompatibilna sa sklopom rashladnog sistema. U okviru ovog ispitivanja izvršene su analize promene tvrdoće i zapremine na zaptivkama TR 35 koje su najšire zastupljene u zahtevima proizvođača vozila. Dozvoljena vrednost u većini standarda je 5% promena zapremine i 5°Sh promene tvrdoće.



Sl. 2 – Promena zaptivnih elemenata pod uticajem različitih komercijalnih antifrizna



Sl. 3 – Prosečne vrednosti rezervne alkalnosti

Rezervna alkalnost (slika 3) predstavlja veličinu koja ukazuje na mogućnost dugotrajne upotrebe antifrizu u sistemu. Minimalna vrednost rezervne alkalnosti od 10 mg KOH/g koncentrovanog antifrizu neophodna je da bi se sredstvo moglo sigurno koristiti u sistemu u toku dve godine. Sa slike se jasno vidi da polovina ispitivanih antifrizu (B, C, D i H) nije zadovoljila ovaj uslov koji je dat u većini specifikacija proizvođača vozila.

Dakle, pošto na tržištu vlada velika ponuda nekvalitetnog antifrizu, treba voditi računa o tome koji će se koristiti, kako bi se omogućio što duži vek trajanja motora i adekvatno hlađenje.

Fizičko-hemijske karakteristike tečnosti za hlađenje

Radi zadovoljenja zahteva za određeno hlađenje motora, kao i izvršenje ostalih zadataka, tečnosti za hlađenje moraju da zadovolje određene fizičko- hemijske karakteristike.

Osnovne fizičke karakteristike koje mora da ispuni tečnost za hlađenje su:

- viskoznost,
- gustina,
- specifična toplota, i
- temperatura mržnjenja.

Najvažnije hemijske karakteristike predstavljaju:

- korozivnost,
- toksičnost i kompatibilnost,
- hemijska stabilnost, i
- termička stabilnost.

Pri izboru tečnosti za hlađenje veliku pomoć može pružiti poznavanje određenih fizičkih i hemijskih karakteristika, na osnovu kojih može da se obezbedi pouzdana kontrola tokom proizvodnje i kasnije pri upotrebi.

Kontrola se ne vrši samo na gotovim proizvodima već i na komponentama koje se koriste u proizvodnji i koje moraju da zadovolje određene karakteristike. Materijali koji predstavljaju osnovne komponente za proizvodnju antifrizu su: etilen-glikol, voda, aditivi za poboljšanje svojstva smanjenja pene i korozije i boja.

Sve ove komponente moraju da zadovolje određene karakteristike.

1. Etilen-glikol (etan diol-1,2), $\text{OHCH}_2\text{-CH}_2\text{OH}$, mora biti bistar, bezbojan, bez stranih primesa i nečistoća, sa sledećim karakteristikama:

- gustina na 20°C od 1,114 do 1,116 g/ml,
- 95% (V/V) mora da se predestiliše na 1013 mbar od 194°C do 199°C ,
- tačka mržnjenja od -12°C do -13°C .

2. Voda, H_2O , mora biti bez mehaničkih nečistoća i primesa i mora imati sledeće karakteristike:

- količina rastvorenih soli, kalcijuma i magnezijuma (ukupna tvrdoća) kao CaO , najviše 35,6 mg/kg ($2^\circ d$)¹,
- količina hlorida najviše 50,0 mg/kg,
- količina gvožđa najviše 50,0 mg/kg.

3. Materijali koji se koriste za poboljšanje svojstava smanjenja penušanja i korozije moraju da budu potpuno rastvorljivi u antifrizu i međusobno hemijski podnošljivi. Ne smeju da se talože, izdvajaju iz antifrizu ili da međusobno hemijski reaguju.

4. Boja koja se dodaje ne sme da utiče na svojstva antifrizu.

Karakteristike koje se prate kod samog antifrizu i vrednosti zavise od tipa antifrizu koji se ispituje. Kod nas mogu da se nađu tri vrste antifrizu koji se primenjuju u motornim vozilima i to:

tip 1: koncentrovani antifriz, koji se pre upotrebe mora razblažiti potrebnom količinom vode,

tip 2: razblaženi rastvor koji se pre upotrebe mora razblažiti potrebnom količinom vode,

tip 3: razblaženi rastvor koji se ne razblažuje pre upotrebe.

Najnovija generacija antifrizu pravi se na bazi etilen-glikola i organskih kiselina i njihovih derivata.

Pri proveru kvaliteta antifrizu treba da se obuhvate sledeće karakteristike:

- tačka mržnjenja u $^\circ\text{C}$,
- gustina na 20°C ,
- pH vrednost,
- rezervna alkalnost u ml $\text{HCl}/10$ ml.

Provera kvaliteta proizvoda koja se vrši pri promeni sirovine ili pri upoređivanju rezultata sa standardom u slučaju neslaganja rezultata, a najmanje jedanput godišnje, obuhvata, pored već pomenutih, i sledeće karakteristike:

- penušanje,
- koroziju,
- količinu vode,
- količinu vode kao destilat do 110°C ,
- tačku ključanja,
- pepeo.

¹ $2^\circ d$ stepeni tvrdoće po nemačkom standardu DIN.

Rezultati ispitivanja promena karakteristika tečnosti za hlađenje tokom eksploatacije vozila

Realizovano je ispitivanje fizičko-hemijskih karakteristika tečnosti za hlađenje ANTIFRIZ GLIKOLNI GA-40 koji je korišćen u sledećim vozilima:

1. vozilo PUCH 300 GD

- godina proizvodnje: 1984,
- zapremina hladnjaka: 6 l,
- sredstvo za hlađenje je sipano u sistem decembra 2005,
- sredstvo za hlađenje je uzorkovano iz sistema maja 2006,
- pređena kilometraža od zamene tečnosti 4876 km.

2. vozilo MERCEDES 600 PULMAN

- godina proizvodnje: 1978,
- zapremina hladnjaka: 6 l,
- sredstvo za hlađenje je sipano u sistem oktobar 2004,
- sredstvo za hlađenje je uzorkovano iz sistema maja 2006,
- pređena kilometraža od zamene tečnosti 260 km.

3. vozilo OPEL ASTRA 1.4

- godina proizvodnje: 1991,
- zapremina hladnjaka: 4 l,
- sredstvo za hlađenje je sipano u sistem decembra 2005,
- sredstvo za hlađenje je uzorkovano iz sistema maja 2006,
- pređena kilometraža od zamene tečnosti 25 000 km.

4. autobus RABA

- godina proizvodnje: 1986,
- zapremina hladnjaka: 5 l,
- sredstvo za hlađenje je sipano u sistem oktobra 2005,
- sredstvo za hlađenje je uzorkovano iz sistema marta 2006,
- pređena kilometraža od zamene tečnosti 4126 km.

Cilj je bio da se ispitivanjem fizičko-hemijskih karakteristika tečnosti za hlađenje prati kvalitet navedenog sredstva, kao i utvrđivanje optimalnog perioda zamene tečnosti za hlađenje, primenjujući standardne metode ispitivanja.

Metodologija ispitivanja

Ispitivanje nultog uzorka je urađeno prema zahtevima standarda za tečnosti za hlađenje JUS H.Z2.010 tip 3.

Svi uzorci tečnosti za hlađenje, nultog i korišćenog, ispitivani su na identičan način i po istoj metodologiji.

Korišćene metode i testovi za određivanje fizičko-hemijskih karakteristika tečnosti za hlađenje prikazane su u tabeli 7.

Tabela 7 – Metode određivanja fizičko-hemijskih karakteristika

R.br.	Karakteristike	Jedinice	Metode
1	Boja		vizuelno
2	Relat. gust. na 20°C	°C	ASTM D1122
3	Tačka ključanja	°C	JUS H.Z8.058
4	Tačka mržnjenja	°C	JUS H.Z8.053
5	Sadržaj pepela	%(m/m)	JUS H.Z8.055
6	Sadržaj vode	%(m/m)	JUS H.Z8.051
7	Rezervna alkalnost	ml	JUS B.H8.059
8	pH vrednost		JUS H.Z8.052
9	Penušanje	ml/ml	JUS H.Z8.057
10	Korozivnost u staklenoj posudi	Gubitak mg/pločici	JUS H.Z8.056
11	Ocena kavitacije, erozije i pitinga vodene pumpe		ASTM D2809
12	Korozija leg. livenog Al ²	mg/cm ² na 7 dana	ASTM D4340

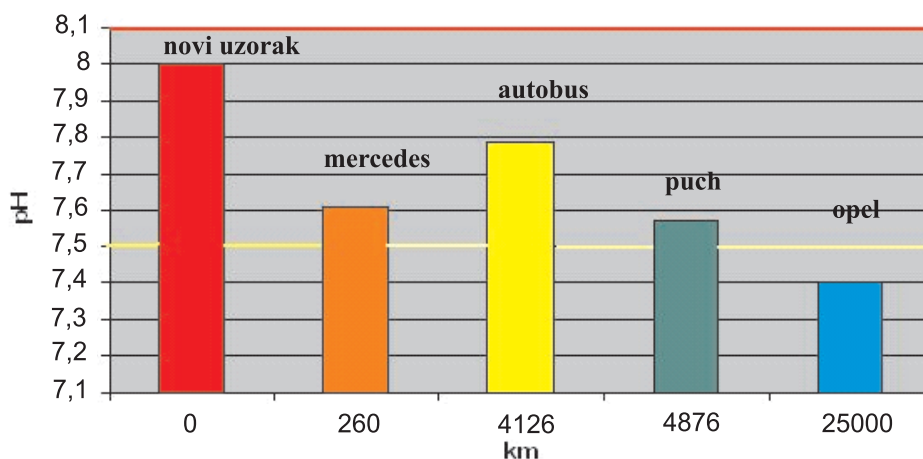
Osnovne fizičko-hemijske karakteristike novog sredstva za hlađenje prikazane su u tabeli 8.

Tabela 8 – Fizičko-hemijske karakteristike novog sredstva za hlađenje

Karakteristike	Vrednost
Boja	Plava boja
Relativna gustina na 20°C	1,065
Tačka ključanja °C	109
Tačka mržnjenja °C	-37
Sadržaj pepela %(m/m)	2
Sadržaj vode %(m/m)	-
Rezervna alkalnost ml	5
pH vrednost	8
Penušanje ml/ml	50/5
Izgled	Bistar, proziran
Korozivnost u staklenoj posudi	
Bakar	5
Mesing	5
Lem	15
Čelik	5
Sivi liv	5
Leg. aluminijuma gubitak mg/pločici	15
Ocena kavitacije, erozije i pitinga vodene pumpe	8
Korozija legure livenog aluminijuma mg/cm ² na 7 dana	1

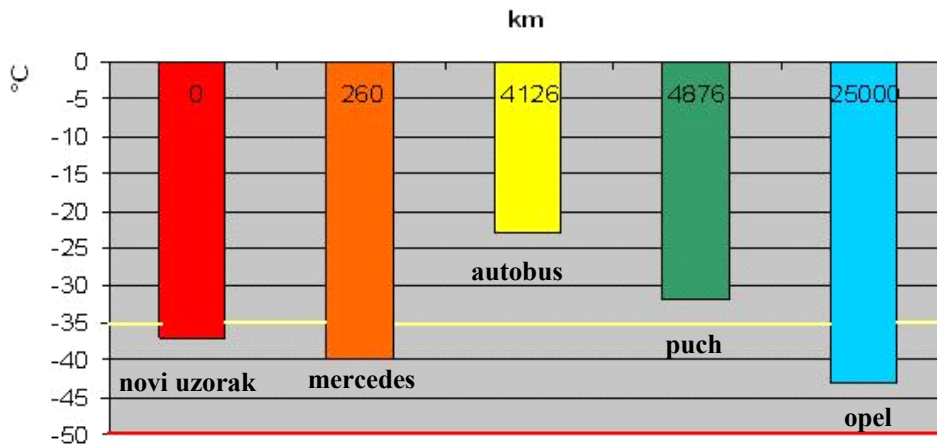
Sredstva za hlađenje korišćena su u motornim vozilima: OPEL ASTRA, PUCH, MERCEDES PULMAN i autobusu RABA koji su eksploatisani u gradskim uslovima. Zadatak je bio da se provere karakteristike rashladne tečnosti u uslovima eksploatacije. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da ima određenih promena, ali da se te promene kreću u okviru dozvoljenih granica. Na sledećim dijagramima prikazani su dobijeni rezultati ispitivanja, gde je crvenom linijom obeležena maksimalna vrednost, a žutom minimalna vrednost koju sredstvo mora da zadovolji po standardu.

Na slici 4 prikazana je promena karakteristika pH vrednosti sredstva za hlađenje u odnosu na pređeni put vozila. Sa slike se vidi da se vrednosti za pH koje su propisane standardom ne razlikuju mnogo, osim kod vozila OPEL ASTRA gde se javlja manje odstupanje od standarda, ali ono ne utiče bitnije na rashladne karakteristike antifrizu.



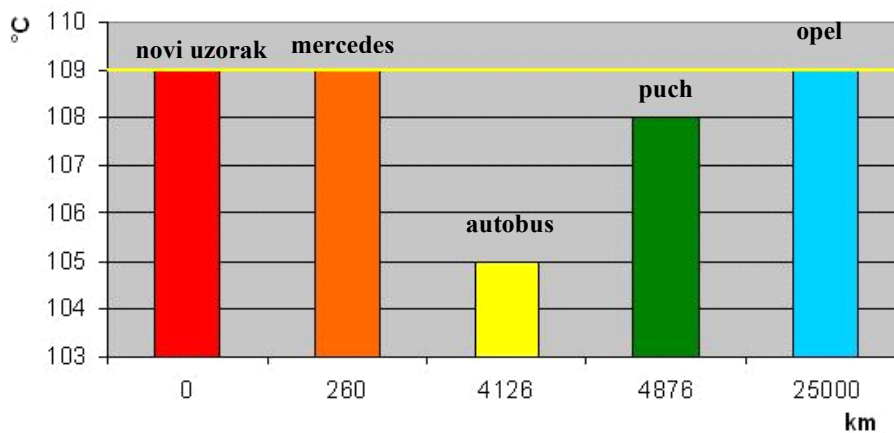
Sl. 4 – Promene karakteristika pH vrednosti sredstva za hlađenje, zavisno od pređenog puta m/v u km

Na slici 5 prikazana je zavisnost temperature mržnjenja od pređenog puta u kilometrima. Sa slike se vidi da vrednosti koje su dobijene pri ispitivanju kod većine vozila zadovoljavaju standard, za dva vozila imamo odstupanje od standarda, i to kod vozila: PUCH i kod autobusa (-32°C i -23°C). Ovo odstupanje je rezultat mogućeg trošenja etilen-glikola i dolivanja vode, kako bi se nadoknadio nedostatak tečnosti u hladnjaku, ili je pri sipanju antifrizu umesto standardnog rastvora i određenog odnosa između vode i etilen-glikola sipana velika količina vode, te je dobijen rastvor sa neadekvatnom temperaturom mržnjenja. Zbog neodgovarajuće temperature mržnjenja ovo rashladno sredstvo ne odgovara zahtevima za antifriz na bazi etilen-glikola, tip 3.



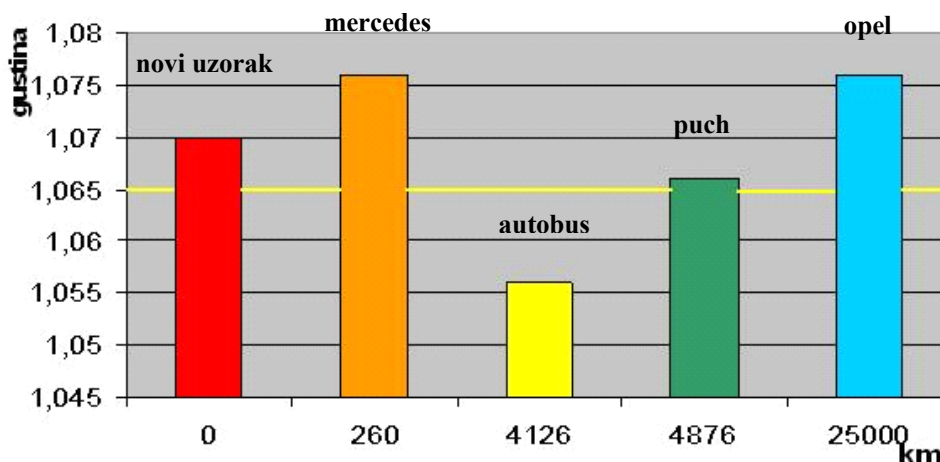
Sl. 5 – Zavisnost temperature mržnjenja sredstva za hlađenje od pređenog puta m/v u km

Na slici 6 prikazana je zavisnost temperature ključanja sredstva za hlađenje u odnosu na pređeni put u km iz koje se vidi da uzorci iz autobusa RABA i vozila PUCH ne zadovoljava minimalno zahtevanu tačku ključanja od 109°C.



Sl. 6 – Zavisnost temperature ključanja sredstva za hlađenje od pređenog puta m/v u km

Na slici 7 prikazana je zavisnost gustine antifrizu od pređenog puta u km. Sa slike vidimo da vrednosti za gustinu uglavnom odgovaraju vrednostima koje su date standardom. Odstupanje se javlja kod uzorka koji je uzet iz autobusa ($\rho=1,056 \text{ g/cm}^3$). Odstupanje se javlja zbog nesrazmernog odnosa između vode i etilen-glikola, gde veliki procenat vode dovodi do smanjenja gustine. Ova razlika ne utiče mnogo na rashladna svojstva antifrizu.



Sl. 7 – Zavisnost gustine sredstva za hlađenje od pređenog puta m/v u km

Analiza dobijenih rezultata

Na osnovu dobijenih eksploatacionih i laboratorijskih ispitivanja može se konstatovati:

1. Tečnosti za hlađenje dobro obavljaju predviđenu funkciju hlađenja u većini vozila. U dva slučaja došlo je do promene temperature mržnjenja i takvo bi sredstvo pri niskim temperaturama bilo izloženo riziku od mogućeg stinjanja i izazivanja pucanja bloka motora.

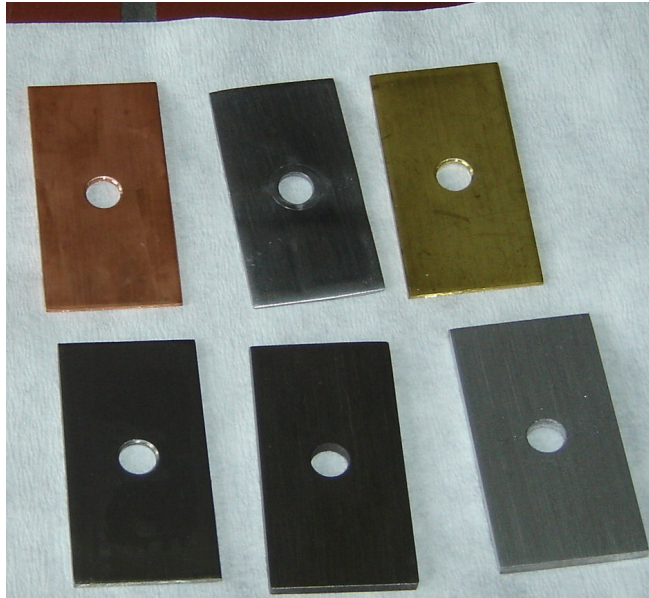
2. U vezi sa tačkom ključanja, sa dijagrama se vidi da sva sredstva imaju zadovoljavajuće vrednosti, osim uzorka koji je uzet iz autobusa, dok je kod PUCH-a razlika od 1°C u odnosu na minimalno zahtevanu, što se može tolerisati.

Pokazalo se da tečnost za hlađenje i u različitim vozilima, pri različitim uslovima eksploatacije, može da zadrži svoje vrednosti u granicama dozvoljenih odstupanja od standardnih vrednosti i da može da se koristi u dužem periodu. Uzorak koji je uzet iz autobusa pokazao je da dolazi do znatnih odstupanja, što je verovatno posledica loše procene posluge vozila pri sipanju vode u hladnjak kako bi se nadoknadila izgubljena tečnost koja je isparila (iscurila) u toku eksploatacije.

Jedna od bitnih karakteristika koje nisu ispitivane, a u znatnoj meri određuju da li je neko sredstvo za hlađenje dobro za dalju upotrebu, jeste ispitivanje korozije u staklenoj cevi. Ono treba da pokaže koliko je sredstvo za hlađenje kompatibilno sa elementima u rashladnom sistemu. Ako ova karakteristika nije u skladu sa vrednostima koje su date u standardu onda sredstvo kao takvo nije pogodno za korišćenje i zabranjuje se njegova upotreba u sistemu za hlađenje.

Na slici 8 prikazan je izgled elemenata u sistemu ako tečnost za hlađenje zadovoljava propisane uslove u pogledu korozivnosti, a na slici 9 mogući izgled elemenata u sistemu za slučaj da tečnost za hlađenje ne zadovoljava uslove koji su propisani za korozivnost datog sredstva.

Sl. 8 – Izgled etalon-pločica koje nisu korodirale u tečnosti za hlađenje



Sl. 9 – Izgled etalon-pločica koje su korodirale u tečnosti za hlađenje



Ova karakteristika nije rađena u laboratoriji zbog toga što je metoda veoma skupa i zahteva veliku čistoću etalon pločica. Osim ove metode još neke metode nisu realizovane, jer su instrumenti bili upućeni na baždarenje.

Regeneracija antifriza

Danas se velika pažnja posvećuje mogućnosti regeneracije korišćene tečnosti za hlađenje, kako bi se rešio problem njenog odlaganja.

Velika pažnja treba da se posveti mogućnosti regeneracije korišćenog antifriza i njegove ponovne upotrebe, jer se etilen-glikol dobija iz prirodnog gasa koji nije obnovljiv resurs. Po podacima američke agencije za zaštitu životne sredine trenutno se samo 12% ukupne količine korišćenog antifriza regeneriše u SAD. Zbog nemogućnosti kontrole skladištenja korišćenog antifriza i mogućeg izlivanja u reke ili zemljište, američka agencija za zaštitu životne sredine propisala je velike kazne za sve one koji ne poštuju propise o pravilnom skladištenju korišćenog antifriza.

Korišćeni antifriz može da bude recikliran na tri načina:

- „ON SITE” regeneracija,
- „OFF SITE” regeneracija,
- mobilna oprema za regeneraciju.

„ON SITE” regeneracija predstavlja način gde se korišćeno sredstvo za regeneraciju na istom mestu skladišti i regeneriše, a regeneraciju obavlja radnici tog skladišta.

Kod „OFF SITE” regeneracije skladišteni korišćeni antifriz se transportuje u specijalna postrojenja namenjena za recikliranje.

Mobilna oprema za regeneraciju predstavlja vozilo na kojem je ugrađena oprema za regeneraciju i obično je to kamion ili kombi. Vozilo dolazi na mesto gde treba da se izvrši regeneracija bez prethodnog skladištenja korišćenog antifriza.

Sve navedene metode sastoje se od dva koraka:

odstranjivanje nečistoća pomoću: filtriranja, destilacije, reversne osmoze, jonskog izmenjivanja;

dodavanje aditiva kako bi se dobile odgovarajuće fizičko-hemijske karakteristike u skladu sa standardom.

Aditivi koji se dodaju moraju da sadrže materije koje podižu i stabilišu pH vrednost, inhibitore korozije i inhibitore koji ne dozvoljavaju razlaganje etilen-glikola.

Reciklirani antifriz mora da ispuni standarde ASTM 6471 i ASTM 6472 pre nego što se počne sa njegovom upotrebom u vozilu. Ovi standardi ne razlikuju se mnogo od standarda za klasične antifrizove.

Reciklirani antifrizi su jeftiniji od običnih antifriza. Procena je da jedno organizovano preduzeće može za sedam meseci da povрати uloženi kapital u postrojenje za regeneraciju antifriza.

Najbolji način za reciklažu korišćenog sredstva za hlađenje je „OFF SITE“, koji koristi destilaciju kao glavni proces u preradi korišćenog sredstva za hlađenje. Ovaj način regeneracije u toku jednog sata preradi oko 1400 l do 1900 l korišćenog antifriza. Radnicima nije potrebno prethodno iskustvo kako bi mogli da rukuju uređajima i u procesu ne dolazi do stvaranja otpada pri preradi. Cena jednog ovakvog recikliranog sredstva jeste oko 250 dinara.

Ostali procesi takođe su se pokazali kao jeftiniji u pogledu konačnog proizvoda. Međutim, kapacitet prerade je mnogo manji nego kod „OFF SITE“ sistema za regeneraciju, a potrebno je da i radnici poseduju određeno radno iskustvo na takvom mestu. Može se zaključiti da je svaki sistem za regeneraciju bolji od čuvanja korišćenog sredstva za hlađenje i mogućnosti njegovog izlivanja i ugrožavanja bezbednosti ljudi i životne sredine.

Zaključak

U ovom radu ispitivane su promene fizičko-hemijskih karakteristika sredstava za hlađenje tokom eksploatacije. Ispitivanja su vršena na četiri tipa vozila i analizirana je promena karakteristika sredstava za hlađenje u zavisnosti od dužine pređenog puta.

Ispitivanja su pokazala da sredstvo za hlađenje može da izdrži date uslove eksploatacije kojim su vozila bila izložena i da sredstva mogu da izdrže i veća eksploataciona naprezanja.

U tri od četiri uzorka koja su ispitivana utvrđeno je da su vrednosti u granicama koje su propisane standardom JUS H.Z2.010 za antifriz tip 3. Uzorak koji se nalazio u autobusu pokazao je odstupanja u odnosu na standard kod tačke ključanja i tačke mržnjenja, zbog čega ovo sredstvo nije pogodno za dalju upotrebu.

Pri realizaciji ispitivanja nije bilo mogućnosti da se ispitaju sve karakteristike zbog tehničkih problema koje je imala laboratorija sa instrumentima, što se posebno odnosi na ispitivanje korozivnosti koja je jedna od bitnijih karakteristika kada se radi ispitivanje sredstva za hlađenje. Na osnovu dobijenih vrednosti može se videti da su sredstva za hlađenje proizvedena da traju znatno duže, a ne samo pet meseci koliki je period upotrebe u Vojsci (letnji i zimski period eksploatacije) i za veću kilometražu gde vrednosti idu i do 100 000 km.

U Vojsci se nalaze velike količine antifriza koje su skladištene po nekoliko godina pre nego što se ukaže mogućnost da se upotrebe, što

dovodi do starenja sredstva za hlađenje, aditivi počinju da se izdvajaju, pa sredstvo nije pogodno za upotrebu i mora da se uništi ili da se regeneriše. Bitan razlog zbog kojeg bi trebalo da se vodi računa o periodu skladištenja antifrizna jeste i garancija koju daje proizvođač, obično na dve godine. Posle tog perioda mora da se vrši kontrola sredstva na svakih šest meseci, što doprinosi povećanju troškova održavanja antifrizna.

Zamena sredstva za hlađenje mora tačno da se evidentira u tehničkoj knjižici vozila, kako bi se znalo kada je zamenjeno i koje sredstvo je sipano u vozilo. Nikako ne treba dozvoliti da se sredstvo za hlađenje izvadi iz vozila i da se skladišti kako bi se ponovo upotrebilo u zimskom periodu, a naročito ako se vadi iz više vozila. To se odnosi na ista sredstva i različite vrste tečnosti za hlađenje.

Pravilan izbor sredstva za hlađenje može da produži vek trajanja motora, a neadekvatna tečnost za hlađenje može da prouzrokuje pregrevanja ili prelazak u čvrsto agregatno stanje tečnosti pri niskim temperaturama spoljne okoline (izaziva pucanje bloka motora).

Literatura

[1] Tomić, V. M., Petrović, V. S.: *Motori sa unutrašnjim sagorevanjem*, Beograd, 1994.

[2] Baraba, I.: *Goriva, maziva i tečnosti za hlađenje*, Zagreb, 1961.

[3] Rokov, I.: *Poznavanje i primena sredstava za pogon*, Zagreb, 1969.

[4] Zbornik radova: *Snabdevanje i održavanje pogonskih sredstava i opreme iz nadležnosti tehničke službe*, Kruševac, 1998.

[5] Kesić, J.: *Analiza životnog ciklusa antifrizna*, Beograd, 1996.

[6] Topalo, L.: *A, B, C, maziva i goriva za vaše vozilo*, Beograd, 2001.

[7] Vujičić, V.: *Korozija i tehnologija zaštite metala*, Beograd, 2002.

[8] Jugoslovenski standard od 1985.

[9] Nacrt novog JUS standarda iz 2004.

[10] Lukić, G.: *Ispitivanje promena karakteristika sredstava za hlađenje motora tokom eksploatacije vozila*, diplomski rad, Beograd, 2006.

REZULTATI PRORAČUNA TORZIONIH OSCILACIJA U SISTEMU BRODSKE DIZEL MOTORNE PROPULZIJE

Major mr *Dragan* Trifković, dipl. inž.
major mr *Živojin* Petrović, dipl. inž.
poručnik *Predrag* Dobratić, dipl. inž.
Vojna akademija

Rezime:

U radu je prikazan tradicionalan postupak proračuna torzionih oscilacija u sistemu brodske dizel motorne propulzije. Realan sistem zamenjen je ekvivalentnim sistemom sa 19 stepeni slobode kretanja, za koji su analizirane slobodne i prinudne torzione oscilacije i odgovarajuća torziona naprežanja.

Ključne reči: torzione oscilacije, sistem brodske dizel motorne propulzije, naprežanje.

THE RESULTS OF TORSIONAL VIBRATION CALCULATION IN THE SHIP DIESEL ENGINE PROPULSION SYSTEM

Summary:

The traditional procedure of calculating the torsional vibrations in the ship diesel engine propulsion system is shown in this work. A real system is replaced with an equivalent 19-degree of freedom system and its free and forced torsional vibrations as well as appropriate torsional vibration strains have been analyzed.

Key words: torsional vibrations, ship diesel engine propulsion system, strain.

Uvod

U fazi projektovanja broda inženjeri brodomaštva, u skladu sa zahtevima naručioca, biraju odgovarajući propulzioni sistem. U većini slučajeva, prvenstveno zbog ekonomičnosti, pouzdanosti u radu i jednostavne eksploatacije i održavanja, kao brodski propulzori koriste se propeleri pogonjeni dizel motorima. Odabrani propulzioni sistem dimenzioniše se imajući u vidu zahtevanu brzinu broda i očekivane otpore i opterećenja. Obrtni moment se sa brodskog motora prenosi na propeler posredstvom mehaničkog sistema brodskih vratila sa odgovarajućim elementima koji torziona osciluju. Naprežanja usled torzionih oscilacija izračunavaju se pogodnim proračunima, a rezultati proračuna proveravaju se merenjem na izgrađenom brodu.

Tradicionalan proračun torzionih oscilacija brodske dizel motorne propulzije izvodi se putem sledećih koraka [4]:

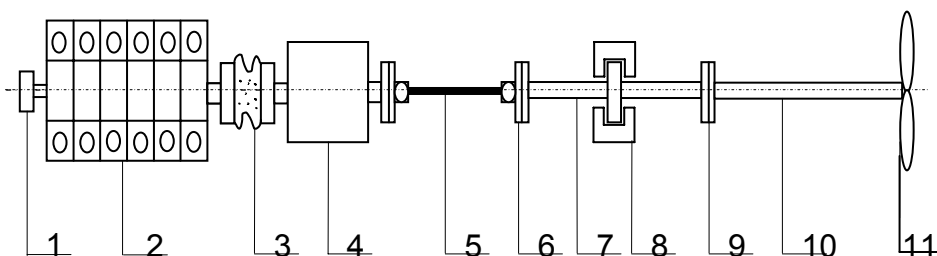
1. Realan sistem kolenastog vratila broskog motora, reduktora, vratilnog voda, spojnice, propelera i drugih elemenata zamenjuje se jednostavnijim ekvivalentnim sistemom istih dinamičkih karakteristika, kao kod realnog sistema.

2. Određuju se frekvencije i amplitude slobodnih oscilacija, kao i odgovarajuća naprezanja.

3. Harmonijskom analizom pobudnog momenta od gasnih i inercijalnih sila i prigušnog momenta proračunavaju se njihove frekvencije i kritični brojevi obrtaja motora.

4. Za kritične brojeve obrtaja izračunavaju se amplitude i naprezanja. U slučaju nedozvoljenih naprezanja pronalaze se rešenja za njihovo smanjenje, kao i izmeštanje kritičnih brojeva obrtaja iz radnog područja motora.

Za istraživanje torzionih oscilacija u sistemu prenosa snage sa broskog dizel motora na propeler odabran je realan objekat – rečni minolovac RML-341, za koji je izrađen kontrolni proračun torzionih oscilacija. Propulziono postrojenje broda RML-341 sastoji se od dva dizel motora koji preko elastičnih spojnica, jednostepenih reduktora (prenosnog odnosa $i = 2$) i sistema vratila pogone po jedan trokrilni propeler sa fiksnim krilima (sl. 1).



Sl. 1 – Šema sistema propulzije na brodu RML-341:

- 1 – prigušivač torzionih oscilacija; 2 – dizel motor; 3 – elastična spojnica;
4 – reduktor; 5 – kardansko vratilo; 6, 9 – spojnice vratila; 7 – uporno vratilo;
8 – uporni ležaj; 10 – propelersko vratilo; 11 – propeler

Motori su sa reduktorima povezani preko elastičnih spojnica, a na prednjem kraju kolenastog vratila imaju prigušivače torzionih oscilacija sa gumenim amortizerima. Vratilni vodovi sastoje se od kratkih kardanskih, upornih i propelerskih vratila. Aksijalna sila propelera prenosi se na trup broda preko upornog ležaja. Zbog simetrije propulzionog postrojenja na sl. 1. prikazana je šema sa jednim motorom.

Osnovni podaci o elementima pogonskog sistema broda RML-341

1. Motor

- Vrsta motora: dizel, četvorotaktni, sa prirodnim usisom, vodom hlađen
- Tip: B539 RM
- Proizvođač: „Torpedo“
- Broj i raspored cilindara: 12, V, pod uglom od 90°
- Prečnik cilindra: 120 mm
- Hod klipa: 140 mm
- Radna zapremina:
 - jednog cilindra: 1,58 l
 - ukupna: 18,96 l
- Stepen kompresije: 17
- Srednji efektivni pritisak: 0,609 MPa
- Broj obrtaja:
 - nominalan: 1800 o/min
 - maksimalan: 1960 o/min
 - minimalan: 500 o/min
- Snaga:
 - nominalna: 177 kW
 - maksimalna: 195 kW
- Redosled paljenja: 1-12-4-9-2-11-6-7-3-10-5-8
- Smer obrtanja: levi
- Specifična potrošnja goriva: 243 g/kWh
- Specifična potrošnja ulja: 1–4 g/kWh
- Način pokretanja: elektropokretačem

2. Prigušivač torzionih oscilacija

- Proizvođač: „Karl Freudenberg“
- Tip: sa gumenim amortizerom
- Moment inercije: 0,10885 kgm²
- Elastičnost: 12,1261·10⁻⁶ rad/Nm

3. Elastična spojnica

- Proizvođač: „Stromag“
- Tip: Perifleks PE-34
- Moment
 - nominalni: 1177 Nm
 - maksimalni: 3530 Nm

4. Reduktor

- Proizvođač: „Reintjes“
- Tip: jednostepeni, BGA 180
- Prenosni odnos: $i = 2$

5. Kardansko vratilo

- Proizvođač: „SOKO“
- Tip: ST-01.120x530
- Nominalni moment: 2942 Nm

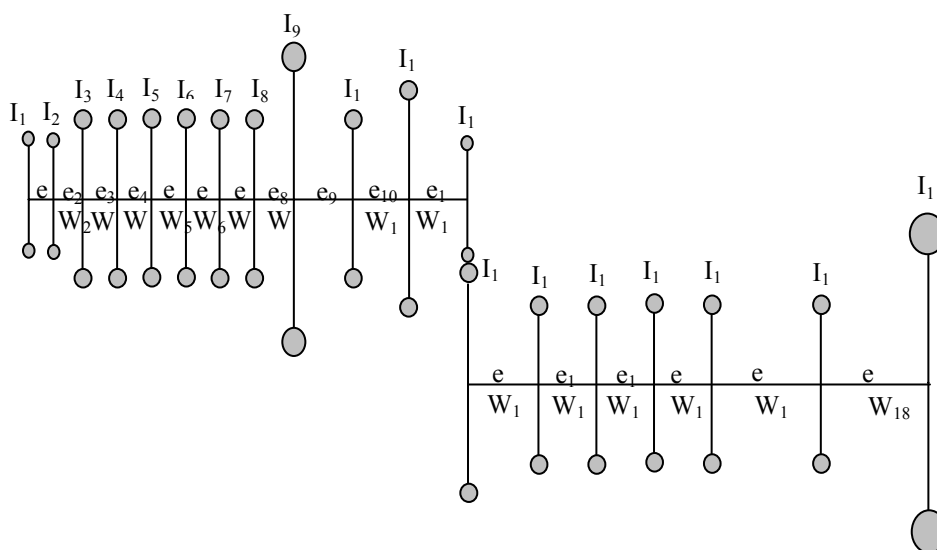
6. Propeler

- Tip: sa konstantnim korakom krila
- Moment inercije: 13,24 kgm²
- Broj krila: 3
- Prečnik: 0,82 m
- Korak: 0,5711 m

Rezultati proračuna frekvencija slobodnih torzionih oscilacija

Na osnovu konstruktivnih podataka proizvođača motora, podataka iz kataloga proizvođača elastičnih spojnika, kardanskih vratila, reduktora i ostalih izvora podataka, a na osnovu odgovarajućih proračuna, pogonski sistem na brodu RML-341 zamenjen je ekvivalentnim torzionim sistemom prikazanim na sl. 2. Ovaj sistem se sastoji od ukupno 19 koncentrisanih masa, pričvršćenih na određenom rastojanju od vratila.

Sl. 2 – Ekvivalentni torzioni sistem propulzije na brodu RML-341



Osnovne proračunske vrednosti za pojedine elemente ekvivalentnog torzionog sistema (sl. 2), kao što su: momenti inercije, elastičnosti i otporni momenti prikazane su u tabeli 1. Neke od ovih vrednosti dobijene su od proizvođača elemenata realnog sistema, a neke su određene korišćenjem odgovarajućih formula. Moment inercije suvog propelera uvećan je za 25%, zbog mase vode koju propeler zahvata u vodi. Za neke elemente sistema nisu izračunate vrednosti polarnog otpornog momenta, pa nisu unete u tabelu 1.

Tabela 1 – Momenti inercije, elastičnosti i otporni momenti elemenata sistema

Redni broj i	Naziv elementa	Moment inercije I [kgm^2]	Elastičnost vratila e [rad/Nm]	Otporni moment W [m^3]
1	Prigušivač torzionih oscilacija	0,10885	$12,1261 \cdot 10^{-6}$	–
2	Remenica	0,09453	$0,59306 \cdot 10^{-6}$	$168,26 \cdot 10^{-6}$
3	1. koleno kolenastog vratila	0,15209	$0,65624 \cdot 10^{-6}$	$168,26 \cdot 10^{-6}$
4	2. koleno kolenastog vratila	0,10267	$0,65624 \cdot 10^{-6}$	$168,26 \cdot 10^{-6}$
5	3. koleno kolenastog vratila	0,14062	$0,65624 \cdot 10^{-6}$	$168,26 \cdot 10^{-6}$
6	4. koleno kolenastog vratila	0,14062	$0,65624 \cdot 10^{-6}$	$168,26 \cdot 10^{-6}$
7	5. koleno kolenastog vratila	0,10267	$0,65624 \cdot 10^{-6}$	$168,26 \cdot 10^{-6}$
8	6. koleno kolenastog vratila	0,15209	$0,38212 \cdot 10^{-6}$	$168,26 \cdot 10^{-6}$
9	Zamajac i priрубnica elastične spojnice	2,43660	$85,0865 \cdot 10^{-6}$	–
10	Glavčina elastične spojnice	0,09992	$2,37427 \cdot 10^{-6}$	$27,59 \cdot 10^{-6}$
11	Spojница reduktora	0,29908	$0,45855 \cdot 10^{-6}$	$66,44 \cdot 10^{-6}$
12	Pogonski zupčanik	0,03898	0	–
13	Gonjeni zupčanik	0,15591	$0,36888 \cdot 10^{-6}$	$120,52 \cdot 10^{-6}$
14	Izlazna spojница reduktora i zglob kardanskog vratila	0,09653	$2,74111 \cdot 10^{-6}$	$51,45 \cdot 10^{-6}$ $20,27 \cdot 10^{-6}$
15	Zglob kardanskog vratila i spojница vratila	0,07574	$1,50404 \cdot 10^{-6}$	$67,3 \cdot 10^{-6}$
16	Uporno vratilo i deo ležaja	0,04208	$1,50404 \cdot 10^{-6}$	$67,3 \cdot 10^{-6}$
17	Spojница vratila	0,08459	$11,66245 \cdot 10^{-6}$	$67,3 \cdot 10^{-6}$
18	Propelersko vratilo	0,11270	$11,66245 \cdot 10^{-6}$	$67,3 \cdot 10^{-6}$
19	Propeler sa pridruženom masom vode	16,76826	–	–

Proračun frekvencija slobodnih oscilacija sistema λ izvršen je Holtzerovom metodom, a ovde se daju samo izvodi iz Holtzerovih tablica (ugao uvijanja θ , moment uvijanja M i tangencijalni napon τ) za prva četiri oblika oscilovanja (tabele 2–5). Grafički prikazi elastičnih linija, koji odgovaraju ovim oblicima oscilovanja, prikazani su na sl. 3–6. Elastična linija za IV oblik oscilovanja prikazana je isprekidanom linijom, jer vrednosti uglova uvijanja nisu prikazane u odgovarajućoj razmeri (sl. 6).

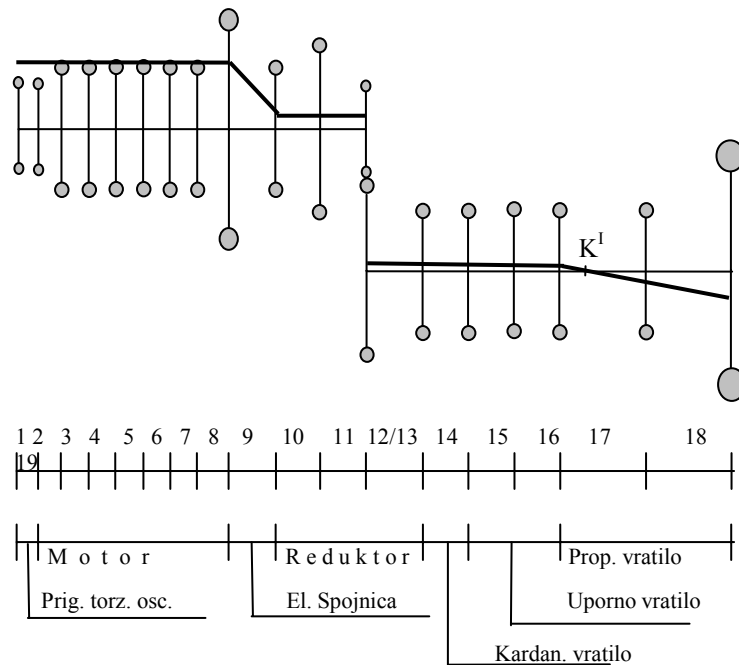
Sl. 3 – Elastična linija za I oblik oscilovanja sistema ($\lambda_1=50,6$ rad/s)

Tabela 2 – Momenti inercije, uglovi uvijanja, momenti uvijanja i tangencijalni naponi za I oblik oscilovanja sistema

Redni broj i	Moment inercije I_i [kgm ²]	Ugao uvijanja θ_i [rad]	Moment uvijanja $\Sigma M_i/\theta_i$ [Nm/rad]	Tangencijalni napon τ_i/θ_i [N/m ² rad]
1	0,10885	1,0000	278,65	-
2	0,09453	0,9966	519,83	$3,089 \cdot 10^6$
3	0,15209	0,9963	907,75	$5,395 \cdot 10^6$
4	0,10267	0,9957	1169,46	$6,950 \cdot 10^6$
5	0,14062	0,9949	1527,63	$9,08 \cdot 10^6$
6	0,14062	0,9939	1885,43	$11,205 \cdot 10^6$
7	0,10267	0,9927	2146,35	$12,756 \cdot 10^6$
8	0,15209	0,9912	2532,31	$15,05 \cdot 10^6$
9	2,43660	0,9903	8070,21	-
10	0,09992	0,2487	8773,33	$317,989 \cdot 10^6$
11	0,29908	0,2278	8947,77	$134,674 \cdot 10^6$
12	0,03898	0,2237	8970,1	-
13	0,15591	0,1119	17984,84	$149,227 \cdot 10^6$
14	0,09653	0,1052	18010,85	$888,547 \cdot 10^6$
15	0,07574	0,0558	18021,67	$267,781 \cdot 10^6$
16	0,04208	0,0287	18024,76	$267,827 \cdot 10^6$
17	0,08459	0,0016	18025,09	$267,832 \cdot 10^6$
18	0,11270	-0,2088	17964,85	$266,937 \cdot 10^6$
19	16,76826	-0,4185	0,00002	-

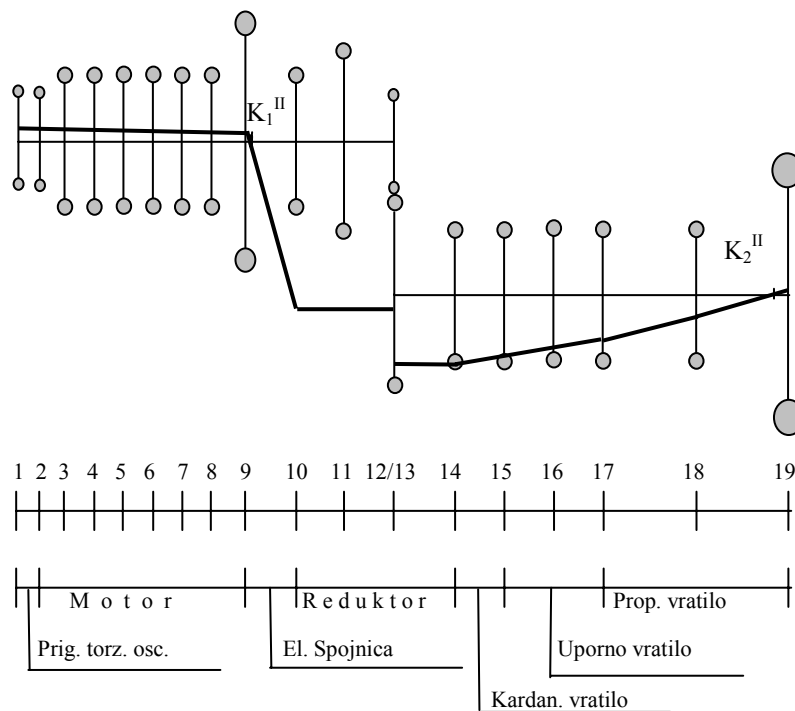
Sl. 4 – Elastična linija za II oblik oscilovanja sistema ($\lambda_{II}=199,7$ rad/s)

Tabela 3 – Momenti inercije, uglovi uvijanja, momenti uvijanja i tangencijalni naponi za II oblik oscilovanja sistema

Redni broj i	Moment inercije I_i [kgm ²]	Ugao uvijanja θ_i [rad]	Moment uvijanja $\Sigma M_i/\theta_i$ [Nm/rad]	Tangencijalni napon τ_i/θ_i [N/m ² rad]
1	0,10885	1,0000	4341	-
2	0,09453	0,9473	7913	$47,028 \cdot 10^6$
3	0,15209	0,9426	13631	$81,011 \cdot 10^6$
4	0,10267	0,9337	17455	$103,738 \cdot 10^6$
5	0,14062	0,9222	22627	$134,476 \cdot 10^6$
6	0,14062	0,9073	27716	$164,721 \cdot 10^6$
7	0,10267	0,8891	31357	$186,360 \cdot 10^6$
8	0,15209	0,8685	36626	$217,675 \cdot 10^6$
9	2,43660	0,8545	119674	-
10	0,09992	-9,336	82466	$2988,981 \cdot 10^6$
11	0,29908	-9,5319	31241	$470,214 \cdot 10^6$
12	0,03898	-9,5176	46038	-
13	0,15591	-4,7588	121670	$1009,542 \cdot 10^6$
14	0,09653	-4,7139	139819	$6897,829 \cdot 10^6$
15	0,07574	-4,3303	152901	$2271,932 \cdot 10^6$
16	0,04208	-4,1002	159783	$2374,19 \cdot 10^6$
17	0,08459	-3,8597	172804	$2567,667 \cdot 10^6$
18	0,11270	-1,8428	181088	$2690,758 \cdot 10^6$
19	16,76826	0,2708	0,01367	-

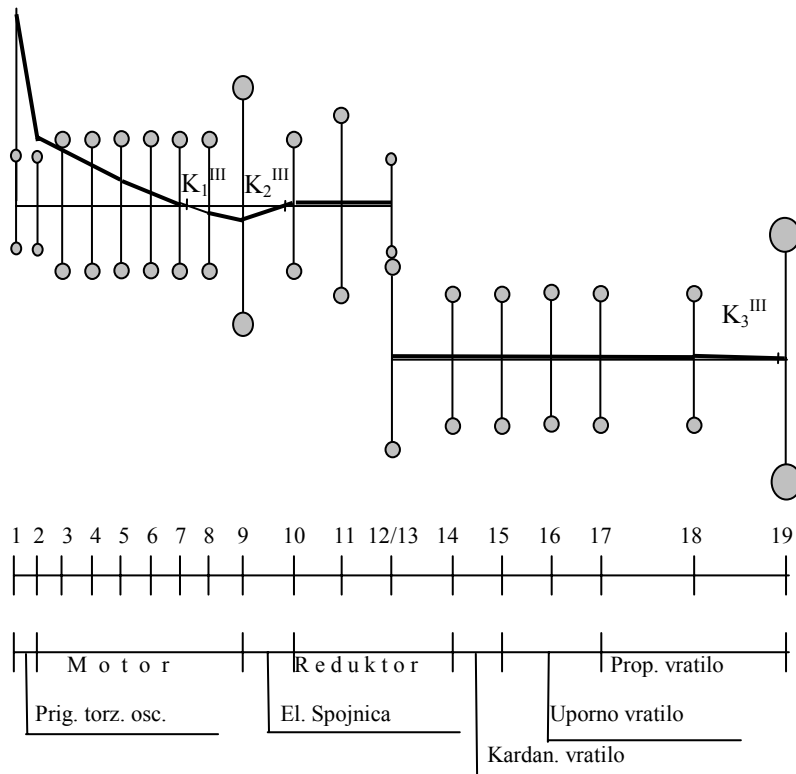
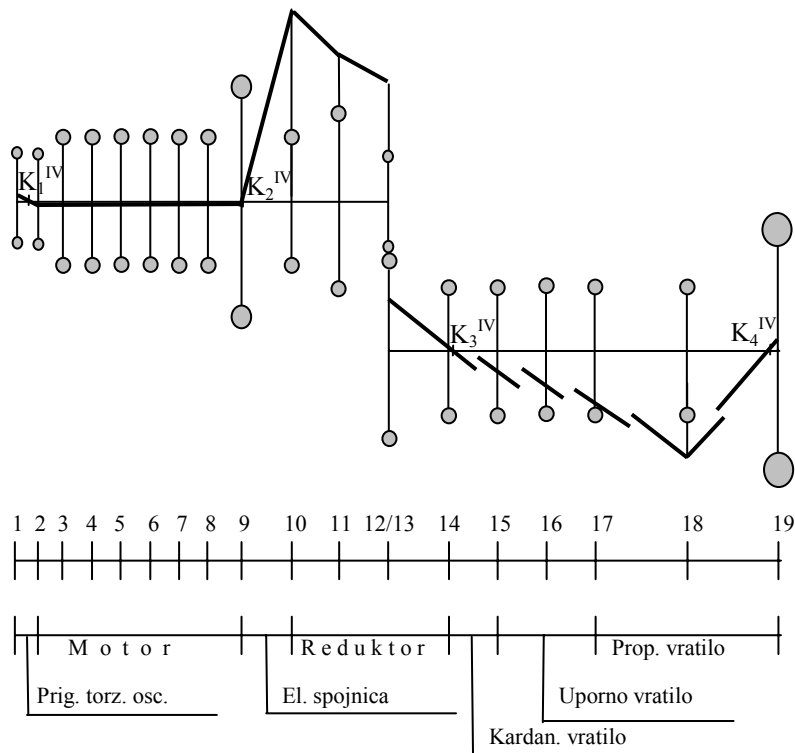

 Sl. 5 – Elastična linija za III oblik oscilovanja sistema ($\lambda_{III}=697,5$ rad/s)

Tabela 4 – Momenti inercije, uglovi uvijanja, momenti uvijanja i tangencijalni naponi za III oblik oscilovanja sistema

Redni broj i	Moment inercije I_i [kgm^2]	Ugao uvijanja θ_i [rad]	Moment uvijanja $\Delta M/\theta_i$ [Nm/rad]	Tangencijalni napon τ_i/θ_i [Nm^2/rad]
1	0,10885	1,0000	52956	-
2	0,09453	0,3574	69391	$412,403 \cdot 10^6$
3	0,15209	0,3162	92786	$551,444 \cdot 10^6$
4	0,10267	0,2552	105535	$627,214 \cdot 10^6$
5	0,14062	0,1859	118255	$702,811 \cdot 10^6$
6	0,14062	0,1083	125662	$746,832 \cdot 10^6$
7	0,10267	0,0257	126948	$754,475 \cdot 10^6$
8	0,15209	-0,0576	122683	$729,127 \cdot 10^6$
9	2,43660	-0,1045	-1256	-
10	0,09992	0,0024	-1141	$41,356 \cdot 10^6$
11	0,29908	0,0051	-403	$6,066 \cdot 10^6$
12	0,03898	0,0053	-303	-
13	0,15591	0,0026	-407	$3,377 \cdot 10^6$
14	0,09653	0,0028	-277	$13,665 \cdot 10^6$
15	0,07574	0,0035	-146	$2,169 \cdot 10^6$
16	0,04208	0,0037	-70	$1,04 \cdot 10^6$
17	0,08459	0,0038	89	$1,322 \cdot 10^6$
18	0,11270	0,0028	244	$3,625 \cdot 10^6$
19	16,76826	-0,00003	4	-



Sl. 6 – Elastična linija za IV oblik oscilovanja sistema ($\lambda_{IV}=1009,8$ rad/s)

Tabela 5 – Momenti inercije, uglovi uvijanja, momenti uvijanja i tangencijalni naponi za IV oblik oscilovanja sistema

Redni broj i	Moment inercije I_i [kgm ²]	Ugao uvijanja θ_i [rad]	Moment uvijanja $\Sigma M/\theta_i$ [Nm/rad]	Tangencijalni napon τ_i/θ_i [N/m ² /rad]
1	0,10885	1,0000	110991	–
2	0,09453	-0,3469	77550	460,894 · 10 ⁶
3	0,15209	-0,3929	16609	98,71 · 10 ⁶
4	0,10267	-0,4038	-25670	152,561 · 10 ⁶
5	0,14062	-0,3870	-81161	482,355 · 10 ⁶
6	0,14062	-0,3337	-129009	766,724 · 10 ⁶
7	0,10267	-0,2480	-155074	921,633 · 10 ⁶
8	0,15209	-0,1471	-177891	1057,239 · 10 ⁶
9	2,43660	-0,0791	-374417	–
10	0,09992	31,8032	2866055	103880,21 · 10 ⁶
11	0,29908	24,9932	10488352	157862,011 · 10 ⁶
12	0,03898	20,1801	11290444	–
13	0,15591	10,0900	24185051	200672,511 · 10 ⁶
14	0,09653	1,1618	24299413	1198787,025 · 10 ⁶
15	0,07574	-65,4967	19240965	285898,44 · 10 ⁶
16	0,04208	-94,4583	15188125	225677,935 · 10 ⁶
17	0,08459	-117,3194	5069019	75319,747 · 10 ⁶
18	0,11270	-176,4821	-15211690	226028,083 · 10 ⁶
19	16,76826	1,0600	2912509	–

Proračunom frekvencija slobodnih oscilacija sistema izračunate su približne vrednosti frekvencija za prva četiri oblika oscilovanja:

- I oblik oscilovanja $\lambda_I = 50,6$ [rad/s],
- II oblik oscilovanja $\lambda_{II} = 199,7$ [rad/s],
- III oblik oscilovanja $\lambda_{III} = 697,5$ [rad/s],
- IV oblik oscilovanja $\lambda_{IV} = 1009,8$ [rad/s].

Vrednosti uglova uvijanja θ (tabele 2–5) relativne su, jer su određene u odnosu na pretpostavljenu vrednost ugla uvijanja prvog elementa ($\theta_I = 1$ rad). Vrednosti momenata uvijanja M i tangencijalnih napona τ date su po uglu uvijanja prvog elementa. Broj čvorova oscilacija (tačke K na sl. 3–6) odgovara rednom broju oblika oscilovanja. Na propelerskom vratilu se nalazi po jedan čvor oscilacija za svaki oblik oscilovanja, dok se u blizini zamajca motora nalazi ukupno četiri čvora oscilacija (za II, III i IV oblik oscilovanja). Od preostala dva čvora oscilacija, jedan se nalazi na prednjem kraju kolenastog vratila motora, a drugi na izlaznoj spojnici reduktora (sl. 6).

Element sistema (izlazna spojnica reduktora i zglob kardanskog vratila, sl. 2) sa rednim brojem $i = 14$ ima najveća naprezanja za sve oblike oscilovanja, izuzev za III oblik. Najveće naprezanje kod III oblika oscilovanja ima element sa rednim brojem $i = 7$ (peto koleno kolenastog vratila motora, tabela 4).

Rezultati proračuna amplituda i naprezanja za kritične brojeve obrtaja

Da bi se odredili kritični brojevi obrtaja, kao i naprezanja koja im odgovaraju, prvo su izračunate amplitude pobudnog momenta od gasnih i inercijalnih sila. Ove amplitude su izračunate, za prva dvadeset i četiri harmonika, pomoću približne metode (Maass i Klier) [1]. Zatim je izračunat rad prinudnog momenta C_k u toku jednog perioda, za svaki harmonik i svaki oblik oscilovanja, vodeći računa o rasporedu cilindara i redosledu paljenja, prema sledećem obrascu [2]:

$$C_k = M_k \cdot \left| \sum_{i=3}^8 \vec{\theta}_i \right| \quad (1)$$

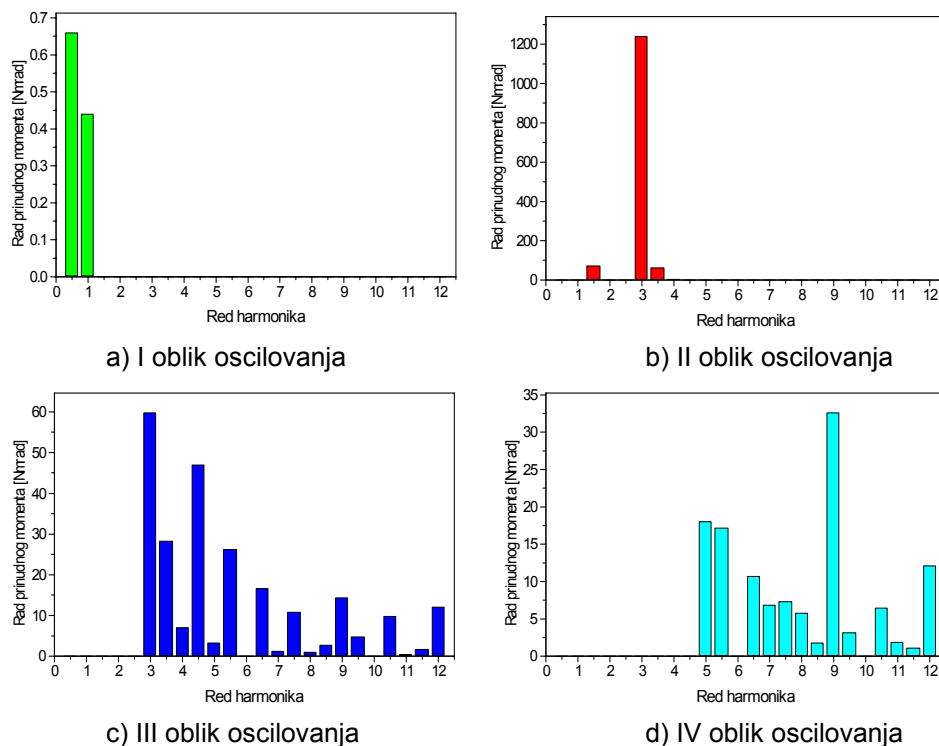
gde je:

C_k – rad harmonika k-tog reda [Nmrad],

M_k – projekcija vektora harmonika k-tog reda svih cilindara na pravac prvog cilindra motora [Nm],

θ_i – relativna amplituda uvijanja i -tog elementa sa sl. 2 [rad].

Vrednosti relativnih amplituda uvijanja θ_i očitane su iz tabela (2–5), a vektorski su sabrane preko zvezde reda posmatranog harmonika [3]. Male vrednosti rada prinudnog momenta ocenjene su kao neuticajne i nisu prikazane na dijagramu 1.



Dijagram 1 – Rad prinudnog momenta za prva četiri oblika oscilovanja sistema

Rad prinudnog momenta na rezonantnim režimima dovodi do povećanja amplituda oscilovanja, koje bi neograničeno rasle kada ne bi postojali otpori na koje se ovaj rad troši. Kod realnih sistema, kakav je sistem prenosa snage na brodu RML-341, to nije slučaj, jer postoje unutrašnji (trenje u prigušivaču torzionih oscilacija, ležištima, materijalu i dr.) i spoljašnji otpori (trenje propelera o vodu, oscilacije nosača motora).

Razmatraju se i oni harmonici koji se nalaze u radnoj oblasti motora ili u njoj blizini. Od svih redova koji se nalaze u pomenutom području od posebnog su značaja oni sa većim amplitudama, jer ulažu veću energiju u oscilovanje sistema. Iz dijagrama 1 ne može se zaključiti koji se harmonici nalaze u radnoj oblasti motora, pa su u tabeli 6 prikazani redovi harmonika i odgovarajući brojevi obrtaja za pojedine oblike oscilovanja (dijagram 1).

Tabela 6 – Redovi harmonika i brojevi obrtaja za različite oblike oscilovanja sistema

Red harmonika k	Broj obrtaja n [o/min]			
	I oblik	II oblik	III oblik	IV oblik
1/2	966	–	–	–
1	483	1907	–	–
1 ¹ / ₂	–	1271	–	–
2	–	953	–	–
2 ¹ / ₂	–	763	–	–
3	–	636	2220	–
3 ¹ / ₂	–	545	1903	–
4	–	477	1665	–
4 ¹ / ₂	–	–	1480	–
5	–	–	1332	1929
5 ¹ / ₂	–	–	1211	1753
6	–	–	1110	1607
6 ¹ / ₂	–	–	1025	1484
7	–	–	952	1378
7 ¹ / ₂	–	–	888	1286
8	–	–	833	1205
8 ¹ / ₂	–	–	784	1134
9	–	–	740	1072
9 ¹ / ₂	–	–	701	1015
10	–	–	666	964
10 ¹ / ₂	–	–	634	918
11	–	–	606	877
11 ¹ / ₂	–	–	579	839
12	–	–	555	804

Iz tabele 6 može se zaključiti da se u radnoj oblasti motora, koju je definisao proizvođač (od 500 do 1800 o/min), nalaze harmonici sledećih redova:

- za I oblik oscilovanja harmonik reda $k = 1/2$,
- za II oblik oscilovanja harmonici reda $k = 1^{1}/_{2}-3^{1}/_{2}$,
- za III oblik oscilovanja harmonici reda $k = 4-12$,
- za IV oblik oscilovanja harmonici reda $k = 5^{1}/_{2}-12$.

Na osnovu vrednosti rada prinudnog momenata C_k (dijagram 1) može se zaključiti da se najveće amplitude, a time i najveća naprezanja, očekuju pri sledećim oblicima oscilovanja i pripadajućim kritičnim brojevima obrtaja (tabela 6):

– II oblik oscilovanja ($\lambda_{II} = 199,7$ rad/s), red harmonika $k = 3$, $n_3^{(II)} = 636$ o/min,

– III oblik oscilovanja ($\lambda_{III} = 697,5$ rad/s), redovi harmonika $k = 3$, $n_3^{(III)} = 2220$ o/min i $k = 4^{1/2}$, $n_{4^{1/2}}^{(III)} = 1480$ o/min,

– IV oblik oscilovanja ($\lambda_{IV} = 1009,8$ rad/s), red harmonika $k = 9$, $n_9^{(IV)} = 1072$ o/min.

Kako su kod I oblika oscilovanja vrednosti amplituda rada prinudnog momenta male, to nema opasnih rezonantnih brojeva obrtaja, pa nema ni potrebe da se ovaj oblik dalje razmatra.

Vrednosti stvarnih amplituda oscilovanja A_i , za izračunate kritične brojeve obrtaja, određene su iz uslova ravnoteže radova prinudnih i prigušnih momenata. Za ovaj proračun korišćene su formule: Widlera, Holzera, Bicera, Cartera, FIAT-a i Ker Wilsona za radove prigušenja u motoru, kao i formule za prigušivanje prigušivača torzionih oscilacija, elastične spojnice i propelera [2]. U prvom koraku proračuna dobijene su sledeće vrednosti stvarnih amplituda oscilovanja A_1 prvog elementa sistema sa sl. 2:

$$-A_1^{(II)} = \pm 0,00243 \text{ rad} = \pm 0,139^0 \text{ (II oblik oscilovanja, } k = 3),$$

$$-A_1^{(III)} = \pm 0,02035 \text{ rad} = \pm 1,166^0 \text{ (III oblik oscilovanja, } k = 3),$$

$$-A_1^{(III)} = \pm 0,01597 \text{ rad} = \pm 0,915^0 \text{ (III oblik oscilovanja, } k = 4^{1/2}),$$

$$-A_1^{(IV)} = \pm 5,423 \cdot 10^{-6} \text{ rad} = \pm 3,1077 \cdot 10^{-40} \text{ (IV oblik oscilovanja, } k = 9),$$

Na osnovu stvarnih vrednosti amplituda oscilovanja prve mase sistema A_1 , u drugom koraku su izračunate stvarne vrednosti amplituda oscilovanja A_i ostalih elemenata sistema. U trećem koraku izračunati su momenti uvijanja M_i i tangencijalni naponi τ_i . Vrednosti ovih veličina za II, III i IV oblik oscilovanja date su u tabelama 7–10. Iz tabele 7 vidi se da amplitude oscilovanja kod II oblika oscilovanja, pri $n_3^{(II)} = 636$ o/min, imaju znatnu vrednost, a naročito u reduktoru. U slučaju rada motora na ovom broju obrtaja mogu se očekivati pojave šumova i udara. Međutim, u normalnoj eksploataciji motora ne postoji potreba za njegovim dužim radom u blizini ovog broja obrtaja.

Eventualno zabranjivanje rada u zoni $n_3^{(II)} = 636$ o/min praktično ne bi narušavalo deklarisanu performanse instalacije u celini. Torziona naprezanja pri ovom broju obrtaja su u dozvoljenim granicama. Dinamički moment usled torzionih oscilacija na elastičnoj spojnici (element sa rednim brojem 9, sl. 2) iznosi $M_{d9} \approx 291$ Nm (tabela 7). Pri istom broju obrtaja (636 o/min) odgovarajući statički moment je $M_{s9} \approx 553$ Nm. Prema tome,

ukupan moment na elastičnoj spojnici je $M_{u9} \approx 845$ Nm i znatno je manji od nominalnog za datu spojnicu (1177 Nm).

Tabela 7
Amplitude, momenti i tangencijalni naponi za II oblik oscilovanja i harmonik reda $k = 3$

Redni broj i	Ugao uvijanja θ_i [rad]	Amplituda A_i [rad]	Amplituda A_i [$^\circ$]	Moment uvijanja M_i [Nm]	Tangencijalni napon τ_i [N/m ²]
1	1,0000	0,002433	0,13941	10,549	–
2	0,9473	0,002302	0,13190	19,229	$0,114 \cdot 10^6$
3	0,9426	0,00229	0,13122	33,124	$0,197 \cdot 10^6$
4	0,9337	0,002269	0,13001	42,415	$0,252 \cdot 10^6$
5	0,9222	0,002241	0,12841	54,983	$0,326 \cdot 10^6$
6	0,9073	0,002205	0,12635	67,35	$0,4 \cdot 10^6$
7	0,8891	0,00216	0,12377	76,197	$0,453 \cdot 10^6$
8	0,8685	0,002111	0,12096	89	$0,528 \cdot 10^6$
9	0,8545	0,002076	0,11895	290,809	–
10	-9,336	-0,022686	-1,2999	200,392	$7,263 \cdot 10^6$
11	-9,5319	-0,023162	-1,32718	75,916	$1,142 \cdot 10^6$
12	-9,5176	-0,023128	-1,32523	111,873	–
13	-4,7588	-0,011564	-0,66262	295,659	$2,453 \cdot 10^6$
14	-4,7139	-0,011455	-0,65637	339,761	$16,761 \cdot 10^6$
15	-4,3303	-0,010523	-0,60297	371,55	$5,52 \cdot 10^6$
16	-4,1002	-0,009963	-0,57088	388,271	$5,768 \cdot 10^6$
17	-3,8597	-0,009379	-0,53742	419,914	$6,239 \cdot 10^6$
18	-1,8428	-0,004478	-0,25659	440,043	$6,539 \cdot 10^6$
19	0,2708	0,000658	0,0377	0	–

Kod III oblika oscilovanja, pri rezonantnom broju obrtaja $n_3^{(III)} = 2220$ o/min, vrednost amplitude prve mase sistema (prigušivač torzionih oscilacija) iznosi $A_1 = \pm 1,166^\circ$, pa su i amplitude u motoru znatne. Osim toga, u oblasti motora, bliže zamajcu, nalazi se i čvor oscilacija (sl. 5). Međutim, kako je rezonantni broj obrtaja $n_3^{(III)} = 2220$ o/min veći za $\approx 1/4$ od nominalnog broja obrtaja motora (1800 o/min), u radnoj oblasti motora ne može se očekivati uticaj rezonancije. Može se zaključiti da su u radnoj oblasti motora sve relevantne vrednosti (amplitude, momenti i naprezanja) mnogo ispod dozvoljenih, tako da harmonik reda $k = 3$ kod III oblika oscilovanja ne predstavlja opasnost za pojavu otkaza u sistemu prenosa snage.

Tabela 8

Amplitude, momenti i tangencijalni naponi za III oblik oscilovanja i harmonik reda $k = 3$

Redni broj i	Ugao uvijanja θ_i [rad]	Amplituda A_i [rad]	Amplituda A_i [°]	Moment uvijanja M_i [Nm]	Tangencijalni napon τ_i [N/m ²]
1	1,0000	0,02035	1,166	1077,651	–
2	0,3574	0,007273	0,4167	1412,104	$8,392 \cdot 10^6$
3	0,3162	0,006435	0,3687	1888,2	$11,179 \cdot 10^6$
4	0,2552	0,00519	0,2974	2147,645	$12,764 \cdot 10^6$
5	0,1859	0,00378	0,2166	2406,496	$14,302 \cdot 10^6$
6	0,1083	0,002204	0,1263	2557,224	$15,198 \cdot 10^6$
7	0,0257	0,000523	0,03	2583,385	$15,353 \cdot 10^6$
8	-0,0576	-0,001172	-0,0672	2496,6	$14,838 \cdot 10^6$
9	-0,1045	-0,002126	-0,1218	25,55	–
10	0,0024	0,000049	0,0028	23,216	$0,841 \cdot 10^6$
11	0,0051	0,000104	0,0059	8,199	$0,123 \cdot 10^6$
12	0,0053	0,000108	0,0062	6,172	–
13	0,0026	0,000053	0,003	8,287	$0,069 \cdot 10^6$
14	0,0028	0,000057	0,0033	5,631	$0,278 \cdot 10^6$
15	0,0035	0,000071	0,0041	2,979	$0,044 \cdot 10^6$
16	0,0037	0,000075	0,0043	1,415	$0,021 \cdot 10^6$
17	0,0038	0,000077	0,0044	1,82	$0,027 \cdot 10^6$
18	0,0028	0,000057	0,0033	4,965	$0,074 \cdot 10^6$
19	-0,00003	-0,0000006	-0,000034	0,073	–

Pri rezonantnom broju obrtaja $n_{41/2}^{(III)} = 1480$ o/min, kojis iznosi 82% od nominalnog broja obrtaja motora, vrednost amplitude prve mase sistema je $A_1 = \pm 0,9149^\circ$. U oblasti motora maksimalna vrednost amplitude nalazi se na I kolenu kolenastog vratila ($i = 3$, sl. 2) i iznosi $A_3 = 0,289^\circ$. Međutim, maksimalno naprezanje se javlja između V i VI kolena kolenastog vratila i ono iznosi $\tau_7 = 12,047 \cdot 10^6$ N/m², što je znatno manje od dozvoljenog naprezanja koje propisuje domaće klasifikaciono društvo. Za kolena-sto vratilo posmatranog brojskog dizel motora naprezanje usled torzionih oscilacija (dodatno naprezanje) mora biti manje od $30 \cdot 10^6$ N/m² [4].

Na osnovu toga, može se zaključiti da harmonik reda $k = 4\frac{1}{2}$ kod III oblika oscilovanja, pri rezonantnom broju obrtaja $n_{41/2}^{(III)} = 1480$ o/min (koji se nalazi u radnoj oblasti motora), ne predstavlja nikakvu opasnost u pogledu torzionih oscilacija.

Tabela 9
Amplitude, momenti i tangencijalni naponi za III oblik oscilovanja i harmonik reda $k = 4^{1/2}$

Redni broj i	Ugao uvijanja θ_i [rad]	Amplituda A_i [rad]	Amplituda A_i [°]	Moment uvijanja M_i [Nm]	Tangencijalni napon τ_i [N/m ²]
1	1,0000	0,015976	0,9149	845,576	–
2	0,3574	0,005707	0,327	1108,004	$6,585 \cdot 10^6$
3	0,3162	0,005049	0,2893	1481,572	$8,772 \cdot 10^6$
4	0,2552	0,004072	0,2333	1685,144	$10,015 \cdot 10^6$
5	0,1859	0,002966	0,1699	1888,251	$11,222 \cdot 10^6$
6	0,1083	0,001729	0,0991	2006,519	$11,925 \cdot 10^6$
7	0,0257	0,00041	0,0235	2027,046	$12,047 \cdot 10^6$
8	-0,0576	-0,00092	-0,0527	1958,95	$11,642 \cdot 10^6$
9	-0,1045	-0,001668	-0,0956	20,048	–
10	0,0024	0,000038	0,0022	18,216	$0,66 \cdot 10^6$
11	0,0051	0,000082	0,0046	6,433	$0,097 \cdot 10^6$
12	0,0053	0,000085	0,0049	4,842	–
13	0,0026	0,000041	0,0023	6,502	$0,054 \cdot 10^6$
14	0,0028	0,000045	0,0026	4,418	$0,218 \cdot 10^6$
15	0,0035	0,000056	0,0032	2,338	$0,035 \cdot 10^6$
16	0,0037	0,000059	0,0034	1,11	$0,016 \cdot 10^6$
17	0,0038	0,00006	0,0034	1,428	$0,021 \cdot 10^6$
18	0,0028	0,000045	0,0026	3,896	$0,058 \cdot 10^6$
19	-0,00003	-0,0000004	-0,00002	0,0579	–

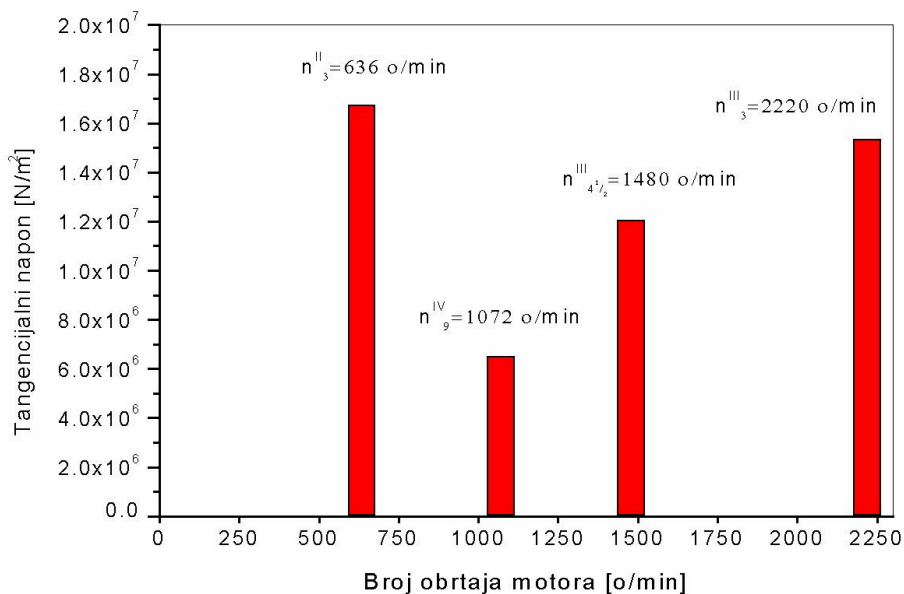
Kod IV oblika oscilovanja pri $n_g^{(IV)} = 1072$ o/min stvarne vrednosti amplitude oscilovanja elemenata sistema su zanemarljivo male, pa ovaj oblik nema praktičnog značaja za proučavanje torzionih oscilacija sistema.

Tabela 10
Amplitude, momenti i tangencijalni naponi za IV oblik oscilovanja i harmonik reda $k = 9$

Redni broj i	Ugao uvijanja θ_i [rad]	Amplituda $A_i \cdot 10^6$ [rad]	Amplituda $A_i \cdot 10^4$ [°]	Moment uvijanja M_i [Nm]	Tangencijalni napon τ_i [N/m ²]
1	1,0000	5,423	3,1077	0,602	–
2	-0,3469	-1,881	-1,078	0,421	$0,25 \cdot 10^4$
3	-0,3929	-2,131	-1,221	0,09	$0,053 \cdot 10^4$
4	-0,4038	-2,19	-1,255	0,139	$0,083 \cdot 10^4$
5	-0,3870	-2,098	-1,203	0,44	$0,261 \cdot 10^4$
6	-0,3337	-1,81	-1,038	0,7	$0,416 \cdot 10^4$
7	-0,2480	-1,358	-0,774	0,841	$0,5 \cdot 10^4$
8	-0,1471	-0,798	-0,457	0,965	$0,573 \cdot 10^4$
9	-0,0791	-0,429	-0,245	2,03	–
10	31,8032	172,469	98,834	15,542	$56,334 \cdot 10^4$
11	24,9932	135,538	77,671	56,878	$85,608 \cdot 10^4$
12	20,1801	109,437	62,713	61,228	–
13	10,0900	54,718	31,357	131,155	$108,825 \cdot 10^4$
14	1,1618	6,301	3,611	131,775	$650,102 \cdot 10^4$
15	-65,4967	-355,189	-203,545	104,345	$155,043 \cdot 10^4$
16	-94,4583	-512,247	-293,547	82,365	$122,385 \cdot 10^4$
17	-117,3194	-636,223	-364,592	27,489	$40,846 \cdot 10^4$
18	-176,4821	-957,062	-548,453	82,493	$122,575 \cdot 10^4$
19	1,0600	5,748	3,294	15,794	–

Na dijagramu 2 prikazane su maksimalne vrednosti tangencijalnog napona, za pojedine oblike oscilovanja i četiri kritična broja obrtaja (tabele 7–10). Najveće vrednosti tangencijalnog napona, za posmatrane oblike oscilovanja i kritične brojeve obrtaja, imaju sledeći elementi sistema (sl. 2):

- izlazna spojnica reduktora i zglob kardanskog vratila ($i = 14$, $n(\text{II})3 = 636$ o/min i $n(\text{IV})9 = 1072$ o/min tabele 7 i 10),
- peto koleno kolenastog vratila motora ($i = 7$, $n(\text{III})4\frac{1}{2} = 1480$ o/min i $n(\text{III})3 = 2220$ o/min tabele 8 i 9).



Dijagram 2 – Maksimalne vrednosti tangencijalnog napona za kritične brojeve obrtaja sistema

Zaključak

Imajući u vidu celokupnu prethodnu analizu proračuna torzionih oscilacija sistema brodske dizel motorne propulzije, može se zaključiti sledeće:

1. Posmatrani pogonski sistem, sa aspekta torzionih oscilacija, uglavnom zadovoljava.

2. Pri niskim brojevima obrtaja ($n = 636$ o/min) mogu se eventualno očekivati nešto veće amplitude oscilovanja u reduktoru, mada su torziona naprezanja i tada relativno niska.

3. Zbog niza pretpostavljenih ili nedovoljno tačno određenih faktora pomoću kojih je izvršen proračun, neophodno je, radi sigurnosti, izvršiti proveru torzionih oscilacija u sistemu prenosa snage merenjem na brodu.

Literatura

- [1] Wilson, W. K.: Practical solution of torsional vibration problems, Chapman & Hall, London, 1963.
- [2] Šićević, M.: Proračun torzijskih vibracija pogonskog sistema, Brodarski institut, Zagreb, 1975.
- [3] Živković, M.: Motori sa unutrašnjim sagorevanjem, II deo, Mašinski fakultet, Beograd, 1983.
- [4] Šretner, J.: Brodski motori s unutarnjim izgaranjem, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1972.
- [5] Vuković, J., Obradović, A.: Linearne oscilacije mehaničkih sistema, Mašinski fakultet, Beograd, 2007.
- [6] Rašković, D.: Otpornost materijala, Građevinska knjiga, Beograd, 1990.
- [7] Trifković, D.: Istraživanje torzionih oscilacija u sistemu prenosa snage sa broskog dizel motora na propeler, Magistarski rad, Mašinski fakultet, Beograd, 2004.

UDC: 355.415.2 : 623.45
355.424.7 : 358.116

PRIMENA METODA OPERACIONIH ISTRAŽIVANJA U REŠAVANJU PROBLEMA SNABDEVANJA MUNICIJOM PROTIVOKLOPNE ČETE

Potpukovnik Aca Ranđelović, Vojna akademija

Rezime:

U radu je prikazana primena jedne od metoda operacionih istraživanja u rešavanju problema snabdevanja protivoklopne čete municijom. Primenjena je metoda transportnog problema u iznalaženju optimalnog plana prevoza municije iz skladišta do reiona razmeštaja protivoklopne čete.

Ključne reči: tečnost za hlađenje, antifriz, sistem za hlađenje, aditiv inhibitor korozije.

APPLICATION OF THE OPERATIONAL RESEARCH METHODS
IN SOLVING THE PROBLEM OF AMMUNITION SUPPLY
OF THE ANTI-TANK COMPANY

Summary:

The paper describes the application of one of the operational research methods in solving the problem of ammunition supply in an anti-tank company. The method of transportation problem is applied in order to find the most cost-effective plan for ammunition transportation from the storage site to the area of anti-tank company deployment.

Key words: operational research, transportation problem, funds reduction.

Uvod

Obezbeđenje Vojske je bitan sadržaj vojne delatnosti, usmeren na stvaranje uslova za realizaciju misija i zadataka. U oružanim sukobima znatno je složenije zbog većeg i dinamičnijeg utroška resursa, neposrednog uticaja na živote ljudi i izvršenje postavljenih zadataka. Obezbeđenje se organizuje pravovremeno, neprekidno i potpuno, u svim vidovima i oblicima borbenih dejstava, a saglasno je borbenim, vremenskim i prostornim uslovima. Ostvaruje se borbenim obezbeđenjem i *logističkom podrškom*. Logistička podrška obuhvata: *snabdevanje*, održavanje, transport, zdravstvo, infrastrukturu i opšte logističke delatnosti [1].

Snabdevanje je deo materijalnog obezbeđenja i predstavlja organizovanu delatnost logističke podrške, kojom se obezbeđuju materijalne potrebe jedinica. Osnovne funkcije snabdevanja su: planiranje, nabavka, skladištenje, *raspodela i izdavanje* i utrošak materijalnih sredstava.

Snabdevanje municijom je najbitniji deo snabdevanja u oružanim sukobima i predstavlja delatnost kojom tehnički organi, planskim i organizovanim korišćenjem izvora snabdevanja, obezbeđuju pravovremeno i neprekidno snabdevanje jedinica municijom potrebnom za borbu. Obavlja se, načelno, „*doturom od sebe*“ iz skladišta municije, tehničkih baza ili iz jedinica za tehničko snabdevanje [2].

Problem snabdevanja, kao jedan od mnogobrojnih realnih problema u vojnom organizacionom sistemu, rešava se praktičnom primenom nekih od metoda operacionih istraživanja. Problemi snabdevanja i transporta municije mogu se uspešno rešavati primenom metode transportnog problema, što će u radu biti prikazano.

Transportni problem, kao metoda, zauzima značajno mesto u operacionim istraživanjima, a tretira određivanje optimalnih troškova pri poznatoj strukturi transporta (lokaciji, transportnoj mreži i zavisnosti troškova od količina koje se transportuju). Transportni problem je specifičan slučaj zadataka linearnog programiranja. Ogleda se u skupu ograničenja L gde se pojavljuju izvesna uprošćenja koeficijenata matrice A skupa ograničenja, koji se, za razliku od drugih slučajeva, izražavaju sa vrednostima nula ili jedan.

Analičke metode transporta u najvećem broju slučajeva vezuju se za izbor najpovoljnije varijante transporta, koja obezbeđuje da troškovi transporta budu minimalni u odnosu na određenu saobraćajnu mrežu i transportna sredstva [3].

Rešavanje transportnih problema obuhvata: *pristup problemu, formiranje matematičkog modela, izbor metode rešavanja i implementaciju*.

Pristup problemu snabdevanja municijom protivoklopne čete

Protivoklopna četa (POČ) osnovna je taktička jedinica pešadije, namenjena za protivoklopnu borbu [4]. Nalazi se u formacijskom sastavu bataljona. Naoružana je protivoklopnim lansirnim oruđima (POLO), bestrzajnim topovima (BsT) i ručnim raketnim bacačima (RBR).

Za uspešno izvršavanje zadataka, pravovremeno snabdevanje POČ municijom je od izuzetne važnosti i predstavlja jedan od prioriteta. Dakle, treba iznaći takav plan transporta čiji će troškovi, u odnosu na mrežu saobraćajnica i raspoloživa transportna sredstva, biti minimalni.

Pri rešavanju problema prvenstveno treba definisati cilj, odnosno utvrditi koji problem donosilac odluka modela želi da reši korišćenjem modela. Postavljanje ciljeva, koji se rešavaju modelovanjem, mora biti u skladu sa zadatim vremenskim i troškovnim ograničenjima. Ciljevi po svom kontekstu ne treba da budu preterano specifični, jer se može postaviti pitanje opravdanosti ulaganja u razvoj modela, kao ni suviše opšti, jer nije moguće jedinstvenim modelom rešiti sve moguće probleme u razmatranom sistemu.

Imajući sve to uvidu, a posebno problem koji se rešava, cilj ovog rada je formulacija *matematičkog modela* transportnog problema, gde je funkcija cilja *minimizacija* troškova transporta, odnosno određivanje najpre početnog, a zatim i optimalnog rešenja.

Polazna matrica za rešavanje problema snabdevanja municijom POČ prikazana je u tabeli 1.

Tabela 1 – Polazna matrica za rešavanje problema snabdevanja municijom POČ

	Komanda protivoklopne čete	Vod-1	Vod-2	Vod-3	Kapacitet skladišta
Skladište broj 1	1560,00	1820,00	1860,00	1756,00	2500
Skladište broj 2	1660,00	1400,00	1990,00	1790,00	2500
Skladište broj 3	1450,00	1750,00	1870,00	1580,00	2500
Skladište broj 4	1300,00	1920,00	2010,00	1654,00	2100
Potrebe POČ	6000	1200	1200	1200	

Formiranje matematičkog modela transportnog problema

Formiranje matematičkog modela podrazumeva da se definiše funkcija cilja i ograničenja. Funkcija cilja predstavlja određivanje minimalnih troškova transporta, a ograničenja su definisana preko količina u skladištima i potrebama.

Protivoklopna četa trenutno se nalazi na četiri lokacije, a popuna nedostajućom municijom se može izvršiti iz četiri skladišta. Moraju se razmatrati zahtevi za popunu, kapaciteti skladišta, njihova lokacija, mogući putevi dotura i cene transporta iz pojedinih skladišta do određenih lokacija, odnosno do protivoklopne čete, na osnovu čega je i konstruisan matematički model problema (tabela 2).

Tabela 2 – Matematički model

Realan sistem	
Upravljačke odluke: ☒ količina robe koja se transportuje od skladišta S-1, S-2, S-3 i S-4 do lokacija na kojoj se nalazi protivoklopna četa L-1, L-2, L-3 i L-4	$x_{ij}, i = 1, 2, 3, 4, j = 1, 2, 3, 4$
Kriterijum upravljanja: ☒ ukupni troškovi transporta	
Cilj: ☒ minimizacija	$(\min)f(x) = 1560x_{11} + 1820x_{12} + 1860x_{13} + 1756x_{14} + 1660x_{21} + 1400x_{22} + 1990x_{23} + 1795x_{24} + 1450x_{31} + 1750x_{32} + 1870x_{33} + 1580x_{34} + 1300x_{41} + 1920x_{42} + 2010x_{43} + 1645x_{44}$
Matematički model	
Ograničavajući faktori: ☒ raspoloživa količina municije u skladištu S-1 ☒ raspoloživa količina municije u skladištu S-2 ☒ raspoloživa količina municije u skladištu S-3 ☒ raspoloživa količina municije u skladištu S-4 ☒ potrebna količina municije na lokaciji L-1 (protivoklopna četa) ☒ potrebna količina municije na lokaciji L-2 (vod RBR 90 mm) ☒ potrebna količina municije na lokaciji L-3 (Vod BsT 82 mm) ☒ potrebna količina municije na lokaciji L-4 (vod POLO 9K11 125 mm) ☒ prirodno ograničenje	$x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} = 2500$ $x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} = 2500$ $x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} = 2500$ $x_{41} + x_{42} + x_{43} + x_{44} = 2100$ $x_{11} + x_{21} + x_{31} + x_{41} = 6000$ $x_{12} + x_{22} + x_{32} + x_{42} = 1200$ $x_{13} + x_{23} + x_{33} + x_{43} = 1200$ $x_{14} + x_{24} + x_{34} + x_{44} = 1200$ $x_{ij} \geq 0, i = 1, 2, 3, 4, j = 1, 2, 3, 4$

Izbor metode rešavanja

Definisani problem predstavlja specijalni oblik problema linearnog programiranja – *transportni problem*, koji se rešava u dve faze:

– *prva faza* – pronalaženje polaznog dopustivog rešenja problema (Vogelova aproksimativna metoda),

– *druga faza* – pronalaženje optimalnog dopustivog rešenja problema (metoda potencijala).

Pre pronalaženja polaznog dopustivog rešenja utvrđuje se da li je transportni problem „zatvoren“ ili „otvoren“. Zatvoren transportni problem nastaje usled idealne ravnoteže ponude i potražnje, odnosno ukoliko je

ponuđena količina proizvoda (u ovom problemu municija) jednaka količini proizvoda koja se potražuje, dok otvoren transportni problem predstavlja nesklad u ponudi i potražnji.

Utvrđivanje slučaja ili tipa transportnog problema vrši se upoređivanjem zbira ukupne količine ponuđenih proizvoda i zbira ukupne količine proizvoda koji se potražuju. U ovom slučaju utvrđeno je da je transportni problem zatvoren, što se dokazuje:

$$\sum_{i=1-4} S_i = 9600 = \sum_{j=1-4} L_j = 9600 \Rightarrow \text{zatvoren transportni problem}$$

Nakon utvrđivanja tipa transportnog problema pristupa se njegovom rešavanju.

Prva faza

Za pronalaženje polaznog dopustivog rešenja postoji više heurističkih metoda, od kojih su najpoznatije:

- metoda „severozapadnog ugla“ (dijagonalna metoda),
- metoda najmanjeg elementa u matrici cena transporta, i
- Vogelova aproksimativna metoda (metoda najmanjih razlika).

Za određivanje početnog rešenja transporta municije za potrebe POČ koristiće se *Vogelova aproksimativna metoda*, čiji je osnovni princip izračunavanje najvećih razlika između dva najmanja koeficijenta cena u svakom redu i svakoj koloni matrice cena. Sam postupak sadrži dva koraka.

Prvi korak – za svaku vrstu i svaku kolonu u matrici cena izračunava se razlika između dva najmanja elementa. Ako u jednoj vrsti ili koloni postoje dva elementa sa istom najmanjom vrednošću, onda je razlika za tu vrstu ili kolonu jednaka nuli.

Drugi korak – nalazi se vrsta ili kolona sa najvećom razlikom i u njoj polje (i, j) koje ima minimalnu vrednost (c_{ij}) . Promenljivoj x_{ij} dodeljuje se minimalna vrednost od raspoložive količine robe u skladištu S_i i potrebne količine na lokaciji L_j . Ukoliko je izabrana količina robe u skladištu S_i za izabrano polje bila veća od potreba lokacije L_j onda su potrebe ove lokacije u potpunosti zadovoljene. Cene transporta iz ove kolone se više ne uzimaju u obzir, a nova vrednost za raspoloživu količinu robe u skladištu S_i dobija se kada se od tekuće vrednosti oduzme vrednost dodeljena promenljivoj x_{ij} . Ako je vrednost potreba lokacije L_j bila veća od raspoložive količine robe u skladištu S_i nova vrednost za potrebe lokacije L_j dobija se kada se od tekuće vrednosti oduzme vrednost dodeljena promenljivoj x_{ij} , a vrednosti cena transporta iz kolone se više ne uzimaju u obzir. Ukoliko je raspoloživa količina robe u skladištu S_i bila jednaka potrebama lokacije L_j vrednosti cena transporta iz ove kolone i vrste više se ne uzimaju u obzir. To znači da je dobijeno degenerisano rešenje.

Navedeni postupak se ponavlja sve dok ne preostane samo jedna vrsta ili samo jedna kolona u kojima je moguće dodeliti vrednost promenljivoj. Ovim poljima dodeljuju se vrednosti raspoložive količine robe u skladištima ili vrednosti nezadovoljenih potreba lokacija. Množenjem vrednosti jediničnih troškova sa vrednošću odgovarajućih bazičnih promenljivih i njihovim sabiranjem dobija se polazno dopustivo (bazično) rešenje.

U konkretnom problemu polazno dopustivo rešenje određuje se na način prikazan u tabeli 3.

Tabela 3 – Određivanje polaznog dopustivog rešenja

Tražnja Ponuda	6000(3900,1400) L ₁	1200 L ₂	1200 L ₃	1200(100) L ₄	Razlika reda
2500	1560,00	1820,00	1860,00	1756,00	1756 1560=196
S ₁	<u>2500</u>				
2500(1300)	1660,00	1400,00	1990,00	1790,00	1660 1400=260 1795 1660=130 1990 1795=195
S ₂		<u>1200</u>	<u>1200</u>	<u>100</u>	
2500(1100)	1450,00	1750,00	1870,00	1580,00	1580 1450=130 1870 1580=290
S ₃	<u>1400</u>			<u>1100</u>	
2100	1300,00	1920,00	2010,00	1654,00	1645 1300=345
S ₄	<u>2100</u>				
Razlika kolone	1450-1300=150 1560-1450=110 1660-1450=210	1750 <u>1400=350</u>	1870 1860=10 1990 1870=120	1645 1580=65 1756 1580=176	

Iz tabele proizilazi polazno dopustivo rešenje:

$$X_b^0 = X_{11}^0, X_{22}^0, X_{23}^0, X_{24}^0, X_{31}^0, X_{34}^0, X_{41}^0$$

Ukupni troškovi:

$$F_0 = 1.560,00 \cdot 2.500 + 1.400,00 \cdot 1.200 + 1.990,00 \cdot 1.200 + 1.790,00 \cdot 100 + 1.450,00 \cdot 1.400 + 1.580,00 \cdot 1.100 + 1.300,00 \cdot 2.100 = 3.900.000 + 1.680.000 + 2.388.000 + 179.000 + 2.030.000 + 1.738.000 + 2.730.000 = 14.645.000 \text{ dinara.}$$

Nakon pronalazaženja polaznog dopustivog rešenja transportnog problema proverava se da li je rešenje optimalno, što se realizuje u drugoj fazi transportnog problema.

Druga faza

Metodama za određivanje optimalnog rešenja transportnog problema proverava se da li je polazno dopustivo rešenje optimalno. Ukoliko nije definisan je postupak prelaska na bazično rešenje koje obezbeđuje smanjenje troškova prevoza.

Najpoznatije metode za određivanje optimalnog rešenja transportnog problema su:

- metoda skakanja s kamena na kamen,
- metoda uslovno optimalnih planova, i
- metoda potencijala (MoDi).

Za određivanje optimalnog rešenja konkretnog transportnog problema biće korišćena *metoda potencijala*. Ona predstavlja uprošćenje metode raspodele (*Modification Distribution*) koju je na osnovu opšte simpleks-metode razvio Dancig. Nakon određivanja polaznog dopustivog rešenja dalji postupak u iznalaženju optimalnog rešenja transportnog problema razvija se po logici simpleks-metode, odnosno postepeno se uvođe slobodne promenljive u bazično rešenje na mesto pojedinih bazičnih promenljivih sve dok se ne postigne optimalno rešenje.

U konkretnom transportnom problemu ima 7 bazičnih promenljivih, što odgovara zbiru kolona i redova umanjnim za jedan ($m + n - 1$) iz čega zaključujemo da rešenje nije degenerisano. Svakom skladištu S_i dodeljuje se potencijal reda u_i ($i = 1, 2, \dots, m$), a svakoj lokaciji L_j potencijal kolone v_j ($j = 1, 2, \dots, n$), koje su međusobno povezane izrazom:

$$C_{ij} = u_i + v_j$$

Nakon rešenja sistema za svaku bazičnu promenljivu izračunava se jedinična promena troškova za svaku nebaznu promenljivu prema izrazu:

$$D_{ij} = c_{ij} - u_i - v_j$$

Vrednost d_{ij} govori za koliko bi se povećala ili smanjila vrednost funkcije cilja ukoliko se od skladišta S_i do lokacije L_j transportuje jedna jedinica robe. Zbog toga se može reći da za bazne promenljive važi $d_{ij} = 0$.

U transportnoj simpleks-tabeli prikazani su sledeći parametri:

Za baznu promenljivu $d_{ij} = 0$
c_{ij} x_{ij}

Za nebaznu promenljivu $d_{ij} \neq 0, x_{ij} \neq 0$
c_{ij} d_{ij}

Neko bazno rešenje je optimalno ukoliko važi $d_{ij} \geq 0$, $i = 1, \dots, m$, $j = 1, \dots, n$. Svako polje na kojem je vrednost jedinične promene troškova manja od nule može da učestvuje u formiranju poboljšanog baznog rešenja. U konkretnom transportnom problemu vrednosti jediničnih promena troškova prikazani su u tabeli 4.

Tabela 4 – Vrednosti jediničnih promena troškova

Tražnja Ponuda	6000 L_1	1200 L_2	1200 L_3	1200 L_4	u_i
2500 S_1	1560,00 2500	1820,00 485	1860,00 -25	1756,00 66	1560
2500 S_2	1660,00 -5	1400,00 1200	1990,00 1200	1790,00 100	1660
2500 S_3	1450,00 1400	1750,00 525	1870,00 95	1580,00 1100	1450
2100 S_4	1300,00 2100	1920,00 845	2010,00 385	1654,00 224	1300
v_j	0	-225	325	130	

Polazno dopustivo rešenje u tabeli T_{00} ne predstavlja optimalno rešenje pošto su $d_{13} = -25 < 0$ i $d_{21} = -5 < 0$. Vrednost funkcije cilja smanjiće se za $25 \cdot \theta$ (θ predstavlja količinu robe koja se može transportovati preko polja koje dovodi do najvećeg smanjenja troškova, što je u ovoj situaciji d_{13} , odnosno polje x_{13} , što predstavlja i kriterijum za ulazak promenljive u bazu), ako se izvrši transport iz skladišta S_1 na lokaciju L_3 .

Nakon određivanja promenljive koja će ući u bazu određuje se bolje susedno rešenje na sledeći način:

- određuje se u transportnoj tabeli „poligon“, čije je teme polje promenljive koja ulazi u bazu, a ostala temena su polja kojima odgovaraju bazne promenljive. U svakoj koloni, odnosno redu koji učestvuje u formiranju poligona nalaze se tačno dva temena poligona;

- određuje se način promene vrednosti u poljima koja predstavljaju temena poligona, tako da količine ponude i tražnje ostanu nepromenjene. Ukoliko se u polje promenljive koja ulazi u bazu transportuje količina robe θ , u nekim temenima poligona treba dodati (pripadaju skupu temena R^+), a u nekim oduzeti (pripadaju skupu temena R^-) vrednost θ , tako da zbirovi vrednosti u kolonama i redovima tabele ostanu nepromenjeni.

U konkretnom transportnom problemu temena poligona su polja 13, 11, 21 i 23, a vrednost $\theta = 1200$. Bolje susedno dopustivo rešenje se vidi u sledećoj iteraciji (tabela 5):

Tabela 5 – Bolje susedno dopustivo rešenje

Tražnja Ponuda	6000 L ₁	1200 L ₂	1200 L ₃	1200 L ₄	u _i
2500 S ₁	1560,00 1300	1820,00 0	1860,00 1200	1756,00 66	1560
2500 S ₂	1660,00 1200	1400,00 1200	1990,00 30	1790,00 100	1660
2500 S ₃	1450,00 1400	1750,00 40	1870,00 120	1580,00 1100	1450
2100 S ₄	1300,00 2100	1920,00 360	2010,00 410	1654,00 224	1300
v _j	0	260	300	130	

Pošto je $d_{ij} > 0$ za sve nebazne promenljive, dobijeno rešenje je optimalno.

Optimalno bazno rešenje transportnog problema je:

$$x^* \begin{bmatrix} 1300 & 0 & 1200 & 0 \\ 1200 & 1200 & 0 & 100 \\ 1400 & 0 & 0 & 1100 \\ 2100 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Optimalno rešenje (vektor vrednosti baznih promenljivih):

$$x^* = x_{11}, x_{13}, x_{21}, x_{22}, x_{24}, x_{31}, x_{34}, x_{41} = (1300, 1200, 1200, 1200, 100, 1400, 1100, 2100)$$

Ukupni troškovi:

$$F_0 = 1.560,00 \cdot 1.300 + 1.860,00 \cdot 1.200 + 1.660,00 \cdot 1.200 + 1.400,00 \cdot 1.200 + 1.790,00 \cdot 100 + 1.450,00 \cdot 1.400 + 1.580,00 \cdot 1.100 + 1.300,00 \cdot 2.100 = 2.028.000 + 2.232.000 + 1.992.000 + 1.680.000 + 179.000 + 2.030.000 + 1.738.000 + 2.730.000 = 14.609.000 \text{ dinara.}$$

Ukupni troškovi su se smanjili za 36.000,00 dinara.

Pored prikazanog načina, postavljeni model može se rešiti i upotrebom adekvatnog softvera. Za rešavanje konkretnog problema linearnog programiranja – transportnog problema u praktičnoj upotrebi je softver transportnog problema.

Matematički model unosi se u softver na sledeći način:

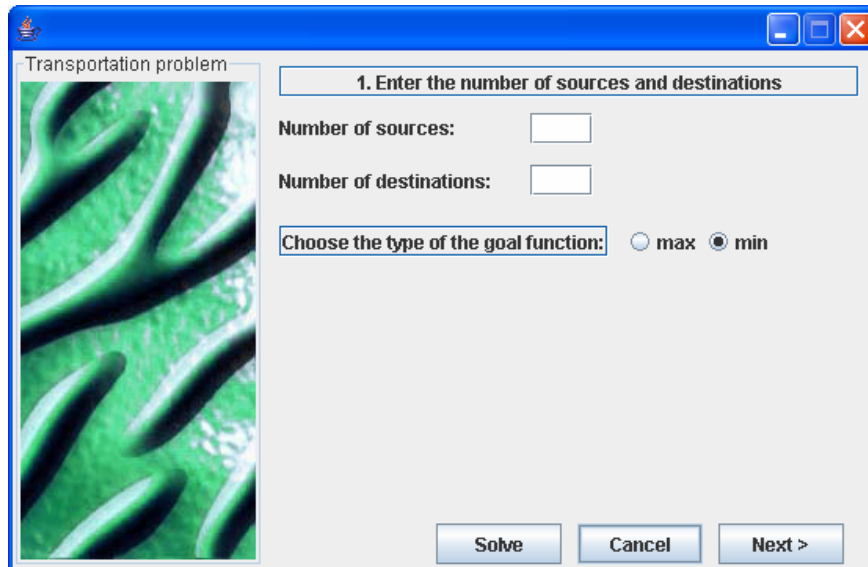
– softver se pokreće aktiviranjem ikone (slika 1):



trans_app.jar

Sl. 1 – Ikona za pokretanje softvera transportnog problema

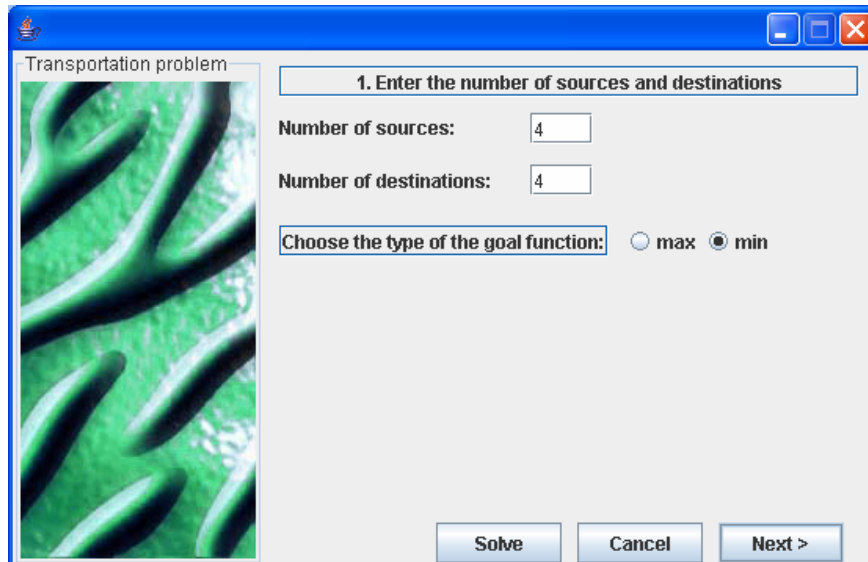
– nakon toga se otvara prozor (slika 2):



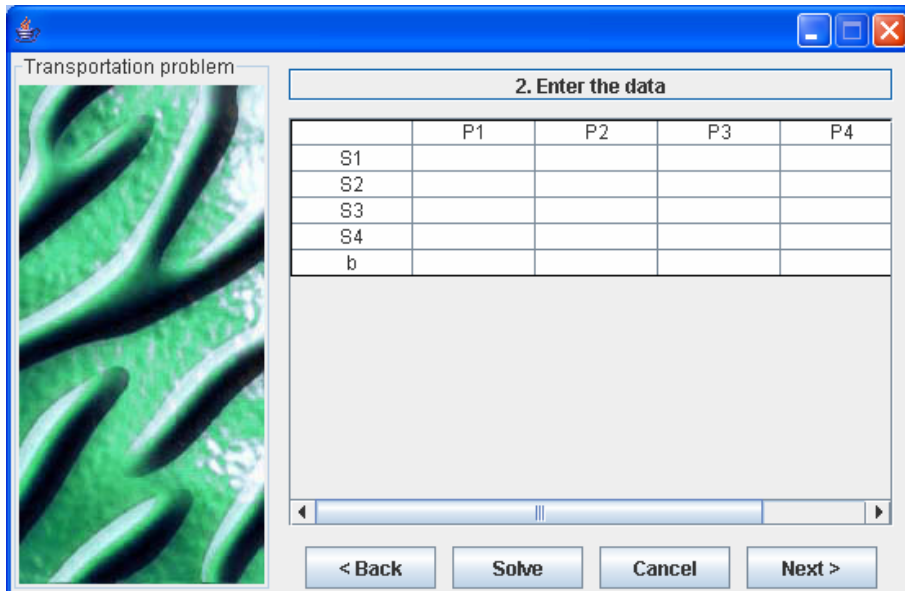
Sl. 2 – Početni prozor softvera transportnog problema

– zatim se unese broj skladišta i broj lokacija (slika 3) i označi funkcija cilja (minimum ili maksimum):

Sl. 3 – Uneti podaci o broju skladišta i lokacija sa funkcijom cilja



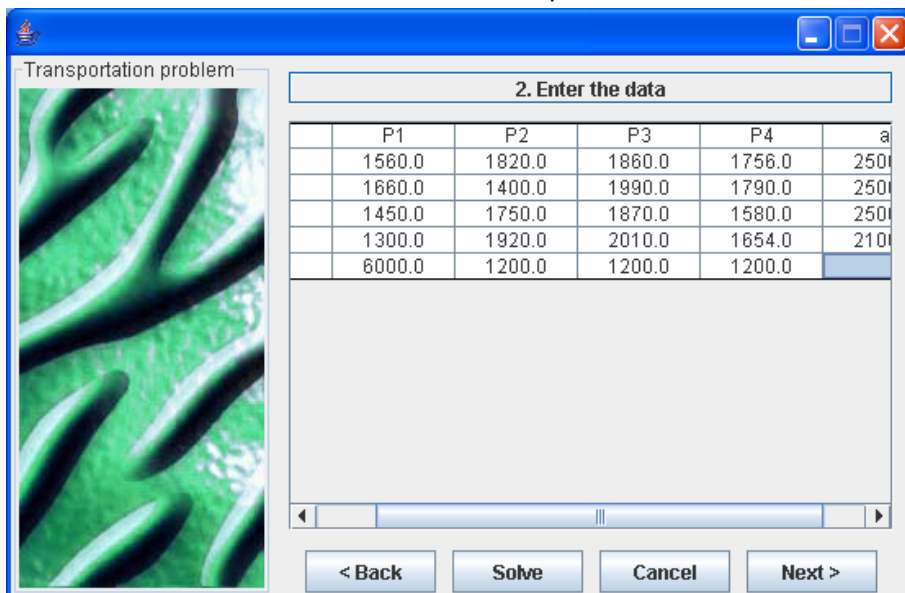
– aktiviranjem polja „next“ otvara se novi prozor za unos podataka (slika 4):



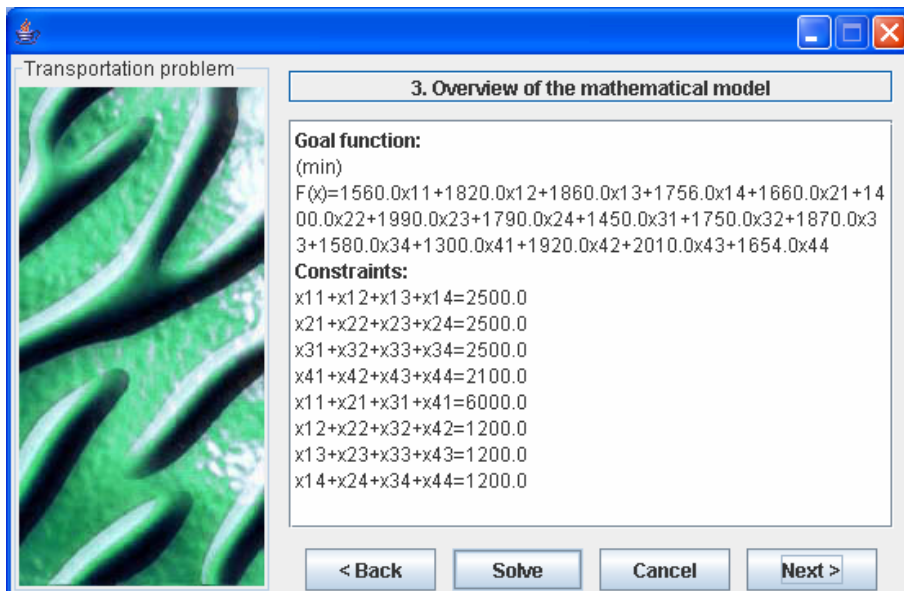
Sl. 4 – Izgled prozora za unos podataka

– zatim se vrši unos podataka (slika 5):

Sl. 5 – Prozor sa unetim podacima



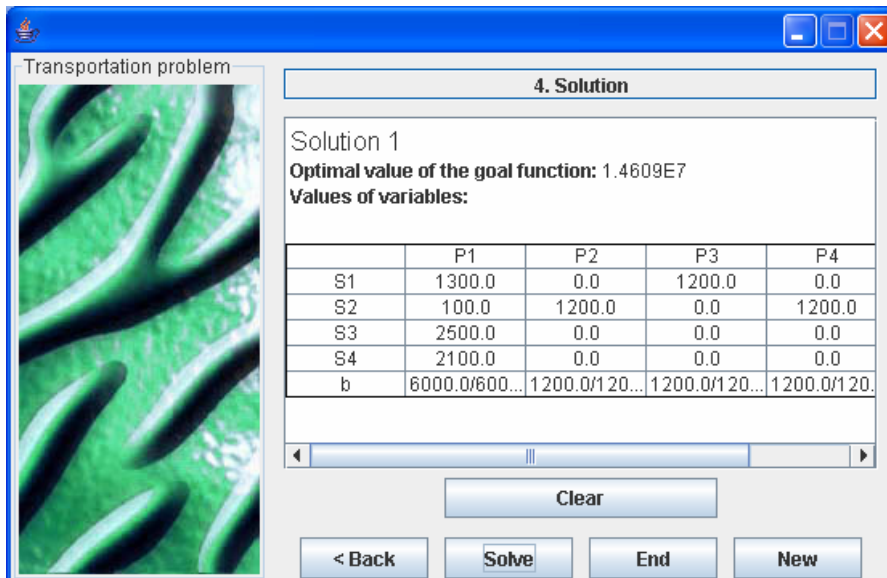
– po unosu podataka aktivira se polje „next“ i dobija novi prozor (slika 6):



Sl. 6 – Izgled prozora sa funkcijom cilja i ograničenjima

– aktiviranjem funkcije „solve“ dobijamo konačno rešenje (slika 7):

Sl. 7 – Rezultat obrade podataka u softveru transportnog problema



Uočava se da je rezultat dobijen ručnim izračunavanjem i upotrebom adekvatnog softvera identičan, sa bitnom razlikom koja se uočava u potrebnom vremenu. Naime, nakon formiranja matematičkog modela za ručno izračunavanje potrebno je 20 do 30 minuta, a softver iste podatke obradi za 2–3 minuta, računajući i potrebno vreme za unos podataka. Opremanjem komandi potrebnom računarskom opremom i adekvatnim softverima vreme za donošenje odluke bi se skratilo i do deset puta.

Rešavanjem transportnog problema došlo se do zaključka o popuni protivoklopne čete na sledeći način:

- komandu protivoklopne čete popuniti municijom iz skladišta broj 1 sa 1300 metaka, skladišta broj 2 sa 1200 metaka, skladišta broj 3 sa 1400 metaka i iz skladišta broj 4 sa 2100 metaka;
- vod 1 popuniti sa 1200 metaka iz skladišta broj 2;
- vod 2 popuniti sa 1200 metaka iz skladišta broj 1, i
- vod 3 popuniti sa 100 metaka iz skladišta broj 2 i sa 1100 metaka iz skladišta broj 3.

Nakon toga vrši se provera podataka:

- ako se iz skladišta broj 1 protivoklopna četa popuni sa 1300 metaka i vod 2 sa 1200 metaka kapaciteti skladišta broj 1 biće utrošeni, a vod 2 popunjen u potpunosti;
- ako se iz skladišta broj 2 protivoklopna četa popuni sa 1200 metaka, vod 1 sa 1200 i vod 3 sa 100 metaka kapaciteti skladišta broj 2 biće utrošeni, a vod 1 popunjen u potpunosti;
- ako se iz skladišta broj 3 protivoklopna četa popuni sa 1400 metaka i vod 3 sa 1100 metaka kapaciteti skladišta broj 3 biće utrošeni, a vod 3 popunjen u potpunosti;
- ako se iz skladišta broj 4 protivoklopna četa popuni sa 2100 metaka kapaciteti skladišta broj 4 biće utrošeni, a protivoklopna četa popunjena u potpunosti, i
- proračunati troškovi transporta iznosiće 14.609.000 dinara što je za 30.000 dinara manje nego u polaznom dopustivom rešenju.

Zaključak

U radu je istaknuta neophodnost primene metoda operacionih istraživanja u rešavanju konkretnih problema u oblasti odbrane. Metode operacionih istraživanja omogućavaju uvođenje matematičkih modela za rešavanje problema na kojima se mogu vršiti provere upotrebe i sagledati eventualni propusti. Izradom adekvatnog matematičkog modela dobija se rešenje realnog problema. U radu je prikazano da se primenom metode transportnog problema može doći do optimalnog rešenja snabdevanja municijom protivoklopne čete, čime se omogućuje kvalitetnije donošenje odluke.

Upotrebom adekvatnog softvera vreme dolaska do rešenja skraćuje se više puta. Opremanje komandi računarskom tehnikom i instaliranjem adekvatnih softvera skratio bi rad u procesu iznalaženja rešenja, a dobijeni rezultati bili bi realniji i matematički provereni.

Upotrebom metoda operacionih istraživanja velika doza subjektivnosti u procesu iznalaženja rešenja i donošenja odluke bi se eliminisala, a pripremom i obradom podataka adekvatnim softverima može se kontinuirano vladati stanjem sopstvenih jedinica i njihovim borbenim mogućnostima.

Literatura

- [1] „Doktrina Vojske Srbije“, Beograd, 2006.
- [2] „Vojni leksikon“, VIZ, Beograd, 1981.
- [3] Petrić, J.: „Operaciona istraživanja“, deveto izdanje, Naučna knjiga, Beograd, 1989.
- [4] „Pravilo četa – vod“, VIZ, Beograd, 1985.

SAVREMENO NAORUŽANJE I VOJNA OPREMA

PRILAGOĐAVANJE LAKIH OKLOPNIH VOZILA NOVIM OPASNOSTIMA*

Mnogo godina su na sceni oklopnih vozila dominirali tenkovi. Ali, za vršetkom hladnog rata i Golfskog rata 1991. godine, sve veća pažnja usmerava se na laka oklopna vozila. Njihov broj se povećava i trenutno postoji više različitih tipova, ali radi lakše analize mogu se svrstati u tri ili četiri kategorije.

Pešadijski transporteri – točkaši

Jednu od osnovnih kategorija lakih oklopnih vozila predstavljaju oklopni transporteri točkaši. Prvobitno su razvijeni da prevoze odeljenja pešadije za desantne akcije kao podrška mobilnim oklopnim dejstvima na otvorenom zemljištu. Međutim, njihova upotreba za zapadne armije dugo godina bila je veoma ograničena. Situacija počinje da se menja devedesetih godina, kada neke armije počinju da se uključuju u mirovne operacije na Balkanu, gde su transporteri točkaši bili mnogo korisniji od mnogih drugih raspoloživih oklopnih vozila. sledeća glavna promena u sudbini oklopnih točkaša bila je u transformaciji armije SAD, koja je iziskivala opremanje vozilima koja su dovoljno laka da se mogu brzo prebacivati i razvijati na ratištima putem transportnih aviona C-130. Ratovi u Avganistanu i Iraku potvrdili su opravdanost toga, mada u početku oklopna zaštita točkaša nije bila u vrhu liste prioriteta.



Oklopni transporter Piranha

Kao privremeno oklopno vozilo armija SAD prihvata vozilo 8×8 Piranha III, koje je konstruisano u švajcarskoj kompaniji Mowag, a proizvedeno u kanadskoj kompaniji General Motors pod nazivom LAV III, a sada poznato kao Stryker.

Pirana III je po mnogim karakteristikama dobro vozilo, ali su njene mogućnosti limitirane u nekoliko slučajeva. Poseb-

* Prema podacima iz časopisa INTERNATIONAL DEFENCE REVIEW, oktobar 2007. godine.

no nije pogodno za upotrebu u zoni direktne vatre u osnovnim borbenim operacijama, kao ni u urbanim borbenim dejstvima bilo kog intenziteta.

U Evropi su njegova konkurencija vozila austrijske proizvodnje Pandur II, koja su prihvaćena u Češkoj i Portugaliji, i oklopno modularno vozilo 8×8 Patria, proizvedeno u Finskoj i prihvaćeno u Poljskoj, Sloveniji i Južnoj Africi.

Drugi oklopni transporter 8×8 koji su prihvaćeni u Evropi, ali još nisu u proizvodnji, jesu Boxer u Nemačkoj i Holandiji, Nexter VBCI u Francuskoj, Iveco/Oto Melara Freccia u Italiji, dok Španija razvija vozilo 8×8 na bazi vozila Piranha. Vozila Boxer i VBCI konkurišu da se uključe u britanske snage za brza dejstva.

Turska u saradnji sa američkom kompanijom GPV razvija vozilo 8×8 Pars.

Na dalekom istoku Singapur razvija vozilo 8×8 Terrex AV81, a Tajvan CM-32. Južna Koreja je razvila tri različita oklopna vozila točkaša 6×6 Rotem KW1, 6×6 Doosan i transportere Samsung verzija 6×6 i 8×8. Japan je razvio transporter 8×8 Kamatsu uz već postojeći Tip 96.

Poboljšana zaštita

Sve šira upotreba oklopnih transportera i njihovo izlaganje povećanim opasnostima rezultiralo je i većim ulaganjima u poboljšanje njihove zaštita.

Progres koji je već učinjen u tom pogledu vidljiv je na primeru vozila Pirana, koje je sa 9311 vozila raznih verzija najbrojniji oklopni transporter, ne računajući bivši Sovjetski Savez i Kinu. Poput drugih lakih oklopnih vozila, prvobitna Pirana I imala je oklop koji je štiti samo od zrna 7,62 mm. Dodavanjem keramičkih oklopnih ploča balistička zaštita Pirane III narasla je do standarda STANAG 4569 Nivo 4, koja podrazumeva zaštitu od pancirnih zrna 14,5 mm. Balistička zaštita Pirane IV biće povećana do standarda STANAG 4569 nivo 5, koja obezbeđuje zaštitu i od pancirnih zrna 25 mm APDS.

Poboljšanja su učinjena i u povećanju izdržljivosti pri eksploziji mina. Na primer, Pirana I izdrži eksploziju mine ekvivalenta 5 kg TNT ispod jednog od točkova, dok je kod Pirane III to 8 kg ili 6 kg ispod centra poda oklopnog tela, da bi kod Pirane IV to dostiglo 10 kg ispod točka ili 8 kg ispod centra vozila.



Prototip oklopnog vozila Iveco Freccia VBS

Dodatna zaštita postala je neophodna i protiv drugih pretnji, posebno raketnih granata RPG-7, za koje se u Iraku primenjuje dodatni rebrasti ili rešetkasti oklop. Efikasnost ovog oklopa ograničena je na oko 60% udara s granatama RPG-7, a nije efikasan ni protiv kumulativnih punjenja sa specijalnim upaljačima. Uz to, taj oklop povećava ukupne dimenzije vozila, otežava pokretljivost i povećava ukupnu masu vozila za oko dve tone.

Eksplzivni reaktivni oklop i aktivni sistemi zaštite

Mnogo racionalniji oblik zaštite od kumulativnog oružja predstavlja hibridni eksplozivni reaktivni oklop, koji su razvile izraelske kompanije Rafael i Vojna industrija IMI. Međutim, tek je ove godine primenjen na nekim vozilima Stryker u Iraku.



*Turski oklopni transporter
FNSS Pars*

Konačna zaštita od kumulativnih granata i raketa trebalo bi da se obezbedi aktivnim sistemima zaštite. Sistem Trophy, koji je razvila izraelska kompanija Rafael, već je demonstriran na transporteru Stryker i testiran kao brzi ubojni sistem. On uključuje vertikalno lansiranje rakete za protivdejstvo radi presretanja opasnosti u tački koju veoma precizno određuje njen radarski kompjuterski sistem, a zatim je uništi usmerenom fokusirajućom eksplozijom.

Drugi aktivni sistemi zaštite, poput AWIS ili Iron Fist, mnogo su jednostavniji i zbog toga potencijalno pouzdaniji, a koriste brzo usmeravajuće lansere raketa za protivdejstva direktno na nadolazeće ciljeve.

Potpuno različit sistem, nazvan AMAP, koji je razvila nemačka kompanija IBD, predložen je za švedska srednje teška vozila. Sastoji se od brojnih modula ugrađenih oko vozila, od kojih se najbliži putanji nadolazeće opasnosti aktivira sistemom za detekciju i uništava opasnost fokusiranom eksplozijom.

Aktivni sistemi zaštite mogli bi da obezbede visok nivo zaštite bez daljeg povećanja mase oklopnih transportera, koja je ograničena na oko 18 t zbog aviotransportera, ili čak na 13 do 14 t u slučaju dužeg leta ili surovih uslova uzletanja, kada bi vozila trebalo da se oslobode adekvatne oklopne zaštite.

Povećane razmere i zapremina

Pored zahteva za većom oklopnom zaštitom, na povećanje ukupne mase vozila uticali su i povećanje razmera kao posledica zahteva za povećanje unutrašnjeg prostora u vozilu. On je porastao sa 7 m³, što je tipično za ranije transportere, do čak 14 m³ u nekim novijim slučajevima.

Iako povećani prostor omogućava bolji smeštaj posade, ponegde se i neracionalno koristi za smeštaj opreme koja bi mogla da se smesti i izvan tog prostora na drugim delovima vozila.

Teže naoružanje

U brojnim slučajevima na povećanje mase transportera uticala je i ugradnja težeg naoružanja. Ranije je najviše oklopnih transportera bilo naoružano mitraljezima 7,62 mm i 12,7 mm, ali, počevši s Piranom 1, prihvaćenom u američkom mornaričkom korpusu kao LAV25, uvodi se u naoružanje transportera kupola s jednim ili dva člana posade i topom kalibra 25 mm, u novije vreme i automatskim topom 30 mm, što je smanjilo prostor za prevoženje pešadijce. Kada je naoružan topovima, transporter se smatra borbenim vozilom pešadije ili čak kao alternativa za gusenična borbeno vozilo pešadije. Ipak, ona ne mogu da budu adekvatna zamena ovim drugim, pre svega zbog slabijih karakteristika pokretljivosti izvan puteva i veće osetljivosti hodnog dela.

Neki od transportera točkaša dodatno su opremljeni topovima kalibra 90 mm srednje brzine i, mnogo kasnije, tenkovskim topovima 105 mm velike brzine zrna. Kao primer može se navesti američki mobilni topovski sistem (MGS) ugrađen na vozilo Stryker. Uprkos tenkovskim topovima ova vozila nisu alternativa tenkovima, već služe samo kao vozila za vatrenu podršku ili kao samohodni protivtenkovski topovi, jer ne mogu da prate u borbenom poretku mnogo izdržljivije borbeno vozilo.



*Južnokorejski oklopni transporter
Rotem KW1*

S druge strane, dok ugradnja tenkovskih topova na transportere točkaše ne eliminiše potrebu za tenkovima, čini se nepotreban dalji razvoj odvojenih kategorija teških oklopnih izviđačkih vozila točkaša naoružanih topovima 105 mm, poput francuskog 6×6 AMX 10RC i italijanskog Iveco-Oto Melara 8×8 Centauro koji su na upotrebi u italijanskoj i španskoj vojsci.

Izviđačka i patrolna oklopna vozila

Mnogo pre pojave teških oklopnih transportera postojala je potreba za lakšim i manje uočljivim oklopnim vozilima točkašima za potrebe izviđanja, patroliranja, vezu i druge pomoćne uloge. Klasičan primer tog tipa vozila je vozilo 4×4 Ferret teško 4 t, koje britanska vojska efikasno koristi gotovo 50 godina. Sadašnji njegov naslednik je vozilo Fennek koje se proizvodi za armije nemačke i Holandije i koje ima sličnu konfiguraciju kao Ferret, ali mu je masa 10,3 t.

Alternativu vozilima tipa Ferret/Fennek predstavljaju vozila Panhard 4×4 koja se proizvode za francusku i druge armije. Ono je čak lakše od vozila Ferret i prilagodljivije za mnoge namene, jer mu je motor smešten na prednjem delu vozila.

Iako imaju velike prednosti mnoge armije izbegavaju njihovu upotrebu. Njihova uloga se sve češće dodeljuje neoklopljenim vozilima, poput višenamenskih vozila velike prohodnosti HMMWV ili Land Rover zbog niže cene.

I druga laka vozila, kao što su višenamensko vozilo Iveco prihvaćeno u V. Britaniji kao komandno, ili vozilo za vezu Panther, koje kada se opremi dodatnim oklopom, poseduju balističku zaštitu i mogućnost da izdrže eksploziju mina od 6 kg TNT pod jednim točkom.

Međutim, bolje rezultate treba očekivati sa vozilima mase od oko 7 t, koji su tipični za tu kategoriju. Njihova konstrukcija uključuje napuštanje upotrebe odvojene šasije i tela sa stalnim oklopom i adaptirane umesto integralne konstrukcije, a monolitni čelični oklop ima dno u obliku slova V. Prednosti tog pristupa demonstrirane su na južnoafričkom lakom vozilu Mambo 4×4 koje može da izdrži eksploziju mine od 14 kg TNT ispod jednog od svojih točkova. Čak i bolje rezultate ostvarilo je vozilo 4×4 od 11 t Casspir, koje izdržava eksploziju od 21 kg TNT pod jednim od točkova. Ali, eksplozija mina i ručno kumulativno oružje, kao što je RGP-7, nisu jedine opasnosti koje zahtevaju dalji razvoj i zaštitu lakih i srednjeteških oklopnih vozila.

Zaštita od improvizovanih eksplozivnih naprava

Opasnost od improvizovanih eksplozivnih naprava (IEN) povećala se invazijom na Irak i predstavljala je izvesno iznenađenje, mada većina IEN u suštini nije nova. Izvesne opasnosti IEN, kakve su veoma velika ukopana eksplozivna punjenja, ne mogu se savladati konstrukcijom vozila, jer se njima mogu uništiti i najbolje oklopljeni tenkovi, kao što je bilo pokazano 2002. godine uništenjem izraelskog tenka Merkava u pojasa Gaze. Ali, oklopna vozila mogu da se učine manje osetljivim na mnoge druge tipove IEN. Ta



*Oklopno vozilo Patria sa topom
105 mm Cockerill*

mogućnost dovela je do razvoja novih vozila sa težištem na zaštiti ne samo od eksplozije mina i RPG-7 već i od bočnih eksplozija usputnih bombi i mina s penetratorima. Primeri za to su vozilo mase 20 t 4×4 Cougar, proizvedeno za marinski korpus i iz njega izvedeno vozilo konfiguracije 6×6 za britansku armiju.

Vozila te vrste se dalje razvijaju u SAD po programu MRAP (Mine Resistant Ambush Protection). Prvobitno, ona su viđena kao odgovor na situaciju u Iraku, ali sada se vide kao nova kategorija oklopnih vozila za upotrebu prentveno u urbanim borbama. Za razliku od drugih, ovi transporteri ne zahtevaju visok nivo balističke zaštite sa prednje strane, a niska silueta, stela tehnologije i visoka prohodnost takođe nisu od primarnog značaja. Umesto toga, ona zahtevaju izuzetno dobru kružnu vidljivost i zaštitu od kumulativnog oružja kratkog dometa, kao i visok klirens koji obezbeđuje da veliki deo eksplozivnog udara usputnih mina prolazi ispod vozila. Zbog toga je varijanta sa četiri točka bolja od varijante sa više točkova. Ona zahtevaju i različit tip oružja od onog koje se sada ugrađuje na srednjeteška vozila. Na primer, minobacači 60 mm, slični onima koji se ugrađuju na oklopna vozila Panhard, mogli bi da budu mnogo prikladniji od topova sa velikom početnom brzinom.

Noviji primer vozila izrađenog po tim novim zahtevima bilo bi vozilo 4x4 Cheetah za zaštitne snage, koje ima borbenu masu od 7,7 t, ali može da izdrži eksploziju mina od 14 kg TNT pod jednim točkom ili bočnu eksploziju od 23 kg TNT sa udaljenosti od samo dva metra.

Drugo veće i mnogo sofisticiranije vozilo, konstruisano da udovolji sličnim zahtevima, jeste vozilo 4x4, mase 17,5 t, Gefas, koje je razvila nemačka kompanija Rheinmetall Land Systems. Gefas koristi električne pogone za ostvarenje visokog klirensa koji dostiže i 700 mm, što isključuje pogonske osnove, koje mogu da dejstvuju kao projektili u slučaju eksplozija mina ispod vozila.

Gusenična vozila pešadije

Potreba za većom zaštitom koja je dovela do evolucije oklopnih transportera točkaša imala je veliki uticaj i na razvoj guseničnih vozila pešadije. Za razliku od oklopnih transportera točkaša, koji su prvobitno razvijani da obezbede pešadiji veću operativnu pokretljivost, gusenična vozila pešadije bila su prvo proizvedena da učine pešadiju taktički pokretljivijom radi bliže i efikasnije podrške tenkovima.

Transformacija guseničnih vozila pešadije u borbena vozila pešadije uključivala je ugradnju kupole sa postepeno sve većim kalibrom ugrađenog topa. Tako su iza topova 20 mm, koji su još u naoružanju vozila Marder i AMX 10P, usledili topovi 25 mm na borbenom vozilu pešadije Bradley i 30 mm na britanskom Warrior i ruskom BMP-2. Iza njih su usledili topo-



*Model oklopnog vozila Gefas
kompanija Rheinmetall*

vi 35 mm na japanskom Type 89 i najnovija verzija CV90 za holandsku vojsku, dok je verzija CV90 za Švedsku naoružana topom 40 mm Bofors.

Topovi su ugrađivani na borbeno vozila pešadije prvenstveno radi uništenja neprijateljevih borbenih vozila pešadije. Povećanje njihovog kalibra dovelo je i do progresivnog povećanja oklopne zaštite. To je neizbežno dovelo i do znatnog povećanja mase borbenih vozila pešadije, što dramatično ilustruje primer porasta mase, verovatno danas najuspešnijeg borbenog vozila pešadije, švedskog CV90, koji je prihvaćen u Danskoj, Holandiji, Finskoj, Norveškoj, Švajcarskoj i Švedskoj, i koji je od mase 2 t, toliko je imao prototip, posle nekoliko međufaznih poboljšanja i dogradnji dostigao masu od 35 t.



Nemačko borbeno vozilo pešadije Puma

Masa je povećana i u slučaju američkih borbenih vozila pešadije Bradley sa 22,8 t za verziju M2 do 30,4 t za M2A3, zatim sa 25 t na 32 t za britanski Warrior i sa 27,5 t na 37,5 t kod najnovije verzije 1A5 nemačkog Mardera.

Budući da nemaju probleme sa pokretljivošću izvan puteva kao oklopni točkaši, gusenična vozila pešadije mogu sebi da dozvole mnogo veću masu, pa zbog toga mogu da imaju i mnogo veći nivo oklopne zaštite. Pored toga, njihova oklopna zaštita i održivost mogu i dalje da se povećavaju, čak i bez pribegavanja aktivnim sistemima zaštite, ukoliko je dalje povećanje mase prihvatljivo. Činjenica je da novo nemačko borbeno vozilo pešadije Puma već ima masu od 43 t, mada se ta masa može reducirati na 31,5 t skidanjem nekih od njegovih modularnih oklopa u slučaju prevoženja vazdušnim putem. Sličan slučaj je sa izraelskim oklopnim vozilom pešadije Achzarit mase 44 t, koje je izraženo na bazi šasije tenka T-55 i predstavlja najteže vozilo pešadije do sada. Ali, novo izraelsko vozilo Nemer, koje se radi na bazi šasije tenka Merkava, ima još najmanje 10 t veću masu.

Preveo Mirko Krbavac

„Vojnotehnički glasnik“ je stručni i naučni časopis Ministarstva odbrane Republike Srbije, koji objavljuje: originalne naučne radove, prethodna saopštenja, pregledne radove i stručne radove, prikaze naučno-stručnih skupova kao i tehničke informacije o savremenim sistemima naružanja i savremenim vojnim tehnologijama.

Svojom programskom koncepcijom časopis obuhvata jedinstvenu intervidovsku tehničku podršku Vojske na principu logističke sistemske podrške, oblasti osnovnih, primenjenih i razvojnih istraživanja, kao i proizvodnju i upotrebu sredstava NVO, i ostala teorijska i praktična dostignuća koja doprinose usavršavanju pripadnika Ministarstva odbrane i Vojske Srbije.

Članak se dostavlja Redakciji na disketi ili CD-u (Times New Roman, srpska latinica, veličina slova 11,5 pt, prored single) i odštampan u dva primerka.

Članak treba da sadrži rezime (u najviše osam do deset redova), sa ključnim rečima na srpskom i engleskom jeziku, uvod, razradu, zaključak i literaturu. Obim članka treba da bude do jednog autorskog tabaka (16 stranica formata A4 sa proredom single). Tekst mora biti jezički i stilski doteran, sistematizovan, bez daktilografskih grešaka, bez skraćenica (osim standardnih), uz upotrebu stručne terminologije. Sve fizičke veličine moraju biti izražene u Međunarodnom sistemu mernih jedinica – SI. Redosled obrazaca (formula) označavati rednim brojevima, sa desne strane u okruglim zagradama. Fotografije i crteži treba da budu jasni, pregledni i pogodni za reprodukciju. Crteže treba raditi u pogodnoj računarskoj grafici. Fotografije i crteže treba postaviti na željeno mesto u tekstu. Tabele treba pisati na isti način kao i tekst, a označavati ih rednim brojevima sa gornje strane. Literatura u tekstu navodi se u uglastim zagradama, a spisak korišćene literature sadrži neophodne bibliografske podatke prema redosledu citata u tekstu. Bibliografski podatak za knjigu sadrži prezime i inicijale imena autora, naziv knjige, naziv izdavača, mesto i godinu izdavanja. Bibliografski podatak za časopis sadrži prezime i ime autora, naslov članka, naziv časopisa, broj i godinu izdavanja. Opširan pregled literature neće se prihvatiti.

Pored članka dostavlja se propratno pismo u kojem treba istaći o kojoj vrsti članka se radi, koji su grafički prilozi (fotografije i crteži) originalni, a koji pozajmljeni.

U propratnom pismu navode se i podaci za autora.

Podaci za autora sadrže: ime i prezime, čin, zvanje, adresu poslodavca (VP), kućnu adresu, telefon na radnom mestu i kućni (mobilni) telefon, račun i naziv banke, SO mesta stanovanja i JMB građana.

Svi radovi podležu stručnoj recenziji, a objavljeni radovi i stručne recenzije se honorišu prema važećim propisima.

Rukopise slati na adresu: Redakcija časopisa „Vojnotehnički glasnik“, 11002 Beograd, Balkanska 53, VE-1.

Redakcija

**DIREKCIJA ZA IZDAVAČKU I BIBLIOTEČKO-
-INFORMACIONU DELATNOST**

- Balkanska 53, 11000 Beograd •
- Telefoni: (011) 32-01-806 i 32-01-495
Telefaks: (011) 36-12-506 •
- Tekući račun: 840-19540845-28 • PIB: 102116082
PDV: 135328814 •

POZIV NA PRETPLATU ZA 2008. GODINU

Pretplaćujemo se na časopis:

br. primeraka

1. „Vojnotehnički glasnik“

Godišnja pretplata 1.620,00 dinara (1.500,00 din + 8% PDV)

Prilikom uplate pozvati se na broj: 122742312963054

.....

2. „Novi glasnik“

Godišnja pretplata 2.268,00 dinara (2.100,00 din + 8% PDV)

Prilikom uplate pozvati se na broj: 122742312963053

.....

3. „Vojno delo“

Godišnja pretplata 2.025,00 dinara (1.875,00 din + 8% PDV)

Prilikom uplate pozvati se na broj: 122742312963051

.....

Broj primeraka izdanja koja se naručuju upisati u narudžbenu, a primerak narudžbenice sa dokazom o izvršenoj uplati na gore navedeni tekući račun poslati na gore navedenu adresu.

Kupac

tel.:

Mesto

Ulica

br.

Potpis naručioca

M. P.

.....



DIREKCIJA ZA IZDAVAČKU
I BIBLIOTEČKO-INFORMACIONU DELATNOST
11000 Beograd, Balkanska 53 • telefaks: 011/3612-506

Preporučujemo nova izdanja VOJNOIZDAVAČKOG ZAVODA

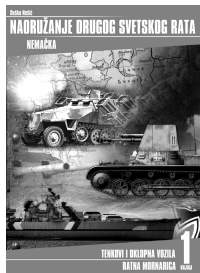
EDICIJA „NAORUŽANJE DRUGOG SVETSKOG RATA“ autor Duško Nešić

Knjiga 1

NEMAČKA

Tenkovi i oklopna vozila
/ Ratna mornarica

- tvrd povez, 21 × 29,7 cm,
288 str. • šifra 111047
- cena: 2.160,00 din.



Knjiga 4

ITALIJA

Tenkovi i oklopna vozila
/ Ratna mornarica
/ Ratno vazduhoplovstvo

- tvrd povez, 21 × 29,7 cm,
160 str. • šifra 111052
- cena: 1.620,00 din.

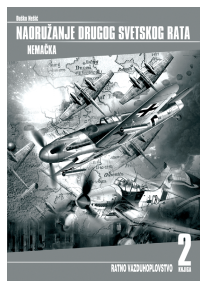


Knjiga 2

NEMAČKA

Ratno Vazduhoplovstvo

- tvrd povez, 21 × 29,7 cm,
214 str. • šifra 111049
- cena: 1.890,00 din.

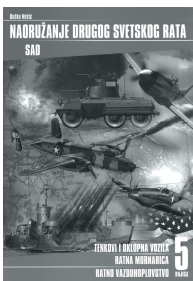


Knjiga 5

SAD

Tenkovi i oklopna vozila
/ Ratna mornarica
/ Ratno vazduhoplovstvo

- tvrd povez, 21 × 29,7 cm,
364 str. • šifra 111057
- cena: 2.646,00 din.

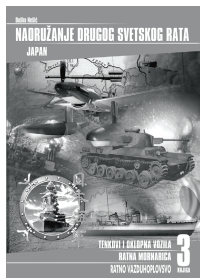


Knjiga 3

JAPAN

Tenkovi i oklopna vozila
/ Ratna mornarica
/ Ratno vazduhoplovstvo

- tvrd povez, 21 × 29,7 cm,
238 str. • šifra 111050
- cena: 1.998,00 din.

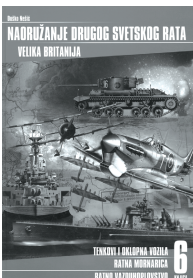


Knjiga 6

VELIKA BRITANIJA

Tenkovi i oklopna vozila
/ Ratna mornarica
/ Ratno vazduhoplovstvo

- tvrd povez, 21 × 29,7 cm,
360 str. • šifra 111062
- cena: 2.646,00 din.



Knjiga 7

SSSR • Tenkovi i oklopna vozila / Ratna mornarica / Ratno vazduhoplovstvo • u pripremi

Knjiga 8

FRANCUSKA • Tenkovi i oklopna vozila / Ratna mornarica / Ratno vazduhoplovstvo • u pripremi

Ovom narudžbenicom neopozivo naručujem knjige sa šifrom/primeraka

Telefoni za informacije:
(011) 3612-506 i vojni 23-495

Kupac: _____

Ulica i broj: _____

Mesto i broj pošte: _____

Telefon: _____

Potpis naručioca: _____

Knjige ću platiti (zaokružiti broj):

1) odjednom (plaćanje unapred)

2) na kredit u _____ mesečne rate (najviše šest rata)
po _____ dinara (najmanji iznos rate je 1.000 din.)

Uz narudžbenicu poslati dokaz o uplati.

NAPOMENA: za svaku narudžbu knjiga potrebno je uplatiti 200,00 din. za troškove poštarine.

DIREKCIJA ZA IZDAVAČKU I BIBLIOTEČKO-INFORMACIONU DELATNOST

Reklamacije za naručene knjige
primamo u roku od 30 dana

Žiro račun: 840-19540845-28 RC MO; pib 102116082

Art direktor
mr *Nebojša* Kujundžić

Tehničko uređenje
Zvezda Jovanović

Lektor i korektor
Dobriła Miletić, profesor

Cena: 423,00 dinara
Tiraž: 700 primeraka

Na osnovu mišljenja Ministarstva za nauku,
tehnologiju i razvoj Republike Srbije,
broj 413-00-1201/2001-01 od 12. 9. 2001. godine,
časopis „Vojnotehnički glasnik“ je publikacija
od posebnog interesa za nauku.

UDC: Centar za vojnonaučnu dokumentaciju, informacije i bibliotekarstvo (CVNDIB)