

VOJNOIZDAVAČKI ZAVOD

DIREKTOR

Pukovnik
SLAVKO BRSTINA

UREĐIVAČKI ODBOR

General-major
dr JUGOSLAV KODZOPELJIC, dipl. inž.
(predsednik Odbora)General-major
dr SINISA BOROVIĆ, dipl. inž.
(zamenik predsednika)General-major
dr NOVICA ĐORĐEVIĆ, dipl. inž.General-major
MILOSAV BRKIĆ, dipl. inž.General-major
dr SLOBODAN BURSAC, dipl. inž.General-major
dr IVAN ĐOKIĆ, dipl. inž.Profesor
dr JOVAN TODOROVIC, dipl. inž.Profesor
dr BORIVOJE LAZIĆ, dipl. inž.Pukovnik
dr DRAGAN LAZAREVIĆ, dipl. inž.Pukovnik
dr MILIUN KOKANOVIĆ, dipl. inž.Pukovnik
dr MILAN SUNJEVARIĆ, dipl. inž.Pukovnik
mr DESIMIR BOGDANOVIĆ, dipl. inž.Pukovnik
dr DRAGO TODOROVIC, dipl. inž.Pukovnik
MIROSLAV COJBAŠIĆ, dipl. inž.
(sekretar Odbora)Pukovnik
MLADOMIR PETROVIĆ, dipl. inž.Pukovnik
mr ILIJA ZAGORAC, dipl. inž.Pukovnik
MILAN UZELAC, dipl. inž.Potpukovnik
mr RADOMIR ĐUKIĆ, dipl. inž.STRUČNI I NAUČNI ČASOPIS
VOJSKE JUGOSLAVIJEVOJNOTEHNIČKI
G L A S N I KGLAVNI I ODGOVORNI
UREDNIKPukovnik
Miroslav Cojbašić, dipl. inž.
(tel. 646-277, 23-59-133 ili 33-133)Urednik
Potpukovnik
Stevan Jošifović, dipl. inž.
(tel. 23-59-323 ili 33-323)Sekretar redakcije
Zora Pavličević
(tel. 23-59-258 ili 33-258)ADRESA REDAKCIJE: VOJNOTEHNIČKI
GLASNIK — BEOGRAD, Bircaninova 5,
Pretpata: 645-020 i 23-124, žiro-račun:
40818-637-9-6319 za VIZ/VTG, poziv na
broj 963/054. Godišnja pretplata 60,00
dinara. Rukopisi se ne vraćaju. Štampa:
Vojna štamparija — Beograd, Generala
Ždanova 40 b.

4

SADRŽAJ

- | | | |
|---|-----|---|
| Dr Jugoslav Kodžopeljić,
general-major, dipl. inž. | 397 | Pristup razradi metodologije ocene i rangiranja varijantnih rešenja opremanja VJ sredstvima NVO |
| Dr Petar Stanojević,
kapetan I klase,
dipl. inž. | | |
| Dr Vasilije Mišković,
potpukovnik, dipl. inž. | | |
| Milić Milićević,
kapetan I klase,
dipl. inž. | | |
| Dr Miroslav Demić,
profesor, dipl. inž. | 412 | Prilog utvrđivanju stvarnih vibracionih opterećenja specijalnog četvoroosovinskog kamiona |
| Mr Predrag Popović,
dipl. inž. | | |
| Mr Vitomir Pijevac,
dipl. inž. | | |
| Zoran Radosavljević,
kapetan I klase | 421 | Optimalna raspodela resursa pri opsluživanju vazduhoplova primenom dinamičkog programiranja |
| Miroslav Radosavljević,
major, dipl. inž. | 432 | Računarska realizacija sistema samonavođenja torpeda na trag broda |
| Dr Slavko Pokorni,
pukovnik, dipl. inž. | 439 | Greška određivanja emisivnosti površi čvrstih materijala IC kamerom |
| Mr Milovan Unković,
dipl. inž. | 449 | Merenje stabilnosti frekvencije izvora signala pomoću digitalnog frekvencmetra |
| Dr Slavko Tomović,
dipl. inž. | 460 | Primena metode statističkog modelovanja eksperimenta |
| Dr Branislav Perme,
pukovnik, dipl. inž. | 467 | Analiza uticaja brzine proticanja tečnosti na dinamičko ponašanje slobodno oslonjene cevi |
| Mihajlo Mihajlović,
dipl. inž. | 473 | Nuklearne napadne podmornice klase »688« Los Angeles |

PRIKAZI IZ INOSTRANIH ČASOPISA

- | | |
|-----|--|
| 482 | Sistem PVO ANTEY-2500 — S.P. |
| 485 | Elektronski štit za odbranu od vazdušnih napada — M.K. |

- 487 JAHONT — protivbrodska raketa nove generacije — M.K.
- 490 Precizno vođeno oružje i elektronski rat — M.K.
- 493 Pirotehnička sredstva u savremenim sistemima naoružanja — M.K.
- 495 Tenk na pragu 21. veka — M.K.

TEHNIČKE NOVOSTI I ZANIMLJIVOSTI

- 498 Novi artiljerijski projektili povećanog dometa — V.R.
- 499 Novi koncept oružja za odbranu od dolazećih projektila — M.S.
- 500 Oklopno vozilo WIESEL 2 — V.R.
- 501 Vojni kamioni iz Rusije — M.K.
- 502 Površinska zaštita aviona — M.S.
- 502 Optika za sve uslove — M.K.
- 504 Formiranje snaga za brzi odgovor u slučaju hemijsko-biološkog rata — M.S.

Dr Jugoslav Kodžopeljić,
general-major, dipl. inž.
Tehnička uprava GS VJ,
Beograd

Dr Petar Stanojević,
kapetan I klase,
dipl. inž.

Dr Vasilije Mišković,
potpukovnik, dipl. inž.

Milić Milićević,
kapetan I klase,
dipl. inž.

Vojnotehnička akademija VJ,
Beograd

PRISTUP RAZRADI METODOLOGIJE OCENE I RANGIRANJA VARIJANTNIH REŠENJA OPREMANJA VJ SREDSTVIMA NVO

UDC: 623.4.017.001

Rezime:

U radu je predložen mogući način razrade metodologije ocene i rangiranja varijantnih rešenja opremanja VJ sredstvima NVO. Problem izbora varijante opremanja VJ sredstvima NVO, kao složen problem, može se uspešno rešiti primenom metode ekspertskog ocenjivanja i metoda višekriterijumskog rangiranja. Definisan su dva načina rešavanja postavljenog problema: rangiranjem varijantnih rešenja sa i bez unapred zadatih kriterijuma. U vidu primera dati su mogući kriterijumi za ocenu i rangiranje varijantnih rešenja. U oba slučaja neophodno je provesti ekspertsko ocenjivanje generisanih varijanti. Razrađena je moguća procedura ekspertskog ocenjivanja sa posebnim naglaskom na etapama izbora eksperata, uz određivanje koeficijenta kompetencije i provođenja ispitivanja sa obradom rezultata ekspertize.

Ključne reči: opremanje sredstvima NVO, ekspertsko ocenjivanje, etape ekspertize.

APPROACH TO THE DEVELOPMENT OF THE METHODOLOGY FOR EVALUATING AND RANKING VARIANT SOLUTIONS IN EQUIPPING THE YUGOSLAV ARMY WITH ARMAMENT AND MILITARY EQUIPMENT

Summary:

One possible approach to the development of the methodology for evaluating and ranking variant solutions in equipping the Yugoslav Army with armament and military equipment (AME) has been given in the paper. The complex problem of choosing a variant of Yugoslav Army equipping with AME can be successfully solved by the expert evaluation method and the multicriteria ranking method. Two approaches to solving the given problem have been defined — ranking variant solutions with and without previously imposed criteria. Possible criteria for evaluation and ranking of variant solutions have been given in the form of examples. In both cases the expert evaluation of generated variants is necessary to be performed. One possible procedure of expert evaluation has been developed with the special emphasis on the phases in choosing experts, together with competence coefficients determination and treatment of expert analysis results.

Key words: equipment with armament and military equipment, expert evaluation, phases of expert analysis.

Uvod

Pitanje koje rešavaju svi organizacioni i drugi sistemi je kako sa raspoloživim resursima postići najveće efekte.

To je posebno značajno za sistem kao što je Vojska Jugoslavije (VJ) u oblasti opremanja sredstvima naoružanja i vojne opreme (NVO). Naime, kako najbolje iskoristiti raspoloživa fi-

nansijska sredstva za najveće povećanje borbene moći? Pribavljanje i modernizacija sredstava naoružanja i vojne opreme, radi povećanja borbene moći VJ i prevazilaženja jaza tehnološkog zaostajanja, na nekim područjima, uz adekvatnu reorganizaciju, predstavlja nužnost za povećanje mogućnosti uspešnog funkcionisanja VJ. Sadašnje vreme karakteriše izuzetno brz razvoj sredstava NVO. Za sve zemlje praćenje razvoja sredstava NVO predstavlja praktično imperativ.

Sam proces opremanja VJ sredstvima NVO povezan je i sa procesom reorganizacije VJ. Ta veza je višeslojna i višedimenzionalna, a međusobni uticaj je uslovljen velikim brojem faktora. Naime, mikroopremanje VJ sredstvima NVO definisano je »Pravilnikom o opremanju sredstvima NVO u miru«. Ta metodologija omogućava dalju razradu po fazama razvoja uz primenu svih savremenih naučnih dostignuća. Međutim, opremanje na nivou VJ, u odnosu na prioritete i materijalno-finansijska sredstva po sadržaju je značajnije i traži stalno usavršavanje.

Kao što je i prirodno, želja nosilaca planiranja jeste da se realizuje što više nabavki i modernizacija sredstava NVO. To je, međutim, najčešće u suprotnosti sa finansijskim mogućnostima. U nesaglasnosti između želja i mogućnosti, a u nedostatku adekvatne i precizno propisane metodologije za izbor, ocenu i rangiranje sredstava NVO prema prioritetu, aktivniji i agilniji predlagači često mogu odneti prevagu, pa se raspoloživa sredstva neće iskoristiti na najefikasniji način. Kod sistema kao što je VJ propusti ovakvog načina odlučivanja mogu imati teške posledice. Sa druge strane, objektivno posmatrano, nije moguće sagledati sve »želje«, ravnopravno ih tretirati i na kraju doneti ispravnu odluku bez razrađene metodologije. U skladu sa dosadašnjim dostignućima nauke na polju rešavanja ovakvih problema nužno je da potrebna metodologija sadrži i metode optimizacije.

Predmet ovog rada se može odrediti kao izbor i primena naučnih pristupa pri rešavanju problema izbora, ocene i rangiranja sredstava NVO, prema prioritetu, u uslovima funkcionisanja VJ, a opšti cilj je razrada celovite i adekvatne metodologije za ocenu i rangiranje varijantnih rešenja opremanja VJ pojedinačnim sredstvima NVO, koja uključuje optimizacione metode.

Praktični cilj ovog rada sastoji se u omogućavanju izbora, ocene i rangiranja mogućih varijantnih rešenja opremanja sredstvima NVO na efikasan i pouzdan način.

Pristup rešavanju problema ocene i rangiranja mogućih varijantnih rešenja opremanja sredstvima NVO

Karakteristike VJ, kao sistema, nameću potrebu za višedimenzionalnim pristupom u posmatranju uspešnosti. To je očigledno i neophodno i zbog određenih ciljeva i potciljeva koje mora ostvariti VJ. Potrebno je naglasiti da i kada je osnovni cilj postizanje visoke vrednosti uspešnosti funkcionisanja (borbene moći) i efektivnosti, to treba uraditi uz najmanje moguće troškove. Pri tome borbena moć bitno zavisi od količine i kvaliteta sredstava NVO. Cilj je, prema tome, izabrati takvu varijantu opremanja sredstvima NVO prema karakterističnim potrebama, koja će dati najbolje vrednosti u skladu sa postavljenim osnovnim ciljem.

Veliki broj određenih faktora, njihova zavisnost, odnosno ukupna složenost problema uslovljava nužnost primene ekspertskih ocena i rangiranja varijanti. Specifičnost problema znatno sužava izbor eksperata. Činjenica da je izbor eksperata ograničen, a da je deo eksperata zainteresovan za pojedine varijante, dodatno uslovljava rešavanje ovog problema.

Danas u svetu verovatno postoje razrađene metodologije za rešavanje

ovakvih i sličnih problema. Njihov sadržaj, postupci i metode koje uključuju, na žalost, često nisu dostupni, pa autorima nije poznato ni jedno konkretno rešenje ovakvog ili sličnog problema. Dostupna su jedino rešenja pojedinih problemskih segmenata [1—6].

Na osnovu naših istraživanja, problem je, načelno, moguće rešavati na dva načina. Prvi način je da eksperti za unapred zadate kriterijume ocenjuju kriterijumske vrednosti varijanti, a da se rangiranje varijanti vrši nekom od metoda višekriterijumskog rangiranja. Drugi način je da svaki ekspert rangira varijante prema sopstvenim kriterijumima, a da se konačan rang varijanti dobije usklađivanjem. U ovom radu će, za oba načina, biti prikazan načelan postupak sa neophodnim stepenom konkretizacije. Prvi način zahteva definisanje kriterijuma unapred, bilo da se kriterijumi zadaju ili da ih eksperti određuju usklađivanjem.

Određivanjem kriterijuma, njihovih minimalnih i (ili) maksimalnih vrednosti koje se moraju postići formira se funkcija cilja, preko koje će se vrednovati varijanta rešenja. Određivanje karakterističnih parametara-kriterijuma uspešnosti i potrebnih ograničenja, u užem smislu, predstavlja, dakle, modelovanje ocene i rangiranja mogućih varijantnih rešenja opremanja sredstvima NVO.

Ne treba zaboraviti da je moguće i potrebno da se neki kriterijumi zadaju unapred u vidu ograničenja (minimalnih vrednosti postavljenih kriterijuma — ciljeva) koje treba zadovoljiti ili u vidu intervala dozvoljenih odstupanja. Svaki od postavljenih kriterijuma može ujedno predstavljati i ograničenje. Sva varijantna rešenja koja ne zadovoljavaju postavljena ograničenja na taj način odmah će biti eliminisana iz procesa odlučivanja. Dalji proces odlučivanja svešće se samo na izbor najboljeg rešenja među onima koja zadovoljavaju posta-

vljena ograničenja, odnosno na rad na skupu zadovoljavajućih ili efikasnih rešenja.

U realnosti procesa rešavanja problema ocene i rangiranja, po zadatim kriterijumima, mogućih varijantnih rešenja opremanja sredstvima NVO, na osnovu iznetog, javlja se potreba za rešavanjem nekoliko vrsta konkretnih problema:

— problem postavljanja opštih kriterijuma za ocenu valjanosti metodologije za ocenu i rangiranje varijantnih rešenja opremanja sredstvima NVO,

— problem izbora karakterističnih kriterijuma za ocenu i rangiranje varijantnih rešenja opremanja sredstvima NVO iz skupa mogućih;

— problem određivanja dimenzija, značenja i metodologije dobijanja vrednosti pojedinih kriterijuma i ograničenja;

— problem izbora optimizacionog modela operacionih istraživanja (prvenstveno među modelima za višekriterijumsko rangiranje) za sprovođenje matematičke procedure ocene i rangiranja varijantnih rešenja opremanja sredstvima NVO;

— problem prevazilaženja nejednake kompetencije eksperata za važnost, namenu i mogućnosti pojedinih sredstava NVO i njihove moguće zainteresovanosti za pojedina rešenja;

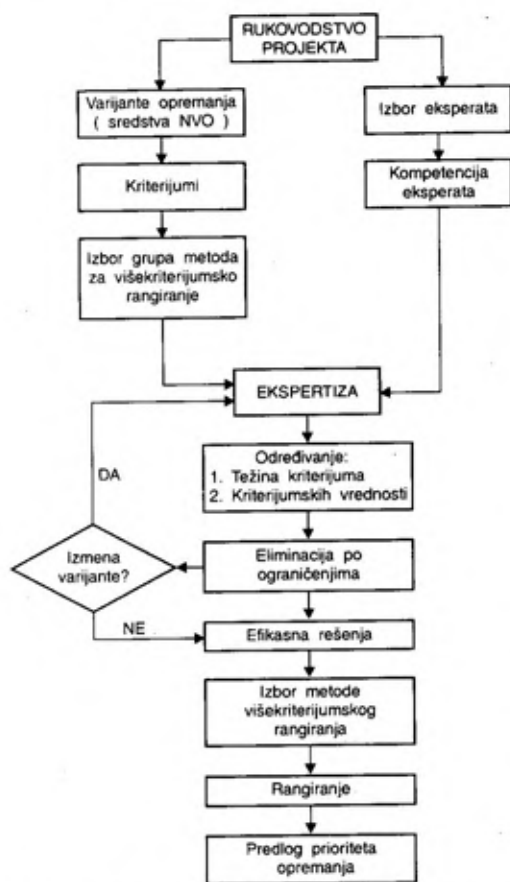
— problem određivanja vrednosti težinskih pokazatelja (ponderisanje) vrednosti pojedinih kriterijuma u konkretnom slučaju, odnosno sprovođenje postupka ekspertize.

Radi postizanja ciljeva istraživanja i rešavanja konkretnog problema moralo se, zbog svega iznetog, pristupiti kriterijumu metodologije koja uključuje pojedina primenljiva iskustva i rešenja iz literature. Ova metodologija dobila je svoj grafički iskaz u algoritmu na slici 1.

U slučaju rešavanja problema ocene i rangiranja, bez unapred zada-

tih kriterijuma, varijantnih rešenja, potrebno je rešiti sledeće probleme:

— postavljanje opštih kriterijuma za ocenu valjanosti metodologije za ocenu i rangiranje varijantnih rešenja opremanja sredstvima NVO;



Sl. 1 — Algoritam procedure za ocenu i rangiranje varijantnih rešenja opremanja VJ sredstvima NVO sa unapred zadatim kriterijumima

— prevazilaženje nejednake kompetencije eksperata za važnost, namenu i mogućnosti pojedinih sredstava NVO i njihove moguće zainteresovanosti za pojedina rešenja;

— usklađivanje ranga varijanti i dobijanje konačnog ranga.

Ova metodologija dobila je svoj grafički iskaz u algoritmu na slici 2.

U daljem tekstu šire je objašnjen sadržaj pojedinih koraka razvijenog algoritma i primenjenih postupaka i metoda. Sveukupnost programiranih ko-



Sl. 2 — Algoritam procedure za ocenu i rangiranje varijantnih rešenja opremanja VJ sredstvima NVO bez unapred zadatih kriterijuma

raka algoritma, primenjeni postupci i metode čine moguću metodologiju za ocenu i rangiranje varijantnih rešenja opremanja VJ sredstvima NVO, ali i za rešavanje sličnih zadataka u drugim značajnim sistemima.

Opšti kriterijumi za ocenu valjanosti metodologije za ocenu i rangiranje varijantnih rešenja opremanja sredstvima NVO

Omogućavanje ocenjivanja i rangiranja varijantnih rešenja opremanja sredstvima NVO zahteva da se za njih određuju iste mere — kriterijumi uspešnosti, i to one koje sa najvećim obuhvatom opisuju željeno stanje. Takođe, mora se zadovoljiti potreba za višedimenzionalnošću pristupa i primena adekvatnog matematičkog aparata.

Prema tome, da bi metodologija ocene i rangiranja varijantnih rešenja

opremanja sredstvima NVO dala dobre rezultate, ona mora zadovoljiti sledeće kriterijume:

- da obuhvati sve značajne kriterijumske vrednosti o kojima se mogu dobiti podaci;

- da omogućiti ocenjivanje novo-projektovanog i postojećeg sredstva NVO određenog za realizaciju istih zadataka;

- da bude invarijanta u odnosu na specifičnosti pojedinih rešenja;

- da zadovolji postavljene taktičko-tehničke zahteve,

- da obezbedi sagledavanje ostvarenja ciljeva i potciljeva VJ kao sistema;

- da se zbog suštine problema zasniva, prvenstveno, na kvalitativnom iskazu kriterijuma, ali i da obuhvati veličine koje opisuju razne aspekte funkcionisanja i troškova;

- da je primenljiva kako na nivou VJ kao celine, tako i za pojedinačne organizacione celine, i

- da omogućiti uključivanje u neki od optimizacionih modela operacionih istraživanja (prvenstveno u modele višekriterijumskog rangiranja).

Generisanje varijanti opremanja sredstvima NVO

Kao što je već navedeno, mikroopremanje VJ sredstvima NVO definisano je »Pravilnikom o opremanju sredstvima NVO u miru«. Nosioци sprovođenja ovog, propisanog, postupka su svi taktički i tehnički nosioци sredstava NVO. Na taj način se obezbeđuje da svi relevantni organi i institucije budu uključeni u proces opremanja VJ sredstvima NVO, odnosno obezbeđuje se celovitost sagledavanja problematike razvoja VJ sa stanovišta povećanja njenih borbenih mogućnosti. Taktički i tehnički nosioци sredstava NVO dužni su, dakle, da odrede koja su to sredstva NVO koji-

ma bi trebalo izvršiti opremanje VJ. Svako od predloženih sredstava i broj koji treba nabaviti ili modifikovati predstavlja, u stvari, varijantu opremanja VJ sredstvima NVO.

Sredstva NVO koja nisu prošla odgovarajuću proceduru propisanu navedenim pravilnikom ne bi trebalo da budu uzeta u razmatranje. Na taj način obezbedila bi se pokrivenost postupka određenim planskim dokumentima i obezbedili potrebni podaci bez kojih je besmisleno, uopšte, pristupiti postupku rangiranja i ocenjivanja varijantnih rešenja opremanja sredstvima NVO. Naime, tek po izradi Taktičke studije i Prethodne analize može se sagledati potreba za opremanjem VJ pojedinim sredstvima NVO, sagledati potrebne i ostvarive taktičko-tehničke karakteristike, analizirati i definisati potrebne količine sredstava NVO, analizirati put realizacije opremanja, odrediti predračun ukupnih troškova i očekivanih učinaka po razvoju borbene sposobnosti VJ i sagledati načelne potrebe za integralnim tehničkim obezbeđenjem.

Sprovođenje navedene procedure uključuje sagledavanje: doktrine upotrebe VJ u miru i ratu, zahteva vođenja oružane borbe u pogledu opremanja, varijanti efikasnosti grupa (sistema) NVO, postupka ocenjivanja usklađenosti zahteva i stanja opremljenosti sredstvima NVO i usklađenosti mogućnosti vođenja oružane borbe sa stepenom opremljenosti VJ.

Potrebno je da se odredi najmanji novčani iznos ispod kojeg nema potrebe da se sprovodi postupak ocenjivanja i rangiranja varijantnih rešenja opremanja sredstvima NVO ili da u taj proces uključi sve predložene varijante. Određivanje najmanjeg novčanog iznosa je način da se smanje dimenzije postavljenog problema i omogućiti da se sredstva NVO za kojima postoji preka potreba, a koja ne koštaju mnogo, nabave sa najvišim prioritetom.

Postupak ocene i rangiranja varijantnih rešenja u slučaju unapred zadatih kriterijuma

*Izbor karakterističnih
kriterijuma za rangiranje i
ocenu varijanti opremanja
sredstvima NVO*

Izborom karakterističnih kriterijuma i njihovih težinskih koeficijenata određuje se »željeno stanje sistema«, odnosno funkcija cilja. Osobine problema koji se rešava determinišu skup metoda za višekriterijumsko rangiranje koje je moguće adekvatno primeniti. Od karaktera izabranih kriterijuma, međutim, zavisi izbor konkretne metode višekriterijumskog rangiranja. Kriterijumi po karakteru mogu biti raznovrsni:

- sa kvantitativnim ili kvalitativnim iskazom,
- ustrojeni hijerarhijski ili na jednom nivou,
- sa ocenjenim ili sa stvarnim vrednostima.

Karakter rešavanog problema zahteva primenu kriterijuma, kako sa kvantitativnim, tako i sa kvalitativnim iskazom, jer je ponekad nemoguće odrediti kvantitativne iskaze nekih željenih osobina sredstava NVO ili bi takav postupak doveo do odvojenog posmatranja pojedinih sredstava NVO ili njihovih grupa, što svakako nije cilj. Moguća je primena, kako kriterijuma hijerarhijski ustrojenih, tako i onih na jednom nivou. Takođe, vrednosti kriterijuma mogu biti i ocenjene i stvarne.

U konkretnom slučaju definišu se i odabiraju kriterijumi, uključujući i one koji će ujedno predstavljati ograničenja i kvantifikuju se njihove težinske, minimalne ili maksimalne vrednosti. Mogućnosti su gotovo neograničene. Međutim, ovde će u vidu primera biti data neka od mogućih rešenja. Dati primeri predstavljaju samo moguće načine strukturiranja kriterijuma.

PRIMER 1.

*Varijanta kriterijuma na
jednom nivou*

Kriterijumi:

- K^0_1 — uticaj NVO na mogućnost vođenja oružane borbe,
- K^0_2 — uticaj NVO na borbenu efikasnost VJ (uključeni i logistički parametri),
- K^0_3 — perspektivnost sredstava NVO,
- K^0_4 — uticaj na podizanje tehnološkog nivoa SRJ,
- K^0_5 — kompatibilnost sa postojećim sredstvima NVO,
- K^0_6 — rizik opremanja (domaća proizvodnja, uvoz, rizik razvoja),
- K^0_7 — cena nabavke sredstva,
- K^0_8 — vreme uvođenja sredstva NVO u VJ,
- K^0_9 — usklađenost sa organizacijsko-formacijskom strukturom VJ,
- K^0_{10} — troškovi životnog ciklusa sredstva.

PRIMER 2.

— data je potpuno hijerarhijski strukturirana varijanta kriterijuma na tri nivoa, s tim što su oni izmenjeni u odnosu na prethodni primer, jer uključuju potkriterijume koji omogućavaju da se jasnije sagleda značenje pojedinih kriterijuma višeg nivoa i omogućavaju obuhvat više osobina sredstava NVO.

Kriterijumi:

K^0_1 — **borbene mogućnosti sredstva NVO:**

- $K^{1,1}_1$ — povećanje borbenih mogućnosti VJ;
- $K^{1,2}_1$ — značaj sredstva NVO za vođenje oružane borbe;
- $K^{1,3}_1$ — upotrebnost kvaliteta NVO;
- $K^{2,3,1}_1$ — performanse operativnosti;
- $K^{2,3,2}_1$ — integritet upotrebe;

$K_{1,3}^2$ — performanse logističke podrške;

$K_{1,3,4}^2$ — radni potencijal;

$K_{1,3,5}^2$ — sigurnost funkcionisanja;

$K_{1,4}^1$ — perspektivnost sredstva NVO;

$K_{1,5}^1$ — kompatibilnost sa postojećim sredstvima NVO;

$K_{1,6}^1$ — usklađenost sa organizaciono-formacijskom strukturom VJ.

K_2^0 — uslovi nabavke sredstva NVO:

$K_{2,1}^1$ — uticaj na podizanje tehnološkog nivoa SRJ;

$K_{2,2}^1$ — rizik opremanja (domaća proizvodnja, uvoz, rizik razvoja);

$K_{2,3}^1$ — vreme uvođenja sredstva u NVO VJ;

$K_{2,4}^1$ — mogućnost pribavljanja sredstva NVO uz odgovarajuće finansijske olakšice.

K_3^0 — Troškovi životnog ciklusa sredstva:

$K_{3,1}^1$ — troškovi razvoja;

$K_{3,2}^1$ — troškovi proizvodnje i nabavke;

$K_{3,3}^1$ — troškovi eksploatacije;

$K_{3,4}^1$ — troškovi održavanja;

$K_{3,5}^1$ — troškovi rashodovanja.

Predlog metodologije ekspertize

Primena matematičkih metoda i modela u pripremi odluka postaje bitan faktor podizanja nivoa naučnog upravljanja. Međutim, potpuna matematička formalizacija tehničko-ekonomskih zadataka često je neostvariva usled njihove složenosti. Zato se sve više koriste ekspertске metode, pod kojima se podrazumeva kompleks logičkih i matematičko-statističkih metoda i procedura, usmerenih ka dobijanju informacija od eksperata, neop-

hodnih za pripremu i donošenje racionalnih odluka. Ekspertске metode mogu se okarakterisati kao načini donošenja odluka koji se koriste intuicijom i iskustvom stručnjaka, a primenjuju se u situacijama kada se izbor, obrazloženje i procena posledica odluka ne mogu ostvariti putem tačnih proračuna. Ove metode se zasnivaju na pretpostavci da postoje ljudi — eksperti koji mogu da identifikuju i analiziraju situacije, jasno prepoznajući njihove ključne osobine. Čovek — ekspert je u stanju da traži najbolja rešenja bez pretraživanja svih mogućih rešenja i da uspešno rešava probleme u uslovima i na bazi nepotpunih informacija. Primena ekspertskih metoda obezbeđuje aktivno i svrsishodno učešće specijalista u svim etapama donošenja odluka, što omogućava bitno povećanje njihovog kvaliteta i efikasnosti.

Metode korišćenja ocena eksperata imaju značajnu ulogu pri:

— stvaranju novih koncepcija,

— projektovanju strukture novih modela i modifikaciji postojećih modela,

— stvaranju prognoza,

— raspoznavanju i određivanju detaljnih ciljeva.

Pri analizi metoda treba imati u vidu njihovu osnovnu podelu na one čiji temelj stvaraju pojedini eksperti i one koje pretpostavljaju iskorišćavanje znanja i iskustava kolektiva eksperata. Grupna ekspertska ocena mnogo je pouzdanija od individualne ako su ispunjeni određeni zahtevi, među kojima su najvažniji nezavisnost mišljenja eksperata i visoka korelacija ocena dve jednake grupe eksperata. U slučajevima donošenja važnih odluka najčešće se primenjuje grupna ekspertska ocena, zbog svoje veće pouzdanosti.

Pod grupnom ocenom podrazumevamo rezultat objedinjavanja individualnih mišljenja eksperata o poretку preferentnosti posmatranih objekata u jednu ocenu kolektivne preferentnosti.

Pri tome se podrazumeva da primena logičkih procedura i matematičko-statističkog aparata, za objedinjavanje mišljenja eksperata (izraženih kvantitativno), obezbeđuje dobijanje skladne grupne preferentnosti. Bitni problemi koji nastaju pri formiranju grupne ocene povezani su sa svođenjem ocena eksperata koji čine grupu na istu meru. Uslovi neophodni za formiranje korektnih ekspertskih ocena su sledeći:

- univerzalnost, u smislu postojanja dovoljnog broja mogućih varijanti, dovoljnog broja eksperata i mogućnost definisanja svih individualnih sistema preferentnosti,

- postojanje pozitivne povezanosti opštih i individualnih preferentnosti,

- nezavisnost nepovezanih varijanti,

- suverenost eksperata,

- nepostojanje diktatorstva.

Na rezultat ekspertize veliki uticaj imaju greške izazvane samom procedurom prikupljanja i analize mišljenja eksperata. Prisutan je problem pokušaja izgradnje univerzalnog modela ekspertize.

Na osnovu dostupne literature i naših istraživanja, u ovom konkretnom slučaju, moguće je predložiti sledeće osnovne etape ekspertize:

- formiranje grupe specijalista — analitičara (organizatora ekspertize),

- definisanje cilja i zadataka ekspertize,

- izradu programa ekspertize (izbor oblika izražavanja individualnih mišljenja, izrada metoda dobijanja grupnih ocena),

- izbor i formiranje grupe eksperata zajedno sa ocenom njihove kompetentnosti,

- sprovođenje ispitivanja,

- obradu rezultata i dobijanje grupne ocene,

— prezentaciju rezultata u formi pogodnoj za donosioca odluke.

Svaka od navedenih etapa biće u kratko objašnjena u nužnom obimu radi potpunog sagledavanja problematike i suštine provođenja grupne ekspertize u okviru ovog zadatka.

Etape ekspertize

Pod pojmom organizatora ekspertize podrazumeva se naručilac ekspertize i grupa specijalista koja provodi ekspertizu. Nužnost postojanja ovakve grupe specijalista uslovljena je iz više razloga. Postupak provođenja ekspertize nije egzaktna i krije mnogo mogućnosti ugradnje sistemске greške u sam postupak. Ekspertska ocena predstavlja na neki način prosečno mišljenje grupe eksperata. Međutim, ako se ovaj prosek shvati čisto mehanički, tada je grupna ocena trivijalna, što najčešće uzrokuje grube greške. Obrada dobijenih mišljenja eksperata i rezultata ekspertize predstavlja interaktivan, relativno komplikovan i težak proces. To su osnovni razlozi zašto je nužno formirati ili angažovati grupu specijalista za provođenje ekspertize.

Cilj organizovanja i izvođenja ekspertize u konkretnom slučaju je dobijanje kvantitativnih kriterijumskih vrednosti varijanti za kriterijume — potkriterijume, koji se ne mogu dobiti na drugi način i težina kriterijuma. Formalizovanim načinom izražavanja mišljenja stručnjaka i statističkom obradom rezultata nastoji se smanjiti subjektivnost i povećati verodostojnost ocene.

Provođenjem grupne ekspertize realizovali bi se sledeći zadaci:

- dobijanje ocene kriterijumskih vrednosti varijanti za određene kriterijume — potkriterijume,

- određivanje težinskih koeficijentata kriterijuma — potkriterijuma.

Programom ekspertize definišu se oblici izražavanja individualnih ocena i metode dobijanja grupnih ocena.

Svaki od eksperata dužan je da, u određenoj formi, da svoje mišljenje (ocenu) o pitanjima kriterijumskih vrednosti varijanti za pojedine kriterijume — potkriterijume i vrednosti težinskih koeficijenata kriterijuma — potkriterijuma. Od eksperta se zahteva da za određeni kriterijum (i potkriterijum, ako postoje hijerarhijski struktuirani kriterijumi) da ocenu kriterijumske vrednosti varijante, izvrši procenu stepena zadovoljenja kriterijuma — potkriterijuma za datu varijantu primenom predložene skale. Za ocenu vrednosti varijanti za određene kriterijume — potkriterijume moguće je primeniti sledeću skalu:

Tabela 1

Skala za ocenu kriterijumskih vrednosti varijanti

Skala	Objašnjenje
10	najviša
9	izuzetno visoka
8	veoma visoka
7	visoka
6	srednja
5	niska
4	veoma niska
3	izuzetno niska
2	najniža

Vrednosti težinskih koeficijenata ocenjuju se posebno za potkriterijume po nivoima rangiranja i za kriterijume na nultom nivou rangiranja. Ekspert je dužan da proceni stepen značajnosti potkriterijuma u odnosu na kriterijum — potkriterijum na neposredno višem nivou rangiranja primenom predložene skale. Procena stepena značajnosti kriterijuma takođe se vrši primenom predložene skale. Za

to je moguće primeniti skalu devet tačaka:

Tabela 2

Skala za ocenu vrednosti težinskih koeficijenata kriterijuma

Skala	Objašnjenje / Rangiranje
9	Apsolutno najznačajnije/najpoželjnije
8	Veoma snažno ka apsolutno najznačajnijem/najpoželjnijem
7	Veoma snažno ka veoma značajnom/poželjnom
6	Snažno ka veoma snažnom
5	Snažnije više značajno/poželjno
4	Slabije ka više snažnijem
3	Slabije više značajno/poželjnije
2	Podjednako ka slabijem višem
1	Podjednako značajno/poželjno
0,50	Podjednako ka slabijem manjem
0,33	Slabije manje značajno/poželjno
0,25	Slabije ka snažno manjem
0,20	Snažno manje značajno/poželjno
0,17	Snažno ka veoma snažno manjem
0,14	Izuzetno snažno manje značajno/poželjno
0,13	Veoma snažno ka apsolutno manjem
0,11	Apsolutno najmanje značajno/poželjno

Proučavanjem mogućih oblika grupnog rada eksperata i uzimajući u obzir karakteristike problema koji se rešava moguće je da se u ekspertizi iskoriste anketa i diskusija kao najprikladniji oblici grupnog rada.

Grupna ocena bi se dobila statističkom obradom individualnih ocena eksperata, uz proveru saglasnosti individualnih ekspertskih ocena datih u anketi. U slučaju da ne postoji saglasnost individualnih ekspertskih ocena organizovala bi se diskusija. Ekspertima bi se predložio rezultat ekspertize po kojem ne postoji saglasnost i pružila bi im se mogućnost da prodiskutuju o problemu. Zatim bi svako od njih ponovo davao svoju individualnu ocenu popunjavanjem anketnih listova. Postupak bi se ponavljao do dobijanja saglasne ocene.

Izbor grupe eksperata uz ocenu njihove kompetencije

Izbor i određivanje broja eksperata uvek je u velikoj meri vezan za konkretan problem koji se rešava. U konkretnom slučaju pojavljuje se problem zainteresovanosti eksperata za pojedine varijante, uz uslov da se takvi eksperti ne mogu eliminisati iz procesa ekspertize. Znači, nameće se konkretan problem smanjenja uticaja svakog pojedinog eksperta na konačnu ocenu. Za rešavanje ovog problema postoje (bar su nama poznata) tri rešenja:

- povećanje broja eksperata,
- da svaki ekspert odgovara samo na slučajno izabrana pitanja,
- da na svako pitanje odgovaraju slučajno izabrani eksperti iz grupe.

Drugo i treće rešenje znatno komplikuju celokupan proces ekspertize, a u nekim slučajevima zahtevaju čak i veći broj eksperata nego u prvom slučaju, pa se predlaže primena prvog rešenja. Broj eksperata ne bi trebalo da bude manji od 30.

Pod pojmom kompetencija podrazumeva se stepen kvalifikacija eksperata u određenom području koji se procenjuje uz pomoć određenih karakteristika, kao što su: profesionalna kompetencija, interes za rezultate ekspertize, lakoća kontaktiranja, objekti-

vizam, originalnost mišljenja, stvaralačka mašta, konformizam, znanje, rešavanje stvaralačkih problema, elastičnost, mudrost, tvrdoglavost, urođena agresivnost, samokritičnost, poznavanje stranih jezika, itd.

Problem određivanja koeficijenta kompetencije sastoji se u neophodnosti merenja navedenih karakteristika. Merenje se može izvršiti putem sopstvene procene eksperata, putem uzajamne procene eksperata i primenom metoda za određivanje objektivnog koeficijenta kompetencije. Predlaže se da se koeficijent kompetencije eksperata K sastoji od sledećih elemenata:

- K_s - koeficijent sopstvene procene,
- K_u - koeficijent uzajamne procene,
- K_t - koeficijent poznavanja tematike,
- K_o - objektivni koeficijent.

U tom slučaju koeficijent kompetencije K bi se računao na sledeći način:

$$K = q_1 K_s + q_2 K_u + q_3 K_t + q_4 K_o \quad (1)$$

gde je:

q_i — težina koja određuje relativnu važnost parcijalnog koeficijenta.

Sopstvenu procenu obavlja određeni ekspert procenom poznavanja problema. Ekspert je dužan da da procenu sopstvene kompetencije u rasponu ocena od 1 do 10. Dobijena ocena se množi sa 0,1 i predstavlja koeficijent K_s .

Uzajamna procena predstavlja procenu drugih eksperata o stepenu poznavanja problema određenog eksperta. Koeficijent uzajamne ocene kompetencije moguće je odrediti na osnovu metode Jevlanova [4], koja se sastoji u sledećem:

— vrši se ispitivanje eksperata o uključivanju, odnosno isključivanju ostalih eksperata iz grupe;

— dobija se tabela u kojoj su smeštena imena eksperata, sa elementima:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{kad je } j\text{-ti ekspert uključio} \\ & \text{i-tog eksperta u grupu;} \\ 0, & \text{kad je } j\text{-ti ekspert isključio} \\ & \text{i-tog eksperta iz grupe;} \end{cases} \quad (2)$$

— svaki ekspert ima pravo da kaže da li će se uključiti u grupu eksperata;

— algoritam omogućava određivanje koeficijenta uzajamne procene h-tog reda, za svakog eksperta, na osnovu izraza:

$$K_j^h = \frac{\sum_{j=1}^m x_{ij} K_j^{h-1}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m x_{ij} K_j^{h-1}} \quad (3)$$

gde je:

m — broj eksperata u grupi,

h — red koeficijenta uzajamne procene.

Stepen poznavanja tematike predstavlja stepen uticaja određenih izvora na mišljenje eksperta. Predlaže se sledeći način određivanja koeficijenta K_i :

— ekspert određuje za tri nivoa (visoki, srednji i niski) stepen uticaja na njegovo mišljenje sledećih šest izvora:

— teoretska analiza koju treba da izvrši ekspert,

— praktično iskustvo eksperta,

— radovi domaćih autora,

— radovi stranih autora,

— autorovo poznavanje stepena razvoja radova u inostranstvu,

— ekspertove intuicije.

Koeficijent K_i tada se računa kao

$$K_i = \sum_{j=1}^6 \sum_{j=1}^3 l_{ij} \quad (4)$$

gde je:

i — indeks izvora,

j — indeks nivoa uticaja izvora,

l_{ij} — koeficijent izvora argumentacije koji pokazuje ekspert.

Objektivni koeficijent kompetencije (K_o) dobija se uvažavanjem određenih objektivnih podataka. Objektivni podaci sadržani su u određenim individualnim crtama eksperata. Možeće je razmatrati sledeće individualne crte eksperata:

C_1 — titula i naučni stepen,

C_2 — završene vojne škole,

C_3 — radni staž,

— C_4 — aktuelni položaj,

C_5 — dosadašnje dužnosti,

C_6 — objavljeni radovi,

C_7 — naučno-organizacioni rad,

C_8 — stručna aktivnost izvan radnog mesta,

C_9 — dobijene stručne nagrade.

Individualne crte eksperata C_i razlažu se na sastavne karakteristike kojima se dodeljuju određeni nivoi važnosti.

Objektivni koeficijent kompetencije računa se kao:

$$K_o = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^9 c_i t_i \quad (5)$$

gde je:

t_i — težina koja određuje relativnu važnost i-te crte eksperta. Uzima se da je $\sum t_i = 1$.

Provođenje ispitivanja i obrada rezultata

Pre pristupanja samoj ekspertizi eksperti bi bili upoznati sa problematikom (varijante i kriterijumi) koju ocenjuju bez upoznavanja sa tehnolo-

gijom ekspertize. Za uspešnu realizaciju ekspertize neophodno je da eksperti budu okupljeni na jednom mestu. Nakon okupljanja eksperata izvršilo bi se određivanje njihovog koeficijenta kompetencije, a zatim bi se pristupilo samoj ekspertizi.

Za ocenu kriterijumskih vrednosti varijanti po pojedinim kriterijumima — potkriterijumima eksperti bi bili dužni da popune unapred pripremljene anketne listove u kojima ocenu kriterijumske vrednosti varijante za posmatrani kriterijum daju u skladu sa predloženom skalom.

Organizatori ekspertize vrše statističku obradu anketnih listova. Statistička obrada informacija, dobijenih od eksperata, mora sadržavati i ocenu usklađenosti mišljenja eksperata i otkriti uzroke njihove raznolikosti. Pri tome, ocene dobijene od eksperata možemo posmatrati kao slučajno promenljive, čije raspodele verovatnoća odražavaju mišljenje eksperata o verovatnoćama pojedinih vrednosti varijanti. Zato se za analizu rasturanja i saglasnosti ekspertskih ocena mogu primeniti generalne statističke karakteristike — srednje vrednosti i mere rasturanja oko srednje vrednosti. Za svaku vrednost varijante po pojedinom kriterijumu — potkriterijumu računa se sledeće:

— srednja vrednost ocene kriterijumske vrednosti varijante

$$y_e = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_j \quad (6)$$

— disperzija, standardno odstupanje i koeficijent varijacije ocene kriterijumske vrednosti varijante

$$D(y) = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (y_j - y_e)^2 \quad (7)$$

$$\sigma = \sqrt{D(y)} \quad (8)$$

$$V = \frac{\sigma}{y_e} \quad (9)$$

U slučaju da se ocene eksperata ne pokoravaju normalnom zakonu raspodele definiše se interval i ako se u granicama tog intervala nalazi zadržani procenat ocena računa se srednja vrednost intervala koja predstavlja ocenu kriterijumske vrednosti varijante. Ako to nije ispunjeno znači da je rasturanje ocena eksperata veliko, odnosno ne postoji njihova saglasnost o oceni kriterijumske vrednosti varijante. U proračunu navedenih vrednosti moraju se uzeti u obzir i koeficijenti kompetencije eksperata.

Ako se nakon prve ankete ne dobiju saglasni rezultati pristupa se diskusiji. Ekspertima se predložava problem oko kojeg ne postoji saglasnost i traži se od svakog da iznese svoje mišljenje. U toku diskusije mora se obezbediti ravnopravnost mišljenja svih eksperata i isključiti bilo kakvo nastupanje sa pozicija položaja ili neko drugo ispoljavanje autoriteta. Nakon diskusije ponovo se provodi anketa, ali samo za problem koji je bio predmet diskusije. Postupak se ponavlja do dobijanja saglasne ocene.

Postupak ocene težinskih koeficijenata kriterijuma — potkriterijuma razlikuje se od prethodno opisanog postupka, jer je kod ocene težina kriterijuma — potkriterijuma, pored vrednosti, bitan i rang potkriterijuma u okviru kriterijuma, odnosno rang kriterijuma na nultom nivou. Zato je ocenu težinskih koeficijenata nužno podeliti na dve faze.

U prvoj fazi eksperti popunjavaju anketne listove gde rangiraju potkriterijume u okviru kriterijuma, odnosno rangiraju kriterijume na nultom nivou. Statistička obrada rezultata sastoji se u proračunu koeficijenta konkordacije (opšteg koeficijenta korelacije rangova) potkriterijuma, odnosno kriterijuma.

Da bi izračunali koeficijent konkordacije za grupu od m eksperata prvo nalazimo sumu ocena (rangova) za svaki kriterijum — potkriterijum, dobijenu od svih eksperata, a zatim iz-

računavamo razliku između te sume i srednje sume rangova:

$$\Delta_i = \sum_{j=1}^m x_{ij} - \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij}}{n} \quad (10)$$

gde je:

a_{ij} — srednja vrednost zbirnih rangova $a_{ij} = 0,5 m (n+1)$.

Zatim se izračunava suma kvadrata odstupanja S po formuli:

$$S = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^m x_{ij} - \frac{1}{2} m(n+1) \right]^2 \quad (11)$$

Veličina S ima maksimalnu vrednost kada svi eksperti daju jednake ocene:

$$S_{\max} = 0,5 nm^2 (n^2 - 1) \quad (12)$$

Koeficijent konkordacije, za datu grupu m eksperata i n kriterijuma — potkriterijuma, iznosi:

$$W = \frac{S}{S_{\max}} \quad (13)$$

Koeficijent konkordacije menja se u granicama od 0 do 1, pri čemu vrednost 1 znači da su svi eksperti dali iste ocene, a vrednost 0 znači da ne postoji veza između ekspertskih ocena. U slučaju pojave istih rangova za različite kriterijume — potkriterijume, koeficijent konkordacije je:

$$W = \frac{S}{\frac{1}{12} [m^2 (n^3 - n) - m \sum_{j=1}^m (t_j^3 - t_j)]} \quad (14)$$

gde je:

t_j — broj jednakih rangova u j -tom redu.

Pri izračunavanju koeficijenta konkordacije moguće je uzeti u obzir težine eksperata β_j uz uslov da je $\sum \beta_j = 1$. Težine eksperata mogu se do-

biti normalizacijom koeficijenata kompetencije. Koeficijent konkordacije tada se računa na sledeći način:

$$W = \frac{S}{\left[\frac{1}{12} m^2 (n^3 - n) - m \sum_{j=1}^m T_j \right] \left[\frac{\sum_{j=1}^m \beta_j}{m} \right]} \quad (15)$$

gde je:

$$T_j = \frac{1}{12} \sum_{ij} t_j (t_j^2 - 1) \quad (16)$$

a t_j — broj podudarnih rangova j -tog eksperta.

U slučajevima u kojima vrednost koeficijenta konkordacije nije zadovoljavajuća pristupa se diskusiji. Postupak se nastavlja do dobijanja potpune saglasnosti o redosledu potkriterijuma u okviru kriterijuma, odnosno o redosledu kriterijuma na nultom nivou.

U drugoj fazi eksperti popunjavaju anketne listove u kojima daju ocenu težine posmatranog kriterijuma — potkriterijuma u skladu sa predloženom skalom devet tačaka, vodeći računa o rangovima potkriterijuma — kriterijuma. Statistička obrada rezultata sastoji se u proračunu srednje vrednosti ocena vrednosti težinskog koeficijenta, disperzije, standardnog odstupanja i koeficijenta varijacije ocene vrednosti težinskog koeficijenta i ocene protivrečnosti ekstremne ekspertske ocene vrednosti težinskog koeficijenta. Za slučajeve nesaglasnih rezultata pristupa se diskusiji. Nakon diskusije ponovo se provodi anketa, ali samo za problem koji je bio predmet diskusije. Postupak se ponavlja do dobijanja saglasne ocene.

Rangiranje varijanti po zadatim kriterijumima

U slučaju kada postoji veliki broj varijanti, metode višekriterijumskog rangiranja se ne primenjuju na celom

polju varijanti. Najčešće se prethodno eliminišu pojedine varijante. Kao prvo, eliminišu se varijante koje ne zadovoljavaju ograničenja. Moguća su dva slučaja, ili se varijanta eliminiše ili se koriguje (na primer, umesto dva diviziona sredstava NVO nabavlja se jedan divizion) da bi zadovoljila ograničenje. U slučaju da se varijanta koriguje, za nju je potrebno ponovo vršiti ekspertsko ocenjivanje kriterijumskih vrednosti. Nakon ovako provedene procedure dobija se polje mogućih varijanti.

U sledećem koraku iz polja mogućih varijanti eliminišu se dominirane varijante. Pod njima se podrazumeva one varijante koje ni po jednom kriterijumu nisu bolje od svih ostalih, a bar po jednom su lošije od ostalih varijanti. Nakon izdvajanja polja dominiranih varijanti ostaje polje nedominiranih ili efikasnih varijanti. Efikasne varijante se rangiraju primenom neke od metoda višekriterijumskog rangiranja.

Izbor metode za višekriterijumsko rangiranje koja će biti primenjena zavisi, prvenstveno, od samog problema. Ako su, na primer, kriterijumi hijerarhijski strukturirani, moraju se primeniti metode koje omogućavaju rangiranje po ovako strukturiranim kriterijumima. Pored toga, iz skupa metoda koje se mogu primeniti za rangiranje lice koje rangira uglavnom uvek preferira primenu jedne ili više metoda. Rangiranje se može vršiti i po više metoda radi poređenja dobijenih rešenja po različitim metodama. Rangiranje varijanti po više metoda povećava pouzdanost dobijenog rešenja.

Postupak ocene i rangiranja varijantnih rešenja u slučaju kada kriterijumi nisu unapred zadati

Postupak rangiranja varijantnih rešenja opremanja VJ sredstvima NVO bez unapred definisanih kriterijuma

sličan je prethodno opisanom postupku, ali je znatno jednostavniji. Naime, pored generisanja varijantnih rešenja, postupak se svodi na ekspertsko ocenjivanje, jer višekriterijumsko rangiranje otpada kao nepotrebno. Predložena metodologija provođenja ekspertize u načelu je ista uz određene izmene, koje se odnose na cilj ekspertize i provođenje ispitivanja i obradu rezultata ispitivanja, dok su ostale etape ekspertize nepromenjene.

Cilj ekspertize, u ovom slučaju, jeste dobijanje ranga varijantnih rešenja opremanja VJ sredstvima NVO.

Eksperti su u toku pripreme ekspertize upoznati sa projektovanim varijantnim rešenjima. Sada, na osnovu svojih kriterijuma, daju rang za svaku varijantu. Pri tome postoji mogućnost dodeljivanja istog ranga za dve ili više varijanti. Obrada rezultata rangiranja sastoji se u određivanju koeficijenta konkordacije i, ukoliko on nije zadovoljavajući, pristupa se diskusiji. Postupak se ponavlja do dobijanja zadovoljavajuće vrednosti koeficijenta konkordacije. Zatim se određuje konačni rang varijantnih rešenja na sledeći način:

$$x_i = \sum_{j=1}^m r_{ij} K_j, \quad i=1, \dots, n \quad (17)$$

gde je:

r_{ij} — rang dodeljen i-toj varijanti od strane j-tog eksperta,

m — broj eksperata,

n — broj varijanti,

K_j — koeficijent kompetencije j-tog eksperta;

— rangiranje varijanti vrši se dodeljivanjem najvišeg ranga varijanti sa minimalnom vrednošću x_i .

Na taj način dobijamo rang varijantnih rešenja koji može poslužiti kao osnova za planiranje opremanja ili modernizacije VJ sredstvima NVO.

Zaključak

Problem ocene i rangiranja varijantnih rešenja opremanja sredstvima NVO veoma je složen. Složenost problema ogleda se u njegovoj višedimenzionalnosti i višeslojnosti, a izuzetan značaj ima i vremenska komponenta. Sigurno je da je od posebnog značaja koliko će uvedena oprema biti kompatibilna sa opremom koja će tek biti uvedena kroz nekoliko godina. Složenost ovog problema je tolika da je ocenu i rangiranje nemoguće izvršiti na osnovu egzaktno kvantifikovanih kriterijuma. Određenje kriterijuma je iz praktičnih razloga vezano sa brojem kriterijuma. Racionalan broj kriterijuma nameće problem da svaki kriterijum sam po sebi bude složen, a složeni kriterijumi ne mogu se egzaktno kvantifikovati. Kriterijumi za ocenu tehnološkog i tehničkog razvoja vezani su za prognozu, a samim tim za neodređenost i neizvesnost.

U praktičnoj realizaciji ocene i rangiranja varijanti rešenja izbora opreme NVO za opremanje VJ ostaju metode ekspertskih ocena kao jedino moguće za praktičnu primenu. Međutim, i pri primeni ovih metoda javljaju se problemi. Pre svega, na ovom području je mali broj eksperata, a oni koji postoje uglavnom su zainteresovani za izbor pojedinih varijanti. Za rešenje ovakvog problema u ovom radu su pra-

klično ponuđene dve metodologije. U prvoj se kriterijumi unapred definišu. Eksperti ocenjuju kriterijumske vrednosti za sve varijante i težine kriterijuma. Rangiranje se vrši nekom od metoda vašekriterijumskog rangiranja. U drugoj metodologiji prepušta se ekspertima da sami biraju kriterijume i vrše rangiranje varijanti. Opšti rang dobija se usklađivanjem na osnovu opšteg koeficijenta korelacije rangova.

Za rešenje problema eliminisanja uticaja moguće zainteresovanosti pojedinih eksperata za pojedine varijante predloženi su mogući postupci ili kombinacija određenih postupaka. Ipak, veoma je teško jednoznačno odrediti koja od ponuđenih metodologija je uspešnija. Prva metodologija je komplikovanija i teža za provođenje, ali je zato moguće izvesti niz varijacija ove metodologije i prilagoditi je konkretnom slučaju. Moguća je varijanta da pojedini eksperti poznaju samo segmente rešavanja problema. Druga predložena metodologija je jednostavnija za provođenje, ali zato ne trpi varijacije i zahteva od svakog eksperta poznavanje celokupnog problema.

U svakom slučaju postoji nužnost razvoja, formalizacije i standardizacije metoda za opremanje NVO. Poznavanje ranga varijanti predstavlja jednu od osnova za planiranje opremanja NVO.

Literatura:

- [1] Belišev, S. D., Gurvič, F. G.: Matematiko-statističke metode ekspertnih ocenok, Statistika, Moskva, 1980.
- [2] Starowicz, W., Kolarić, N.: Prognoziranje i planiranje razvoja transporta metodama eksperata, deo I — opšte karakteristike metoda, Železnica 5 (1986) 64—69.
- [3] Starowicz, W., Kolarić, N.: Prognoziranje i planiranje razvoja transporta metodama eksperata, deo II — osnovni metodološki proces prognoze, Železnica 7 (1986) 45—51.
- [4] Starowicz, W., Kolarić, N.: Prognoziranje i planiranje razvoja transporta metodama eksperata, deo III — izbor eksperata procena njihovih kompetencije, Železnica 12 (1986) 30—41.
- [5] Starowicz, W., Kolarić, N.: Prognoziranje i planiranje razvoja transporta metodama eksperata, deo IV — formalizacija i analiza informacija dobijenih od eksperata, Železnica 1 (1987) 41—49.
- [6] Todorović, J.: Inženjerstvo održavanja tehničkih sistema, Jugoslovensko društvo za motore i vozila, Beograd, 1993.

Dr Miroslav Dedić*
profesor, dipl. inž.
Mašinski fakultet, Kragujevac
Mr Predrag Popović,
dipl. inž.
Institut za nuklearne nauke
— Centar za motore i vozila,
Vinča
Mr Vitomir Pijevac,
dipl. inž.
FAP Korporacija, Priboj

PRILOG UTVRĐIVANJU STVARNIH VIBRACIONIH OPTEREĆENJA SPECIJALNOG ČETVOROOSOVSKEG KAMIONA

UDC: 629.114.012.1-445.001.57

Rezime:

Noseći sistem i mostovi kamiona izloženi su delovanju dinamičkih opterećenja. Kako je pri njihovom projektovanju (za potrebe proračuna i ispitivanja) neophodno poznavanje stvarnih opterećenja, u radu su prikazani delimični rezultati eksploatacionih istraživanja vibracionih opterećenja jednog specijalnog četvoroosovinskog kamiona formule točkova 8x8. Tokom ispitivanja posebna pažnja posvećena je vertikalnim vibracijama okvira i vertikalnim i podužnim vibracijama mostova vozila u karakterističnim eksploatacionim uslovima. Statistička analiza rezultata ispitivanja, primenom metode srednjih vrednosti oblasti i metode prelaza graničnih nivoa, omogućila je definisanje potrebnih informacija za proračun i ispitivanje pomenutih sistema posmatranog vozila.

Ključne reči: kamion, vibracije, statistika.

A CONTRIBUTION TO THE DETERMINATION OF ACTUAL VIBRATORY LOADING OF A SPECIAL FOUR AXLE TRUCK

Summary:

Frame and driving axles of trucks are affected by dynamical loading during service period. Actual loading is necessary to be known in the designing phase (for calculations and investigations). Partial results of investigations of vibratory loading of a special four axle truck with 8x8 driving line are presented in the paper. Vertical vibrations of the frame and vertical and longitudinal vibrations of driving axles of an above-mentioned truck in characteristic service conditions are emphasized. Statistical analysis of investigations results, performed by the Range — Mean Method and the Level — Crossing Method, made it possible to define necessary information for calculation and investigation of above-mentioned vehicle systems.

Key words: truck, vibrations, statistics.

Uvod

U toku projektovanja motornih vozila i njihovih sklopova često se javljaju veoma oprečni zahtevi, kao na primer: mala masa — velika nosivost, mali spoljni gabariti vozila — maksimalni komfor putnika i sl. Očigledno se nameće potreba da se u toku pro-

jektovanja vozila izvrši optimizacija konstrukcije elemenata i sklopova, uz uvođenje ciljeva obavljanja namenjene funkcije, postizanja očekivanog veka, prihvatljive pouzdanosti i zadovoljavanja odgovarajućih zakonskih propisa [3, 11, 14—18].

Kako su neki od postavljenih ciljeva u tesnoj vezi sa opterećenjima kojima su elementi, agregati i vozilo u celini izloženi, u ovom radu biće re-

* Akademik Akademije transporta i Akademije kvaliteta Ruske Federacije.

či o utvrđivanju stvarnih vibracionih opterećenja sistema jednog specijalnog kamiona, formule točkova 8x8, iz proizvodnog programa FAP. Naime, delimično su prikazani rezultati ispitivanja vibracionih opterećenja mostova i okvira pomenutog vozila u realnim eksploatacionim uslovima, radi stvaranja pouzdanih uslova i kriterijuma za proračunske provere i laboratorijska ispitivanja pomenutih sistema.

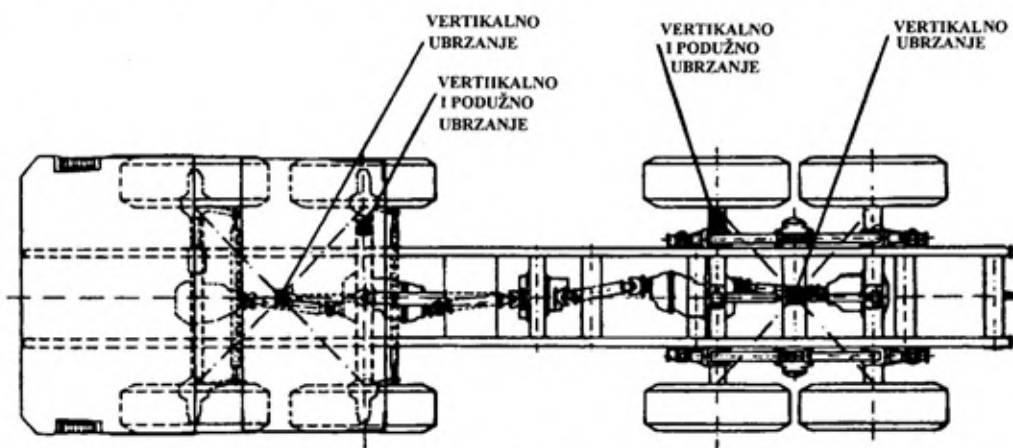
Celishodno je da se ukaže na neke činjenice iz teorije motornih vozila [4—6, 12, 13]. Naime, motorna vozila čine sklopovi, agregati i sistemi (koji se u zavisnosti od potrebe mogu posmatrati kao kruta ili elastična tela) međusobno povezani elastoprigušnim elementima, najčešće nelinearnih karakteristika. Pri njihovom kretanju po neravnim putevima mikro-profila slučajnog karaktera, usled neuravnoteženih obrtnih masa, neuniformnih pneumatika ili neuravnoteženog (nestacionarnog) rada motora, vozilo u opštem slučaju (kao i njegovi delovi) vrši slučajna prostorna vibraciona kretanja [4, 6, 12, 13]. Posledica takvih kretanja su stvarna radna opterećenja, koja su u najopštijem slučaju stohastičkog karaktera.

Parametri tih opterećenja mogu se utvrditi dinamičkom simulacijom uz korišćenje odgovarajućih vibracionih modela (sa konačnim ili beskonač-

nim brojem stepeni slobode kretanja) [4, 6, 12, 13]. Pri tome treba imati u vidu činjenice koje su poznate iz [6, 12, 13] da linearni i nelinearni vibracioni modeli motornih vozila, pod dejstvom pobuda stohastičkog karaktera, vrše stohastičke vibracije. Analitički se može dokazati da u slučaju pobuda od mikroneravnina puta, koje se pokoravaju Gausovoj (normalnoj) raspodeli, i vibracioni model vozila vrši stohastičke vibracije koje se pokoravaju toj istoj raspodeli. Kako se u ovom radu žele utvrditi stvarna radna opterećenja izabranih sklopova i sistema kamiona, neophodno je da se to učini eksperimentalnim putem.

Metod i uslovi ispitivanja

Analize izvršene u [7—10] pokazale su da je celishodno registrovanje vertikalnih vibracionih ubrzanja okvira kamiona iznad prednjeg i zadnjeg tandema i vertikalnih i podužnih vibracionih ubrzanja drugog i trećeg pogonskog mosta. Vertikalne vibracije okvira registrovane su u njegovoj podužnoj osi simetrije, a vertikalne i podužne vibracije mostova registrovane su u osi simetrije ispod gibnja. Ovakav izbor mernih mesta stvorio je uslove za izračunavanje vibracionih ubrzanja bilo koje tačke po dužini okvira,



Sl. 1 — Merna mesta

pod uslovom da se on posmatra kao kruto telo [4—7, 12, 13] kao i sistema za vođenje točkova.

Merne veličine registrovane su uz korišćenje davača ubrzanja HBM B12/200 i pojačavača HBM KWS/6T-5, kao i magnetofona HP 3964A, čime je omogućena kasnija obrada podataka. Pri postavljanju pretvarača ubrzanja postavljane su preporuke njihovih proizvođača, tako da su minimizirane greške merenja. Bliže informacije o načinu postavljanja pretvarača ubrzanja mogu se naći u [10], a radi ilustracije, na slici 1, prikazana su merna mesta.

Kako su režimi opterećenja polazne veličine pri projektovanju, proračunu i konstrukciji, izboru uslova ispitivanja mora se posvetiti posebna pažnja. Radi pravilnog utvrđivanja radnih opterećenja sklopova, agregata i sistema posmatranog kamiona, neophodno je naglasiti da uslovi rada zavise od: intenziteta eksploatacije, vrste puta sa aspekta makro i mikroreljefa, načina korišćenja i okruženja. Ovi činioci detaljno su objašnjeni u [15]

Ocenjeno je celishodnim [18] da se kamion ispita sa punim opterećenjem, tako da je njegova ukupna masa tokom ispitivanja iznosila 31000 kg.

Imajući u vidu pretežnu namenu kamiona [7, 8, 18], definisana je ukupna struktura uzorka puta dužine 150 km, od čega: asfaltnog puta 50 km (33%), makadama sa lošom podlogom 60 km (40%), zemljanog puta 20 km (13,3%) i ledine 20 km (13,3%).

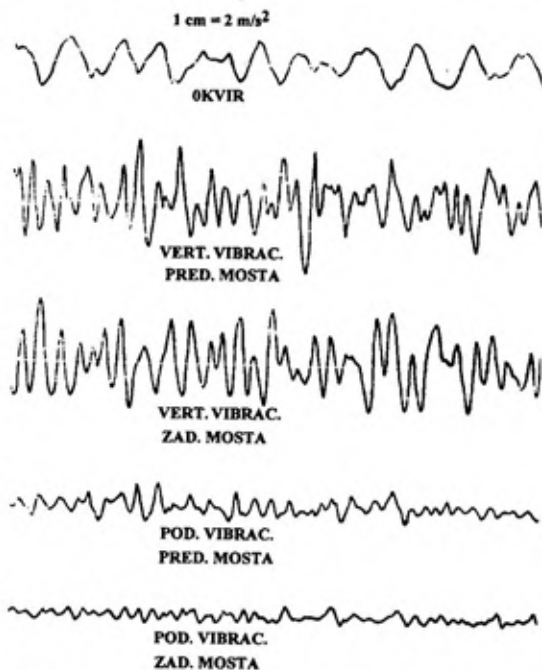
Asfaltni put imao je mestimična oštećenja i nekoliko blagih krivina. Prosečna brzina kretanja iznosila je 56 km/h, a ispitivanja su obavljena uz intenzivna kočenja na svakih 5 km puta, uz promenu svih stepena prenosa.

Makadamski put imao je podlogu od tucanog kamena i veće neravnine (dužina neravnina 0,2 do 8 m, a visina 0,1 do 0,3 m). Prosečna ostvarena brzina kretanja iznosila je 31 km/h.

Na zemljanom putu sa većim neravninama prosečno ostvarena brzina iznosila je 22 km/h, a na ledini obrasloj travom, sa podlogom od peska i sa različitim vrstama prepreka — 18 km/h.

Statistička obrada eksperimentalnih podataka

Analize svih mernih veličina pokazale su da one pripadaju grupi stohastičkih procesa, a radi ilustracije, na slici 2, prikazan je primer jednog zapisa u vremenskom domenu. Uobičajeno je da se, ako se ima u vidu ve-



Sl. 2 — Primer vremenskog zapisa ubrzanja

ća dužina vremenske realizacije, ovakve veličine posmatraju kao stacionarne i ergodične [1, 2]. Za obradu tih procesa postoji više metoda [1, 2], a imajući u vidu cilj istraživanja, ocenjeno je celishodnim da se izvrši statistička obrada registrovanih analognih veličina metodom klasiranja srednjih vrednosti oblasti (Range-Mean Method) i

metodom prelaska graničnih nivoa (Level-Crossing Method). Kao što je poznato, prva metoda je dvoparametarska i sastoji se u utvrđivanju izmena amplituda oko srednjih vrednosti, a druga jednoparametarska i zasniva se na brojanju pojava prelaska graničnih nivoa [8]. Obrada podataka izražena je primenom računarskog sistema Hewlett Packard 3052.

Analiza dobijenih rezultata

Prilikom analize statističkih podataka posebna pažnja posvećena je informacijama dobijenim na osnovu dvoparametarskih raspodela.

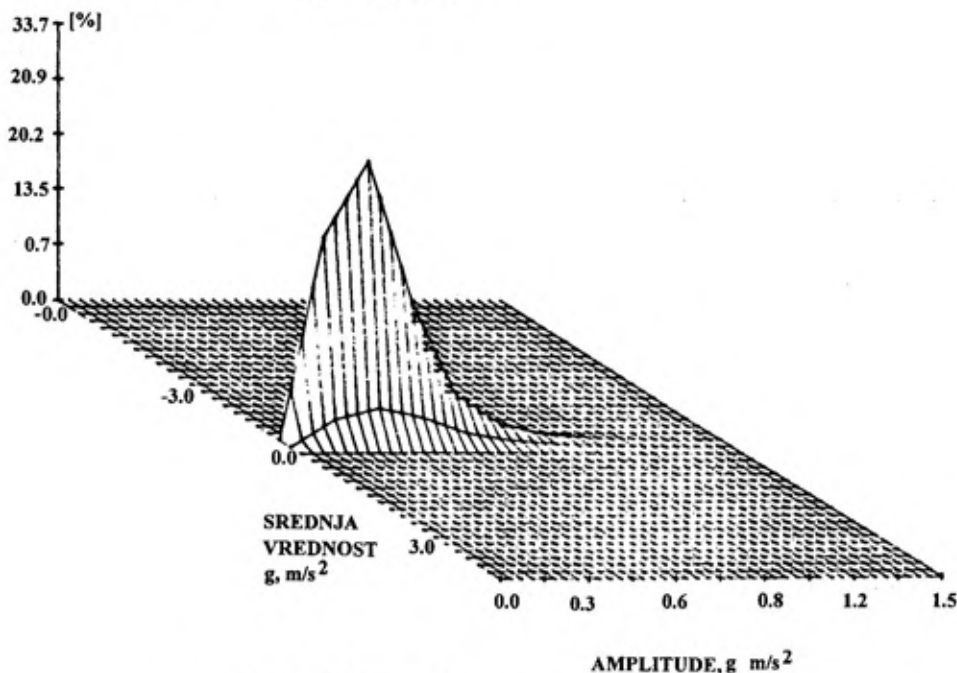
Treba napomenuti da dvoparametarska raspodela predstavlja prostornu površinu, a ilustrativni primer je prikazan na slici 3. Radi daljeg korišćenja dobijenih rezultata urađeni su »nulti preseki« na osnovu kojih su de-

finisane matrice raspodela srednjih vrednosti i amplituda ubrzanja. Primenom statističkih metoda [16] u matricama su definisane margine koje predstavljaju kumulativne učestanosti pojavljivanja pomenutih veličina. Imajući u vidu rasipanje rezultata, ocenjeno je celishodnim [10] da se odbace sve vrednosti čija je verovatnoća pojavljivanja mala (praktično su posmatrane vrednosti čija je verovatnoća pojavljivanja iznad 99,80 %). Na taj način definisani su intervali srednjih vrednosti i amplituda ubrzanja.

U toku obrade podataka izvršeno je klasiranje izmerenih vibracija kako za pojedine karakteristične deonice (asfalt, makadam i sl.), tako i za celu dužinu puta (»zbirno«).

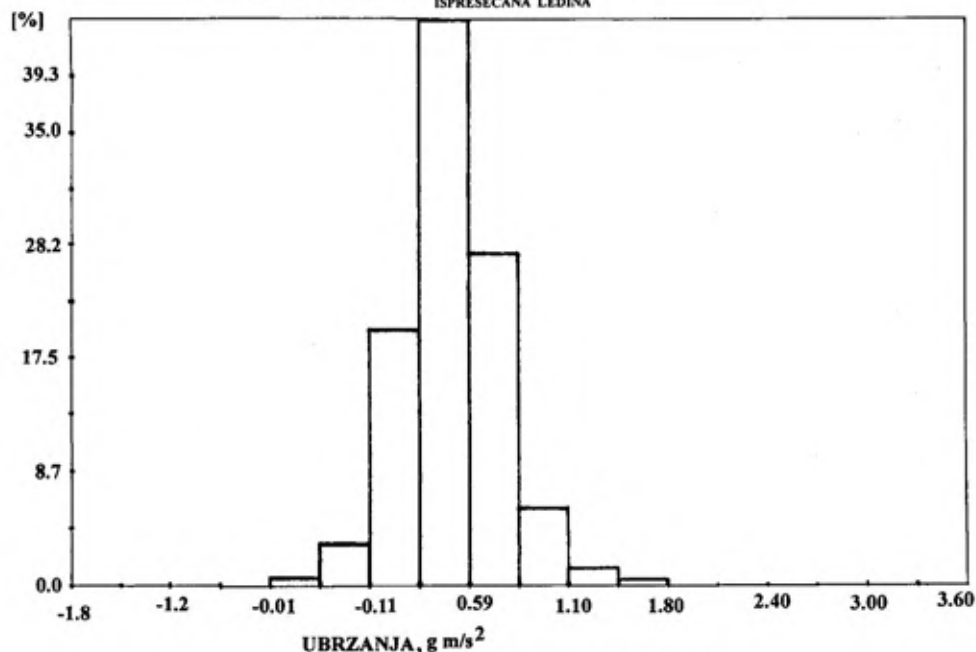
Pored dvoparametarskih raspodela u analizi su korišćene i jednoparametarske (histogrami), koje su omogućile izračunavanje kumulativnih učestanosti radi utvrđivanja zakona ra-

VERTIKALNO UBRZANJE DRUGOG MOSTA
ISPRESECANA LEDINA



Sl. 3 — Primer dvoparametarske raspodele

VERTIKALNO UBRZANJE DRUGOG MOSTA
ISPRESECANA LEDINA



Sl. 4 — Primer histograma raspodele

spodela srednjih vrednosti i amplituda ubrzanja (primer histograma prikazan je na slici 4).

Vertikalna ubrzanja okvira

Vertikalna ubrzanja okvira predstavljaju stohastička dvoznačno-sime-

trično promenljiva opterećenja, u svim eksploatacionim uslovima.

Na osnovu dvoparametarskih raspodela utvrđene su karakteristične vrednosti koje su date u tabeli 1.

Analizom podataka iz tabele 1 može se utvrditi da se maksimalna vrednost vertikalnih ubrzanja okvira jav-

Tabela 1

Raspodela srednjih vrednosti i amplituda vertikalnih ubrzanja okvira iznad prednjeg (P) i zadnjeg (Z) tandema

Vrsta puta	Intenzitet srednje vrednosti	Kumulat. učest. (%)		Intenzitet amplituda	Kumulat. učest. (%)	
		P	Z		P	Z
Asfalt	$\pm 0,2$ g	99,83	99,86	0 do 0,3 g	99,83	99,86
Makadam	$\pm 0,3$ g	99,86	99,50	0 do 0,4 g	99,83	99,60
Zemlj. put	$\pm 0,3$ g	99,85	99,65	0 do 0,4 g	99,86	99,86
Ledina	$\pm 0,3$ g	99,86	/	0 do 0,4 g	99,66	/
Zbirno	$\pm 0,3$ g	99,88	99,65	0 do 0,4 g	99,83	99,75

lja na makadamu, a najmanja na asfaltnom putu. Podaci govore o tome da uslovi eksploatacije (vrsta puta, eksploataciona brzina) utiču na vertikalna ubrzanja okvira posmatranog vozila. Uočljivo je da se rezultati koji se odnose na pojedine deonice i celu dužinu puta razlikuju.

Na osnovu podataka iz tabele 1 može se utvrditi da se intervali srednjih vrednosti vertikalnih ubrzanja okvira kreću u granicama $\pm 0,3$ g u preko 99 % slučajeva, a amplituda u intervalu 0 do 0,4 g u preko 99 % slučajeva.

Primenom verovatnosnog papira za normalnu raspodelu potvrđeno je da se ubrzanja pokoravaju normalnoj raspodeli.

Vertikalna ubrzanja mostova

Na osnovu dvoparametarskih raspodela vertikalnih ubrzanja mostova definisani su podaci u tabeli 2.

Analizom je utvrđeno da vertikalna ubrzanja mostova pripadaju grupi stohastičkih procesa sa dvoznačnom, simetričnom promenom amplituda.

Podaci iz tabele 2 pokazuju da eksploatacioni uslovi utiču na veličinu vertikalnih ubrzanja mostova. Evidentno je da se i u ovom slučaju razli-

kuju rezultati koji se odnose na pojedine deonice i celu dužinu puta.

Najveća vertikalna ubrzanja (srednje vrednosti i amplitude) mostova ostvarena su na asfaltnom i makadamskom putu, pri čemu su ubrzanja na makadamskom putu veća.

Može se ustanoviti da su srednje vrednosti od $\pm 0,9$ g i amplitude od 0 do 3,3 g zastupljene u preko 99 % slučajeva.

Uz korišćenje verovatnosnog papira utvrđeno je da se srednje vrednosti i amplitude pokoravaju normalnom zakonu raspodele.

Na osnovu podataka iz tabela 1 i 2 može se uočiti da postoji razlika između vertikalnih ubrzanja okvira i posmatranih mostova. Ova pojava može se objasniti činjenicom da sistem za oslanjanje vrši prigušivanje, što je u skladu sa rezultatima koji se mogu dobiti dinamičkom simulacijom uz korišćenje vibracionih modela vozila [4, 6, 12, 13].

Podužne vibracije mostova

Analizom podataka utvrđeno je da podužna ubrzanja pogonskih mostova pripadaju grupi stohastičkih procesa sa simetričnom dvoznačnom raspodelom amplituda.

Tabela 2

Raspodela srednjih vrednosti i amplituda ubrzanja drugog (D) i trećeg (T) mosta

Vrsta puta	Intenzitet srednje vrednosti	Kumulat. učest. (%)		Intenzitet amplitude	Kumulat. učest. (%)	
		D	T		D	T
Asfalt	$\pm 0,9$ g	99,96	99,90	0 do 2,7 g	99,91	99,96
Makadam	$\pm 0,9$ g	99,92	99,87	0 do 3,3 g	99,93	99,80
Zemlj. put	$\pm 0,6$ g	99,97	99,97	0 do 1,8 g	99,99	99,99
Ledina	$\pm 0,6$ g	99,99	99,99	0 do 1,5 g	99,98	99,98
Zbirno	$\pm 0,9$ g	99,96	99,85	0 do 3,3 g	99,97	99,92

Raspodela srednjih vrednosti i amplituda podužnih ubrzanja drugog (D) i trećeg (T) mosta

Vrsta puta	Intenzitet srednje vrednosti	Kumulat. učest. (%)		Intenzitet amplitude	Kumulat. učest. (%)	
		D	T		D	T
Asfalt	$\pm 0,4$ g	99,92	99,99	0 do 0,55 g	99,88	99,97
Makadam	$\pm 0,4$ g	99,75	99,88	0 do 0,7 g	99,96	99,96
Zemlj. put	$\pm 0,3$ g	99,92	99,94	0 do 0,65 g	99,97	99,98
Ledina	$\pm 0,3$ g	99,97	99,97	0 do 0,5 g	99,97	99,99
Zbirno	$\pm 0,4$ g	99,87	99,94	0 do 0,7 g	99,98	99,98

Korišćenjem dvoparametarskih raspodela definisani su podaci dati u tabeli 3.

Na osnovu podataka iz tabele 3 može se ustanoviti da podužna ubrzanja mostova zavise od eksploatacionih uslova, a maksimalne vrednosti ostvarene su na makadamskoj i asfaltnoj podlozi. Značajno je da se i u ovom slučaju uoče razlike između rezultata koji se odnose na pojedine deonice i celu dužinu puta.

Očigledno je da su u preko 99 % slučajeva zastupljene srednje vrednosti podužnih ubrzanja od $\pm 0,4$ g i amplituda od 0,7 g.

Primenom verovatnosnog papira utvrđeno je da se srednje vrednosti i amplitude pokoravaju normalnoj raspodeli.

Napomene u vezi sa dobijenim rezultatima i njihovim korišćenjem u laboratorijskim uslovima

Analizom podataka dobijenih metodama klasiranja utvrđeno je da:

— vertikalna i bočna ubrzanja svih izmerenih veličina zavise od vrste puta i prosečne brzine kretanja vozila (uslova eksploatacije);

— jednoparametarske i dvoparametarske raspodele ukazuju na činje-

nicu da je najveća gustina raspodela izmerenih vibracija oko nultih srednjih vrednosti, što se može objasniti činjenicom da vozilo tokom eksploatacije ostvaruje vibracije oko ravnotežnog položaja, što je u skladu sa teorijom iz [4—6, 12, 13];

— vertikalna ubrzanja okvira i mostova, kao i podužna ubrzanja mostova, pokoravaju se normalnoj raspodeli,

— »zbirni« rezultati su dovoljno reprezentativni za laboratorijska ispitivanja, jer je struktura izabranih deonica obuhvatila sve karakteristične eksploatacione uslove posmatranog kamiona.

Utvrđene zakonitosti promena analiziranih veličina omogućavaju da se, na osnovu podataka iz tabele 1—3, u laboratorijskim uslovima, izvrše odgovarajuća ispitivanja. Međutim, simulacija u laboratorijskim uslovima može biti otežana, posebno zbog obezbeđenja istovetnosti pobuda u putnim i laboratorijskim uslovima, što dovodi do razlike u rezultatima [15]. Celishodno je da se za laboratorijska ispitivanja koriste blokovi opterećenja [10, 11, 14, 15, 17, 18], iako novija istraživanja kazuju na greške koje se pri tome javljaju. Svakako, najvažnije su one greške koje su posledica neodgovarajuće reprodukcije stvarnih opterećenja u laboratorijskim uslovima usled uproš-

čenja koja se čine pri korišćenju blokova opterećenja [15].

Savremeni laboratorijski uređaji omogućavaju neposrednu reprodukciju slučajnih vremenskih zapisa opterećenja karakterističnih tačaka vozila, sa magnetofonske trake [18]. Pri tome se teži da razlike mernih veličina u putnim i laboratorijskim uslovima budu minimalne. To praktično znači da se, pod određenim uslovima, eksploataciona ispitivanja mogu zameniti laboratorijskim. Nepovoljna strana takvih uređaja ogleda se u činjenici da se pobude (sile, momenti i sl.) moraju reprodukovati uz korišćenje magnetnih pisača, jer se radi o veoma dugačkim zapisima, koje nije lako zameniti digitalnim podacima (prvenstveno zbog ograničenih mogućnosti diskovih računara).

Imajući u vidu nedostatke laboratorijskih ispitivanja uz korišćenje blokova opterećenja, kao i probleme sa dužinama analognih zapisa karakterističnih veličina, smatra se da je povoljnije, na osnovu statistički obrađenih signala izvršiti generisanje odgovarajućih pobudnih opterećenja, u potrebnom vremenu trajanja. Međutim, sadašnji nivo obrade podataka [1, 2, 16] ne omogućava, na žalost, verodostojnu reprodukciju vremenskih signala opterećenja na osnovu poznatih parametara amplitudne identifikacije (dvo-parametarske i jednoparametarske raspodele). Zbog toga je povoljnije koristiti metode zasnovane na Furijeovoj analizi signala [1, 2], jer se na osnovu relativno malih datoteka Furijeove transformacije u kompleksnom obliku, primenom inverzne Furijeove transfor-

macije, mogu izračunati vremenske realizacije pobuda [1, 2]. Prednost ovakvog načina obrade rezultata jeste u činjenici da se uz pomoć personalnih računara mogu relativno jednostavno, generisati vremenske realizacije neophodne za laboratorijska ispitivanja.

Smatra se da ova metoda iziskuje kraće deonice za putna ispitivanja, jer je dužina signala ograničena minimalnom i maksimalnom učestanošću, a ne potrebnom dužinom deonice sa aspekta verodostojnosti pojave potrebnog broja amplituda. Pri tome treba imati u vidu i probleme koji mogu nastupiti pri definisanju reprezentativnog uzorka za laboratorijska ispitivanja, pa je ovu hipotezu neophodno proveriti u praksi upoređivanjem sa rezultatima koji se dobijaju u laboratorijskim uslovima neposrednim pobuđivanjima signalom sa magnetofonske trake.

Zaključak

Na osnovu izvršenih istraživanja razvijena je metodologija eksperimentalnog utvrđivanja stvarnih vibracionih opterećenja sistema specijalnog kamiona FAP i omogućila dobijanje neophodnih informacija za naknadne računarske provere i ispitivanja. Dobijeni podaci pružaju dovoljno informacija za stvaranje blokova opterećenja za laboratorijska ispitivanja i proračun posmatranih sistema kamiona. U narednim istraživanjima treba posvetiti više pažnje postupcima obrade podataka zasnovanim na direktnoj i inverznoj Furijeovoj transformaciji.

Literatura:

- [1] Bendat, S. J., Piersol, A. G.: Random Data: Analysis and Measurement Procedures, Wiley-Interscience (Prevod na ruski), Mir, Moskva, 1974.
- [2] Bruel & Kjaer: Digital Signal Analysis. Selected Reprints from Technical Review, 1981.
- [3] Grubišić, V.: Criteria and Methodology for Lightweight Design of Vehicle Components subjected to Random Loads, SAE 850367, 1985.
- [4] Demeć, M.: Optimizacija oscilatornih sistema motornih vozila (monografija), Mašinski fakultet u Kragujevcu, 1997.
- [5] Demeć, M., Pljevac, V. i dr.: Osnovi projektovanja teretnih motornih vozila, Mašinski fakultet u Kragujevcu, 1994.
- [6] Mitschke, M.: Dynamik der Kraftfahrzeuge, Springer, 1972.
- [7] Pljevac, V.: Jedan pristup u istraživanju proračuna nosećeg okvira motornog vozila pogonske formule 8x8 (magistarski rad), Mašinski fakultet, Sarajevo, 1988.
- [8] Popović, P.: Postupci simuliranja radnih opterećenja elemenata vozila, MVM 81/82, Kragujevac, 1988.

- [9] Popović, P.: Istraživanje režima radnih opterećenja vozila FAP 2832 BDS/A (Izveštaj), Centar za motore i vozila instituta Vinča, 1987.
- [10] Power, E., M.: Cycle Counting Methods and the Development of Block Load Fatigue Programmes, SAE 780102, 1978.
- [11] Rotenberg, R. V.: Podveska avtomobilja, Mašinostrojenje, Moskva, 1972.
- [12] Simić, D.: Dinamika motornih vozila, Naučna knjiga, Beograd, 1980.
- [13] Todorović, J., Popović, P.: Uticaj rasipanja dinamičke izdržljivosti na pouzdanost elementa vozila, NMV, 1981.
- [14] Todorović, J.: Ispitivanja motornih vozila, Mašinski fakultet, Beograd, 1973.
- [15] Vukadinović, S.: Elementi teorije verovatnoće i matematičke statistike, Privredni pregled, Beograd, 1973.
- [16] Direction du materiel SNCF — Departement des essais et des laboratoires: Methodes d'essais et de calcul d'endommagement des structures ferroviaries la SNCF, MEV3 9108, Paris, 1991.
- [17] Fiat: Lične informacije, 1982.
- [18] FAP Korporacija a.d.: Informacije, 1998.

OPTIMALNA RASPODELA RESURSA PRI OPSLUŽIVANJU VAZDUHOPLOVA PRIMENOM DINAMIČKOG PROGRAMIRANJA

UDC: 519.81/.86:623.7

Rezime:

Opisluživanje grupe vazduhoplova na pristanišnoj platformi podrazumeva raspodelu ljudi i sredstava koji opslužuju svaki pojedini vazduhoplov iz definisane grupe. Raspodela mora da zadovolji određeni globalni cilj (kriterijumsku funkciju) i predviđena ograničenja za svaki konkretan problem. Potrebno je napraviti optimalnu raspodelu raspoloživih resursa po zadatim vazduhoplovima, tako da se posao opsluživanja završi u što kraćem (minimalnom) roku. Ograničenja će, pre svega, biti vezana za raspoloživi broj radnika, kao i za minimalni, odnosno maksimalni broj angažovanih radnika po svakom vazduhoplovu u grupi. Postavljeni problem spada u grupu kombinatornih problema optimalne raspodele ograničenih resursa i rešava se tehnikom dinamičkog programiranja. Ono što ovaj zadatak izdvaja i čini ga nekarakterističnim jeste da se on ne rešava ni aditivnim ni multiplikativnim oblikom dinamičkog programiranja. Činjenica da većina programskih paketa za računar rešavaju samo ova dva tipična oblika dinamičkog programiranja uticala je na neophodnost projektovanja softvera koji bi rešavao postavljeni problem.

ključne reči: opsluživanje, dinamičko programiranje, raspodela resursa.

DYNAMIC PROGRAMMING APPLICATION IN THE OPTIMAL DISTRIBUTION OF RESOURCES DURING AIRCRAFT SERVICING

Summary:

Servicing a group of aircrafts on a landing platform implies appropriate distribution of human and material resources for servicing each aircraft separately. The distribution must satisfy particular global goal (criterion function) as well as determined constraints for each particular problem. Available resources should be optimally distributed in order to complete servicing in a minimum time. Constraints concern, above all, the number of available workers as well as minimum and maximum number of workers per each aircraft in a group. The dynamic programming technique is applied to solve this problem which belongs to the group of combinatorial problems about optimal distribution of limited resources. The particularity of this task is that it cannot be solved neither by additive nor by multiplicative forms of dynamic programming. Since most of softwares solve only these two typical forms of dynamic programming it was necessary to design a software for solving this type of problems.

Key words: servicing, dynamic programming, distribution of resources.

Uvod

Opisluživanje vazduhoplova na pristanišnoj platformi (stajanci ili kaponiru) jedan je od osnovnih zadataka

vazduhoplovnotehničke službe (VTSl). Kriterijumi za procenjivanje dobro organizovanog i uspešno izvedenog opsluživanja su minimalno potrebno vreme opsluživanja, kao i naprezanje rad-

ne snage i sredstava opsluživanja. Navedeni kriterijumi odnose se kako na vojno, tako i na civilno vazduhoplovstvo i ukazuju na to da se problem optimalne opsluge vazduhoplova na pristanišnoj platformi može predstaviti i kao problem optimalne raspodele resursa. Ratna vazduhoplovstva, kao i kompanije koje se bave vazдушnim saobraćajem, manipulišu veoma skupim resursima, bilo da su u pitanju vazduhoplovi, gorivo ili specifično obučena radna snaga.

Vreme opsluživanja vazduhoplova na pristanišnoj platformi zavisi od obučenosti, opremljenosti i organizovanosti izvršioca. Odatle je jasno da se pravilnim dimenzioniranjem ljudskih i materijalnih resursa (radne snage i opreme) i njihovim adekvatnim raspoređivanjem na avione, vreme opsluživanja vazduhoplova na platformi može svesti na najmanju moguću meru.

Opsluživanje vazduhoplova na pristanišnoj platformi predstavlja skup radnji koje se obavljaju između dva leta radi pripreme vazduhoplova za naredni let. Postupak opsluživanja vazduhoplova podrazumeva angažovanje odgovarajuće radne snage (ljudstva) i opreme (sredstava). Pri tome, na broj radnika i sredstava koje treba angažovati utiče veći broj faktora. Među njima su najvažniji [1]: broj aviona koje treba opslužiti u jedinici vremena, produktivnost radne snage i opreme, raspored momenta ispostavljanja zahteva za pružanje određene usluge u posmatranom periodu, vreme potrebno za izvršenje pojedinih operacija, način raspoređivanja radnika i sredstava na zadatke opsluživanja aviona, itd. Uticaj svakog od ovih faktora treba pravilno sagledati pri dimenzioniranju potrebnih ljudskih i materijalnih resursa, jer se na taj način stvaraju uslovi za efikasno opsluživanje aviona na platformi aerodroma.

Cilj ovog rada je optimizacija raspodele ljudstva koje opslužuje grupe aviona na pristanišnoj platformi aerodroma. U osnovi opsluživanje vazdu-

hoplova može biti pojedinačno i timsko. Pošto je poznato da je timsko opsluživanje efikasnije od pojedinačnog, ovaj rad će se baviti optimalnom raspodelom resursa u timskom radu.

Problemi koji se rešavaju u ovom radu su kombinatorne prirode. Sa jedne strane, postoji ograničeni broj radnika koji opslužuju avion, a sa druge određeni broj aviona koji treba da bude opslužen. Problem može biti dodatno zakomplikovan ukoliko se ograniči minimalni i maksimalni broj radnika koji mogu da opslužuju jedan avion, ili se taj limitirajući faktor odredi posebno za svaki avion koji je potrebno opslužiti. Takvi problemi, u zavisnosti od svoje dimenzionalnosti, mogu biti rešavani klasičnim matematičkim metodama optimizacije ili, ukoliko je problem obimniji, primenom heurističkih metoda. Dinamičko programiranje, kao jedan od metoda za rešavanje kombinatornih problema, veoma je prikladan za ovu vrstu zadataka, pa će se zadati problem raspodele, rešavati ovom tehnikom.

Mogućnost primene tehnike dinamičkog programiranja na računarskim mašinama omogućava rešavanje obimnijih zadataka u veoma kratkom roku i tako promovise ovu tehniku u jednu od primerenijih u svim oblastima u kojima je vreme veoma bitan faktor.

Postavka problema

Posle sletanja avion dolazi na pristanišnu platformu, parkira se i zauzima se rad motora. Od tog momenta pa do momenta polaska na sledeći let obavlja se proces opsluživanja aviona na pristanišnoj platformi aerodroma. Neke od tih aktivnosti odvijaju se paralelno i bez zavisnosti jedne od drugih, a neke su zavisne i nadovezuju se jedna na drugu. Primer na kojem će biti predstavljen predloženi model je iz civilnog vazduhoplovstva, pa će dalji tok postavke problema biti preusmeren prvenstveno na komercijalno vazduhoplovstvo.

Aktivnosti o kojima se govori, na primeru aviona DC-10, su: postavljanje podmetača, postavljanje aviomosta, servis vode, rutinski pregled aviona, pregled dokumenata, servis toaleta, istovar kontejnera prednjeg bagaža, snabdevanje bifea, utovar kontejnera prednjeg bagaža, istovar kontejnera centralnog bagaža, utovar kontejnera centralnog bagaža, istovar komadnog teškog tereta, utovar komadnog teškog tereta, iskrčavanje putnika, čišćenje kabine, snabdevanje aviona gorivom, ukrčavanje putnika, start motora, uklanjanje podmetača, uklanjanje aviomosta, izvlačenje aviona pomoću traktora. Na datom primeru jasno se vidi da je utovar komadnog teškog tereta, recimo, uslovljen prethodnim istovarom komadnog teškog tereta, a snabdevanje aviona gorivom i čišćenje kabine predstavljaju nezavisne, paralelne, radnje.

Određene zavisnosti, odnosno nezavisnosti, između ovih operacija pružaju mogućnost primene neke od metoda mrežnog planiranja radi određivanja vremena potrebnog za opsluživanje određenog aviona. Mrežno planiranje je veoma prikladan metod u primeru jednog vazduhoplova. Međutim, kada se radi o većem broju aviona, i to još različitog tipa, problem postaje složen.

Problem koji se razmatra u ovom radu sastoji se u sledećem: određeni skup aviona $R = \{r_1, r_2, \dots, r_k\}$ potrebno je opslužiti raspoloživim brojem radnika N , tako da se svakom avionu r_k pridruži određeni broj radnika n_k , gde je $n_1 + n_2 + \dots + n_k + \dots + n_K = N$, odnosno

$$N = \sum_{k=1}^K n_k. \text{ Pored toga, dodatno je de-}$$

finisan i minimalni (n_k'), odnosno maksimalni (n_k'') broj radnika angažovanih na nekom avionu r_k relacijom $n_k' \leq n_k \leq n_k''$. Vreme potrebno da se opsluži jedan avion u funkciji je broja radnika koji ga opslužuju i označava se sa $t_k(n_k)$. Što je broj radnika koji opslužuju vazduhoplov na pristani-

šnoj platformi veći to će vreme opslu-
ge biti kraće i obrnuto.

Ukoliko postoji R aviona, ukupno vreme njihovog opsluživanja biće vreme potrebno da se opsluži avion na kojem to najduže traje. Avioni se opslužuju paralelno (jednovremeno) i bitno je samo maksimalno, a ne ukupno vreme opsluživanja:

$$T = \max\{t_1(n_1), t_2(n_2), \dots, t_k(n_k), \dots, t_K(n_K)\} \quad (1)$$

Pošto je cilj minimizirati vreme opsluživanja vazduhoplova na pristanišnoj platformi relacija (1) će poprimiti oblik:

$$\min T = \min_{n_1, n_2, \dots, n_K} \{ \max\{t_1(n_1), t_2(n_2), \dots, t_k(n_k), \dots, t_K(n_K)\} \} \quad (2)$$

Navedeni zadatak označava raspodelu resursa u kojima su kriterijumske funkcije separabilne, pa se on efikasno može rešavati primenom dinamičkog programiranja.

Rešenje problema

Postavljeni problem opsluživanja više vazduhoplova na aerodromskoj pristanišnoj platformi, koji rešava ograničeni broj radnika, rešen je primenom teorije dinamičkog programiranja. Tehnika dinamičkog programiranja podrazumeva opis procesa raspodelu resursa, izgradnju matematičkog modela i definisanje funkcionalne jednačine u osnovnom smislu, poznata je i nije je potrebno šire predstavljati [2, 5].

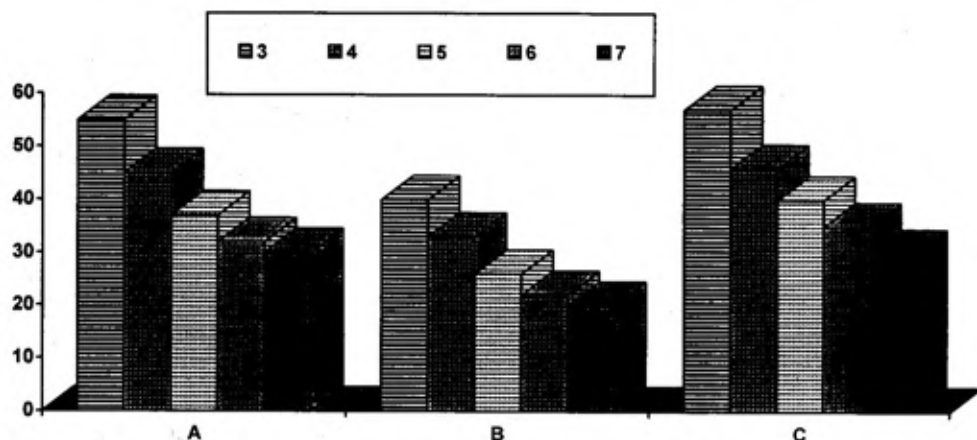
Pri konkretnom problemu prvo se postavlja funkcionalna jednačina. Sledeći korak je rešavanje manje dimenzionog problema datom teorijom zbog prezentacije njenog funkcionisanja na realnom problemu. Nakon toga prikazan je računarski program izrađen u Excel 97 i višedimenzioni primer obrađen tim programom. U postavci problema zaključeno je da je maksimalno vreme opsluživanja grupe vazduhoplo-

Зависимост времени

Tabela 1

Zavisnost vremena opsluživanja od broja angažovanih radnika

n_k		3	4	5	6	7
R	A	55	45	37	32	30
	B	40	33	26	22	20
	C	57	46	40	35	33



Sl. 1 — Grafički prikaz zavisnosti i vremena opsluživanja od broja angažovanih radnika

Tabela 2

Minimalno vreme opsluživanja za date uslove angažovanja

N	$n_1(N)$	$T_1(N)$	$n_2(N)$	$T_2(N)$	$n_3(N)$	$T_3(N)$
3	3	55	—	—	—	—
4	4	45	—	—	—	—
5	5	37	—	—	—	—
6	6	32			—	—
7	7	30			—	—
8	—	—			—	—
9	—	—				
10	—	—				
11	—	—				
12	—	—				

N=6:

$$T_2(6) = \min_{n_2} \{ \max \{ t_2(n_2), T_1(6 - n_2) \} \} = \min_{n_2} \{ \max \{ t_2(3), T_1(6 - 3) \} \} = \min_{n_2} \{ \max \{ 40, 55 \} \} = 55$$

N=7:

$$T_2(7) = \min_{n_2} \{ \max \{ t_2(n_2), T_1(7 - n_2) \} \} = \min_{n_2} \{ \max \{ t_2(3), T_1(7 - 3) \}, \max \{ t_2(4), T_1(7 - 4) \} \} = \min_{n_2} \{ \max \{ 40, 45 \}, \max \{ 33, 55 \} \} = \min_{n_2} \{ 45, 55 \} = 45$$

N=8:

$$T_2(8) = \min_{n_2} \{ \max \{ t_2(n_2), T_1(8 - n_2) \} \} = \min_{n_2} \{ \max \{ 40, 37 \}, \max \{ 33, 45 \}, \max \{ 55, 26 \} \} = \min_{n_2} \{ 40, 45, 55 \} = 40$$

N=9:

$$T_2(9) = \min_{n_2} \{ \max \{ t_2(n_2), T_1(9 - n_2) \} \} = \min_{n_2} \{ \max \{ 40, 32 \}, \max \{ 33, 37 \}, \max \{ 26, 45 \}, \max \{ 22, 55 \} \} = \min_{n_2} \{ 40, 37, 45, 55 \} = 37$$

N=10:

$$T_2(10) = \min_{n_2} \{ \max \{ t_2(n_2), T_1(10 - n_2) \} \} = \min_{n_2} \{ \max \{ 40, 30 \}, \max \{ 33, 32 \}, \max \{ 26, 37 \}, \max \{ 22, 45 \}, \max \{ 20, 55 \} \} = \min_{n_2} \{ 40, 33, 37, 45, 55 \} = 33$$

N=11:

$$T_2(11) = \min_{n_2} \{ \max \{ t_2(n_2), T_1(11 - n_2) \} \} = \min_{n_2} \{ \max \{ 33, 30 \}, \max \{ 26, 32 \}, \max \{ 22, 37 \}, \max \{ 20, 45 \} \} = \min_{n_2} \{ 33, 32, 37, 45 \} = 32$$

Tabela 3

Minimalno vreme opsluživanja za date uslove angažovanja posle druge faze

N	$n_1(N)$	$T_1(N)$	$n_2(N)$	$T_2(N)$	$n_3(N)$	$T_3(N)$
3	3	55	—	—	—	—
4	4	45	—	—	—	—
5	5	37	—	—	—	—
6	6	32	3	55	—	—
7	7	30	3	45	—	—
8	—	—	3	40	—	—
9	—	—	4	37		
10	—	—	4	33		
11	—	—	5	32		
12	—	—	5	30		

$$N=12:$$

$$T_2(12) = \min_{n_2} \{ \max \{ t_2(n_2), T_1(12 - n_2) \} \} = \min_{n_2} \{ \max \{ 26, 30 \}, \max \{ 22, 32 \}, \max \{ 20, 37 \} \} = \min_{n_2} \{ 30, 32, 37, 45 \} = 30$$

Posle druge faze dobija se tabela sa novim stanjem raspodele (tabela 3).

U razmatranje se uključuje i treći avion (avion C), čime otpočinje treća faza proračuna. U toj fazi uzimaju se u obzir dosadašnji rezultati proračuna kao optimalni, a na njih se nadograđuju vrednosti opsluživanja trećeg aviona. Dosadašnji tok proračuna izdvaja, kao najbolje, poslednje rešenje druge faze, koje glasi: 7 radnika na avion A i 5 radnika na avion B. U tom slučaju vreme opsluživanja bi trajalo samo 30 minuta.

$$K=3$$

$$T_3(N) = \min_{n_3} \{ \max \{ t_3(n_3), T_2(N - n_3) \} \}$$

$$N=9:$$

$$T_3(9) = \min_{n_3} \{ \max \{ t_3(n_3), T_2(9 - n_3) \} \} = \min_{n_3} \{ \max \{ 57, 55 \} \} = 57$$

$$N=10:$$

$$T_3(10) = \min_{n_3} \{ \max \{ t_3(n_3), T_2(10 - n_3) \} \} = \min_{n_3} \{ \max \{ 57, 45 \}, \max \{ 46, 55 \} \} = \min_{n_3} \{ 57, 55 \} = 55$$

$$N=11:$$

$$T_3(11) = \min_{n_3} \{ \max \{ t_3(n_3), T_2(11 - n_3) \} \} = \min_{n_3} \{ \max \{ 57, 40 \}, \max \{ 46, 45 \}, \max \{ 40, 55 \} \} = \min_{n_3} \{ 57, 46, 55 \} = 46$$

$$N=12:$$

$$T_3(12) = \min_{n_3} \{ \max \{ t_3(n_3), T_2(12 - n_3) \} \} = \min_{n_3} \{ \max \{ 57, 37 \}, \max \{ 46, 40 \}, \max \{ 40, 45 \}, \max \{ 35, 55 \} \} = \min_{n_3} \{ 57, 46, 45, 55 \} = 45$$

Tabela 4

Minimalno vreme opsluživanja za date uslove angažovanja posle treće, poslednje faze

N	$n_1(N)$	$T_1(N)$	$n_2(N)$	$T_2(N)$	$n_3(N)$	$T_3(N)$
3	3	55	—	—	—	—
4	4	45	—	—	—	—
5	5	37	—	—	—	—
6	6	32	3	55	—	—
7	7	30	3	45	—	—
8	—	—	3	40	—	—
9	—	—	4	37	3	57
10	—	—	4	33	4	55
11	—	—	5	32	4	46
12	—	—	5	30	5	45

Nakon završene treće, poslednje faze proračuna stanje raspodele resursa dobija novi, završni oblik prikazan u tabeli 4.

Tabela 4 otkriva i optimalni rezultat postavljenog problema opsluživanja tri aviona na pristanišnoj platformi. Minimalno vreme opsluživanja ova tri aviona sa 12 radnika iznosi 45 minuta, a ono se postiže samo ukoliko se na avionu C angažuje 5 radnika. Prema tome, za avion A i B ostaje samo 7 radnika. Pošto je u slučaju angažovanja 7 radnika na poslovima opsluživanja ova dva aviona optimalno vreme 45 minuta, i to tako da se za avion B angažuje 3 radnika, a za avion A preostala 4 radnika, optimalna raspodela radnika za ova tri aviona iznosiće: $A=4$, $B=3$, $C=5$. Na taj način rešen je problem optimalne raspodele resursa na postavljenom primeru.

Istom metodologijom može se rešiti mnogo obimniji zadatak. Međutim, za takve zadatke dovodi se u pitanje vreme potrebno da se dođe do određene raspodele. Pomoću računara moguće je doći do optimalne raspodele veoma obimnih zadataka za neuporedivo kraće vreme nego što je to bilo potrebno za navedeni primer.

Program sa zavidno brzom evolucijom, predviđen prvenstveno za tabelarne proračune, pod nazivom *Microsoft Excel*, pravi je izbor za automatizaciju proračuna problema analognih postavljenom. Program *Excel 97* zasniva se na ćelijama unutar tabele i zavisnosti između njih. Samim tim je projektovanje tabele u *Excel-u*, slične tabeli 3, sa uzajamnim zavisnostima između ćelija veoma blisko i prihvatljivo već iznetom numeričkom primeru.

Realizacija postavljenog algoritma zahteva viši stepen poznavanja *Excel 97*. Da bi se ispoštovala potpuna automatizacija proračuna optimalne raspodele resursa neophodno je kreirati makroe (potprogramme) koji će izvršavati nestandardne radnje unutar

programa. Za njihovo kreiranje služi programski jezik *VBA (Microsoft Visual Basic for Application)* koji se zasniva na popularnom programskom jeziku *Visual Basic*.

Projektovani program za ovu vrstu zadataka pod nazivom *OPSLUGA 1.0* sastoji se od dve stranice (Sheet). Prva stranica se naziva »Podaci«, a druga »Rezultat«. Na prvoj stranici ove *Excel* aplikacije unose se neophodni podaci za odgovarajući proračun. Na toj stranici postoji ćelija za unos raspoloživog broja radnika, tabela za unos aviona, minimalnog i maksimalnog broja radnika po avionu i odgovarajuće vreme opsluživanja (analogno tabeli 1). Na prvoj strani nalazi se i taster za aktiviranje makroa »Dinamik«. Taj makro ima zadatak da izvrši kompletan proračun prema postavljenom algoritmu i da prikaže rezultate proračuna u tabelarnom obliku na sledećoj strani. Sledeća strana »Rezultat«, predstavlja prikaz rezultata dobijenog proračuna. Tu se na jednom mestu vidi kompletna tabela (analogna tabeli 4) sa svim rezultatima, stim što su optimalna rešenja predstavljena osenčenim ćelijama. Kompletan proračun, za manje dimenzioni problem, ne traje duže od jedne sekunde.

Ograničenja ovog programa odnose se na broj kolona unutar jedne strane koje predstavljaju broj aviona (broj faza dinamičkog programiranja). S obzirom na to da je broj tih kolona 255 i da je potrebno predstaviti u svakoj fazi broj angažovanih radnika i vreme opsluge, program *OPSLUGA 1.0* namenjen je za obradu do 127 aviona. Ukoliko bi bilo potrebno da se radi sa većim brojem aviona program bi trebalo da pretrpi neznatne izmene.

Radi primera predstaviće se program *OPSLUGA 1.0* za grupu od $R=8$ aviona ($A, B, C_1, C_2, D, E_1, E_2$ i F). U grupi se nalaze po dva aviona tipa C i E . Broj radnika određen da opsluži ovu grupu aviona je $N=50$. Dodatno je definisano i to da jedan avion

File Edit View Insert Format Tools Data Window Help

Arial 10

H2 50

	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	F
1													
2		Rasplošivi broj radnika:		50									
3													
4													
5													
6													
7		u	3	4	5	6	7	8	9	10			
8		A	85	70	60	51	43	35	29	25			
9		B	60	51	43	38	35	32	29	27			
10		C ₁	72	60	51	43	36	30	27	25			
11		C ₂	72	60	51	43	36	30	27	25			
12		D	60	55	50	44	42	37	32	29			
13		E ₁	65	56	47	41	34	30	26	22			
14		E ₂	65	56	47	41	34	30	26	22			
15		F	50	45	41	38	34	31	28	25			
16													
17													

Podaci / Rezultat

Ready

Sl. 2 — Izgled strane »Podaci«

File Edit View Insert Format Tools Data Window Help

Arial 8

D10 35

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
4			$u_1(N)$	$f_1(N)$	$u_2(N)$	$f_2(N)$	$u_3(N)$	$f_3(N)$	$u_4(N)$	$f_4(N)$	$u_5(N)$	$f_5(N)$	$u_6(N)$	$f_6(N)$	$u_7(N)$
5		3	3	85											
6		4	4	70											
7		5	5	60											
8		6	6	51	3	85									
9		7	7	43	3	70									
10		8	8	35	3	60									
11		9	9	29	3	60	3	85							
12		10	10	25	4	51	3	72							
13		11			4	51	4	70							
14		12			5	43	4	60	3	85					
15		13			5	43	4	60	3	72					
16		14			6	38	4	60	3	72					
17		15			7	35	5	51	4	70	3	85			
18		16			7	35	5	51	4	60	3	72			
19		17			8	32	5	51	4	60	3	72			
20		18			9	29	6	43	4	60	3	70	3	85	
21		19			9	29	6	43	4	60	3	60	3	72	
22		20			10	27	6	43	5	51	3	60	3	72	
23		21					7	38	5	51	3	60	3	70	3
24		22					7	36	5	51	3	60	3	65	3
25		23					8	35	5	51	3	60	4	60	3

Podaci / Rezultat

Ready

Sl. 3 — Izgled strane »Rezultati«

Zavisnost vremena opsluživanja od broja angažovanih radnika

n	3	4	5	6	7	8	9	10
A	85	70	60	51	43	35	29	25
B	60	51	43	38	35	32	29	27
C ₁	72	60	51	43	36	30	27	25
C ₂	72	60	51	43	36	30	27	25
D	60	55	50	44	42	37	32	29
E ₁	65	56	47	41	34	30	26	22
E ₂	65	56	47	41	34	30	26	22
F	50	45	41	38	34	31	28	25

može da opslužuje najmanje $u_k' = 3$ i najviše $u_k'' = 10$ radnika. Vreme opsluživanja $u_k(g_k)$ dato je u tabeli 5.

Kada se podaci obrade u navedenom programu dobijaju se sledeći rezultati:

avion A: 8 radnika — 35 min
 avion B: 6 radnika — 38 min
 avion C₁: 6 radnika — 43 min
 avion C₂: 6 radnika — 43 min
 avion D: 7 radnika — 43 min
 avion E₁: 6 radnika — 43 min
 avion E₂: 6 radnika — 43 min
 avion F: 5 radnika — 43 min

Zaključak

Postavljeni problem opsluživanja grupe aviona na pristanišnoj platformi aerodroma, što obavlja određeni broj radnika, sasvim se uspešno može rešavati tehnikom dinamičkog programiranja. Problem se može svesti pod obrazac raspodele ograničenih resursa. Posle definisanja funkcionalne jednačine i projektovanja programa za računarsku mašinu veoma brzo je mo-

guće doći do optimalne raspodele radnika za avione iz definisane grupe. Na taj način postiže se raspodela radnika koja omogućava najefikasniju realizaciju postavljenog zadatka, tj. opsluživanje grupe aviona za što kraće vreme.

Za računarsku realizaciju datog algoritma kao osnova poslužio je programski paket *Excel 97*. U navedenom programu kreirana je konkretna aplikacija sa intervencijom u obliku makroa programiranog u *Microsoft Visual Basic for Application*. Projektovani aplikacioni program pokazao se kao dobar alat za dati proračun. On omogućava pronalaženje optimalne raspodele resursa u vremenu manjem od jedne sekunde i to na računarskoj platformi minimalnih zahteva za dati program (PC-486 sa 16Mb RAM-a). Mogućnost instalacije programa na standardnom personalnom računaru omogućava širok spektar upotrebe softvera. Program je vrlo lako moguće prilagoditi i standardnoj (aditivnoj) rekurentnoj formuli dinamičkog programiranja sa narastajućom potrošnjom resursa.

Doprinos ovog rada nije samo u dobijenom aplikacionom programu kojim se mogu rešavati srodni problemi, već i u tome što dobijeni rezultati mogu da ukažu i na jasno povećanje produktivnosti (smanjenje vremena opslu-

živanja) uvođenjem timskog načina opsluživanja u VTSl. Na kraju, treba istaći i to da je postavka funkcionalne jednačine (5) ključni doprinos za rešenje postavljenog problema.

Literatura:

- [1] Babić, O.: Optimizacija posluživanja aviona na pristanišnoj platformi aerodroma, doktorska disertacija, Saobraćajni fakultet, Beograd, 1986.
- [2] Bellman, R. E., Dreyfus, S. E.: Applied Dynamic Programming, Princeton University Press, Princeton, 1962
- [3] Guberinić, S., Matejić, V., Mikić, O., Petrović, R.: Sistemi, upravljanje sistemima, sistemske discipline, tehnike i metode — Leksikon pojmova sa tumačenjima, Institut »Mihailo Pupin«, Beograd, 1970
- [4] Lerner, A. J.: Principi kibernetike, ICS, Beograd, 1975.
- [5] Taha, H. A.: Operations Research An Introduction, The Macmillan Company, New York, 1971.

Miroslav Radosavljević,
major, dipl. inž.
Vojnotehnička akademija VJ,
Beograd

RAČUNARSKA REALIZACIJA SISTEMA SAMONAVOĐENJA TORPEDA NA TRAG BRODA

UDC: 623.946.3:681.32

Rezime:

U članku je analizirana mogućnost zamene postojećeg uređaja za samonavođenje torpeda na trag broda računarskim komponentama. U postupku predloga nove konfiguracije, prikazana je logika rada postojećeg uređaja sa blok-šemom i putanjom koju torpeda napravi vođen signalima glave za samonavođenje. Kao sinteza data je nova blok-šema uređaja za samonavođenje, čiju osnovu predstavlja mikrokontroler.

Ključne reči: projektil, hardver, softver, dijagram toka, samonavođenje torpeda.

COMPUTER REALIZATION OF A SYSTEM FOR TORPEDO HOMING ON A VESSEL PATH

Summary:

The possibility to replace an existing torpedo homing device by computer components has been analyzed in the paper. The operating principle of the existing device has been presented together with its block-diagram as well as the path of a torpedo guided by homing head signals. The new configuration has introduced, as a synthesis, a new block-diagram of a homing device based on a microcontroller.

Key words: projectile, hardware, software, flow chart, torpedo homing.

Uvod

Projektili u najširem smislu, predstavljaju uređaje koji imaju sposobnost da, prema unapred određenoj trajektoriji, dođu do željene tačke u prostoru. Kretanje po zadatoj putanji odvija se sopstvenim pogonom i komandama koje generišu uređaji za vođenje. Samonavođenje se ostvaruje na različite načine, a najčešće obradom informacija, skoncentrisanih u nekoj vrsti signala, koje su imale kontakt sa ciljem. Veza sa ciljem ostvaruje se putem reflektovanih signala ili signalima koje on emituje. Reflektovani signali su deo emitovane

energije predajnika projektila, koji su odbijeni od cilja. Signali koje emituje cilj primaju se pomoću nekog senzora, a najčešće nastaju kao posledica rada pogona cilja.

Najčešći mediji kroz koje se projektili kreću su voda i vazduh. Razlika između projektila ogleda se, pre svega, u fizičkim zakonima koji se koriste za samonavođenje, motorima za pogon, izvršnim uređajima i sl.

U ovom radu pažnja je posvećena torpedima koji se kreću kroz vodu, navodeći se na trag broda. Danas u svetu postoji veliki broj različitih vrsta torpeda koji se navode po signalima uređaja za samonavođenje. Oni

su i po konstrukciji vrlo različiti. Razlike se ogledaju u korišćenju različitih fizičkih polja i načinu ostvarivanja kretanja po unapred određenoj putanji. Sigurno je da je navođenje na trag broda veoma karakteristično i specifično za torpedo. Ova vrsta navođenja obrađena je u ovom radu sa aspekta zamene dela postojećih blokova računarskim komponentama.

Uređaj za samonavođenje torpeda na trag broda

Uređaj za samonavođenje treba da, u završnom delu putanje, na osnovu detekcije traga broda i ugrađene sopstvene logike dovede torpedo do cilja. U radu je potpuno samostalan i pouzdan. Sastoji se od sledećih celina:

- hidrofona primopredajnika,
- bloka napajanja,
- bloka generatora impulsa,
- bloka prijemno-pojačivačkog uređaja,
- bloka ograničavača uglovnih brzina i davača impulsa,
- bloka logičkog uređaja.

Hidrofoni primopredajnika

Hidrofon primopredajnika ugrađen je na omotaču glave za samonavođenje. Osnovna uloga predajnog hidrofona jeste da pretvori električne signale iz predajnika u ultrazvučne i emituje ih u prostor vodene okoline. Prijem ultrazvučne energije iz okolnog vodenog prostora i pretvaranje u električni signal obavlja prijemni hidrofon. Ultrazvučni signal emituje se vertikalno naviše ka morskoj površini. Ukoliko je na svom putu naišao na turbulentno kretanje vode, ultrazvučni signal se reflektuje, pri čemu se menja njegova dužina trajanja. Detekcija reflektovanog signala je detekcija razlike dužine njegovog trajanja u odnosu na emitovani signal. Dijagram zra-

čenja predajnog i prijemnog hidrofona je usko usmeren i iznosi svega nekoliko lučnih stepeni.

Blok napajanja

Blok napajanja služi da na osnovu osnovnog napajanja koje postoji u torpedu obezbedi potrebne napone za rad blokova, kao i za formiranje izvršnih komandnih signala kormilima.

Blok generatora impulsa

Osnovna uloga generatora impulsa jeste da generiše impulse za sinhronizaciju rada kompletnog uređaja, strob impulsa koji otvara predajnik i prijemnik. On sadrži oscilator i pojačavački stepen sa izlaznim stepenom.

Blok prijemno-pojačivačkog uređaja

Osnovni zadatak prijemno-pojačivačkog uređaja jeste da nakon početka rada uređaja za samonavođenje izvrši samopodešavanje, a u osnovnom modu rada analizira reflektovane signale i predaje informacije o postojanju traga broda koji se prati.

Samopodešavanje primopredajnika podrazumeva podizanje osetljivosti prijemnika iznad nivoa reflektovanih signala okoline i anuliranje prijema signala nastalih refleksijom od površine mora. Nakon samopodešavanja primopredajnik obrađuje reflektovane signale od traga broda.

Blok ograničavača uglovnih brzina i davač impulsa

Ograničavač uglovnih brzina i davač impulsa namenjen je za ograničavanje uglovnih brzina zakreta torpeda i predaju impulsa koji predstavljaju zakret torpeda.

Sastoji se od bloka napajanja, davača uglovne brzine, ograničavača uglovne brzine i davača impulsa.

Osa brzinskog žiroskopa, koji ima dva stepena slobode, usklađuje se sa osom prinudnog zakreta torpeda. Otklon kardanskog prstena žiroskopa proporcionalan je uglovnoj brzini prinudnog zakreta torpeda. Za kardanski prsten je mehanički čvrsto povezan klič potencijometra koji navedeno zakretanje pretvara u električne signale koji se odvođe u logički blok. Takođe, električni signali sa brzinskog žiroskopa upoređuju se sa referentnim naponima (svaki referentni napon predstavlja određenu dopuštenu ugaonu brzinu zakretanja torpeda) radi generisanja komandnih signala. Komandni signali neposredno utiču na izvršne organe torpeda čime se ostvaruje njegovo potrebno zakretanje u horizontalno ravni.

Blok logičkog uređaja

Blok logičkog uređaja namenjen je za:

- sinhronizaciju rada svih ostalih blokova uređaja samonavođenja,
- formiranje putanje torpeda,
- brojanje impulsa zakreta torpeda.

Ovaj blok je centralni u uređaju za samonavođenje. Na osnovu informa-



Sl. 1 — Blok-šema uređaja za samonavođenje torpeda na trag broda

cije o (ne)postojanju traga i položaju torpeda formira potrebne signale kojima se realizuje putanja torpeda, odnosno neprestano presecanje traga broda koji se prati.

Blok-šema uređaja za samonavođenje prikazana je na slici 1.

Uvod u rad uređaja za samonavođenje podvodnog projektila

Uređaj ima zadatak da vodi podvodni projektil pod vodom, koristeći trag broda kao osnovni podatak za navođenje.

Oblik putanje projektila koji se navodi na trag broda i koji će u radu biti razmatran prikazan je na slici 2.

Nakon lansiranja projektil se kreće (na sopstveni pogon koji radi nezavisno od uređaja koji se razmatra) pod vodom. Algoritam samonavođenja odvija se po određenim fazama.

Prvo presecanje traga broda

Kada se projektil nađe ispod traga broda — laminarnog kretanja vodene mase, formira se signal koji se naziva PT (pod tragom). Signal PT formira se ukoliko je od određenog broja uzastopno emitovanih signala primljen potreban broj reflektovanih signala. Dalje kretanje projektila nastavlja se po tangenti (na slici je to predstavljeno pravim linijama) na ugao koji je imao do ulaska u brazdu. Kretanje po tangenti ostvaruje se do izlaska iz brazde broda, a signal koji će se tada formirati naziva se ZT (završetak traga).

Prvi izlazak projektila iz brazde broda

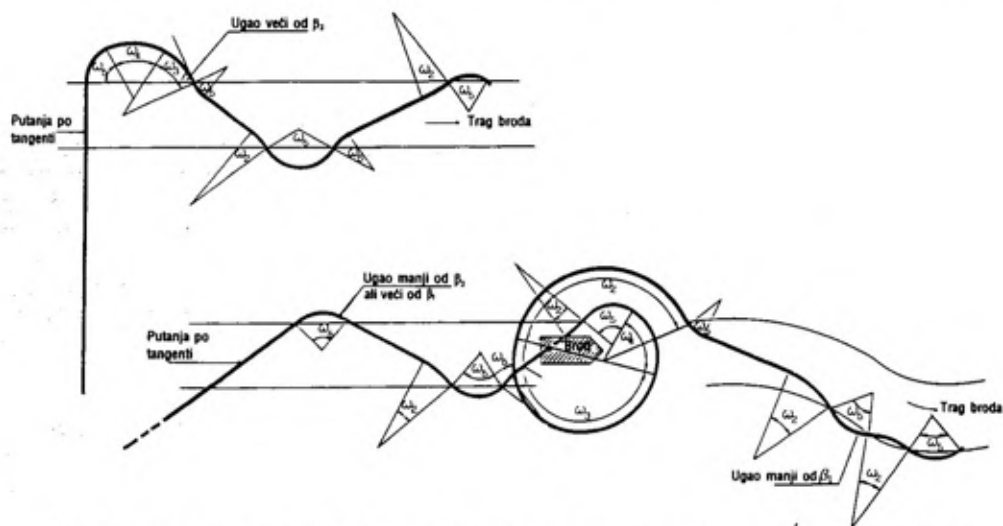
Signal ZT nastaje ukoliko od određenog broja uzastopno emitovanih signala postoji bar jedan reflektovani

signal manje od potrebnih za formiranje signala PT. To znači da je projektil napustio brazdu broda.

Sa formiranim signalom ZT počinje da se odrađuje signal SC (strana cilja). Ovaj signal unet je tokom pripreme projektila za lansiranje.

Sledeći ulasci projektila u trag broda

Ponovno formiranje signala PT označava da se projektil nalazi ispod traga broda. Dalje kretanje u — ispod traga broda zavisi od ugla kojim se



Sl. 2 — Putanje torpeda koja se navode po signalima glave za samonavođenje

Kada projektil počinje da se zakreće u stranu cilja (signal SC) vrši se detekcija lučnih stepeni zaokreta u horizontalnoj ravni. Formiranje sledećih signala obavlja se zakretanjem:

- po uglovima do α_1 ugaonom brzinom ω_3^1 ,
- po uglovima od α_1 do α_2 ugaonom brzinom ω_4 ,
- po uglovima od α_2 do α_3 ugaonom brzinom ω_3 ,
- po uglovima preko α_3 ugaonom brzinom ω_2 .

To su mogućnosti koje mogu da se pojave, što ne znači da će do zakretanja uvek dolaziti, a vrsta zakretanja zavisi od momenta presecanja traga broda.

¹ Na slici 2 uglovi zakretanja su predstavljeni sektorima u kojima se određuju odnosne ugaone brzine. Tako, na primer, za ugao α_1 odgovara ugaona brzina ω_3^1 .

torpedo kretalo neposredno pre ulaska u trag.

Ako je ugao zakreta van traga manji od β_1 (projektil je pre ulaska u trag imao zakretanje ω_5) formira se signal promena SC (CD ako je pre toga bio CL i obrnuto), sa ugaonom brzinom zakreta ω_2 . Ovakvo zakretanje traje sve dok se ne formira signal ZT (navođenje se obavlja na ivicu brazde). Ako je ugao zakreta van traga veći od β_1 ali manji od β_2 formira se signal T (kretanje po tangenti na ugao koji je bio do ulaska u trag).

Ako je ugao zakreta van traga veći od β_2 formira se signal promena SC (CD ako je pre toga bio CL i obrnuto), sa ugaonom brzinom zakreta ω_5 . Ovakvo zakretanje traje sve dok se brojač uglova zakreta ne vrati na β_1 posle čega se formira signal T.

Ako je projektil bio duže od unapred određenog vremena u — ispod tra-

ga broda, formira se signal SC (uzima se strana cilja koja je bila do ulaska projektila u brazdu), pri čemu se projektil zakreće ugaonom brzinom ω_2 . Ovakvo zakretanje traje sve dok se ne formira signal ZT.

Sledeći izlasci projektila van brazde broda

Kada se formira signal ZT dalje kretanje projektila van brazde broda odvija se na sledeći način: ako je ugao zakreta u tragu manji od β_1 (projektil je u tragu imao zakretanje ugaonom brzinom ω_2) formira se signal promena SC (CD ako je pre toga bio CL i obrnuto), a projektil se zakreće ugaonom brzinom ω_3 . Ovakvo zakretanje traje sve dok se ne formira signal PT (navođenje se obavlja na ivicu brazde).

Ako je ugao zakreta u tragu veći od β_1 prvo se formira signal promena SC (CD ako je pre toga bio CL i obrnuto), a dalje navođenje je identično kao i pri prvom izlasku iz — ispod brazde.

Kada se u brazdi broda formira signal ZT (postoje prekidi) tada je postupak sledeći: ako je ugao zakreta u prekidu traga manji od β_1 i ponovo dolazi signal PT formira se signal promena SC (CD ako je pre toga bio CL i obrnuto), a projektil se zakreće ugaonom brzinom ω_2 . Ovakvo zakretanje traje sve dok se ne formira signal ZT. Ako je ugao zakreta u prekidu traga veći od β_1 postupa se kao da je nastalo novo presecanje i postupa se prema šemi za sledeće izlaske projektila van brazde.

Ponovno traženje, drugi manevar projektila obavlja se zakretanjem:

- po uglovima do α_1 ugaonom brzinom ω_5 ,
- po uglovima od α_1 do α_2 ugaonom brzinom ω_4 ,
- po uglovima od α_2 do α_3 ugaonom brzinom ω_3 ,

— po uglovima preko α_3 ugaonom brzinom ω_2 do formiranja signala PT.

Kada se formira signal 270° — do formiranja signala 420° isključuje se indikatorski nivo (u tom periodu ne sme se formirati signal PT da bi se izbegla identifikacija sopstvenog traga).

Hardverska realizacija

Radi zamene postojećeg hardvera računarskom konfiguracijom neophodno je izučiti računarske komponente koje bi u potpunosti mogle da odgovore traženim zahtevima. U izboru računarskih komponenti mora se voditi računa da budu kompatibilne sa postojećim uređajima u torpedu. Nakon analize konkretnog stanja dolazi se do zaključka da je pogodnije primeniti mikrokontroler koji poseduje određeni hardver (ulazno-izlazne portove, tajmere, memoriju i slično) nego mikroprocesor kome se mora dodati neophodni hardver.

Blok-šema hardvera uređaja za samonavođenje

Blok-šema hardvera čiju okosnicu čini mikrokontroler prikazana je na slici 3. Predloženi hardver može u potpunosti zameniti postojeći uređaj za samonavođenje torpeda na trag broda. Po novoj šemi uređaj za samonavođenje sadrži:

- mikrokontroler,
- analogne ulazne referentne naponе,
- brzinski žiroskop,
- napon koji označava stranu cilja,
- digitalno-analogni konvertor,
- oscilator,
- blok za napajanje,
- uzemljenje.

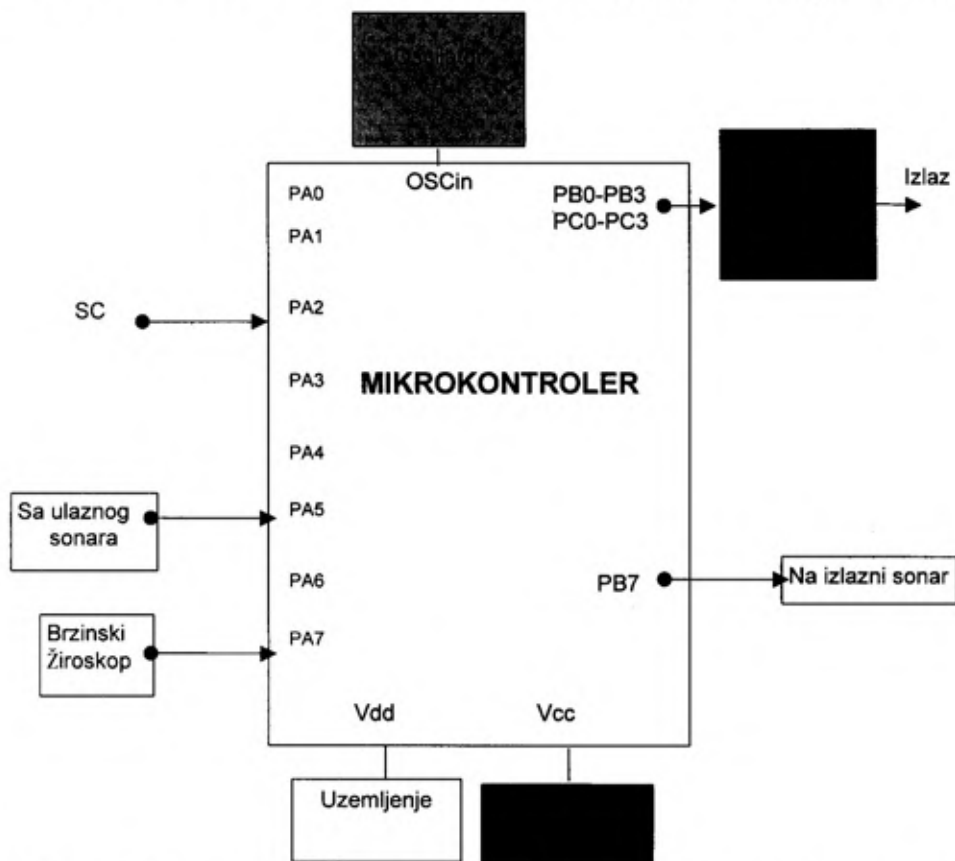
Izabrani mikrokontroler zamenjivao bi postojeći hardver (na slici 1 šrafirano) koji se sastoji od:

- logičkog bloka,
- bloka generatora impulsa,
- bloka ograničavača uglovnih brzina i davača impulsa,
- prijemnog bloka.

Na osnovu opisanog rada uređaja za samonavođenje može se izraditi dijagram toka koji će u potpunosti zameniti funkcije postojećih blokova prikazanih (šrafirano) na slici 1. Novoformirani hardver na slici 3 softverski će analizirati primljene signale i, na osnovu pravila koja se unapred definišu, formirati komandne signale. Izvršni organi torpeda, izvršavajući komandne signale, zakreće torpeda,

formirajući na taj način putanju prikazanu na slici 2.

Analizom se može zaključiti da sve navedene funkcije uspešno može da izvrši mikrokontroler THOMPSON ST6265B [1, 2], koji ima mašinski ciklus 1,625 μ s, a dinamika postojećeg hardvera je reda ms. To znači da se potrebna dinamika samonavođenja torpeda može u potpunosti izvršavati, a biće moguće da se izvrše i neke druge funkcije, kao što su: regulacija broja obrtaja turbine, kontrola napona napajanja na glavnim vodovima, kontrola pritiska unutar torpeda, kontrola smeše za pogon torpeda i sl., koje se na postojećem sistemu za sada ne obavljaju. Mikrokontroler THOMPSON ST6265B poseduje multiplexer i A/D konvertor za konverziju 13 različitih



Sl. 3. — Blok-šema mikrokontrolerskog uređaja za samonavođenje torpeda na trag broda

analognih napona. Analogni napon dovodi se na nožice mikrokontrolera, a time i na multiplexer, a zatim, po određenom redu, na A/D konvertor. Selekcija pojedinih priključaka za analogne ulaze (od svih mogućih), obavlja se konfiguracijom postojećih ulazno-izlaznih portova (ima ih tri). A/D konvertor ima osmobaritnu rezoluciju i vreme konverzije 70 μ s.

Pošto mikrokontroler daje izlazne signale u logičkom obliku, neophodno je da se izvrši njihova transformacija u analogne napone koje treba odvesti u uređaj za vođenje torpeda po pravcu. Za te potrebe mora se ugraditi digitalno-analogni konvertor. Predlaže se da to bude AD558DAC, čije karakteristike odgovaraju zahtevima rada uređaja torpeda. On se priključuje na izlazni port B i C linije PB0—PB3 i PC0—PC3.

Zaključak

Predložena šema hardverske podrške samonavođenja projektila na trag broda je ostvarljiva. Osnovna prednost datog rešenja je u jednostavnosti hardvera i u njegovoj niskoj ceni. Ostale prednosti su:

- male dimenzije;
- jednostavno održavanje;
- mala cena i mogućnosti nabavke mikrokontrolera na slobodnom tržištu;

Literatura:

- [1] ST6260B/ST6265B Data Book 3rd Edition SGS — THOMSON Microelectronics, July, 1994.
- [2] AST6/LST6 Macro — assembler Linker For the ST Family Of Microcontrollers, User manuel, July, 1993.

— siguran rad, odnosno mala verovatnoća otkaza u toku rada;

— vreme rada u toku eksploatacije i ispitivanja nije ograničeno kao sa postojećim hardverom;

— mogućnost dogradnje više modova rada sa malim ulaganjima. Moralo bi se ulagati jedino u dogradnju primopredajnika, pri čemu se mikrokontroler ne bi menjao. U slučaju potrebe zamene mikrokontrolera njegova cena je mnogo manja u odnosu na kupovinu novog sredstva;

— na račun smanjenja gabarita uređaja samonavođenja mogli bi se povećati neki drugi resursi (na primer, količina eksploziva, količina energenata za pokretanje i sl.).

Predloženo rešenje ima i mane koje se, pre svega, ogledaju u vremenu koje je potrebno za razvoj, načinu i potrebi angažovanja skupih materijalnih sredstava u toku ispitivanja i sl. Verovatno postoje i drugi nedostaci, ali su oni mnogo manji u odnosu na kvalitet koji bi se dobio.

U radu je prikazan samo način na koji se problem može rešiti, a konkretna realizacija zahteva dodatna i potpunija objašnjenja. Radi približavanja rada konkretnom problemu trebalo bi posebno objasniti konfigurisanje mikrokontrolera i izradu softvera.

- [3] Willis J. Tompkins, John P. Webster: Interfacing Sensors To the IBM PC, Brentce Hill New Jersey, 1988.

- [4] Zivković, D., Popović, M.: Impulsna i digitalna elektronika, Nauka, Beograd, 1993.

Dr Slavko Pokorni,
pukovnik, dipl. inž.
Vojna akademija VJ,
Beograd

GREŠKA ODREĐIVANJA EMISIVNOSTI POVRŠI ČVRSTIH MATERIJALA IC KAMEROM

UDC: 535.247-15:681.785.6

Rezime:

Određivanje temperature IC termovizijskom kamerom bitno zavisi od poznavanja emisivnosti materijala čija se temperatura određuje. Podaci o emisivnosti materijala mogu se naći u priručnicima, ali mogu znatno odstupati od stvarnih vrednosti. Zbog toga je do podatka o emisivnosti potrebno doći merenjem na stvarnom materijalu. Emisivnost materijala moguće je odrediti istim IC sistemom kojim se određuje temperatura. U radu je izveden matematički model određivanja emisivnosti, a zatim izvedena i analizirana funkcija greške određivanja emisivnosti čvrstih materijala pomoću IC kamere THERMOVISION 870SWB firme Agema, koja radi u spektralnom opsegu 2 do 5 μm . Predstavljeni su rezultati analize standardne relativne greške i parcijalnih grešaka određivanja emisivnosti površi čvrstih materijala, koji ukazuju na mogućnost modeliranja uslova koje treba obezbediti radi postizanja potrebne tačnosti određivanja emisivnosti IC kamerom.

Ključne reči: emisivnost, matematički model, greška merenja, IC zračenje, IC kamera, termovizija.

ERROR IN SOLID SURFACE EMISSIVITY DETERMINATION BY AN IR CAMERA

Summary:

Determination of temperature by IR thermal cameras depends significantly on the knowledge about the emissivity of solids in question. Solids emissivity data can be found in handbooks but can also considerably differ from real values. It is therefore necessary to obtain emissivity data by measurements taken on real materials. Solids emissivity can be determined by the same IR system used for temperature determination. A mathematical model for emissivity determination is derived in the paper as well as the function of error in determining solid materials emissivity by the 870SWB Agema IR THERMOVISION camera with 2–5 μm spectral range. The standard relative error and partial errors in determining emissivity of solid surfaces are analyzed and the obtained results point out to the possibility to model conditions necessary for acquiring demanded accuracy in emissivity determination.

Key words: emissivity, mathematical model, measurement error, IR radiation, IR camera, thermal imaging.

Uvod

Termovizija se, osim za otkrivanje maskiranih objekata, vizuelizaciju objekata u noćnim uslovima, snimanje signature aviona i slično, može pri-

meniti i za merenje temperature. Dok je u prvom slučaju, gde je cilj dobijanje termalne slike, potrebno utvrditi samo da li su dve susedne tačke međusobno toplije ili hladnije, pri čemu nije toliko značajno i koliko je stvar-

no neka tačka toplja, u drugom slučaju, pri merenju stvarne temperature objekta, potrebno je kvantitativno odrediti (proračunati) vrednost temperature na osnovu intenziteta infracrvenog (IC) zračenja koje registruje IC senzor, odnosno IC kamera.

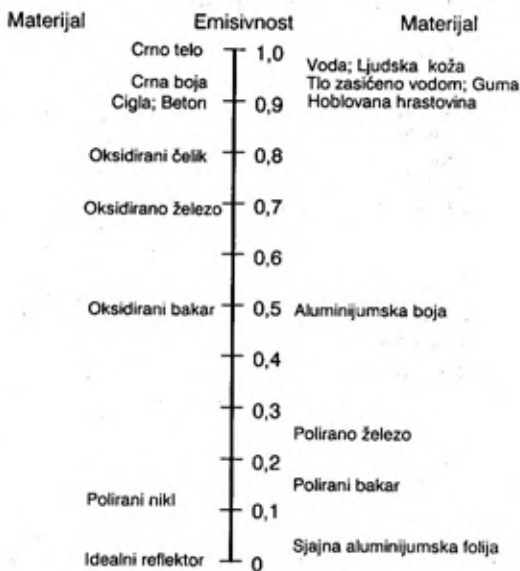
Određivanje temperature na osnovu merenja fluksa IC zračenja pripada grupi indirektnih metoda merenja, pri čemu se koristi odgovarajući matematičko-fizički model za proračun temperature, koji povezuje temperaturu objekta sa direktno merenim veličinama [1]. Pri određivanju temperature objekta IC kamerom, emisivnost objekta je jedna od direktno merenih veličina, a pokazalo se da greška određivanja temperature znatno zavisi od poznavanja emisivnosti materijala čija se temperatura određuje [1, 2]. Podaci o emisivnosti materijala koji se mogu naći u priručnicima mogu biti prilično nepouzdana, zbog toga što nisu u dovoljnoj meri precizirani uslovi pod kojima su dobijeni pa njihovo korišćenje može dovesti do značajne greške. Zbog toga je do podataka o emisivnosti potrebno doći merenjem na objektu na kojem se meri temperatura. Za određivanje emisivnosti objekta može se primeniti isti IC sistem koji se koristi za određivanje temperature, ako se temperatura objekta smatra direktno merenom veličinom, odnosno ako je poznata ili se izmeri nekom metodom. Prema tome, i određivanje emisivnosti na ovaj način pripada grupi indirektnih merenja i greška određivanja emisivnosti zavisi od kompletnosti, odnosno greške modela (metodska greška) i od greške direktno merenih veličina (instrumentalne greške).

Zbog toga je, koristeći isti pristup kao pri analizi greške određivanja temperature IC kamerom [3], izveden matematički model određivanja emisivnosti u funkciji direktno merenih veličina i parametara kamere THERMOVISION 870SWB, a zatim izvedena i analizirana funkcija greške određivanja emisivnosti primenom iste IC kamere. Izvedena funkcija greške omo-

gućuje modeliranje uslova merenja koji obezbeđuju postizanje prihvatljive greške određivanja emisivnosti površi čvrstih materijala.

Karakteristike emisivnosti materijala

Intenzitet infracrvenog zračenja materijala zavisi, prema Plankovom i Štefan-Bolcmanovom zakonu, od temperature tela i od emisivnosti njegove površi. Emisivnost materijala zavisi od vrste materijala. Sva realna tela imaju emisivnost manju od jedan (slika 1). Dielektrici imaju veću emisivnost od provodnih materijala, uglavnom veću od 0,5 a veliki broj dielektrika ima emisivnost veću od 0,9. Metali imaju emisivnost manju od 0,5, osim ako im površ nije korodirala ili je premazana nekim dielektričnim materijalom, na primer bojom. Metali sjajne površi imaju vrlo malu emisivnost, često ispod 0,1. Očigledno je da se emisivnost materijala mora uzeti u obzir u relaciji koja povezuje količinu zračenja i temperaturu površi materijala, jer bi se u protivnom moglo



Sl. 1 — Vrednosti emisivnosti različitih materijala

desiti da se, zavisno od vrednosti emisivnosti konkretnog materijala, temperatura odredi sa velikom greškom.

Podaci o emisivnosti materijala se mogu naći u priručnicima, kao na primer u [4]. Međutim, i emisivnost istog materijala zavisi od niza faktora [5], kao što su spektralni opseg zračenja, temperatura, ugao zračenja, stanje površi materijala (hrapavost, premazi, zaprljanost uljem i gareži i slično). Ti faktori obično, za potrebe preciznog određivanja temperature IC kamerom, nisu dovoljno precizno specifikirani u podacima o emisivnosti u priručnicima, pogotovo stanje površi materijala. Zbog toga su nepouzdati i njihovo korišćenje može dovesti do velike greške u određivanju temperature. Podatak o emisivnosti uzet iz priručnika, i stvarna emisivnost površi materijala može se razlikovati i po nekoliko puta (posebno zbog uticaja stanja površi materijala), što unosi veliku grešku.

Postoje mogućnosti analitičkog predviđanja emisivnosti materijala, ali su isto tako ograničene [6]. Prema tome, do podatka o emisivnosti materijala potrebno je doći merenjem upravo na materijalu čija se temperatura meri i, po mogućnosti, IC senzorom kojim se temperatura određuje.

Određivanje emisivnosti IC kamerom kojom se određuje i temperatura pogodno je zbog toga što se tada podatak o emisivnosti dobija upravo u spektralnom opsegu u kojem radi IC sistem za merenje temperature, a takav je i neophodan kao ulazni podatak u matematički model za proračun temperature koja se određuje na osnovu IC zračenja materijala [1].

Kod čvrstih materijala kod kojih emisivnost ima vrednost manju od jedan koeficijent refleksije je, u skladu sa Kirhofovim zakonom, jednak razlici broja jedan i emisivnosti. To znači da što je manja emisivnost to se više toplotnog zračenja iz okoline reflektuje od površi objekta. Zbog toga je je-

dan od ključnih problema primene termovizije i radijacionih termometara za merenje temperature — kako odrediti stvarnu temperaturu tela sa nepoznatom emisivnošću i nepoznatim zračenjem iz okoline [7, 8, 9].

IC sistem sa kamerom THERMOVISION 870SWB

Merna aparatura korišćena u ovom radu predstavlja termovizijski sistem THERMOVISION 870SWB, švedske firme Agema, čiji su namena i sastav opisani u [3].

Laboratorijska konfiguracija termovizijskog mernog sistema THERMOVISION 870SWB obuhvata:

- IC kameru koja radi u SWB (Short Wave Band) kratkotalasnom IC spektralnom opsegu 2 do 5 μm sa termoelektrično hlađenim SPRITE IC detektorom;

- upravljačko-pokazivačku (display) jedinicu,

- personalni računar sa odgovarajućim interfejsima i softverom za snimanje i analizu termičkog stanja i proračun stvarne temperature objekta (Temperature Image Computer — TIC-8000),

- kolor printer.

Osetljivost kamere je, prema podacima proizvođača [10], $0,1^{\circ}\text{C}$ na 30°C temperature objekta, a tačnost $\pm 2\%$ ili $\pm 2\text{ K}$. Može da meri temperature od 253 K do 723 K bez primene filtera, odnosno do 1773 K uz njegovu primenu. Rezolucija iznosi 90 elemenata po liniji, mereno na 50 % modulacije.

Termovizijski sistem THERMOVISION 870SWB omogućuje trenutno određivanje (merenje) temperature velikog broja tačaka površi nekog objekta. Pored vrednosti temperature svake tačke omogućuje prikazivanje profila temperature duž željene linije, ra-

spodelu temperature i praćenje dinamike promene temperature u realnom vremenu. To je omogućeno povezivanjem personalnog računara u termovizijski sistem i odgovarajućim softverom. Funkcije softvera mogle bi se svrstati u četiri grupe:

- kvantitativni proračun stvarne temperature objekta;
- detaljna obrada i dijagnostika termograma;
- zapis, skladištenje i korišćenje zapisanih termograma;
- upoređenje termograma.

Situacija pri merenju, koja je poslužila za formiranje matematičkog modela određivanja emisivnosti površi čvrstih materijala IC kamerom THERMOVISION 870SWB, švedske firme Agema i za analizu greške, predstavlja situaciju pri merenju temperature datu u [3], s tom razlikom što je sada emisivnost indirektno, a temperatura objekta direktno merena veličina.

Matematički model određivanja emisivnosti IC kamerom

Polazeći od relacije za termički ekvivalent koji odgovara ukupnom fluksu IC zračenja koji prima detektor senzora kamere, date u [3], za emisivnost površi materijala objekta može se napisati sledeća relacija:

$$\epsilon_o = \frac{I_e - \tau I_a - (1 - \tau) I_{atm}}{\tau (I_o - I_a)} \quad (1)$$

gde je:

- ϵ_o — emisivnost objekta;
- I_e — termički ekvivalent ukupnog zračenja koje prima senzor,
- I_o — termički ekvivalent zračenja površi objekta (zavisí od temperature objekta T_o i ϵ_o);
- I_a — termički ekvivalent zračenja okoline (zavisí od temperature okoline T_a);

I_{atm} — termički ekvivalent zračenja medija prostiranja — atmosfere (zavisí od temperature atmosfere T_{atm} i τ);

τ — transmitivnost medija prostiranja (atmosfera).

Kao što je objašnjeno u [3], signal detektora (termički ekvivalent) jeste funkcija temperature koja se određuje kalibracijom IC kamere. Za termovizijsku kameru THERMOVISION 870, firma Agema, ova zavisnost ima isti oblik [10]:

$$I = \frac{R}{\frac{B}{e^T} - F} \quad (2)$$

Kalibracione konstante R , B , F zavise od tipa IC detektora, otvora objektiva IC kamere, otvora dijafragme (aperture) i vrste filtera [10]. Za IC kameru THERMOVISION 870SWB, serijski broj 4131, otvor objektiva 12° , bez filtera i za otvore dijafragme 0, 1 i 2, podaci o konstantama R , B i F prikazani su u tabeli 1.

Tabela 1

Podaci za konstante R , B i F

Otvor dijafragme	Konstante		
	R	B	F
0	456600	2942	-170
1	94230	3031	-25.3
2	22560	3237	0.38

Kao i pri određivanju temperature, relacija (2) važi za bilo koju komponentu termičkog ekvivalenta zračenja, uključujući i termički ekvivalent ukupnog zračenja. Na primer, ako se radi o termičkom ekvivalentu zračenja površi materijala objekta termički ekvivalent u relaciji (2) predstavlja termički ekvivalent I_o , a temperatura, u relaciji (2), predstavlja temperatu-

ru površi objekta T_o . Slično važi za vezu termičkog ekvivalenta zračenja oko line I_a i temperature okoline T_a , odnosno termičkog ekvivalenta zračenja atmosfere I_{atm} i temperature atmosfere T_{atm} . Ako se radi o termičkom ekvivalentu ukupnog zračenja onda termički ekvivalent u relaciji (2) predstavlja I_e , a temperatura predstavlja neku prividnu temperaturu T_{priv} . Termički ekvivalent ukupnog zračenja I_e meri se IC kamerom, a temperature T_o , T_a i T_{atm} odgovarajućim instrumentom. Temperatura površi objekta T_o može se meriti i IC kamerom ako postoji na objektu deo površi poznate emisivnosti. Prema tome, emisivnost objekta ϵ_o može se izraziti u zavisnosti od direktno merenih veličina, tj.:

$$\epsilon_o = f(I_e, T_a, T_{atm}, T_o, \tau) \quad (3)$$

Transmitivnost atmosfere τ takođe se smatra direktno merenom veličinom, iako se u ovom slučaju ne meri već izračunava na osnovu semiempirijske relacije [10]:

$$\tau = e^{[-\alpha(\sqrt{d_o} - \sqrt{d_{cal}}) - \beta(d_o - d_{cal})]} \quad (4)$$

U relaciju (4) ulaze veličine: udaljenost objekat—kamera d_o , koja se meri, kalibraciona udaljenost d_{cal} i odgovarajuće konstante α i β koje zavise od korišćenog filtera.

Ako se sve to ima u vidu, zamenom relacije (2) u relaciju (1), umesto vrednosti termičkih ekvivalenata I_o , I_a i I_{atm} , za emisivnost objekta dobija se relacija u kojoj figurišu termički ekvivalent ukupnog zračenja I_e , i ostale direktno merene veličine T_o , T_a , T_{atm} i τ , u obliku:

$$\epsilon_o = \frac{I_e - \tau \frac{R}{\frac{B}{e^{T_a}} - F} - (1 - \tau) \frac{R}{\frac{B}{e^{T_{atm}}} - F}}{\tau \left(\frac{R}{\frac{B}{e^{T_o}} - F} - \frac{R}{\frac{B}{e^{T_a}} - F} \right)} \quad (5)$$

Greška određivanja emisivnosti IC kamerom

Na osnovu opštih relacija za grešku indirektnih merenja [11], standardna relativna greška određivanja emisivnosti IC kamerom e_{ϵ_o} izražava se relacijom:

$$e_{\epsilon_o} = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{1}{\epsilon_o} \frac{\partial \epsilon_o}{\partial x_j} e_{x_j} \right)^2} \quad (6)$$

gde je:

x_j — direktno merene veličine (I_e , T_a , T_{atm} , T_o , τ),

e_{x_j} — relativne instrumentalne greške direktno merenih veličina x_j ,

$m = 1, \dots, 5$ ($1=I_e$, $2=T_a$, $3=T_{atm}$, $4=T_o$, $5=\tau$).

Parcijalni izvodi koji ulaze u relaciju za relativnu grešku (6) prikazani su u tabeli 2. Prikazane relacije važe za senzore definisane izrazom (2).

Izvedena funkcija greške omogućava proračun greške, analizu određenih faktora i modeliranje uslova merenja radi postizanja potrebne tačnosti određivanja emisivnosti.

Analiza greške određivanja emisivnosti IC kamerom

Analiza greške direktno merenih veličina

Analiza relacija u tabeli 2, koje ulaze u relaciju (6), za grešku određivanja emisivnosti čvrstih materijala pokazuje da greška određivanja emisivnosti IC kamerom zavisi od sledećih direktno merenih veličina i njihovih instrumentalnih i metodskih grešaka:

— termički ekvivalent ukupnog fluksa zračenja I_e i greške kojom se on meri;

— temperatura objekta T_o , i greške kojom se ona meri;

— temperatura okoline T_a i greške kojom se ona određuje (procenjuje) ili meri;

— temperatura atmosfere T_{atm} i greške kojom se ona meri;

— transmitivnost atmosfere τ i greške kojom se ona određuje (proračunava);

— emisivnost objekta ϵ_0 koja se određuje (proračunava) prema relaciji (5),

— kalibracione konstante sistema.

Tabela 2

Parcijalni izvodi za relaciju (6)

m	Direktno merena veličina x_j	Parcijalni izvod $\frac{\partial \epsilon_0}{\partial x_j}$
1	I_s	$\frac{1}{\tau D}$
2	T_s	$\frac{(\epsilon_0 - 1)BR \cdot e^{(B/T_s)}}{DT_s^2(e^{(B/T_s)} - F)^2}$
3	T_{atm}	$\frac{(\tau - 1)BR \cdot e^{(B/T_{atm})}}{\tau DT_{atm}^2(e^{(B/T_{atm})} - F)^2}$
4	T_o	$\frac{\epsilon_0 BR \cdot e^{(B/T_o)}}{DT_o^2(e^{(B/T_o)} - F)^2}$
5	τ	$\frac{I_{atm} - I_s - \epsilon_0 D}{\tau D}$

$$D = I_s - I_o$$

Greške određivanja svih ovih veličina analizirane su u [3] pri analizi greške određivanja temperature površi materijala pomoću IC senzora. Tada je emisivnost objekta predstavljala direktno merenu veličinu (na neki način poznatu ili merenu, kada je upravo i naznačen problem tačnosti poznavanja emisivnosti objekta), a temperatura objekta bila je veličina koja je određivana. U ovom slučaju je obrnuto — temperatura površi objekta je direktno merena veličina, pored ostalih u relaciji (5), a emisivnost površi objekta je veličina koja se određuje. Prema tome, i ovde važe zaključci u

vezi s greškama merenja svih direktno merenih veličina, osim temperature površi objekta i emisivnosti objekta.

Temperatura površi objekta, potrebna kao direktno merena veličina za određivanje emisivnosti, može se meriti na više načina, počevši od kontaktnih metoda do primene IC senzora, uz pretpostavku da na površi objekta postoji tačka sa poznatom emisivnošću (tzv. »crna tačka«). Radi prove- re mogućnosti korišćenja istog IC sistema kojim se meri emisivnost za istovremeno merenje temperature objekta, temperatura objekta, koja je potrebna kao ulazni podatak za proračun emisivnosti, merena je termo- parom zavarenim elektronskim snopom na površ materijala, i IC sistemom uz pomoć »crne tačke« — dela površi poznate emisivnosti [1].

Merenje temperature termo-parom zavarenim na površ uzorka, kao preciznija metoda, poslužilo je za evaluaciju mogućnosti merenja temperature objekta istim IC sistemom uz pomoć dela površi poznate emisivnosti, odnosno, takozvane »crne tačke«. Pokazalo se da je obe ove metode merenja temperature moguće ravnopravno koristiti [1]. Kao materijali za »crnu tačku« korišćeni su crni emajl lak i čađ sveće. Za te materijale je, istim IC sistemom, prethodno utvrđeno da imaju emisivnost 0,95, pri čemu je temperatura uzorka na koje su nanošeni ovi materijali merena termo-parom zavarenim na površ uzorka. Kalibracija termo-para vršena je u uljnoj kupki, pre nanošenja čađi, odnosno emajl laka na uzorak, čime je postignuta visoka tačnost merenja temperature uzorka.

Kvantitativna analiza greške određivanja emisivnosti

Za kvantitativnu analizu greške određivanja emisivnosti čvrstih materijala IC kamerom odabrani su ulazni podaci i instrumentalne greške, prikazani u tabeli 3.

Za određivanje termičkog ekvivalenta ukupnog zračenja I_e korišćena je IC kamera THERMOVISION 870 firme Agema, čija greška, prema podacima proizvođača [10], iznosi 2 %, odnosno 0,02. Ovaj podatak proizvođač navodi kao grešku merenja temperature, međutim u [1] je pokazano da je to instrumentalna greška merenja termičkog ekvivalenta IC zračenja a odgovara grešci određivanja temperature samo kada se radi o crnom telu, što je slučaj pri kalibraciji, a vrlo retko u praksi. U tabeli 2 je, radi analize, uzeto da greška iznosi 1 %, što je svakako u granicama greške kontaktnih termometara, odnosno termoparova, a takva tačnost se pod određenim uslovima može postići i putem termovizijskog sistema i »crne tačke« [1]. Temperatura okoline merena je kontaktnim termometrom (apsolutna greška 0,5 K), a temperatura medija prostiranja (atmosfera) živinim termometrom (apsolutna greška 0,15 K).

Tabela 3

Ulazni podaci za analizu greške

Veličina		Apsolutna greška	Relativna greška e_{rel}
Oznaka	Vrednost		
I_e	—	—	0,02
T_a	303 K	0,5 K	0,0016
T_{atm}	303 K	0,15 K	0,0005
T_o	323 K	—	0,01
τ	0,99	—	0,05

Što se tiče transmitivnosti atmosfere, koja se određuje prema relaciji (4), s obzirom na to da je uticaj greške merenja udaljenosti objekat—kamera d_o mali, greška određivanja τ svodi se na grešku matematičkog modela koja iznosi 5 do 10 % [12]. Za potrebe analize uzeto je da ona iznosi 5 %, odnosno 0,05.

Na slikama 2, 3, 4 i 5 prikazane su zavisnosti standardne relativne greš-

ke i parcijalnih grešaka od T_o , ϵ_o , T_a i T_{atm} , respektivno. Na slici 6 prikazana je zavisnost standardne relativne greške od temperature objekta T_o za iste, a na slici 7 za različite vrednosti T_a i T_{atm} i različite vrednosti ϵ_o . Dok je na svim slikama za instrumentalnu grešku transmitivnosti atmosfere uzeta vrednost 0,05, na slici 7 je prikazana kriva, označena brojem 6, kod koje je uzeto za instrumentalnu grešku transmitivnosti atmosfere vrednost 0,1. Na slici 8 dat je komparativan prikaz zavisnosti standardne relativne greške određivanja emisivnosti za iste i različite vrednosti T_a i T_{atm} , a sve ostale parametre iste. Standardna relativna greška određivanja emisivnosti objekta e_{ϵ} izračunata je prema relaciji (6), parcijalnim izvodima u tabeli 2 i podacima u tabeli 3.

Relativne parcijalne greške direktno merenih veličina izračunate su prema relacijama u tabeli 2, pomnožene sa relativnom instrumentalnom greškom odgovarajuće direktno merene veličine iz tabele 3, a krive za parcijalne greške na slikama su označene odgovarajućom direktno merenom veličinom.

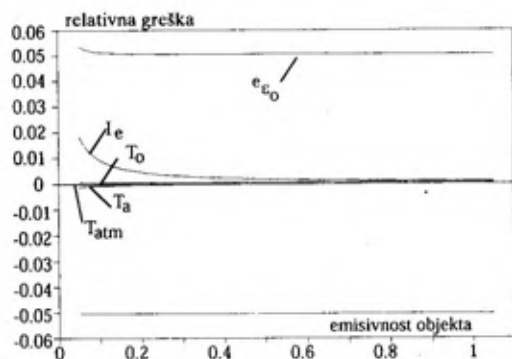
Analiza greške određivanja emisivnosti materijala pokazuje da greška neograničeno raste kada je vrednost temperature objekta T_o jednaka vrednosti temperature okoline T_a (slika 2, $T_a=303$ K a T_o se menja, i slika 4, $T_o=323$ K, a T_a se menja). Prema tome u uslovima $T_o=T_a$ i u okolini te jednakosti, merenje emisivnosti postaje nemoguće. Greška određivanja emisivnosti ne zavisi mnogo od vrednosti emisivnosti (slika 3), osim pri malim vrednostima emisivnosti kada počinje brže da raste. Ako se menja samo temperatura atmosfere, vidi se da greška određivanja emisivnosti ima minimum (slika 5), koji za $\epsilon_o=1$ nastupa za $T_o=T_{atm}$, a za $\epsilon_o \neq 1$ nastupa za neku vrednost temperature između T_o i T_a , što zavisi od vrednosti ϵ_o . Što je ϵ_o manje ta temperatura je bliža vrednosti T_a , a što je ϵ_o veće ta temperatura je bliža vrednosti T_o .

Sa svih dijagrama se uočava da najveći uticaj na ukupnu grešku određivanja emisivnosti ima parcijalna greška transmitivnosti atmosfere zbog njene velike instrumentalne greške (5 %) u odnosu na ostale instrumentalne greške (2 % i manje) i velike zavisnosti od ostalih veličina (temperatura ambijenta i temperature atmosfere).

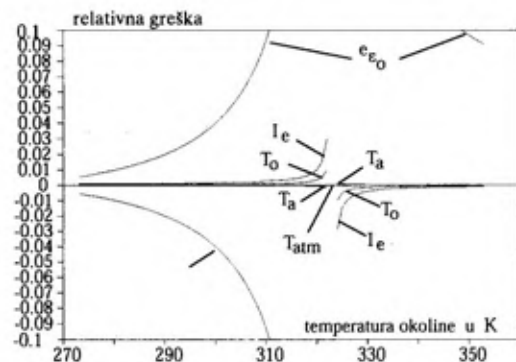
Da bi se postigla standardna relativna greška određivanja emisivnosti IC kamerom THERMOVISION 870 SWB, za uslove iz tabele 3, manja od 2 %, potrebno je da bude $|T_o - T_a| > 30$ K (slika 4), pod uslovom da je $\epsilon_o \geq 0,5$ i $T_o > T_a$. Nepovoljnije je ako je $T_o < T_a$.

Detaljnija analiza greške (slike 6, 7 i 8) pokazuje da je povoljnije ako su temperature okoline i atmosfere jednake nego ako se razlikuju (u razmatranju je uzeto da je $T_a > T_{atm}$, jer je češća situacija da u okolini objekta postoje izvori toplote čija je temperatura veća od temperature medija kroz koje se prostire zračenje od objekta do kamere, odnosno temperature atmosfere. Ako je $T_a = T_{atm}$ potrebna je manja razlika T_o i T_a da bi se postigla ista tačnost određivanja emisivnosti (slika 6). Može se uočiti da je povoljnija situacija kada je $T_o > T_a$ za $T_o = T_{atm}$, dok za slučaj $T_o \neq T_{atm}$ to nije tako. U slučaju kada je $T_a > T_{atm}$, kao na slici 7, greška ima minimum na temperaturi bliskoj T_{atm} (koliko bliskoj zavisi od vrednosti ϵ_o , ako je $\epsilon_o = 1$ onda je taj minimum na T_{atm}),

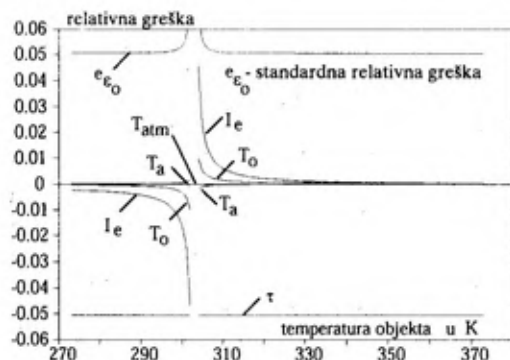
ali je mesto tog minimuma teže proceniti bez ovakvog računa. Zbog toga ostaje zaključak da je povoljniji slučaj kada je $T_o > T_a$, ali je potrebno obezbediti veću razliku ove dve temperature.



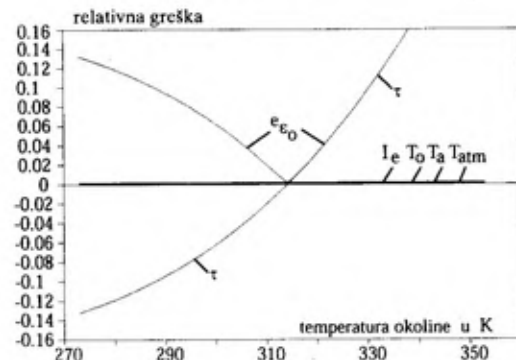
Sl. 3 — Zavisnost greške od emisivnosti objekta



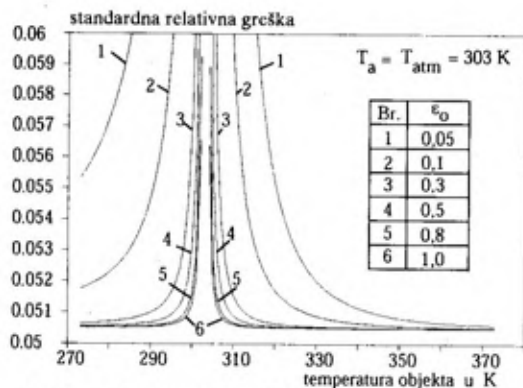
Sl. 4 — Zavisnost greške od temperature okoline



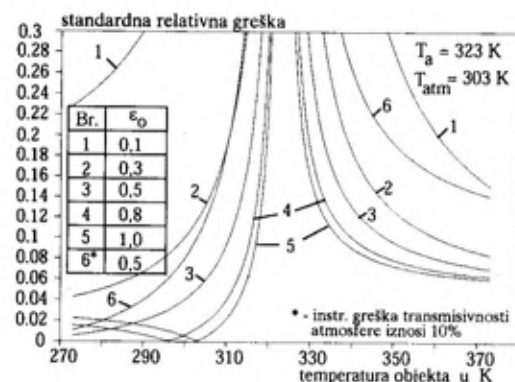
Sl. 2 — Zavisnost greške od temperature površi objekta



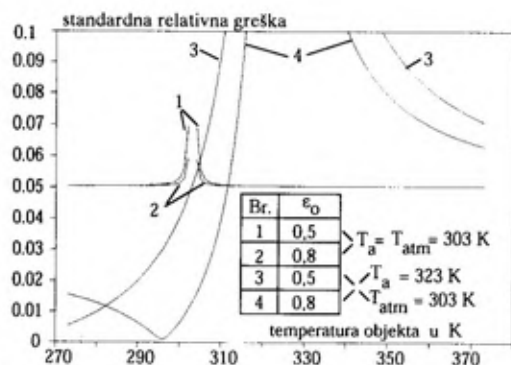
Sl. 5 — Zavisnost greške od temperature atmosfere



Sl. 6 — Zavisnost greške od temperature površi objekta za iste vrednosti T_a i T_{atm} i različite vrednosti ϵ_0 i instrumentalne greške za τ



Sl. 7 — Zavisnost greške od temperature površi objekta za različite vrednosti ϵ_0 , T_a i T_{atm} i instrumentalne greške za τ



Sl. 8 — Komparativan prikaz uticaja istih i različitih vrednosti za T_a i T_{atm} na grešku određivanja emisivnosti

Greška se može smanjiti i manjim instrumentalnim greškama merenja direktno merenih veličina, za što je potrebna oprema koja prelazi nivo radne klase tačnosti, a to znači i veću cenu.

Zaključak

U radu je izveden matematički model određivanja emisivnosti primenom IC kamere THERMOVISION 870SWB firme Agema, koja se koristi i za određivanje temperature. Izvedena je i analizirana funkcija greške određivanja emisivnosti, koja omogućava proračun greške merenja, analizu uticaja pojedinih parcijalnih grešaka i parametara i modeliranje uslova merenja radi postizanja zahtevane tačnosti.

Pristup analizi greške preko parcijalnih grešaka omogućava izdvajanje direktno merene veličine koja najviše utiče na ukupnu grešku merenja, odnosno određivanje emisivnosti. Analiza pokazuje da najveći uticaj na ukupnu grešku merenja ima parcijalna greška transmitivnosti atmosfere, i njena velika instrumentalna greška kao direktno merene veličine. Najveći udeo u toj grešci ima greška modela transmitivnosti atmosfere koja, za raspoložive modele, iznosi 5 do 10 %.

Da bi se postigla standardna relativna greška određivanja emisivnosti IC kamerom THERMOVISION 870 SWB, manja od 2 %, za uslove u ovom radu, potrebno je da bude $|T_o - T_a| > 30$ K, uz uslov da je $\epsilon_0 \geq 0,5$ i $T_o > T_a$. Povoljnija je situacija kada je $T_o > T_a$.

Parcijalna greška transmitivnosti atmosfere znatno zavisi od temperature atmosfere. Prema tome, kontrolom temperature atmosfere, odnosno medija kroz koji se prostire zračenje od objekta do kamere, može se znatno uticati na povećanje tačnosti određivanja emisivnosti.

Posebno je nepovoljna situacija kada je temperatura objekta jednaka

ili bliska temperaturi okoline, što je u praksi često, kada je precizno određivanje emisivnosti praktično nemoguće.

S obzirom na to da proizvođač ne daje podatak o tačnosti, odnosno grešci određivanja emisivnosti IC kamerom THERMOVISION 870SWB, preostaje da se smatra da je ta greška jednaka grešci koju je proizvođač dao za merenje temperature, što je, u stvari, instrumentalna greška merenja ter-

mičkog ekvivalenta IC zračenja ili da se pribegne ovakvoj detaljnijoj analizi greške određivanja emisivnosti.

Vrednost temperature okoline koja ulazi u model, kao i kod određivanja temperature IC kamerom, mora se proceniti, ako okolina nije uniformna ili treba koristiti radijacione štitove.

Vrednost emisivnosti koja se dobija merenjem predstavlja srednju vrednost emisivnosti u spektralnom opsegu rada senzora, što je bolje rešenje.

Literatura:

- [1] Pokorni, S.: Određivanje temperaturnog stanja toplih delova turbomlaznog motora metodom infracrvenog zračenja, doktorska disertacija, VTA VJ, Beograd, 1994.
- [2] Pokorni, S.: Analiza greške određivanja temperature površi materijala primenom IC senzora, ETRAN'96, Zbornik radova, sveska IV, Budva, 4-7. juni 1996. str. 103-106.
- [3] Pokorni, S.: Analiza greške određivanja temperature površi čvrstih materijala IC kamerom, Vojnotehnički glasnik, 1/98. str. 75-86.
- [4] OMEGA Engineering Inc.: The Temperature Handbook, 1991.
- [5] Siegel, R., Howell, J.: Thermal Radiation Heat Transfer, McGraw-Hill, Kogakusha, Ltd., 1972.
- [6] Pokorni, S.: Mogućnosti i ograničenja predikcije emisivnosti materijala, Vojnotehnički glasnik, 3/1997. str. 313-325.
- [7] Emilsson B. E., Roos A. R.: A Method And Equipment For Measuring Infrared Emissivity, Sweden.
- [8] Lixin C., Bing T. J., Xie-Rong H.: Design Principle for simultaneous emissivity and temperature measurement, Optical Engineering, vol. 29, No. 12, dec. 1990. p. 1445-1448.
- [9] You-Wen Zhang, i dr.: Quantitative measurements of ambient radiation emissivity, and truth temperature of a greybody: methods and experimental results, Applied Optics. vol. 25, No. 20, 1986. p. 3683-3689.
- [10] Thermovision 870, Operating Manual, AGEMA Infrared Systems, 1991.
- [11] Kurzenkov, D. D.: Osnovi metrologii v aviopriBOROSTROENII, Izdatel'stvo MAI, Moskva, 1990.
- [12] Gossorg, Z.: Infrakrasnaja termografija, osnovi, tehnika, primenenie, Mir, Moskva, 1988. (prevod sa francuskog na ruski).
- [13] Snopko, N. V.: Spektralnie metody optičeskoj pirometrii nagretoj poverhnosti, Nauka i tehnika, Minsk, 1988.
- [14] Pokorni, S.: Analiza greške određivanja emisivnosti materijala pomoću IC senzora, ETRAN '97, Zbornik radova, sveska IV, Zlatibor 3-6. jun, 1997. str. 133-136.

MERENJE STABILNOSTI FREKVENCIJE IZVORA SIGNALA POMOĆU DIGITALNOG FREKVENCMETRA

UDC: 621.373.08:621.317.76

Rezime:

U ovom radu opisane su dve metode merenja stabilnosti frekvencije pomoću digitalnog frekvencmetra visoke rezolucije. U vremenskom domenu merenje kratkotrajne stabilnosti frekvencije obavlja se pomoću Alanove varijanse. U frekvencijskom Furijerovom domenu merenje faznog šuma obavlja se pomoću Hadamardove varijanse.

Cljučne reči: digitalni frekvencmetar, kratkotrajna stabilnost frekvencije, Alanova varijansa, fazni šum, Hadamardova varijansa.

MEASURING FREQUENCY STABILITY OF SIGNAL SOURCES USING DIGITAL COUNTERS

Summary:

In this article two methods of measuring frequency stability using high resolution digital counters are described. In time domain measuring of short term frequency stability is performed using the Allan variance. In the Fourier frequency domain measuring of phase noise is performed using the Hadamard variance.

Key words: digital frequency counter, short form frequency stability, Allan variance, phase noise, Hadamard variance.

Uvod

Danas postoje opšti zahtevi za sve boljom frekvencijskom stabilnošću izvora signala koji se koriste u sistemima kao što su Doplerovi radari, telekomunikacioni linkovi, višekanalni prijemnici i sintetizatorski generatori signala. Cezijumski i rubidijumski etaloni frekvencije, ali i temperaturno stabilisani kvarcni oscilatori izrađuju se u tehnologijama koje omogućavaju visoku frekvencijsku stabilnost signala.

Za merenje, posebno kratkotrajnih fluktuacija frekvencije signala često je potrebna kompleksna i skupna merna oprema. Zbog toga se ova mere-

nja obavljaju u relativno malom broju laboratorija.

U ovom radu opisane su metode merenja nestabilnosti frekvencije signala u vremenskom i frekvencijskom domenu koji se primenjuju u metrološkoj laboratoriji ML 36, uz korišćenje klasičnog frekvencmetra visoke rezolucije HP 5345A. Kao uzor pri formiranju mernih mesta poslužio je integrisani sistem Hewlett Packard HP 5390A.

U prvom delu rada prikazani su matematički modeli koji se koriste za opisivanje nestabilnosti frekvencije, kako u frekvencijskom, tako i u vremenskom domenu, u drugom delu opisana je metoda merenja kratkotrajne stabilnosti u vremenskom domenu, uz

korišćenje Alanove varijanse, a u trećem delu metoda merenja faznog šuma uz korišćenje Hadamardove varijanse.

Osnovni pojmovi o kratkotrajnoj stabilnosti frekvencije i faznom šumu

Izlazni signal idealnog izvora signala (oscilatora, generatora) može se predstaviti čistim sinusoidnim signalom:

$$V(t) = V_0 \sin 2\pi\nu_0 t \quad (1)$$

gde su V i ν_0 nazivne vrednosti amplitude i frekvencije, respektivno. Trenutna vrednost frekvencije data je izrazom:

$$\dot{\Phi}(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} = 2\pi\nu(t) \quad (2)$$

gde je Φ trenutna vrednost faze signala. Vremenski zavisna frekvencija signala označava se sa $\nu(t)$ (Hz), dok su Furijerove frekvencije označene sa ω (rad/s) ili f (Hz) i važi relacija $\omega = 2\pi f$.

Kod realnih signala postoje slučajne promene amplitude i frekvencije. Realni izlazni signali oscilatora i generatora predstavljaju se sledećim matematičkim modelom:

$$V(t) = [V_0 \varepsilon(t)] \sin [2\pi\nu_0 + \varphi(t)] \quad (3)$$

gde je $\varepsilon(t)$ slučajni proces koji označava promenu amplitude (amplitudni šum), dok član $\varphi(t)$ uključuje promene u vremenu aktuelne frekvencije ν .

U svim razmatranjima se pretpostavlja da važi:

$$\left[\frac{\varepsilon(t)}{V_0} \right] \ll 1$$

$$\left[\frac{\dot{\varphi}}{2\pi\nu_0} \right] \ll 1 \quad (4)$$

Iz jednačina (2) i (3) sledi:

$$\Phi(t) = 2\pi\nu_0 t + \varphi(t) \quad (5)$$

odnosno:

$$\nu(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d}{dt} [2\pi\nu_0 + \varphi(t)] = \nu_0 + \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (6)$$

gde je $\nu(t)$ trenutna vrednost frekvencije signala. Frekvencijski šum je slučajni proces definisan sledećim izrazom:

$$\Delta\nu(t) = \nu(t) - \nu_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (7)$$

Ovaj šum ima ista svojstva kao i fazni šum. Često je uputno koristiti normalizovanu bezdimenzionalnu promenu frekvencije:

$$y(t) = \frac{\Delta\nu(t)}{\nu_0} = \frac{d\varphi(t)}{2\pi\nu_0 dt} \quad (8)$$

Ova veličina ostaje nepromenjena pri množenju i deljenju frekvencije, pa se koristi kao osnova pri upoređenju signala oscilatora na različitim nazivnim frekvencijama.

Pri analizi nestabilnosti signala, a u zavisnosti od zahteva uzrokovanih različitim primenama izvora signala, već tri decenije se koriste dve vrste parametara: vremenski i spektralni. Spektralni parametri su spektralne gustine promena faze i frekvencije u Furijerovom frekvencijskom domenu, dok su vremenski parametri varijanse (ili standardne devijacije) srednje promene frekvencije u vremenskom domenu. Za stacionarne Gausove procese spektralna gustina (ili autokorelaciona funkcija) sadrži najviše informacija o procesu. Sve varijanse su preko integrala ili prenosnih funkcija u vezi sa spektralnim gustinama, ali se pri ovim transformacijama deo informacija gubi.

U Furijerovom frekvencijskom domenu analiza normalizirane promene frekvencije $y(t)$ obavlja se preko jedno-

bočne spektralne gustine $S_{\phi}(f)$ (rad^2/Hz) koja se izražava u radijanima na kvadrat po propusnom opsegu od jednog Hz na Furijerovoj frekvenciji udaljenoj za f od frekvencije nosioca ν_0 . Analiza se može obavljati i preko spektralne gustine trenutnih promena $y(t): S_y(f)$. Preporučena mera stabilnosti signala u frekvencijskom domenu je $S_{\phi}(f)$ [1]. $S_y(f)$ ima dimenziju Hz^{-1} i definiše se kao:

$$S_y(f) = 4 \int_0^{\infty} R_y(\tau) \cos 2\pi f \tau d\tau \quad (9)$$

gde je $R_y(\tau) = \langle y(t) \cdot y(t-\tau) \rangle$ autokorelaciona funkcija od $y(t)$. Važe relacije:

$$\begin{aligned} S_y(f) &= \frac{1}{2\pi\nu_0} \cdot S_{\phi}(f) \\ S_y(f) &= \frac{1}{\nu_0} \cdot f^2 S_{\phi}(f) \\ S_{\phi}(f) &= \frac{\nu_0^2}{f^2} \cdot S_y(f) \quad (\text{rad}^2/\text{Hz}); 0 < f < \infty \end{aligned} \quad (10)$$

Ponekad se koriste i druge mere faznog šuma u Furijerovom frekvencijskom domenu: $S_{\Delta\phi}(f)$ i $L(f)$.

Važe veze:

$$\begin{aligned} S_{\Delta\phi}(f) &= \nu_0 S_y(f) \quad (\text{Hz}^2/\text{Hz}) \\ L(f) &= \frac{1}{2} S_{\phi}(f) \quad \text{za} \quad \int_{f_1}^{\infty} S_{\phi}(f) df < 1 \text{ rad}^2 \end{aligned} \quad (11)$$

Promene frekvencije signala mogu se svrstati u dve kategorije: sistemat-ske i slučajne. Slučajne promene frekvencije (koje su u centru našeg interesovanja) nedeterminističke su po karakteru, mada se njihov nivo može odrediti preko zakona spektralne snage:

$$S_y(f) = \sum_{a=-2}^{+2} h_a f^a \quad (12)$$

Analiza nestabilnosti signala u vremenskom domenu često je efikasnija od analize u frekvencijskom domenu,

posebno ako se radi o merenjima dugotrajnih stabilnosti.

Ako je T period ponavljanja merenja, a τ trajanje merenja, tada je relativna promena frekvencije data izrazom:

$$\bar{y}_k = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_k+\tau} y(t) dt = \frac{\phi(t_k+\tau) - \phi(t_k)}{2\pi\nu_0\tau} \quad (13)$$

gde je: $t_{k+1} = t_k + T$; $k=0, 1, 2, \dots$

S obzirom na to da savremeni frekvencimetri mere broj ciklusa u periodu, to oni mere $\nu_0\tau(1 + \bar{y}_k)$.

U [3] je pokazano da klasična varijansa (kvadrat standardne devijacije) divergira sa dužinom podataka za $\alpha \leq -1$, pa se ne može koristiti kao dobra mera stabilnosti frekvencije u vremenskom domenu. Stabilnost frekvencije u vremenskom domenu određuje se preko Alanove varijanse [3]:

$$\langle \sigma^2(N, T, \tau) \rangle = \left\langle \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N \left(\bar{y}_n - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \bar{y}_k \right)^2 \right\rangle \quad (14)$$

pri čemu $\langle g \rangle$ označava srednju vrednost skupa svih vrednosti koje g dobija u toku vremena t . Mera (14) je bezdimenzionalna, jer je i y_k bezdimenzionalno. Preporučuje se da se uzme $N=2$ i $T=\tau$ (nema »mrtvog« vreme na između merenja), pa Alanova varijansa dobija oblik:

$$\sigma_y^2(\tau) = \sigma^2(N=2, T=\tau, \tau) = \left\langle \frac{(\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2}{2} \right\rangle \quad (15)$$

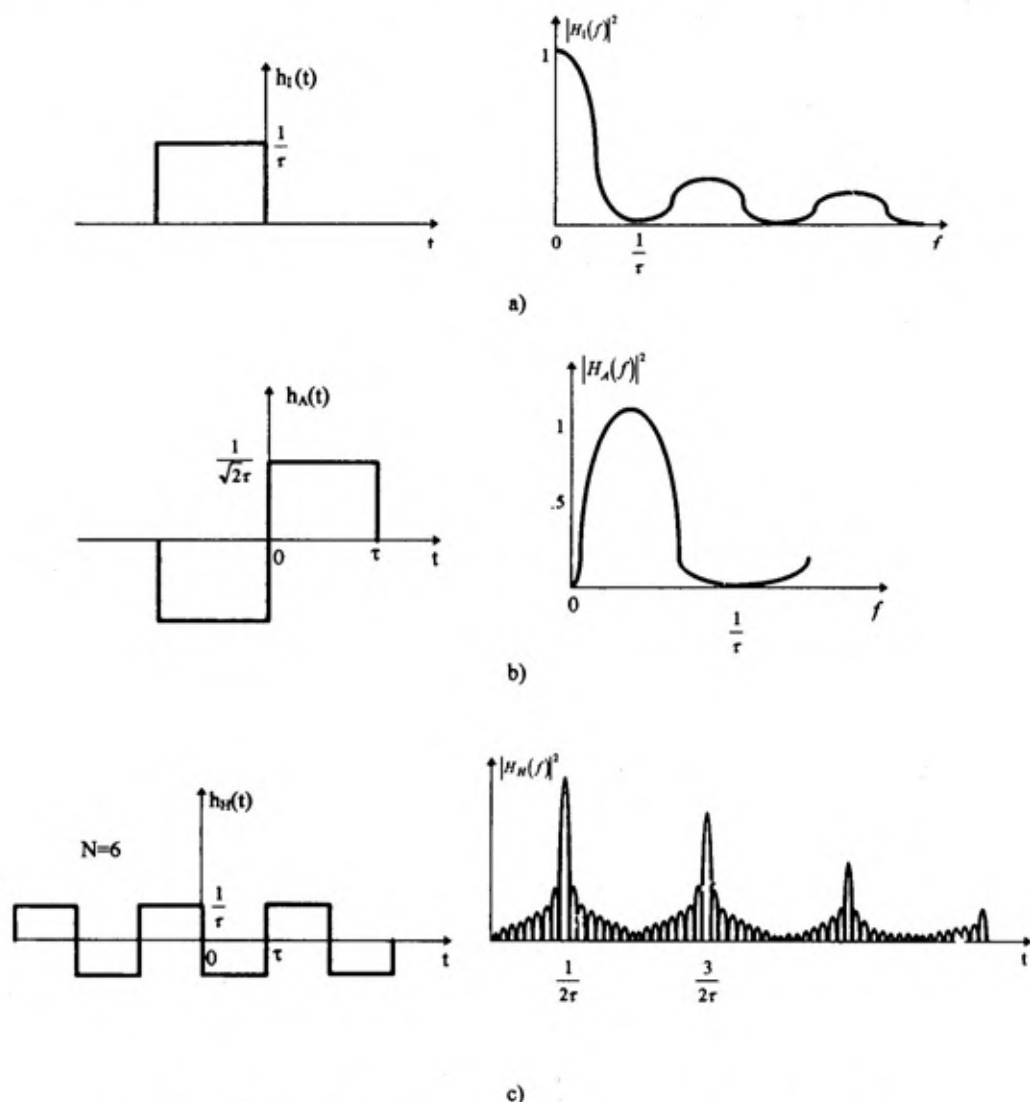
Postoji veza između varijanse (14) i zakona spektralne snage (12). Važi relacija:

$$\sigma_y^2(\tau) \sim \tau^{\alpha}; \mu = \begin{cases} -2 & \text{za } \alpha \geq 1 \\ -\alpha-1 & \text{za } -3 < \alpha \leq 1 \end{cases} \quad (16)$$

Za svaku varijansu može se naći »prenosna funkcija varijanse« [4, 8]. Na slici 1a) prikazane su merene se-

kvence klasične varijanse i njena prenosna funkcija, dok je na slici 1b) prikazana merna sekvenca Alanove varijanse i njena prenosna funkcija. Klasična varijansa je neupotrebljiva za detektovanje fliker-frekvencijskog šuma i frekvencijskog šuma slučajni pomak, dok prenosna funkcija Alanove varijanse ima širok vrh, pa se ova varijansa ne može koristiti pri razlučivanju belog faznog i fliker-faznog šuma.

Ukoliko se želi koristiti digitalni frekvencemetar kao sredstvo spektralne analize od $y(f)$ prenosnu funkciju varijanse treba odabrati tako da se pri spektralnoj analizi postigne visoka selektivnost i razlučivanje. To znači da se moraju ostvariti takvi ciklusi (sekvence) merenja čija će Furijerova transformacija dati prenosnu funkciju varijanse koja će zadovoljiti postavljene uslove spektralne analize. Pogodni ci-



Sl. 1 — Merne sekvence i odgovarajuće prenosne funkcije varijansi

klus merenja ostvaruje se specifičnim softverskim postupcima i dodatnom opremom koja, osim frekvenckmetra i računara, uključuje spoljni izvor vremena usrednjavanja, dodatnu memoriju, MF filtre, itd.

Težnja je da, za potrebe merenja spektralne gustine, kombinacija frekvenckmetar/računar izgleda kao usko-pojasni filter vrlo male širine, a u idealnom slučaju kao delta funkcija. Mer-ni ciklus se može predstaviti kao težina kombinacija merenja u različitim vremenima:

$$h(t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i \quad (17)$$

U slučaju kada je $\alpha_i = (-1)^i$ dobija se Hadamardova varijansa:

$$\langle \sigma_H(N, T, \tau) \rangle = \langle (\bar{y}_1 - \bar{y}_2 + \bar{y}_3 - \dots - \bar{y}_N)^2 \rangle \quad (18)$$

Veza između spektralne gustine i Hadamardove varijanse uz uslove da je

N dovoljno veliko, $|\omega - \omega_0| \ll \omega_0$ i $\tau_d = \tau/2$ data je sledećim izrazom:

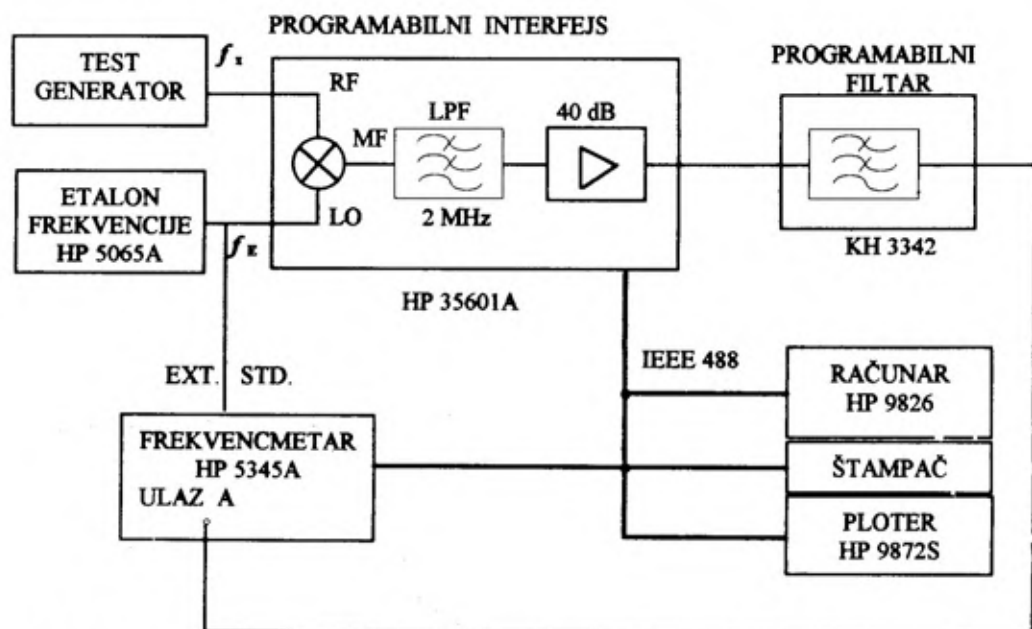
$$S_{\phi}(\omega_0) \approx \frac{1}{8} \left(\frac{\pi}{3} \right)^2 \frac{\sigma_H^2}{N f_0^3} \approx 0,183 \frac{\sigma_H^2}{N f_0^3} \quad (19)$$

Spektralna gustina se, prema tome, može odrediti preko Hadamardove varijanse σ_H^2 , pri čemu se σ_H^2 određuje numeričkim metodama.

Na slici 1c) prikazan je ciklus merenja i prenosna funkcija Hadamardove varijanse.

Merenje kratkotrajne stabilnosti frekvencije u vremenskom domenu (Alanova varijansa)

U metrološkoj laboratoriji ML36 kratkotrajna stabilnost frekvencije određuje se uz korišćenje blok-šeme povezivanja mernih uređaja prikazane na slici 2.



Sl. 2 — Blok-šema povezivanja mernih sredstava za merenje kratkotrajne stabilnosti frekvencije

POČETAK

-Vreme usrednjavanja
- Broj parova M
- F (Hz) osc.

ULAZ preko
tastature

MERENJE FREKVENCIJE
Računanje poboljšanja rezolu-
cije, crtanje i označavanje skala

Podprogram "GATE"
(postavljanje vremena
usrednjavanja)

MERENJE
 f_{2i}, f_{2i-1}

NE

Očitano
M parova
?

DA

IZLAZ
ploter, printer

Korištena
sva vremena
usrednj. ?

NE

DA

KRAJ

-grafik $\sigma(\tau)$
-listing $\sigma(\tau)$

Da bi se povećala rezolucija, koristi se tehnika snižavanja frekvencije preko mešača koji je deo programabilnog interfejsa HP 35601A. Željeni propusni opseg reguliše se programabilnim filtrom KH 3342.

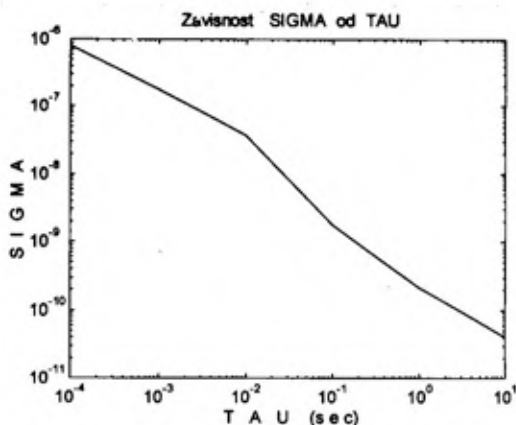
Za procenu korena Alanove varijanse koristi se izraz:

$$\langle \sigma_y(\tau) \rangle \approx \frac{1}{f_0} \sqrt{\frac{1}{M} (f_{2k} - f_{2k-1})^2} \quad (20)$$

gde je f_0 nominalna frekvencija izvora signala, a M broj parova merenja. Automatizovana metoda merenja omogućava da se »mrtvo vreme« između dva susedna merenja smanji sa 40 ms na oko 1 ms.

Dijagram toka programa koji upravlja merenjem i izdaje obrađene rezultate dat je na slici 3.

Tipični grafik zavisnosti »SIGMA od TAU« prikazan je na slici 4. On predstavlja kratkotrajnu stabilnost si-



Sl. 4 — Zavisnost σ od τ za signal generatora HP 8660C ($f=5,010$ MHz)

gnala iz generatora signala HP 8660C nominalne frekvencije 5,010 MHz, kada je niskopropusni filter KH 3325 postavljen na graničnu frekvenciju od 15 kHz. Izvršeno je merenje 50 parova uzoraka, uključeno je pojačanje x100 (40 dB) i niskopropusni filter 2 MHz.

Sl. 3 — Dijagram toka programa za merenje kratkotrajne stabilnosti

Granica razlaganja frekvencometra HP 5345A iznosi $8,2 \times 10^{-10}$ po sekundi vremena merenja. Ako je σ manje ili jednako navedenoj vrednosti, merenje nije valjano. Međutim, granica razlaganja se poboljšava kada se koristi heterodinska tehnika smanjivanja frekvencije, pri čemu se na lokalni oscilator mešača (kao što je to u ovom slučaju) dovodi signal čija je kratkotrajna stabilnost frekvencije daleko bolja od kratkotrajne stabilnosti frekvencije testirajućeg izvora. Kratkotrajna stabilnost 10 MHz oscilatora vremenske baze frekvencometra HP 5345 A iznosi 1×10^{-10} za vreme merenja 1 s. Međutim, ako se za sinhronizaciju koristi signal iz rubidijumskog standarda frekvencije, kratkotrajna stabilnost vremenske baze frekvencometra je bolja od 5×10^{-12} za vreme merenja 1 s.

Na ukupnu tačnost merenja frekvencometra utiče i greška okidanja koja za HP 5345A iznosi 3×10^{-3} (broj perioda) za sinusni signal od 10 mV i odnos signal/šum veći od 40 dB. Zbog toga je poželjno u merni sistem (ispred ulaza frekvencometra) ubaciti Šmitov okidni sklop, čime se bitno smanjuje uticaj greške okidanja na tačnost merenja.

Pri procenjenoj Alanovoj varijansi mora se voditi računa o dva faktora: uticaju broja merenja na konvergenciju varijanse i uticaju »mrtvog vremena«. S obzirom na to da je broj merenja konačan i da često postoji određeno »mrtvo vreme« između dva merenja ($T > \tau$), Barnes je uveo funkcije za popravku kojima se vrši preslikavanje iz vremenskog u vremenski domen [1, 2]:

$$B_1(N, r, \mu) = \frac{\langle \sigma_y^2(N, T, \tau) \rangle}{\langle \sigma_y^2(2, T, \tau) \rangle} \quad (21)$$

$$B_2(r, \mu) = \frac{\langle \sigma_y^2(2, T, \tau) \rangle}{\langle \sigma_y^2(2, T, \tau) \rangle}$$

U ovom radu značajna je bila funkcija $B_2(r, \mu)$ koja se računa kao:

$$B_2(r, \mu) = \frac{1 + \frac{1}{2} \left[2|r|^{\mu+2} - |r+1|^{\mu+2} - |r-1|^{\mu+2} \right]}{2(1-2^\mu)} \quad (22)$$

U tabeli 1 prikazani su rezultati merenja kratkotrajne stabilnosti izlaznog signala iz generatora MI 2022C. Frekvencija ovog signala je 5,010 MHz.

Tabela 1

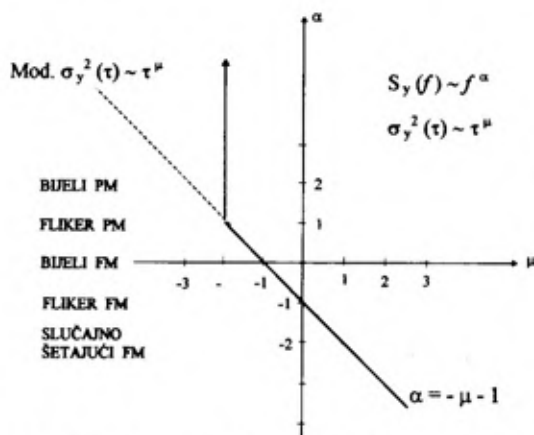
τ (s)	σ_1	σ_2	σ_3
0,0001	$4,62 \times 10^{-7}$	$4,114 \times 10^{-7}$	$4,62 \times 10^{-7}$
0,001	$2,82 \times 10^{-7}$	$2,969 \times 10^{-7}$	$2,82 \times 10^{-7}$
0,01	$3,374 \times 10^{-8}$	$3,445 \times 10^{-8}$	$3,543 \times 10^{-8}$
0,1	$3,044 \times 10^{-9}$	$2,946 \times 10^{-9}$	$3,062 \times 10^{-9}$
1,0	$3,155 \times 10^{-10}$	$2,646 \times 10^{-10}$	$3,155 \times 10^{-10}$
10,0	$3,473 \times 10^{-11}$	$3,404 \times 10^{-11}$	$3,473 \times 10^{-11}$

Vrednosti σ_1 u tabeli 1 su procenjene Alanove varijanse za $N=50$ parova uzoraka kada nije vršena popravka zbog postojanja »mrtvog vremena« između pojedinih merenja. σ_2 je merenje sa $N=100$ parova uzoraka bez korekcije »mrtvog vremena«, a σ_3 je koren procenjene Alanove varijanse sa $N=50$ parova uzoraka i korigovanim »mrtvim vremenom« koristeći Barnesovu funkciju $B_2(r, \mu)$ iz (21).

U praktičnim slučajevima merenja povećanje broja uzoraka sa 50 na 100 parova nije donelo bitne razlike. Međutim, dokazano je [3] da se smanjenjem broja uzoraka smanjuje pouzdanost procene Alanove varijanse, posebno kada τ uzima velike vrednosti (reda godinu dana) jer u tom slučaju broj uzoraka ne može biti veliki.

Osnovni nedostatak Alanove varijanse jeste nemogućnost razlučivanja belog faznog šuma od faznog fliker šuma za $\mu = -2$, odnosno $\sigma_y(\tau) \sim \tau^{-1}$ (za

$\alpha=1$ i $\alpha=2$). Na slici 5 prikazane su zavisnosti $\alpha=f(\mu)$ za razne vrste šuma kada se koristi Alanova varijansa. Vidi se da je za $\mu=-2$, $\alpha=1$ i $\alpha=2$. Da bi se eliminisala ova neodređenost, koristi se modifikovana Alanova varijansa.



Sl. 5 — Zavisnost $\alpha=f(\mu)$ za Alanovu i modifikovanu Alanovu varijansu

Modifikovana Alanova varijansa ne zahteva korišćenje druge opreme osim one prikazane na slici 2. Vršiti se samo modifikacija algoritma merenja. Vremenski interval τ deli se na n ci-

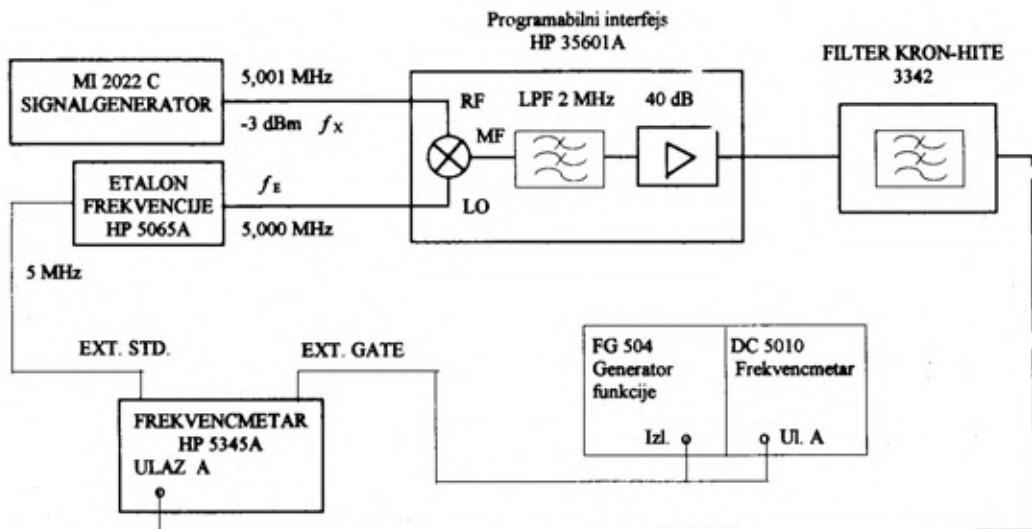
klusa dužine τ_0 , tako da je $\tau=n \times \tau_0$. Modifikovana Alanova varijansa je tada:

$$\text{mod } \sigma_y^2(n\tau_0) = \frac{1}{2} \left\langle \frac{1}{n^2} [y_{n+1}(\tau) - y_1(\tau) + y_{n+2}(\tau) - y_2(\tau) + \dots + y_{2n}(\tau) - y_n(\tau)] \right\rangle \quad (23)$$

Kada se koristi modifikovana Alanova varijansa postiže se dobro odvajanje faznog belog od faznog fliker-šuma, što je predstavljeno iscrtnanom linijom na slici 5.

Merenje faznog šuma uz korišćenje Hadamardove varijanse

Mada digitalni frekvencmetri nisu »prirodna sredstva« za merenje faznog šuma, ipak se koriste za merenje spektralnih karakteristika šuma, posebno na frekvencijama vrlo bliskim frekvenciji nosioca. Koristeći opisanu Hadamardovu varijansu moguće je proširiti merenja u frekvencijskom domenu do vrlo niskih Furijerovih frekvencija reda 10^{-3} Hz, i to samo na račun povećavanja vremena T i τ u vre-



Sl. 6 — Blok šema povezivanja mernih sredstava za merenje faznog šuma

menskom domenu. Na taj način dopunjavaju se merne mogućnosti analognih analizatora spektra, čiji je frekvenzijski opseg rada ograničen do 10 Hz ili u najboljem slučaju 1 Hz. Međutim, moderni analizatori spektra koji rade na osnovama brze Furijerove transformacije (FFT) rade od vrlo niskih Furijerovih učestanosti (primer je analizator spektra HP 3582A, čiji je frekvenzijski opseg 0,02 Hz do 40 kHz).

Povezivanje mernih uređaja za određivanje faznog šuma prikazano je blok-šemom na slici 6.

Postupak merenja i računanja

Vreme merenja (GATE TIME) digitalnog frekvenckmetra određuje se ekstremno a korišćen je generator funkcije FG 504 kao generator četvrtastog signala sa promeljivom širinom impulsa. Izabrano je »mrtvo vreme«

$\tau_d = \frac{\tau}{2}$, odnosno $T = \tau_d + \tau = 3 \tau_d$. Na

taj način poništavaju se parazitski odzivi digitalnog filtra na $f/f_0 = 3, 9, 15, \dots$. Težnja je da se izabere takav ciklus merenja digitalnim frekvenckmetrom da digitalni filter, koji frekvenckmetar sa mernom sekvencom predstavlja, ima nenultu vrednost samo za $f/f_0 = 1$, a da se svi harmonici izbrišu. U ovom slučaju je:

$$f_0 = \frac{1}{2(\tau + \tau_d)} = \frac{1}{3\tau} = \frac{1}{6\tau_d} \quad (24)$$

f_0 se menja eksternim menjanjem vremena merenja τ . Širina propusnog opsega za svaki odziv digitalnog filtra je:

$$P = \frac{1}{N\tau} \quad (25)$$

gde je N broj merenja.

Frekvenckmetar meri N parova frekvencija, koji se za vreme τ_d transpor-

tuju u memoriju računara HP 9620. Zatim se računa:

$$m_i = \sum_{j=1}^N (f_{2j} - f_{2j-1}) \quad (26)$$

Ovaj proces ponavlja se K puta i računa se Hadamardova varijansa:

$$\sigma_H^2(\tau, \tau_d, N) = \frac{1}{K-1} \left[\sum_{j=1}^K m_i^2 - \frac{1}{K} \left(\sum_{j=1}^K m_i \right)^2 \right] \quad (27)$$

Spektralna gustina promena faze $S_\phi(\omega_0)$ računa se po formuli (19).

Osetljivost mernog sistema prikazanog na slici 6 ograničena je rezolucijom frekvenckmetra HP 5345A koja iznosi 2 ns. Osetljivost sistema i njegova rezolucija određeni su jednakošću [9]:

$$S_\phi(\omega_0) \approx \left(\frac{\pi/2}{\sin \pi/2} \right)^2 \frac{\tau_c^2}{3\tau^2} \frac{v_b^2}{f_0} \quad (28)$$

gde je τ_c perioda glavnog takta frekvenckmetra (500 MHz), a v_b je frekvencija ulaznog signala. Na drugi način se osetljivost sistema može predstaviti kao:

$$L(f) = -173 + 20 \cdot \log v_b - 10 \cdot \log f_0 \quad (\text{dB/Hz}) \quad (29)$$

Za svaku frekvenciju f_0 računa se osetljivost sistema.

Osnovni nedostatak mernog sistema sa slike 6 jeste prisustvo harmonika na frekvencijama $5f_0, 7f_0, 11f_0, 13f_0$ u prenosnoj funkciji ekvivalentnog digitalnog filtra. U slučaju kada su u faznom šumu dominantni faktori f^{-4}, f^{-2} i f^{-1} (frekvenzijski šum slučajni pomak, frekvenzijski fliker-šum i beli frekvenzijski šum), harmonici filtra nemaju veliki uticaj, jer su navedene vrste šuma po frekvenciji blizu nosioca. Međutim, kada se radi o oblasti f^{-1} i f^0 (fliker-fazni šum i beli fazni šum), harmonici filtra mogu davati grešku u merenju koja ide do 5 dB. Kompenzovanje uticaja harmonika filtra uspeš-

f_v (kHz)	1				
f_0 (Hz)	10,4	2,5	1,0	0,5	0,2
τ (ms)	32,1	133,3	333,3	666,7	1666,7
τ_d (ms)	16,0	66,7	166,7	333,3	833,3
L_{patos} (dBc)	-123,17	-116,979	-113,0	-109,99	-108,01
L (dBc)	-117,753	-108,776	-101,334	-89,347	-75,207

L_{patos} (dBc) označava granicu osetljivosti sistema.

no se vrši korišćenjem spoljašnjih niskopropusnih filtera ili filtera propusnika opsega učestalosti.

Rezultati merenja faznog šuma izlaza signal-generatora MI 2022C na frekvenciji 5,001 MHz prikazani su u tabeli 2.

Osnovni nedostatak metode koja se koristi u laboratoriji ML36 je nepotpuna automatizovanost. Generator funkcije FG 504 nije programabilan, pa se za svako merenje mora postavljati nova frekvencija i širina »mrtvog vremena« τ_d . Ove veličine moraju se proveravati frekvencometrom DC 5010, kako je prikazano na slici 6.

Zaključak

U radu je pokazano da se kratkotrajne nestabilnosti frekvencije signala mogu u metrološkim laboratorijama meriti i bez namenskih integrisa-

nih sistema za merenje stabilnosti frekvencije. Ključno merno sredstvo je klasični frekvencometar HP 5345A.

Merenja kratkotrajne stabilnosti frekvencije u vremenskom domenu više puta su uspešno izvedena i, uz poboljšanja koja će nastati kada se iskoristi algoritam modifikovane Alanove varijanse, ML 36 će posedovati pravi aparat za navedena merenja.

Zbog nemogućnosti potpune automatizacije, a i činjenice da se koristi za merenja u frekvencijskom domenu, samo na frekvencijama vrlo bliskim frekvenciji nosioca, korišćenjem Hadamardove varijanse, ne čini se kao dobro rešenje za merenje faznog šuma u metrološkoj laboratoriji ML 36. Posebno i zbog toga što ML 36 poseduje dobar analizator spektra HP 8568B, koji se može programirati preko kontrolora, tako da izvršava brzu Furijevu transformaciju.

Literatura:

- [1] Barnes, A. J. i drugi: Characterization of Frequency Stability, IEEE Transactions on Instrum. and Measurm. Vol. IM-20, No. 2, 1971, str. 105-120
- [2] Alan W. D., Shoaf H. J., Halford D.: Statistics of Time and Frequency Data Analysis, National Bureau of Standards U. S. Monograph 140, May 1974, Washington, Chapter 8, str. 151-204.
- [3] Alan, W. D.: Statistics of Atomic Frequency Standards, Proceedings of the IEEE, vol. 54, No. 2, 1966, str. 221-230.
- [4] Rutman, J.: Characterization of Phase and Frequency Instabilities in Precision Frequency Sources: Fifteen Years of Progress, Proceedings of the IEEE, Vol. 68, No. 9, Septem. 1978, str. 1048-1075.
- [5] Rutman, J., Walls, L. F.: Characterization of Frequency Stability in Precision Frequency Sources, Proceedings of the IEEE, Vol. 79, No. 6, 1991, str. 952-960.
- [6] Walls, L. F., Allan, W. D.: Measurements of Frequency Stability, Proceedings of the IEEE, Vol. 74, No. 1, 1986, str. 162-168.

- [7] Robins, P. W.: Phase Noise in Signal Sources (Theory and Applications), Peter Peregrinus Ltd., London, U. K., 1982.
- [8] Cuttler, S. L., Searle, J. C.: Some Aspects of the Theory and Measurement of Frequency Fluctuations in Frequency Standards, Proceedings of the IEEE, Vol. 54, No. 2, 1966, str. 136-153.
- [9] Peregrino, L., Ricci, W. D.: Phase Noise Measurement Using a High Resolution Counter with On-line Data Processing, Thirtieth Annual Frequency Symposium, June 2-4, 1976, str. 309-317.
- [10] HP Application Note 174-7: 5345 Electronic Counter Measuring Fractional Frequency Standard Deviation (SIGMA) Versus Average Time (TAU), Palo Alto, CA, USA 1974.
- [11] 5390A Frequency Stability Analyzer - User Manual, Hewlett - Packard Co., Santa Clara, SA, USA, 1977.
- [12] Lesage, P., Ayi, J.: Characterization of Frequency Stability: Analysis of the Modified Allan Variance and Properties of Its Estimate, IEEE Transactions on Instr. and Measurement, Vol. IM-33, No. 4, 1984, str. 332-336.
- [13] Lesage, P., Audion, C.: Characterization of Frequency Stability: Uncertainty due to the Finite Number of Measurement, IEE Transactions on Inst. and Measurement, Vol. IM-22, No. 2, 1973, str. 157-161.
- [14] Ključić, B.: Analiza signala i sistema, ETF Sarajevo, 1972.
- [15] Ivković, A. L.: Statistika, Naučna knjiga, 1980, Beograd.
- [16] HP Application Note 225: Measuring Phase Spectral Density of Sinthesized Signal Sources exhibiting and Noise Characteristics with the 5390A Frequency Stability Analyzer, Palo Alto, CA, USA, 1978.
- [17] Proševski, J.: Etaloni frekvencije i njihova primena, Bilten Tehničkog Obitnog Centra, br. 1, 1985, str. 27-34.
- [18] Zindović, Z.: Stabilnost etalona frekvencije i vremena, Opšti seminaar iz metrologije, TOC KoV, Beograd, april 1985, str. 138-144.
- [19] Voelker, M. K.: Automation raises accuracy, versatility of phase - noise measurement system, Electronics, March 24, 1983, str. 131-135.
- [20] Wiley, G. R.: A Direct - Domain of Frequency Stability: The Modified Allan Variance, IEEE Transactions on Instrum. and Measurement, Vol. IM-26, No. 1, March 1977, str. 38-41.
- [21] Milinković, R. D.: Merenje faznog šuma kvarcnih oscilatora, Magistarski rad, ETF Beograd, 1990.
- [22] Rutman, J.: Characterization of Frequency Stability: A Transfer Function Approach and Its Application to Measurement via Filtering of Phase Noise, IEEE Transactions on Instrum. and Measur. Vol. IM-23, No 1, March 1974, str. 40-48.

Rezime:

U radu je opisan postupak statističkog modelovanja eksperimenta po uzoru na metodu Monte-Karlo i prikazane su razne mogućnosti primene, posebno u matematičkoj statistici i pouzdanosti. U metodi se koriste slučajni i pseudoslučajni brojevi. Na primerima funkcija raspodele vremena rada do pojave otkaza dati su matematički modeli za izračunavanje vremena rada, kao i primer modela za generisanje pseudoslučajnih brojeva sa povoljnim osobinama za primenu na mikroracunarima.

Ključne reči: metoda statističkog modelovanja, slučajni i pseudoslučajni brojevi, matematička statistika, pouzdanost, funkcija raspodele.

APPLICATION OF THE EXPERIMENT STATISTIC
SIMULATION METHOD

Summary:

This paper presents models for the simulation of experiments by the Monte-Carlo method. The models are often used in many distributions, especially for the generation of the time to failure in the reliability analysis. The method supposes that the real distribution function is known and has uniform distributed values. The time to failure is calculated as the inverse function. The application of this model is illustrated by some examples.

Key words: statistic simulation method, random and pseudorandom numbers, mathematics statistics, reliability, distribution function.

Uvod

Pri proučavanju ili projektovanju nekog fizičkog sistema vrše se razne analize njegovih funkcija sa ciljem da se optimizira funkcija efektivnosti. Da bi se zadaci lakše rešavali pristupa se posmatranju modela umesto realnog sistema. Na primer, u fazi projektovanja, fizički sistem još i ne postoji, pa je model jedina alternativa.

U oblasti modelovanja sistema koriste se tri vrste modela: fizički, analogni i matematički.

Fizički model sličan je realnom sistemu. On se, međutim, može često uprotiviti tako da zahvata samo važne karakteristike realnog sistema, odnosno samo detalj koji se posmatra.

Analogan model ne liči na stvaran sistem. Na primer, električni sistem prikazuje se hidraulički, pa se proticanje elektriciteta prikazuje proticanjem hidrauličkog fluida. U stvari, koriste se analogne matematičke relacije.

Matematički model izražava posmatrana svojstva realnog sistema matematičkim algoritmom.

Fizički modeli su najrealniji, najbliži su realnom sistemu, ali su skupi i komplikovani za izradu i analizu. Analogni su apstraktniji, ali često pogodniji za realizaciju. Sa tog stanovišta, matematički modeli su najpogodniji, mada su najopštiji i najapstraktniji.

Poseban vid matematičkog modelovanja je statističko modelovanje. Metod statističkog modelovanja (simulacije) u stvari je metod rešavanja numeričkih zadataka. Naziva se još i metod Monte-Karlo [2] a dobio je najširu primenu sa razvojem elektronskih računskih sistema. Statističkim modelovanjem obuhvataju se one pojave, procesi i veličine koji imaju slučajni karakter. Pri analizama svih važnijih statističkih karakteristika važni su tačnost i verodostojnost rezultata, što zavisi od broja simulacionih eksperimenata, a greška je reda kvadratnog korena iz $(1/n)$.

Efikasnost metode dolazi do najvećeg izražaja upravo kod najsloženijih matematičkih sistema.

U radu se razmatraju zadaci koji se odnose na modelovanje statističkih eksperimenata iz domena pouzdanosti tehničkih sistema.

Opis metode Monte-Karlo

Metod Monte-Karlo ima jednostavan algoritam za izračunavanje. Druge osobine metode jeste da je greška izračunavanja, po pravilu, proporcionalna kvadratnom korenu iz D/N , gde je D konstanta, a N broj ispitivanja (eksperimenata). Ako želimo da smanjimo grešku $1 \cdot 10^2$ puta broj eksperimenata treba povećati $1 \cdot 10^4$ puta.

Na primer, treba naći približnu vrednost veličine A korišćenjem metode Monte-Karlo. Odredi se raspodela neke slučajne promenljive X , tako da je matematičko očekivanje ove veličine $m(X)=A$. Na osnovu realizovanog uzorka $(x_1, \dots, x_n)$ velikog obima n ,

matematičko očekivanje A ocenjuje se sredinom uzorka:

$$a = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (1)$$

Tačnost ove ocene može se proceniti sa datom verovatnoćom. Prema centralnoj graničnoj teoremi može se postaviti izraz:

$$P(|\bar{x} - a| < \epsilon) = 2\Phi\left(\epsilon \frac{\sqrt{n}}{s_n}\right),$$

$$s_n^2 = \frac{1}{n} \sum (x_k - \bar{x}_n)^2 \quad (2)$$

Za verovatnoću 0,95 tačnost je reda kvadratnog korena iz $(1/n)$, što se za manje vrednosti n ne smatra za veliku efikasnost. Metoda se primenjuje tamo gde se ne traži znatno veća tačnost od ove.

Za modelovanje neke slučajne veličine (x) potrebno je poznavati ili odrediti zakon raspodele te slučajne veličine, a onda za funkciju raspodele $F(x)$ pretpostavljamo da je uniformno raspodeljena u opsegu $(0,1)$. Zatim se $F(x)$ zamenjuje sa slučajnim brojem iz skupa uniformno raspodeljenih slučajnih brojeva i za svaku vrednost $F(x_i)$ izračuna se vrednost modelovane slučajne veličine iz izraza kojim je definisana funkcija raspodele slučajne veličine.

Modelovanje funkcije raspodele slučajne veličine

Osnovni problem svodi se na određivanje slučajnog uzorka (skupa vrednosti) uniformno raspodeljene funkcije raspodele slučajne promenljive veličine, što se može rešiti korišćenjem tablica slučajnih brojeva ili najčešće putem generisanja slučajnih brojeva u toku procesa modelovanja, koji se dobijaju preko definisanog matematičkog algoritma. Potrebno je da perioda ponavljanja istog niza pseudoslučajnih

brojeva bude što veća. Pored jednostavnosti za generisanje, pseudoslučajni brojevi imaju prednost jer se pomoću njih može realizovati ponovljivost, što je značajno pri upoređenju raznih analitičkih varijanti, radi ocene efikasnosti pojedinih matematičkih modela u toku konkretnog teoretskog istraživanja.

Rekurentna formula za izračunavanje pseudoslučajnih brojeva ima oblik:

$$z_{n+1} = a \cdot z_n \pmod{m} \quad (3)$$

Relacija (3) definiše da je z_{n+1} ostatak pri deljenju z_n sa m . Ovako dobijen pseudoslučajni broj je ceo broj. Da bi dobili slučajan broj $0 < y < 1$ koristi se izraz:

$$y_n = z_n / m \quad (4)$$

U izrazima (3) i (4) pogodno su odabrani veliki brojevi, tako da se postigne što veća perioda ponavljanja. Na primer, mogu se naći primeri gde je $a=997$ i $m=1000$. Znatno jednostavniji za primenu je algoritam (predložila ga je firma Hewlet Packard) u obliku:

$$\begin{aligned} y_{n+1} &= y_n \cdot 997 - \lfloor (y_n \cdot 997) \rfloor, \\ y_0 &= 0,5284163 \end{aligned} \quad (5)$$

Izračunavanje funkcija metodom Monte-Karlo

U matematičkoj statistici, kao i u oblasti pouzdanosti i u drugim oblastima, potrebno je poznavanje određenih funkcija, kao što su gama, beta i Laplasova funkcija. Vrednosti ovih funkcija daju se tabelarno, ali je njihova primena u tom obliku nepodesna.

Metoda Monte-Karlo omogućava približno izračunavanje funkcija, što se u praksi pokazalo kao povoljno zbog jednostavnosti i velike tačnosti.

Približno izračunavanje određenog integrala

Neka je zadata funkcija $f(x)$ na intervalu $a \leq x \leq b$. Zadatak je da se približno izračuna integral:

$$I = \int_a^b f(x) \quad (6)$$

Paralelno sa funkcijom $f(x)$ može se pretpostaviti neka slučajna veličina ξ koja na intervalu a, b ima gustinu raspodele $p_\xi(x)$ i koja zadovoljava uslove [1]:

$$p_\xi(x) > 0 \quad (7)$$

$$\int_a^b p_\xi(x) dx = 1 \quad (8)$$

Pored slučajne veličine ξ formira se na istom intervalu a, b i izvedena slučajna veličina

$$\eta = \frac{f(\xi)}{p_\xi(\xi)}$$

Matematičko očekivanje ove slučajne veličine je

$$M\eta = \int_a^b [f(x) / p_\xi(x)] \cdot p_\xi(x) dx = I \quad (9)$$

odnosno, to je vrednost integrala datog izrazom (6).

Posmatrajmo niz od N jednorodnih nezavisnih slučajnih veličina $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots, \eta_N$ i primenimo na njega centralnu graničnu teoremu matematičke statistike. Po njoj za dovoljno veliko N važi verovatnoća:

$$P\left\{ \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i - I \right| < 3 \sqrt{\frac{D\eta}{N}} \right\} \approx 0,997 \quad (10)$$

U izrazu (10) N je broj članova niza, $D\eta$ je disperzija slučajne veličine η i I vrednost integrala (6).

Izraz (10) znači da se, ako se izabere dovoljno veliko N , može sa velikom tačnošću tvrditi da je:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N \frac{f(\xi_i)}{p_{\xi}(\xi_i)} \sim I \quad (11)$$

Metoda se u praksi svodi na to da se odabere pogodan matematički model za funkciju gustine raspodele $p_{\xi}(x)$. Kada imamo tu funkciju, njoj odgovara za bilo koju vrednost X verovatnoća

$$P(X) = \int_a^x p_{\xi}(x) dx \quad (12)$$

Ako verovatnoća $P(X)$ uzima vrednosti iz uniformno raspodeljenog slučajnog skupa (preko slučajnih ili pseudoslučajnih brojeva), za poznate vrednosti $p(x)$ možemo modelovati vrednosti za X i uneti ih u izraz (10).

Za konkretan određeni integral bira se pogodna funkcija gustine raspodele $p_{\xi}(x)$.

Primena ove metode ilustruće se na primerima određivanja vrednosti gama, beta i Laplasove funkcije.

Izračunavanje vrednosti gama funkcije

Gama funkcija ima oblik:

$$\Gamma(p) = \int_0^{\infty} t^{p-1} \cdot e^{-t} dt, \quad p > 0 \quad (13)$$

Ova funkcija ima osobinu da važi izraz [5]:

$$\Gamma(1+p) = p\Gamma(p), \quad (14)$$

koji se koristi u praksi za brže izračunavanje određenih vrednosti.

Za približno izračunavanje vrednosti funkcije (13), po metodi izloženoj u ovoj tački pokazalo se kao izuzetno povoljno da se kao funkcija $p_{\xi}(x)$ upotrebi funkcija gustine raspodele za Vejbulov zakon raspodele, odnosno:

$$p_{\xi}(x) = \gamma \cdot \beta \cdot X^{\beta-1} \exp(-\gamma \cdot X^{\beta}) \quad (15)$$

preko koje se izračunava verovatnoća:

$$P(x) = \int_0^x p_{\xi}(x) dx = \exp(-\gamma \cdot X^{\beta}) \quad (16)$$

gde je:

γ — parametar razmere,

β — parametar oblika.

Između raznih vrednosti ovih parametara izabraćemo one koji su ispitani kao najpovoljniji u praksi, a to su $\beta=0,3$ i $\gamma=0,5$.

Ako za razne vrednosti verovatnoće $P(x_i)$, koja može imati determinisane vrednosti od 0 do 1, izračunamo iz izraza (6) vrednosti x_i , dobijamo:

$$X_i = \left[\frac{\ln \left(\frac{1}{P(x_i)} \right)}{\gamma} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (17)$$

Relacija (11) sada ima oblik:

$$\Gamma(p) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{X_i^{p-1} \cdot e^{-X_i}}{\gamma \cdot \beta \cdot X_i^{\beta-1} \exp(-\gamma \cdot X_i^{\beta})} \quad (18)$$

gde je:

x_i — izračunato iz izraza (17).

Za vrednost verovatnoće $P(X_i)$ koristimo izraz:

$$P(X_i) = P_0 - \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} \quad (19)$$

gde je:

$$P_0 = 1 - \frac{1}{2N}$$

Ovako definisano $P(X_i)$ omogućava znatno bržu konvergenciju niza (11) nego kada se za tu verovatnoću koriste slučajni brojevi.

Praktično, već za $N=20$ dobijaju se sa tačnošću 10^{-5} vrednosti gama funkcije $\Gamma(p)$, u opsegu p (od 1 do 2), a za

Tabela 1

Redni broj	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
$\Gamma(p)$	0,95135	0,91817	0,89747	0,88726	0,88623	0,89352	0,90864	0,93138	0,96177	1,00000

vrednosti p izvan ovog intervala može se koristiti izraz (14).

U tabeli 1 date su ovim putem izračunate vrednosti gama funkcije za 10 vrednosti parametra p (od 1,1 do 2,0).

Izrazi (17), (18) i (19) pogodni su za unošenje u aplikacione softvere. Za vrednosti $n > 3/4 N$ članovi niza (18) veoma brzo teže nuli, pa se za izračunavanje može prekinuti kod $i=3/4 N$, ostali članovi niza zamene se sa nulom.

Izračunavanje vrednosti beta funkcije

Beta funkcija definiše se integralom:

$$\beta(p,q) = \int_0^x t^{p-1}(1-t)^{q-1} dt \quad (20)$$

Za parametre p i q beta funkcija ima vrednost [5]:

$$\beta(p,q) = \frac{\Gamma(p) \cdot \Gamma(q)}{\Gamma(p+q)} \quad (21)$$

pa se njeno izračunavanje svodi na izračunavanje vrednosti gama funkcije $\Gamma(p)$, $\Gamma(q)$ i $\Gamma(p+q)$ koje se uvrste u izraz (21).

Izračunavanje Laplasove funkcije

Laplasova funkcija definiše se integralom:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (22)$$

Za primenu izložene metodologije može se, kao model za gustinu raspodele $p_{\xi}(x)$, koristiti gustina uniformne raspodele definisane u intervalu 0 do X, pa je

$$p_{\xi}(x) = \frac{1}{x} \quad (23)$$

Verovatnoća P(x) je:

$$p(t_i) = \int_0^{t_i} \frac{1}{x} dt = \frac{t}{x} \quad (24)$$

odakle je $t_i = P(t_i) \cdot X_i$, a izraz (6) ima oblik:

$$\Phi(x) = \frac{1}{N\sqrt{2\pi}} \sum_{i=1}^N \frac{e^{-\frac{t_i^2}{2}}}{x} \quad (25)$$

Tabela 2

Redni broj	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
$\Phi(t)$	0,19146	0,34194	0,43319	0,47725	0,49379	0,49865	0,49977	0,49996	0,499997	0,499997

Za $N=50$ dobijaju se, sa tačnošću 10^{-5} , vrednosti Laplasove funkcije za t od nule do 5. Za $N=20$ dobijaju se vrednosti sa tačnošću 10^{-4} . Za 10 raznih vrednosti t (od 0,5 do 5,0) prikazane su ovako izračunate Laplasove funkcije (tabela 2).

Za modelovanje vrednosti t po izrazu (24) koriste se vrednosti za $P(t_i)$ dobijene prema izrazu (19).

Modelovanje eksperimenta primenom metode Monte-Karlo

Pri eksperimentalnim ispitivanjima dobijaju se rezultati slučajnog karaktera, koji se mogu razmatrati kao vrednosti posmatrane slučajne veličine koje podležu određenim statističkim zakonitostima. Zbog toga je pri statističkim analizama ključna funkcija raspodele slučajne veličine, kao i parametri koji iz nje proizilaze.

U praksi se zakon raspodele unapred poznaje, ili se on pretpostavi, a zatim se ta hipoteza testira putem statističkih testova, kao što je, na primer, test Kolmogorova-Smirnova.

Određivanjem parametara ove funkcije dobija se statistička slika o osobinama tehničkog proizvoda, što je cilj izvođenja eksperimenata (ispitivanja).

Modelovanjem se simuliraju eksperimentalni rezultati bez skupih stvarnih ispitivanja, a generisani slučajni uzorci imaju bitne prednosti, kao što su brzina rada i ponovljivost.

Primeri modelovanja vremena rada do pojave otkaza za razne zakone raspodele

Pri modelovanju vremena rada do pojave otkaza, koji se pokorava poznatom zakonu raspodele, posmatramo funkciju raspodele vremena rada do otkaza $F(t)$ koja je definisana izrazom:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (26)$$

gde je:

$f(t)$ — funkcija gustine raspodele vremena rada do pojave otkaza.

Pretpostavlja se, zatim, da ova funkcija dobija razne slučajne vrednosti iz skupa uniformno raspodeljenih slučajnih ili pseudoslučajnih brojeva $N(0,1)$, a zatim se za svaku ovu vrednost izračunava vreme rada do pojave otkaza kao inverzna funkcija:

$$t = F(t)^{-1} \quad (27)$$

Za neprekidne funkcije, svakoj vrednosti jednoznačno odgovara neko vreme t po izrazu (27).

Normalna raspodela

Funkcija raspodele ima oblik:

$$F(t) = 1 - \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^t e^{-1/2 \cdot \frac{(t-m)^2}{\sigma^2}} \cdot dt \quad (28)$$

Integral u izrazu (28) ne može se izraziti preko elementarnih funkcija, pa se predstavlja preko Laplasove funkcije:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt \quad (29)$$

Ako se za vrednost funkcije raspodele uzme slučajan broj iz skupa $N(0,1)$ onda se t može izračunati sukcesivnim približavanjem, tako što se izračuna $1 - F(t)$, a integral se računa kao zbir:

$$\frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \sum_0^n e^{-\frac{(\sum t_i)^2}{2}} \cdot \Delta t \quad (30)$$

gde je:

$$t_i = \sum_0^n \Delta t$$

Za dovoljno malo Δt i dovoljno veliko n može se, sa bilo kojom tačnošću, odrediti t tako da se zadovolji relacija (28).

Pomoću ovako modelovanog vremena rada do pojave otkaza, koje odgovara normalnoj raspodeli kod koje je standardna devijacija jednaka 1, a srednje vreme $m=0$, izračunava se modelovano vreme rada do pojave otkaza za bilo koje srednje vreme, i bilo koju standardnu devijaciju, po sledećem izrazu:

$$t_i = m + \sigma t \quad (31)$$

Vejbulova raspodela

Funkcija raspodele za ovu raspodelu glasi:

$$F(t) = 1 - e^{-\gamma t^\beta} \quad (32)$$

Odatle se izračunava vreme rada do pojave otkaza:

$$t_i = \left[\frac{-\ln(1 - F(t))}{\gamma} \right]^{1/\beta} \quad (33)$$

Ako se ne raspolaze elektronskim računarom koji generiše pseudoslučajne brojeve, ovi brojevi se mogu generisati pomoću sledeće rekurentne formule:

$$Y_{i+1} = (Y_i \cdot 997) - \lfloor (Y_i \cdot 997) \rfloor \quad (34)$$

U izrazu (34) u obzir se uzima samo broj manji od 1, tako što se od proizvoda u zagradi oduzme njegov celobrojni deo.

Literatura:

- [1] Tomović, S.: Izračunavanje i korišćenje nekih važnih funkcija u matematičkoj statistici i pouzdanosti, »Naučno-tehnički pregled«, br. 9, vol. 46, Beograd, 1996.
- [2] Sobol, I. M.: Metod Monte-Karlo, »Nauka« Moskva, 1978.

Zaključak

Statističko modelovanje je savremeni prilaz analitičkim analizama slučajnih veličina. Pojave ili procesi, koji imaju slučajni karakter, mogu se izračunati preko slučajnih brojeva. Najvažniju ulogu imaju uniformno raspodeljeni slučajni i pseudoslučajni brojevi iz skupa $(0, 1)$, kojima se predstavlja verovatnoća nastupanja slučajnih događaja koji se posmatraju. Zakonitosti raspodela posmatranih slučajnih veličina mogu se prema potrebi modelovati. Pri teorijskim istraživanjima modelovanje može da zameni stvaran eksperiment, čime se postižu uštede, u vremenu potrebnom da se prikupe uzorci neophodni za teorijska istraživanja.

Na primer, da bi se pri razvoju nove metode za ocenu parametara neke raspodele, proverila efikasnost date metode i uporedila sa drugim poznatim metodama, mogu se modelovati eksperimentalni skupovi i na osnovu njih odrediti parametar po novoj metodi, a zatim ga statistički analizirati, putem određivanja statističkih pokazatelja, kao što su srednja vrednost, standardna devijacija i dr.

Metoda Monte-Karlo, koja se najčešće primenjuje kod statističkog modelovanja, omogućava efikasne približne proračune pri određivanju vrednosti raznih funkcija.

- [3] Ivković, Z.: Matematička statistika, »Naučna knjiga«, Beograd, 1976.
- [4] Zečević, T.: Matematičko i statističko modeliranje, »Stručna knjiga«, Beograd, 1977.
- [5] Vukadinović S.: Elementi teorije pouzdanosti i teorije obnavljanja tehničkih sistema, »Privredni pregled«, Beograd, 1979.

ANALIZA UTICAJA BRZINE PROTICANJA TEČNOSTI NA DINAMIČKO PONAŠANJE SLOBODNO OSLONJENE CEVI

UDC: 621.644.01

Rezime:

Pri projektovanju sistema za transport fluida i rastresitih materijala cevovodom, odnosno konstruisanju mobilnog cevovodnog sistema, pojavljuje se potreba da se izvesno rastojanje, kao što je, na primer, saobraćajnica, premosti. U praksi se premošćavanje rešava tako da cev kojom se transportuje fluid bude u isto vreme i most kojim se ostvaruje premošćavanje. Ovakvo rešenje problema, pored toga što je jeftinije, sadrži i izvesne nedostatke koji se ogledaju u ograničenoj brzini proticanja fluida, kako se ne bi narušio integritet konstrukcije. U radu je izvršena analiza mogućih stanja konstrukcije i izveden zaključak o veličini dozvoljene brzine proticanja fluida kroz cevovod.

Ključne reči: fluid, brzina proticanja, cevovod.

ANALYSIS OF EFFECTS OF LIQUID FLOW VELOCITY ON DYNAMIC BEHAVIOUR OF FREELY SUPPORTED PIPES

Summary:

In design of mobile pipeline systems for transport of fluids and finely divided solids there are different problems to be solved such as, for example, spanning of natural and artificial obstacles like highways, railroads, ... One of practical solutions is to design pipes to serve as bridges at the same time. Although cheaper, this solution has one disadvantage — fluid flow velocity is limited in order not to bring the structure into danger. In this paper possible states of the structure are analyzed and the conclusion about the permitted fluid flow velocity through pipes is given as well.

Key words: fluids, flow velocity, pipeline.

Uvod

Pri konstrukciji cevovoda kojim će se transportovati tečnost ili rastresit materijal, odnosno projektovanju pokretnog cevovoda za navodnjavanje, naftovoda, toplovoda i sličnih instalacija dolazi se u situaciju da se cevovodom mora premostiti određeno rastojanje.

Ovakvi cevovodi često su izloženi spoljašnjim slučajnim opterećenjima

koja deluju kratko, ali intenzivno, tako da izazivaju poremećaj statičke ravnoteže cevi. U tim uslovima nastupa oscilatorno kretanje cevi, uzrokovano elastičnim silama akumuliranim u elastičnim deformacijama cevi, ali i nasilnom promenom pravca kretanja tečnosti kroz cev. Pojavu oscilacija cevovoda često može da prouzrokuje i turbulentno kretanje tečnosti kroz cev. Ovakvo oscilatorno kretanje cevi treba izbegavati još u fazi projektova-

nja cevovoda, jer u praksi može doći do neželjenih posledica.

U radu su analizirani ovi uticaji i njihovo odražavanje na ponašanje cevi, i određene karakteristične brzine proticanja tečnosti koje imaju najmanji uticaj na poremećaj dostignute statičke ravnoteže cevovoda.

Analiza problema kao kvazistatičkog stanja cevi

Radi analize ponašanja cevi kroz koju protiče tečnost posmatra se, najpre, takozvano kvazistatičko stanje cevi — odnosno stanje pri kojem dolazi do vrlo sporih promena položaja neutralne linije cevi, pa se može smatrati da cev, i pored promenljivog opterećenja, miruje. Pri toj analizi smatra se da je cevovod od materijala čiji je modul elastičnosti E , površinu poprečnog preseka cevi karakteriše moment inercije J , a specifično kontinualno opterećenje prazne cevi p . Cev je postavljena horizontalno i zglobno oslonjena u ležištima čije je međusobno rastojanje l .

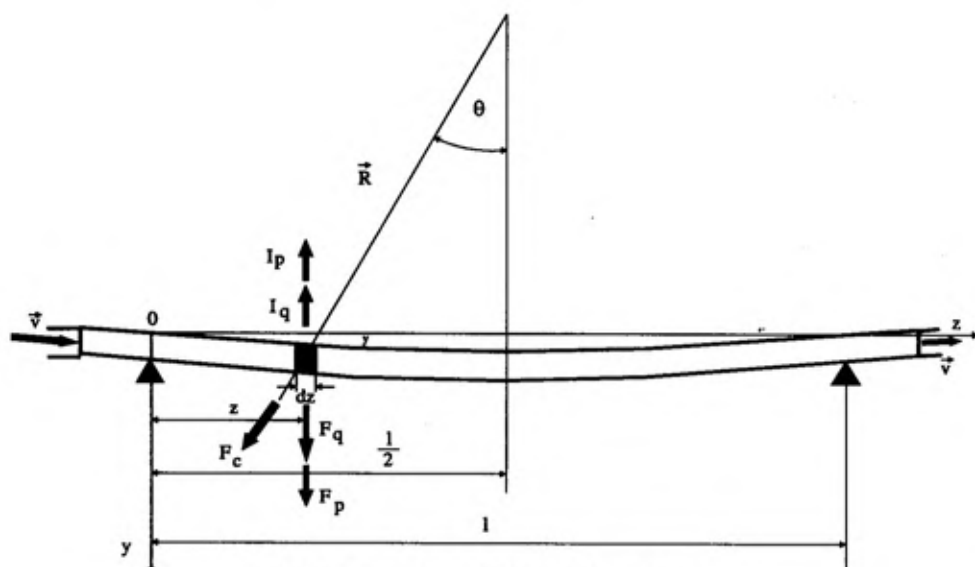
Kroz ovako definisanu cev protiče tečnost brzinom v , što znači da je unutrašnjost cevi potpuno ispunjena tečnošću koja izaziva dopunsko kontinualno opterećenje q . Pod dejstvom ovakvog statičkog opterećenja i opterećenja izazvanog promenom smera brzine proticanja tečnosti, cev će naćiniti ugib y . Sile koje opterećuju cev imaju isti vertikalni pravac, pa je zbog toga u tekstu izostavljena vektorska oznaka za sile.

Koordinatni početak postavljen je u levom osloncu cevi, a osa z usmerena prema desnom osloncu. Osa y usmerena je vertikalno naniže i prema njoj se meri progib cevi, što je prikazano na slici.

Posmatrano je kvazistatičko stanje cevi koje pretpostavlja da se poluprećnik krivine elastićne linije, koja je nastala usled statičkih opterećenja F_q i F_p i dinamićkog opterećenja zbog proticanja, tokom vremena ne menja.

Sila težine F_q pokretnog opterećenja na cevi dućine dz iznosi:

$$F_q = q dz$$



Prikaz cevi kroz koju protiče tečnost

a sila inercije I_q pokretne mase tečnosti usled vertikalnog propadanja, za veličinu progiba cevi na mestu z , iznosiće

$$I_q = - \frac{q}{g} \frac{d^2 y}{dt^2} dz.$$

Kako je elastična linija savijene cevi deo kružnice poluprečnika R , na tečnost će, zbog njenog kretanja po kružnici, delovati i centrifugalna sila čija se komponenta u smeru ose y može iskazati kao:

$$F_c = \frac{q}{g} \frac{v^2}{R} dz \cos \Theta = \\ = \frac{q}{g} \frac{v^2}{R^2} \sqrt{R^2 - \left(\frac{l}{2} - z\right)^2} dz,$$

$$\text{za } 0 < z < \frac{l}{2} \text{ i}$$

$$F_c = \frac{q}{g} \frac{v^2}{R^2} \sqrt{R^2 - \left(z - \frac{l}{2}\right)^2} dz \text{ za } \frac{l}{2} < z < l,$$

gde je Θ ugao između vertikalne ose y i trenutnog pravca radijusa elementarne čestice tečnosti.

Ukupno specifično opterećenje cevi, koje predstavlja sumu spoljašnjih sila koje deluju na cev, iznosi:

$$F_R = q + p + \frac{q}{g} \frac{v^2}{R} dz \cos \Theta - \frac{q}{g} \frac{d^2 y}{dt^2} dz = \\ = q + p + \frac{q}{g} \frac{v^2}{R} dz \cos \Theta - \frac{q}{g} \frac{d^2 y}{dz^2} v^2 \quad (1)$$

Kako je radijus krivine elastične linije R relativno veliki, a pri tome još i kvadriran, količnik kvadrata brzine i kvadrata radijusa teži nuli, pa se izraz za centrifugalnu silu može, bez veće pogreške, zanemariti.

Zanemarivanjem centrifugalne sile u izrazu (1) i izjednačavanjem spoljašnjih sila F_R sa silama koje su to opterećenje izazvale unutar materijala

cevi dobija se jednačina elastične linije cevi, iz uslova jednakosti tih sila, koja glasi:

$$EJ \frac{d^4 y}{dz^4} = q + p - \frac{q}{g} \frac{d^2 y}{dz^2} v^2 \quad (2)$$

Rešenje diferencijalne jednačine ima oblik:

$$y = \frac{(p+q)l^2}{4EJu^2} \left\{ \frac{1}{2} (z^2 - lz) + \right. \\ \left. + \frac{l^2}{u^2} \left[\frac{\cos\left(\frac{2z}{l} - 1\right)u}{\cos u} - 1 \right] \right\} \quad (3)$$

$$\text{gde je } u = \frac{vl}{2} \sqrt{\frac{q}{gEJ}}.$$

Dobijeno rešenje predstavlja jedinačinu ugiba cevi u funkciji brzine proticanja tečnosti. Očigledno je da će ugib cevi najveće vrednosti imati na sredini raspona, tj. na $\frac{l}{2}$, i iznosiće:

$$y\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{(p+q)l^4}{32EJu^2} \left[\frac{8}{u^2} \left(\frac{1}{\cos u} - 1 \right) - 1 \right] \quad (4)$$

Ugib cevi povećava se sa povećanjem brzine i postaje beskonačno veliki kada je $\cos u = 0$, odnosno kada je $u = \frac{\pi}{2}$. Uvrštavanjem ove vrednosti u izraz za u dobija se kritična brzina tečnosti kroz cev:

$$\frac{\pi}{2} = \frac{vl}{2} \sqrt{\frac{q}{gEJ}},$$

odakle sledi da je:

$$v_{krit} = \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{gEJ}{q}} \quad (5)$$

Pod kritičnom brzinom tečnosti podrazumeva se ona brzina proticanja pri kojoj cev dobija beskonačno veliki statički ugeb. Ovu vrednost brzine tečnosti treba izbegavati pri projektovanju cevovoda, kako ne bi došlo do neželjenih posledica.

Iz izraza (4) takođe se vidi da se sa porastom dužine cevi zglobno oslonjene na dva oslonca, ili povećanjem raspona cevi, granice kritične vrednosti brzine smanjuju, što znači da se radi sigurnijeg rada mora smanjiti brzina proticanja. Takođe, brzina proticanja se mora smanjiti ukoliko se kroz cevovod mora propustiti tečnost većeg specifičnog protočnog opterećenja. To bi trebalo imati u vidu pri projektovanju cevovoda kojim se premošćava saobraćajnica ili povezuju dve obale reke.

Dinamička analiza cevovoda

Navedeni izrazi odnose se na kvazistatičko ponašanje cevovoda, tj. promene koje se mogu očekivati su vrlo spore, pa se sva događanja mogu posmatrati kao statički problem. Položaj koji je cev zauzela pod uticajem navedenog opterećenja vremenom se neće menjati. Međutim, ukoliko se iz bilo kog razloga unese neki spoljašnji poremećaj ravnoteže cevi doći će do njenog oscilovanja oko postignutog položaja statičke ravnoteže. Nameće se problem određivanja perioda sopstvenih oscilacija cevi kroz koju protiče tečnost, kao i određivanje uzroka takvog kretanja, odnosno, kako odrediti uticajne veličine a da ne dođe do takvih pojava.

U uslovima oscilovanja neutralna osa cevi menja svoj položaj tokom vremena, oscilujući oko položaja koji je imala u uslovima statičke ravnoteže, pa se može napisati da je ugeb neutralne ose cevi: $y=y(z,t)$.

Usled promene položaja neutralne ose cevi tokom vremena i na cev će delovati specifična sila inercije I_p ma-

se cevi koja nije bila prisutna pri kvazistatičkom proučavanju problema. Ona se može napisati kao:

$$I_p = - \frac{p}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (6)$$

Radi određivanja sile inercije pokretnog opterećenja I_q cevi, potrebno je da se koordinata z izrazi u funkciji vremena, odnosno $z=vt$.

Promena ordinate u po vremenu naći će se kao supstancijalna derivacija, tj.:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{\partial y}{\partial t} + v \frac{\partial y}{\partial z},$$

gde prvi član govori o lokalnoj brzini promene progiba, a drugi o promeni brzine progiba nastalog kao posledica promene smera kretanja tečnosti kroz cev. Druga materijalna derivacija po vremenu, koja je potrebna, naći će se iz izraza:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right) + \frac{d}{dt} \left(v \frac{\partial y}{\partial z} \right) \quad (7)$$

što daje prvi član:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right) = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + v \frac{\partial^2 y}{\partial t \partial z},$$

i drugi član:

$$\frac{d}{dt} \left(v \frac{\partial y}{\partial z} \right) = v \frac{\partial^2 y}{\partial t \partial z} + v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial z^2}.$$

Treba napomenuti da brzina tečnosti kroz cev nije promenila svoj intenzitet usled pojave poremećaja već samo menja pravac, pa je zbog toga posmatrana kao konstantna veličina. Poznajući ova dva člana, druga derivacija po vremenu može se napisati kao zbir:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y}{dt^2} &= \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + v \frac{\partial^2 y}{\partial t \partial z} + v \frac{\partial^2 y}{\partial t \partial z} + \\ &+ v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + 2v \frac{\partial^2 y}{\partial t \partial z} + v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} \end{aligned}$$

Sada se može napisati i sila inercije cevi:

$$I_q = -\frac{q}{g} \left(\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + 2v \frac{\partial^2 y}{\partial t \partial z} + v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} \right) \quad (8)$$

Jednačina kretanja cevi, koja je nekim spoljašnjim poremećajem izvedena iz statičke ravnoteže i puštena da slobodno osciluje oko položaja statičke ravnoteže, nalazi se iz jednakosti spoljašnjih sila i sila nastalih u materijalu cevi, kao reakcija materijala na spoljašnje sile, i biće:

$$EJ \frac{d^4 y}{dz^4} = -\frac{p}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \frac{q}{g} \left(\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + 2v \frac{\partial^2 y}{\partial t \partial z} + v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} \right) \quad (9)$$

Nakon sređivanja izraza (9) dobija se diferencijalna jednačina:

$$\frac{d^4 y}{dz^4} + a \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + b \frac{\partial^2 y}{\partial t \partial z} + c \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = 0 \quad (10)$$

gde je:

$$a = \frac{p+q}{gEJ}, \quad b = \frac{2qv}{gEJ}, \quad c = \frac{qv^2}{gEJ}$$

$$\text{Član } b \frac{\partial^2 y}{\partial t \partial z} = b \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right)$$

iskazuje zakonitost promene brzine ugiba duž ose cevi. Ova promena se može, budući da zavisi od koeficijenta prigušenja oscilacija cevi, bez činjavanja većih pogrešaka, zanemariti, ali se time dobija jednostavniji oblik diferencijalne jednačine:

$$\frac{\partial^4 y}{\partial z^4} + a \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + c \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = 0 \quad (11)$$

Rešenje ove diferencijalne jednačine potražiće se za cev koja se zglobno oslanja, u obliku:

$$y = A \sin \frac{n\pi z}{l} \sin \omega t \quad (12)$$

gde je:

ω — učestalost ili frekvencija.

Unoseći ovo rešenje u diferencijalnu jednačinu, dobija se jednačina:

$$\left(\frac{n\pi}{l} \right)^4 - a\omega^2 - c \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 = 0 \quad (13)$$

Iz jednačine (13) nalazi se učestalost oscilovanja:

$$\omega = \sqrt{\frac{\left(\frac{n\pi}{l} \right)^4 - c \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2}{a}} \quad (14)$$

Kako je $c = \frac{qv^2}{gEJ}$ iz izraza (14) vi-

di se da učestalost oscilovanja cevi zavisi od brzine proticanja tečnosti v kroz cev, kao i od specifične težine opterećenja cevi q.

Kada brzina proticanja tečnosti kroz cev postane tolika da se statička ravnoteža nalazi na samoj granici, što podrazumeva da i malo povećanje te brzine može dovesti do slobodnog oscilovanja sistema, kaže se da je to kritična brzina. Ovakvu brzinu karakteriše stanje sistema u kojem učestalost teži nuli, a period oscilovanja beskonačnosti. Da bi se ta brzina odredila potrebno je u jednačini (14) ω izjednačiti sa nulom, što dovodi do nove jednačine:

$$\left(\frac{n\pi}{l} \right)^4 - c \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 = 0 \quad (15)$$

Iz izraza (15) dobija se da je:

$$c = \frac{qv^2}{gEJ} = \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2,$$

odnosno kritična brzina proticanja iznosi:

$$v_{krit} = \frac{n\pi}{l} \sqrt{\frac{gEJ}{q}} \quad (16)$$

Njena najmanja vrednost dobija se za $n=1$ i odgovara statičkoj kritičnoj brzini proticanja, što ukazuje na to da pri projektovanju cevovoda kojim se premošćuje neki razmak ili raspon treba voditi računa da brzina proticanja tečnosti ne prelazi vrednost kritične brzine.

Zaključak

Često je potrebno da se cevovodom, kojim se transportuje rastresit materijal ili fluid, premosti izvesno rastojanje iznad površine tla. Tada se najčešće koristi isti cevovod kao samonoseća konstrukcija, što znači bez do-

datnog potpornog nosača cevi. Pri prekoračenju brzine transporta može doći do pojave nestabilnosti cevovoda, što može ugroziti stabilnost konstrukcije. U ovom radu analizirana su moguća ponašanja cevovoda u takvim uslovima, u zavisnosti od raspona cevovoda, materijala cevovoda, karakteristike preseka cevi, kao i od brzine proticanja. Najčešće se ne može mnogo uticati na izbor materijala cevi, jer se one izrađuju po određenim standardima, ali se problem mora rešavati pravičnim izborom brzine proticanja transportovane materije. Ta brzina ne bi trebalo da pređe izračunatu kritičnu vrednost ukoliko se želi dugotrajan i pouzdan rad cevovoda.

Literatura:

- [1] Rašković, D.: Teorija oscilacija, Naučna knjiga, Beograd, 1965.
- [2] Rašković, D.: Otpornost materijala, Naučna knjiga, Beograd, 1965.

- [3] Panovko, J. G., Gubanov, I. I.: Ustojčivost i kolebanja uprugih sistema, Nauka, Moskva, 1967.
- [4] Novacki, V.: Dinamika elastičnih sistema, Građevinska knjiga, Beograd, 1966.

Mihajlo Mihajlović,
dipl. inž.
Viša tehnička škola,
Zrenjanin

NUKLEARNE NAPADNE PODMORNICE KLASE »688« LOS ANGELES

Uvod

Nuklearne napadne podmornice klase »688« su najbrojnije američke nuklearne napadne podmornice (SSN). Iako je njihova gradnja prestala sa početkom gradnje najnovije klase nuklearnih napadnih podmornica, »SSN-21 SEAWOLF«, njihov kvalitet, naoružanje, oprema i mogućnosti će ih i u prvim godinama narednog veka činiti okosnicom američkih podmorničkih snaga. Iako su projektovane krajem šezdesetih godina, stalnom modernizacijom i ugradnjom nove opreme i naoružanja ove podmornice su sigurno najsavremenije na zapadu, a po mnogo čemu i u svetu.

Razvoj i varijante

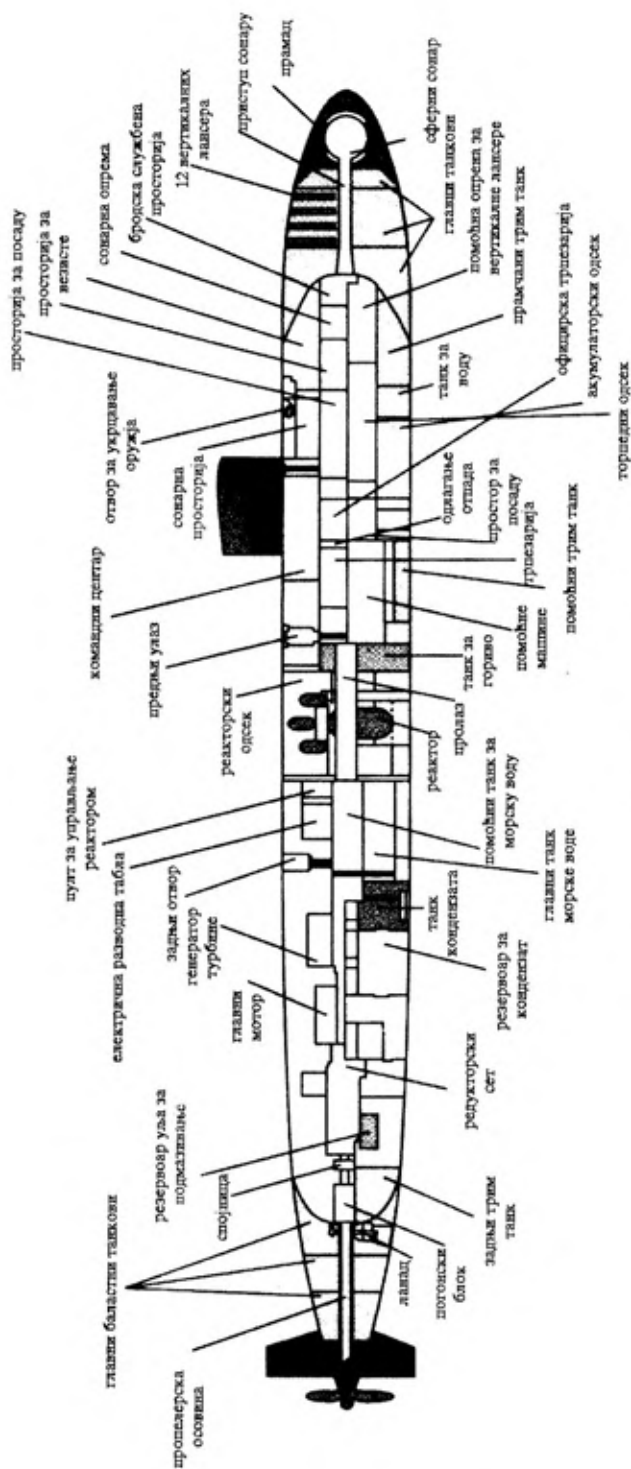
Od svih nuklearnih napadnih podmornica, projektovanih i izgrađenih u SAD, nijedna nije bila predmet toliko kontroverznih političkih igara kao klasa »688«. Projektovane su kasnih šezdesetih godina kada je serija različitih incidenata opredelila SAD u odluci kakvu seriju nuklearnih podmornica treba graditi, da bi se zamenila do tada prilično uspešna klasa STURGEON. Početak je bio u odluci da se izgradi podmornica koja može da se kreće velikom brzinom (35 čv) i podržava operacije flote, pogotovo sastava udarnih nosača aviona. Organizacija u sastavu američke ratne mornarice (U.S.

Navy) pod nazivom Naval Sea System Command (NAVSEA), zadužena, pored ostalog, i za specifikaciju i dizajn novih generacija nuklearnih napadnih podmornica, odredila je da nova podmornica neće imati zahtevanu brzinu, ali će biti znatno unapređena po pitanjima nečujnosti i komfora za posadu. Prvobitni projekat nazvan je »CONFORM«.

Gradnja podmornice je od samog početka predstavljala kompromise između brzine i nečujnosti. Prvi problem bila je ugradnja nuklearnog reaktora čija masa sa pratećom opremom iznosi 600 do 800 tona. To je značilo da će naoružanje i ostali prostori morati biti redukovani. Kompromis je nađen u trupu manjeg prečnika i ograničenju maksimalne dubine ronjenja na oko 300 m (za trećinu manje nego kod klasa PERMIT i STURGEON). Rezervna plovnost iznosila je oko 11%, što je najmanja vrednost od svih američkih nuklearnih podmornica.

Prvi brod iz klase USS Los Angeles, SSN-688 u sastav ratne mornarice primljen je novembra 1976. Po prvi put je sonarni sistem od samog početka uključen u dizajn, odnosno podmornica je projektovana oko sonarnog sistema. Veliku prednost predstavljala je mogućnost nošenja savremenih protivbrodskih raketa HARPOON UGM-84 i torpeda Mk 48. Brodovi prve serije označeni su kao FLIGHT I.

Razvojem krstarećih raketa TOMAHAWK UGM-109 omogućeno je i



Poprečni presek SSN-755, Miami, serija «688I»

njihovo lansiranje iz torpednih cevi, što je uslovalo i redukciju osnovnog torpednog i protivbrodskog raketnog naoružanja. Da bi se rešio problem redukcije torpednog naoružanja, osnovni projekat je redizajniran, tako da je prostor iza sonara na pramcu, iznad glavnih pramčanih tankova prema komandnom tornju, iskorišćen za ugradnju 12 vertikalnih lansera za rakete TOMAHAWK. Podmornicom USS PROVIDENCE, SSN-719, započeta je druga serija nazvana FLIGHT II, sa vertikalnim lanserima za krstareće rakete. Ova serija dobila je i specijalnu oblogu trupa koji smanjuje sonarni odraz i znatno redukuje reflektujući signal aktivnog sonara, a ujedno smanjuje i buku postrojenja. Ovakav način oblaganja trupa primenjen je i za podmornice prve serije tokom remontovanja i modernizacije. Nuklearni reaktor dobio je efikasnije gorivo koje je omogućilo postizanje nešto većih brzina podmornice i povećavalo vreme između dva punjenja.

Spoljašnji izgled brodova prve i druge serije ostao je nepromenjen, osim što prva serija ima nešto uzdignutiji pramac koji je kod druge serije spušten zbog mase vertikalnih lansera.

Treću seriju, nazvanu »Improved Los Angeles class«, ili »688I«, čine najnovije podmornice čiji je izgled drugačiji, a najveća vizuelna razlika je u pramčanim hidroplanima koji su kod prve dve serije montirani na komandnom mostu, a kod serije »688I« postavljeni su u trupu, prema pramcu. To je omogućilo izronjavanje i ispod tanjeg sloja leda, dok ranije serije to nisu mogle. Kod serija FLIGHT I i FLIGHT II pramčani hidroplani se ne mogu zaokretati za 90° kao kod klase »STURGEON«. Na petom brodu serije ugrađen je novi borbena-informacioni sistem BSY-1, i još više je smanjena šumnost, tako da je akustični trag ove serije u odnosu na FLIGHT I manji oko 10 puta.

Poslednja podmornica iz serije »688I«, USS CHEYENNE, SSN-773 porinuta je aprila 1995. u brodogradilištu Newport News Shipyard, čime je gradnja ove klase završena.

Trup

Trup podmornica klase »688« veoma je dugačak i uzak. Službeno objavljene dimenzije su 109,8x10x9,8 m (dužina-širina-gaz). U odnosu na prethodnu klasu STURGEON, duži je za trećinu. Uzak trup je pogodan za razvijanje većih podvodnih brzina i smanjenje otpora kretanju. Izrađen je od zavarenih čeličnih prstenova. U pripremi zavarivanja spojevi su prethodno zagrejani na 64°C. Za gradnju trupa korišćen je čelik HY80, prosečne debljine 7,6 cm.

Po konstrukciji podmornica je jednotrupna sa tankovima smeštenim na pramcu i krmi. Trim-tankovi se nalaze unutar trupa. Na desnom boku je dugačko kućište za pasivni tegljeni sonar, a na krmi je otvor za sidro. Trup je prekriven specijalnim antisonarskim materijalom na bazi gume, koji smanjuje odraz aktivnog sonara i buku unutrašnjeg postrojenja. Njime je prekriven ceo trup osim otvora za torpeda, poklopaca vertikalnih lansera za krstareće rakete, ulazno-izlaznih otvora i sonarskog kućišta. U centralnoj liniji broda nalaze se tri otvora, i to dva iza komandnog mosta, a jedan ispred njega. Prednji otvor služi za utovar naoružanja, a ostala dva predviđena su za posadu. Glavni ulazni otvor je prečnika 1,65 m i visine 2,65 m. Zadnja dva otvora služe i kao komore za spasavanje. Maksimalna dubina sa koje se može vršiti spasavanje individualnim sredstvima iznosi 132 m. Za trup je karakteristično da nema isturenih delova koji smetaju opstrujavanju vode i prouzrokuju dodatne šumove. Komandni toranj je oblikovan tako da smanjuje otpor kretanju. Propulziju podmornice obavlja

jedan propeler izrađen od bronzе sa sedam lopatica. Prečnik propelera je veliki, tako da je smanjen broj obrtaja, što prouzrokuje i smanjenje kavitacionog šuma pri većim brzinama kretanja. Za jedan čvor brzine propeler ostvari devet okretaja. Na komandnom tornju nalazi se komandni most sa neophodnim sredstvima za površinsku navigaciju, a iza njega nalaze se otvori za uređaje poput periskopa, antena, radara, i sl.

Komandni centar

Iz komandnog centra, koji je smješten ispod komandnog mosta, upravlja se podmornicom i svim dejstvima. U sredini komandnog centra nalazi se uzdignuta platforma sa dva periskopa. Na prednjem delu platforme je mesto za oficira palube (Officer of the Deck-OOD), a deo za upravljanje brodom koji čine dva mesta za kormilarjenje nalazi se na levoj strani. Američka mornarica zadržala je tehniku dualnog upravljanja, tako da jedan član posade upravlja hidroplanima, a drugi kormilom pravca (planesman i helmsman). Odmah iza njih nalazi se oficir ronjenja. Upravljačke komande su u obliku poluvolana, a do njih je pult za upravljanje balastnim tankovima. Na pultu za kontrolu balasta nalaze se i komande za hitno izronjavanje, pomoću kojih se visoki pritisak vazduha uvodi u tankove ronjenja i podmornica velikom brzinom izronjava. Manji problem pri upravljanju predstavlja nestabilnost koja se pojavljuje na pojedinim brzinama i dubinama, a nastaje zbog oblika i dužine trupa, kao i prednjeg profila komandnog mosta.

Dva periskopa postavljena su jedan do drugog i to napadni periskop Type 2 sa leve strane a osmatrački periskop Mk 18 sa desne. Mk 18 je najsavremeniji periskop u ratnoj mornarici SAD. Ono što se pomoću njega vidi TV sistemom prikazuje se na mo-

nitorima u komandnom centru. Periskop je opremljen kamerom 70 mm, ESM sistemom za elektronska dejstva i GPS antenom. Glave oba periskopa obložene su RAM (Radar Absorbing Material) materijalom koji smanjuje radarski odraz.

Sistem za navigaciju i stolovi sa kartama za određivanje kursa nalaze se u zadnjem delu prostorije. Na levoj strani, iza pulta ronjenja, su sistemi za navigaciju koji uključuju i Navstar Global Positioning System Receiver-GPS. Ovaj sistem omogućava trodimenzionalnu navigaciju, a može da koristi podatke sa 22 satelita u niskoj orbiti. Iza njega nalazi se brodski inercioni navigacioni sistem-SINS. Praćenje ovog sistema i periodično uključivanje GPS omogućavaju držanje zadanog kursa sa greškom do 50 m. Iako je sistem za navigaciju automatizovan, američke podmornice i dalje koriste ručno određivanje i ucrtavanje kursa. Pored standardnih instrumenata za navigaciju postoje i sistemi za rad pod ledom, koji određuju profil leda pod kojim se plovi, a sadrže i instrumente za određivanje temperature i dubine okolne vode.

Na desnoj strani komandnog centra nalaze se pultovi za naoružanje i borbeni sistem. Kod serije »6881« tu se nalazi borbeni sistem BSY-1, kao i radar.

Radio i elektronska dejstva

Prostorija za radio i elektronska dejstva nalazi se na levom boku, prema krmi. U njoj su smešteni svi radio-uređaji i uređaji za šifriranje. Frekvencije rada radio-uređaja kreću se od ultravisoke frekvencije (UHF), visoke frekvencije (HF), vrlo niske frekvencije (VLF) i ekstremno niske frekvencije (ELF). Tu se nalazi oprema koja omogućava satelitsku i podvodnu komunikaciju. Gotovo celokupan radio-saobraćaj je »skremblovan« i šifriran.

Najinteresantniji sistem je VLF i ELF koji se najviše koriste u komunikacijama. Dobra osobina signala na ovim frekvencijama jeste mogućnost prodiranja duboko u vodu. Signale prima dugačka antena sa levog boka koja se tegli iza podmornice. ELF frekvencija omogućava prijem jedne grupe karaktera svakih 30 s. VLF signalizira podmornici da se podigne na periskopsku dubinu i uključi UHF prijemnike. Podmornice su opremljene i uređajima SLOT (Submarine Launched One-Way Transmitter) koji se lansiraju iz cevi. Isplivavanjem na površinu oni emituju poruku u određenom intervalu. Kroz ove cevi izbacuju se i batitermografi, a mogu se lansirati i mamci. Za pretraživanje i označavanje elektronskih emisija služi ESM sistem sa radarskim prijemnikom WLR-8 (V).

Borbeni sistemi

Najnoviji borbeni sistem nuklearne napadne podmornice je integrisani sonarno-borbeni informacioni sistem AN/BSY-1, koji je prvo bio ugrađen na podmornicu USS Miami (SSN-755), a sada je ugrađen na sve podmornice serije »688I«. Kod serije FLIGHT I i FLIGHT II svi senzori, sistemi za kontrolu vatre i oružani sistemi objedinjeni su u jedan sistem koji kontroliše serija kompjutera UYK. Najnoviji borbeni sistem američke mornarice, razvijen za podmornice, jeste BSY-1. On predstavlja distribuiranu procesorsku arhitekturu. Umesto velikog kompjutera koji upravlja svim senzorima i borbenim funkcijama, kakav je na serijama FLIGHT I i FLIGHT II, centralni kompjuter prosleđuje zadatke manjim kompjuterima. Prednost ovog sistema je u brzini, jer su poslovi raspodeljeni. Takođe, sistem BSY-1 lakši je za nadogradnju i za brzu zamenu neispravnih komponenti. Pored kompjutera UYK-7, UYK-43 i UYK-44, glavno obeležje sistema BSY-1 su konzole u sonarnoj prostoriji. Glavni sonar BQQ-5D isti je

na svim serijama. Konzole su konfigurisane tako da tri prate informacije sa glavnog sonara a četvrta je za supervizora. Na prednjem kraju sonarne prostorije nalazi se spektralni analizator. Svaka konzola može se prekonfigurisati i optimizirati za različite frekvencije. Operateri na konzolama ovlašćeni su da od oficira palube traže promenu kursa broda ukoliko će to omogućiti bolji prijem signala. Kod serije »688I« proces prenosa informacija sa sonarskih konzola drugačiji je nego kod ostalih serija. Ovde se informacije prenose automatski, direktno sa konzola na sistem za kontrolu vatre preko BSY-1 systemske mreže. Od tog trenutka tim za praćenje (TMA-Target Motion Analysis) preuzima praćenje cilja. Dok BSY-1 pomaže TMA timu da prati cilj, tim koji radi na manuelnom praćenju pomoću specijalno programiranog desktop kompjutera Hewlett Packard 9020 takođe prati cilj. Ovaj mali kompjuter ima vlastitu bazu podataka i timu za praćenje omogućava brže kalkulacije. Američka mornarica i dalje manuelno prati cilj, tako da je sistem za praćenje dupliran, što omogućava veću sigurnost pri određivanju elemenata cilja. Za razliku od prve dve serije podmornica čiji sistemi su mogli da prate istovremeno nekoliko ciljeva, serija »688I« pomoću BSY-1 može mnogo više.

Glavni sonar BQQ-5D lociran je na pramcu i prečnika je 4,95 m. To je ujedno aktivni i pasivni sonar. Snaga aktivnog impulsa je do 75 kW. Oko pramca se nalaze niskofrekventne pasivne prijemne površine. Sforni sonar je nadograđen sa visokofrekventnim emiterom koji sistem BSY-1 čini još efektivnijim. Dopunjen je i sistemom za rad pod ledom i za detekciju mina, kao i sistemom koji se nalazi na tornju. Pasivni sonar je dopunjen tegljenim sonarom TB-16D (prve serije) koji je lociran u proširenju na desnom boku. Dužina teglećeg kabla je 858 m, a debljina 8,9 cm. Hidrofoni se nala-

ze na 240 m dugom završetku kabla. TB-23 je novi pasivni tegljeni sonar koji radi sa sistemom BSY-1. Prečnika je svega 28 mm, a hidrofonu su raspoređeni na 316,8 m dugom završetku kabla. Ovaj sonar je specijalno projektovan tako da detektuje niskofrekventne signale na velikim daljinama. Namena sistema WLR-9 jeste da upozorava na aktivne sonarne signale.

Naoružanje

Torpedno naoružanje je osnovno podmorničko naoružanje. Podmornice ove klase imaju po četiri torpedne cevi koje su smeštene jedna ispod druge, ispod vodene linije na trećem nivou (treća paluba). Torpedne cevi su prečnika 533 mm i nalaze se pod uglom od 7° i 8° respektivno u odnosu na centralnu osu broda. U prostoru za torpeda ukupno se može smestiti 22 torpeda ili rakete i još četiri u cevima. Između levog i desnog slagališta nalaze se uređaji za punjenje torpednih cevi. Za razliku od većine ostalih podmornica u svetu, torpedne cevi kod klase »688« povučene su prema krmi kako bi se dobio prostor za sferni sonar. Borbeni komplet čini 26 torpeda, ali je najčešće manji, pošto se jedna ili dve cevi ostavljaju prazne. Ukupno vreme utovara celokupnog naoružanja u torpedni prostor podmornice, uz minimalnu pomoć sa strane, traje oko 12 časova.

Osnovni torpedo u naoružanju američkih podmornica je Mk 48 ADCAP. U odnosu na osnovnu verziju on ima za 50% povećan domet, brzinu od 60 čv, a produžen je i kabl za vođenje dužine oko 18,5 km. Upotrebljena je nova kombinacija samonavodene glave i kompjutera. Polje traženja glave za samonavođenje iznosi 180°. Bojna glava torpeda sadrži 295 kg eksploziva PBXN-103.

Raketnu komponentu naoružanja predstavljaju krstareće i protivbrodske rakete. Skoro 20 godina američke

podmornice nisu imale adekvatno protivbrodsko raketno naoružanje, jer su podmornice imale prevashodno protivpodmorničku ulogu. Prvo raketno protivbrodsko oružje primenjeno na podmornicama bila je raketa A/R/UGM-84 HARPOON, koja se može lansirati sa aviona, broda i podmornice. Originalno je razvijena za upotrebu na protivpodmorničkim avionima koji bi njome gadali protivničke raketne podmornice kada su one na površini. Raketa se lansira iz torpedne cevi u koju se postavlja u kapsuli. Nakon izbacivanja kapsule na površinu oslobađa se raketa i pali raketni motor. Masa rakete je 750 kg, nosi bojnu glavu sa 222 kg eksploziva, i ima radarski tražilac. Raketa se izbacuje na visinu oko 30 m od površine vode, a odatle nastavlja kretanje brzinom od 550 čv. Može se lansirati u više modova: BOL mod (Bearing Only Launch) koristi se kada je poznat samo kurs cilja; RBL mod (Range and Bearing Launch) kada je poznat kurs i daljina; RBL-L se koristi kada je jasna situacija i nema neutralnih brodova; RBL-S se koristi kada je mala površina na kojoj se nalazi cilj, odnosno, u okolini ima i neutralnih brodova. Raketa se može programirati sa nekoliko putnih tačaka (waypoint). Programiranje se vrši u MGU jedinici (Midcours Guidance Unit) koja predstavlja mali inercijalni sistem za držanje rakete na kursu. Zadnja verzija rakete UGM-84D ima povećan domet od 250 km.

Pored raketa HARPOON klasa »688« može nositi i TOMAHAWK krstareće rakete UGM-109. FLIGHT I serija može rakete da lansira samo iz torpednih cevi. Bazična verzija rakete sa nuklearnom bojnog glavom je B/UGM-109A ili TLAM-N, za napade po kopnenim ciljevima. Verzija rakete sa konvencionalnom bojnog glavom je B/UGM-109B ili TASM, i služi za napade na brodove. Kod nje je umesto nuklearne bojne glave W-80 postavljena glava sa 455 kg eksplozivnog punjenja. Koristi isti sistem vođenja

kao i raketa HARPOON. Za napade na kopnene ciljeve koristi se i TLAM-C verzija. Bazičnoj verziji dodata je bojna glava sa termalnim sistemom za vođenje DSMAC. Domet ovakve raket je oko 1 150 km. DSMAC je elektrooptički sistem koji se sastoji od male TV kamere u nosu rakete. Može se upotrebljavati i noću i po lošem vremenu, a koristi se za završno vođenje na cilj. Prvi put ovakve rakete korišćene su u borbi 1991. godine u operaciji »Desert Storm«, kada je 12 raketa lansirano na ciljeve u Iraku sa dve američke nuklearne podmornice (USS Chicago, SSN-721, 4 rakete i USS Louisville, SSN-724, 8 raketa). Iz ove verzije izvedena je i verzija TLAM-D gde je bazična bojna glava zamenjena glavom sa fragmentiranom municijom 166 BLU-97/B. Namenjena je za gađanje ljudstva, vozila, aviona na stajankama i drugih otvorenih i poluotvorenih ciljeva. Verzija rakete B/UGM-109F ima bojnu glavu sa municijom za razaranje aerodromskih poletno-sletnih staza. Najnovija verzija, nazvana još i BLOCK III, operativna od 1994. godine, ima poboljšan motor, vlastiti NAVSTAR GPS prijemnik, novu bojnu glavu i povećan domet od oko 1 650 km.

FLIGHT II i »688I« imaju po 12 vertikalnih lansera na pramcu. Rakete se popunjavaju pre polaska na patrolu i ne postoji mogućnost za popunu bez pomoći sa strane. Lansira se pri brzini od 3 do 5 čv sa periskopske dubine, pomoću komprimovanog vazduha. Za upravljanje lansiranjem koristi se sistem BSY-1 CCS Tac Mk 2 koji je lociran odmah pored tri konzole BSY-1 u komandnom centru. Osim ovih raketa mogu se nositi i protivpodmorničke rakete—torpeda SUBROC.

Minsku komponentu naoružanja čini mina Mk 57, koja se postavlja na dubinama do 100 m, a ima akustične ili magnetne upaljače. Ovaj tip mina je najstariji koji se koristi u američkoj mornarici. Drugi tip je mobilna mina Mk 67, razvijena od torpeda Mk 37. Lan-

sira se poput torpeda i pada na dno gde se aktiviraju senzori (akustički ili magnetski). Njena prednost je u mogućnosti polaganja na daljinu (9 do 12 km). Koristi se za miniranje moreuza, plićaka i kanala. Treći tip je mina Mk 60 CAPTOR razvijena od torpeda Mk 46. Radi se o torpedu koji se nalazi u kapsuli, i nakon lansiranja kreće se kao običan torpedo. Dolaskom na zadatu poziciju mina se potapa. Kako poseduje različite senzore, nailaskom cilja aktivira se punjenje koje izbacuje torpedo iz kapsule, koji se vlastitim pogonom kreće prema cilju.

Pogon

Pogon podmornice čini jedan nuklearni reaktor S6G. Maksimalna snaga reaktora je 26 000 kW (35 000 KS) na izlaznom vratilu. Nuklearni reaktor je tipa PWR — hlađen vodom pod pritiskom. Kao gorivo za reaktor koristi se U235. Koliko je uloženo u bezbednost posade i broda od radijacije govori i činjenica da se i stepen sigurnosti kreće u granicama 4 do 6 za sve vitalne delove. Iza odseka reaktora nalazi se centar za upravljanje (»Maneuvering«). Pretpostavlja se da postoji velika sličnost između upravljačkog pulta nuklearnog reaktora na podmornici i upravljačkog pulta nuklearne centrale. Mašinskim prostorom dominira »splav« na kojem su smeštene sve mašine. To je, u stvari, postolje koje služi za smanjenje vibracija. Svaki deo opreme koji proizvodi buku je izolovan. Za nuklearnu podmornicu najveći izvor buke predstavlja rad pumpi za kretanje hladioca. Kod klase »688« postignuto je da je intenzitet šuma koji proizvode ove pumpe izuzetno mali. Za praćenje vlastitog nivoa šuma služe različiti senzori postavljeni duž broda.

Sigurnosne mere u radu sa reaktorom na najvišem su nivou. U slučaju vanrednih okolnosti, pomoću sklopke SCRAM može se zaustaviti reaktor ta-

ko što se šipke nuklearnog goriva izvuku van zone jezgra. Time reaktor postaje potkritičan i ne nastavlja se lančana reakcija. Kada je reaktor zaustavljen za njegovo ponovno startovanje potrebna je velika energija, tako da se ono primenjuje samo u slučaju težih havarija.

Na trećoj palubi, iza torpednog prostora prema krmi nalazi se osek pomoćnih mašina koje služe za održavanje svih vitalnih funkcija broda i za obezbeđivanje životnih uslova posade. U ovom prostoru smešten je i dizel-motor Fairbanks-Morse, snage 242 kW (325 KS). On služi da u slučaju neispravnosti reaktora omogućujući podmornici neophodan pogon. U slučaju vanrednih okolnosti podmornica izronjava i startuje se dizel-motor. U ovom prostoru postavljeni su i uređaji za prečišćavanje vazduha. U slučaju požara za svakog člana posade postoji EAB (Emergency Air Breathing) aparat koji omogućava nesmetano disanje i obavljanje zadataka. Za potrebe članova posade i kuhinje postoji mala destilerija koja dnevno može da prečisti 38 000 litara vode.

Posada

Uobičajenu posadu serije FLIGHT I čini 127 članova od kojih su 13 oficiri. Za FLIGHT II i »688I« seriju broj članova posade je povećan na 133 (13 oficira). Svi članovi posade su dobrovoljci profesionalnog sastava. Na američkim podmornicama je ustaljena praksa da 3 do 5 članova posade budu ronjosi.

Prostor za boravak posade nalazi se na drugoj palubi. Najveći prostor na ovoj palubi zauzima trpezarija za mornare sa 48 sedišta. Ona se koristi i kao predavaonica, TV sala, sala za vežbu i sl. Pored trpezarije tu je i kuhinja u kojoj se spremaju četiri obroka dnevno. U spavaonici za mornare kreveti

su postavljeni na tri nivoa. Širina ležaja je oko 1 m, dužina 1,8 m i visina 0,75 m. Broj ležaja je toliki da tri člana dele dva ležaja po smenama.

Na desnom boku je smeštaj za starije mornare i podoficire. U ovom prostoru nalazi se i prostorija koja je namenjena za boravak i sastanke podoficira. Svaki podoficir ima svoj ležaj, a postavka ležajeva je na tri nivoa. Za oficire postoji posebna trpezarija, ali ne i kuhinja. Trpezarija služi i kao sala za sastanke i za vođenje administracije. Za komandanta podmornice (CO — Commanding Officer) postoji posebna kabina, dok ostali oficiri dele kabine. U komandantovoj kabini nalazi se displej koji je povezan sa BSY-1 sistemom, pomoću kojeg komandant ima uvid u situaciji na brodu i oko broda, a da ne ulazi u kontrolnu sobu (samo na »688I«). Drugi čovek broda je izvršni oficir (XO — Executive Officer). On je ujedno i zamenik komandanta. Oficir koji je zadužen za sigurnost podmornice je oficir palube (OOD). Za rad nuklearnog reaktora zadužen je inženjer — oficir za nadgledanje (EO OW — Engeneering Officer of the Watch). Podoficir zadužen za smenu (COW — Chief of the Watch) rukuje balastnim i trim-tankovima po naređenju oficira ronjenja. Među podoficirima je i šef broda (COB — Chief of the Boat) koji je zadužen za direktnu saradnju sa izvršnim oficijom.

Patrola klase »688« obično traje oko 70 dana. Rad na brodu obavlja se u smenama po 6 sati. Da bi se posada stalno držala »budnom« svakodnevno postoji serija vežbi i simuliranja vanrednih okolnosti. Kako su komunikacije podmornice sa spoljašnjim svetom ograničene, posada može jednom nedeljno dobiti poruku »famylygram«, maksimalne dužine do 40 reči. Za zabavu postoje TV i video, mašine za osvežavajuća pića i sladoled. Posadi je omogućeno i učenje za »kvalifikaciju« — dobijanje višeg čina, što oduzima veliki deo slobodnog vremena.

Zaključak

Američka ratna mornarica je u podmornicama klase »688« dobila izuzetno jaku podmorničku komponentu. Iako je njihova gradnja prestala zbog gradnje najnovijih podmornica klase SEAWOLF i dalje će biti udarna podmornička snaga uz strateške podmornice tipa OHIO. Savremena gradnja,

usavršena elektronska oprema i snažno naoružanje omogućavaju ovoj podmornici široki spektar namene, što je pokazala i u napadu na iračke položaje hiljadu kilometara daleko na kopnu. Od svih američkih nuklearnih podmornica ova serija je izgrađena u najvećem broju. Ukupno su izgrađene 62 jedinice, a neke su povučene u rezervu.

Literatura:

- [1] Los Angeles class SSN, Operational Instruction.
- [2] Clancy, T.: Submarine, Harper Collins Publisher, 1993.

- [3] Mihajlović, M.: Podmornice, knjiga u pripremi.



prikazi iz inostranih časopisa

SISTEM PVO ANTEY*

Razvoj balističkih raketa, posebno povećanje njihovog dometa, zahtevalo je kvalitativno poboljšavanje karakteristika protivraketnih sistema zemlja-vazduh (z-v). Nestrategijske rakete, različitog dometa, trenutno su u naoružanju oko 30 država. To su, pored ostalih, balističke rakete tipa ATAKMS, ADES, DUNFEN-3, DUNFEN-15, DUNFEN-25, SKUD-S, PERSHING, IYERIKHON-2. Neke zemlje započele su proizvodnju i uvođenje u naoružanje raketnih sistema srednjeg dometa namenjenih za taktičke i strategijske zadatke. Radi pariranja takvom trendu porasta opasnosti od balističkih raketa, ruski konstruktori su razvili sistem ANTEY-2500. Oni smatraju da su iskustva iz rata u Persijskom zalivu pokazala da je to bio pravi potez u pravo vreme. Amerikanci su morali da se okrenu poboljšavanju svog raketnog sistema PATRIOT upravo posle Zalivskog rata, i na tome treba još dosta da rade.

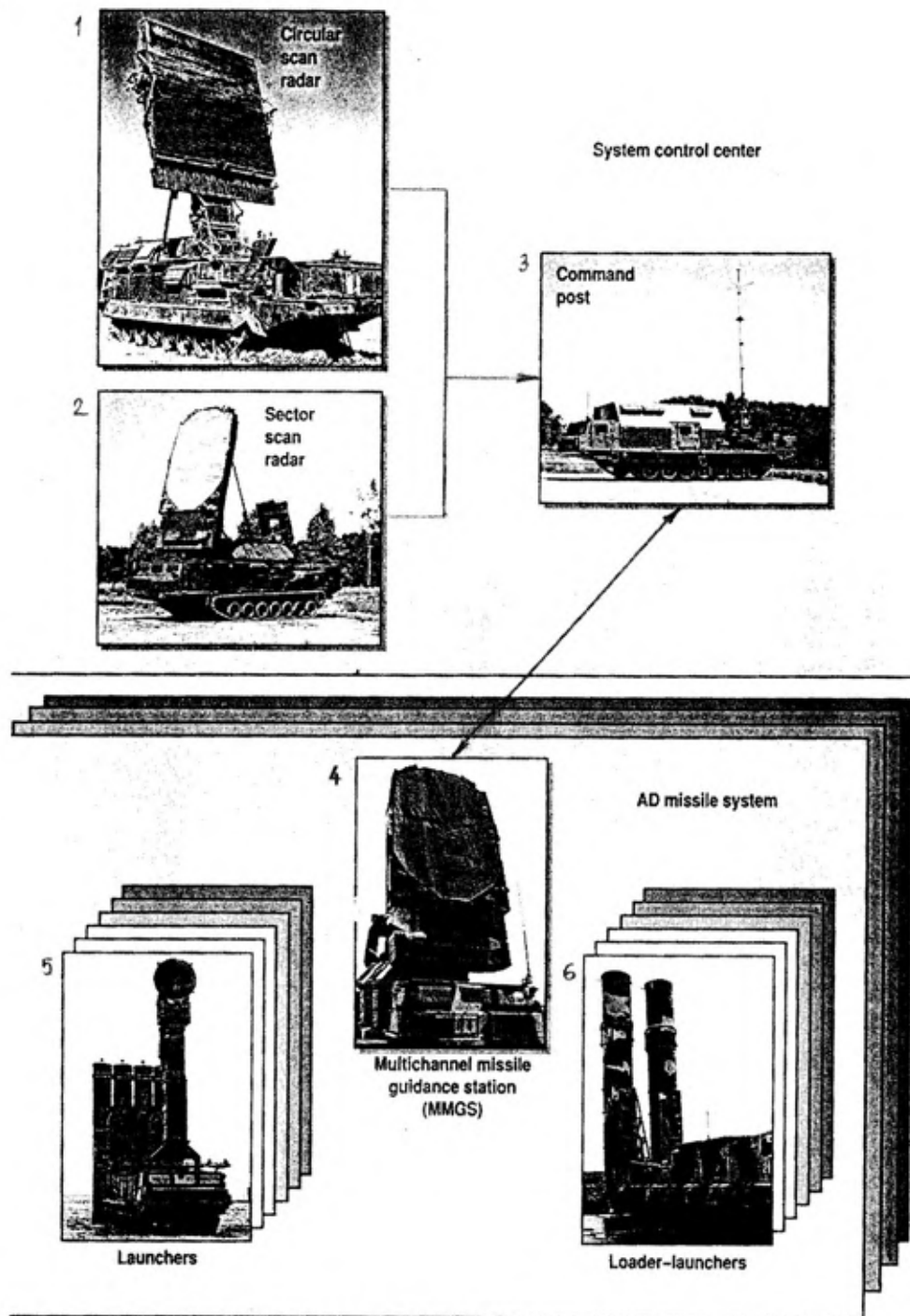
Mobilni fleksibilni protivraketni i protivavionski sistem protivvazdušne odbrane (PVO) ANTEY-2500 je raketni sistem nove generacije. Namenjen je za odbranu važnih državnih, vojnih i

industrijskih objekata i jedinica od balističkih i aerodinamičkih oružja. To je jedinstven protivraketni i protivavionski sistem za efikasnu odbranu, odnosno uništenje nestrategijskih balističkih raketa koje se lansiraju sa udaljenosti manje od 2500 km, kao i svih tipova aerodinamičkih i aerobalističkih ciljeva. Može se upotrebiti u svim tipovima oružanih sukoba u bilo kom delu zemlje. Funkcioniše samostalno, a po potrebi može se integrisati u nacionalni automatizovani sistem odbrane.

ANTEY-2500 može istovremeno da gađa 24 aerodinamička cilja, uključujući i »stelt« ciljeve, ili 16 balističkih raketa sa efektivnom refleksnom površinom koja nije manja od 0,02 m² i čija je brzina leta ispod 4500 m/s. Pored toga, sistem ima vrlo povoljan odnos cena-efektivnost.

ANTEY-2500 koristi nove rakete, tipa 9M82M i 9M83M, čije su težina, dimenzije, sistem vođenja i bojna glava iste kao kod raketa tipa 9M82 i 9M83 raketnog sistema S-300V (NATO oznaka SA-12). Međutim, ove rakete imaju znatno veći domet i ubojnu moć i mogu da se koriste protiv svih tipova nestrategijskih balističkih i aerobalističkih raketa. Manevarske karakteristike raketa 9M82M i 9M83M znatno

* Prema podacima iz časopisa MILITARY PARADE, januar-februar, 1998.



Raketni sistem Antey-2500

1 — osmatračko akvizicijski radar, 2 — sektorski radar, 3 — komandna stanica, 4 — višekanalna stanica za vođenje raketa, 5 — lanseri, 6 — vozilo za prevoz, pre-tovar i lansiranje raketa

Karakteristika/tip raketnog sistema	S-300V	ANTEY-2500	PATRIOT PAK-3
Donja granica zone uništenja (km): — aerodinamičkih ciljeva — balističkih ciljeva	100 do 40	200 do 40	150 do 40
Gornja granica zone uništenja (km): — aerodinamičkih ciljeva — balističkih ciljeva	0,025—30 do 25	0,025—30 do 30	do 25 do 20
Maksimalna brzina balističkih ciljeva (m/s)	3000	4500	3000
Minimalna refleksna površina cilja (m ²)	0,02	0,02	0,1
Maksimalna daljina sa koje se lansira balistički cilj (km)	1100	2500	1000
Vreme uključenja-isključenja (min)	5/5	5/5	30/15
Vreme pripreme rakete za lansiranje (s)	15	7	—

su bolje, što omogućava njihovu upotrebu protiv visokomanevarskih ciljeva.

Poboljšane informacione karakteristike radara i optimizacija tehnika obrade radarskih signala kod ovog sistema omogućavaju borbu protiv balističkih ciljeva velike brzine i male refleksne površine.

Potpunom automatizacijom postupka upotrebe, uz visoku pouzdanost i korišćenje savremenih tehnika za dijagnostiku stanja i otkrivanje neispravnosti, broj članova posade i vreme potrebno za pripremu sistema za dejstvo svedeni su na minimum.

Raketa 9M82M je upravljiva u toku leta i namenjena za dejstvo protiv

Sastav divizion raketnog sistema PVO Antey-2500

Tabela 2

Sredstvo	Osmatračko-akvizicijska stanica		Komandna stanica	Višekanalna stanica za vođenje raketa	Lanse-ri	Vozilo za prevoz, pre-tovar i lansiranje raketa	Rakete	
	osmatračko-akvizicijski radar	sektorski osmatračko-akvizicijski radar						
	9S15M	9S19M	9S457M	9S83M	9A83M	9A84M	9M82M	9M83M
Količina	1	1	1	4	24	24	96	96

S. Pokorni

balističkih raketa srednjeg dometa, kao i aerodinamičkih ciljeva na daljinama do 200 km, dok je raketa 9M83M namenjena za dejstvo po raketama malog i srednjeg dometa, kao i po aerodinamičkim ciljevima. Operativni vek upotrebe ovih raketa je najmanje 10 godina, i za to vreme nije predviđeno testiranje niti održavanje.

Prema tome, za razliku od ostalih raketnih sistema z-v koji su u upotrebi, ANTEY-2500 je zamišljen kao oružje za borbu protiv nestrategijskih balističkih raketa i ostalih ciljeva velike brzine, visokih manevarskih karakteristika i male uočljivosti («stel») koje je teško pogoditi. Jedinstvene borbene mogućnosti ovog raketnog sistema PVO postignute su intenzivnim istraživačkim, razvojnim i eksperimentalnim radom, uz upotrebu najsavremenijih dostignuća u razvoju radarske i raketne tehnike, kao i opitnim gađanjima različitih balističkih i aerobalističkih raketa.

S. Pokorni

ELEKTRONSKI ŠTIT ZA ODBRANU OD VAZDUŠNIH NAPADA*

Protivelektronska borba čini visokoefikasni deo ukupnih odbrambenih protivvazdušnih sistema kopnenih snaga i vojnih postrojenja.

Kvantna proizvodna asocijacija iz Novgoroda proizvodi najsavremenije mobilne sisteme za protivelektronsku borbu (PEB) projektovane za zaštitu zemljišnih prostora i malih postrojenja od usmerenih bombi i raketnih napada, kao i zaštitu od osmatranja svih radara, uključujući avio-radare, prateće na zemlji, navigacione i za kontrolu

niskog leta, kao i radare za upravljanje sistemima vazduh-zemlja.

Sum koji ovi sistemi izazivaju na radarskoj slici potpuno isključuje mogućnost usmerenog bombardovanja ili raketnog napada na zaštićena postrojenja. Sistem može da uguši istovremeno do 50 različitih radara, na bilo kom pravcu i visinama od 30 do 30000 m.

Sistem može da funkcioniše na temperaturi od -50 do $+40^{\circ}\text{C}$ i atmosferskom pritisku od 60 kPa.

Snažni ometači mogu funkcionisati autonomno kada su ugrađeni u sistem, tj. odgovarajući na komande koje šalje operator iz kontrolne ometačke konzole ili na centralizovan način, na nivou četne upravne automatizovane stanice.

Ometači obezbeđuju:

- automatsko pretraživanje i praćenje jednog ili više ciljeva;
- identifikaciju ciljeva;
- merenje opasnosti od radarskih impulsa, trajanje i period;
- selekciju prioritarnog cilja i strukturu buke radi neutralisanja neprijateljskih radara;
- emisiju ometajućih signala.

Sistem za ometanje kontroliše se kompjuterski. Tehnika koja se primenjuje za traganje za nevidljivim radarima koristi postupne ili skokovite varijacije nosača frekvencija, sa ponavljanjem učestalosti od 5 kHz. Ometački sistem može emitovati signale šuma u dva pravca i istovremeno ometati dva bočno postavljena radara ili dva niskoletuća radara ili do šest upravljačkih radara za oružje vazduh-zemlja (jedan bočni ili niskoletajući radar i tri upravljačka u svakom pravcu, respektivno).

Sistem za ometanje proizvodi:

- kvazikontinualne (maskirne) ometajuće signale;
- ponavljanje ometačkih signala (opasnost od radarskog nosača frekvencija je različita od impulsa do impulsa).

* Prema podacima iz časopisa MILITARY PARADE, novembar—decembar, 1997.

Kvazikontinualni ometački signali dalje se dele na tačkaste ometajuće signale, koji grubo korespondiraju sa prijemnim radio-impulsom i baražnim ometajućim signalima.

Ako je samo jedan cilj prisutan, ometač efikasno sprečava njegov radar na rastojanju ne manjem od 60 km, a ako dva cilja napadaju — na rastojanju od najmanje 40 km. Slično tome, niskoletići radari mogu se ometati na rastojanju ne manjem od 50 km (za jedan cilj) i 30 km (dva cilja). Upravljački radari za oružje mogu se ometati na rastojanju od preko 130 km.

Sistem za ometanje može dejstvovati:

- po azimutu — preko 360° ;
- po elevaciji — od minus 2,5 do plus 45° .

Efikasna emisiona snaga ometača iznosi 400 i 580 kW pojedinačno.

Funkcionalno, sistem za ometanje sastavljen je od antenskog vozila, komandnog i kontrolnog vozila i pogonskog generatora montiranog na šasiju kamiona KamAZ-4310 ili URAL-43203.

Sistemom za ometanje rukuje posada od pet članova. Sistem se može postaviti za 20 minuta leti i 40 minuta zimi.

Radi povećanja njegove efikasnosti, sistem za ometanje kombinuje se po grupama, kojima se upravlja iz autonomnog kontrolnog centra koji ima operativne i komandne radio-veze sa svim sistemima za ometanje uključenim u grupaciju i razmeštenim na rastojanju do 20 km.

Podaci o vazdušnoj situaciji koji se prime u četnom kontrolnom centru preko radarskog i elektronskog izvora određuju se u ugrađenom kompjuteru, u zavisnosti od prioriteta otkrivanja ciljeva i određivanja njihove klase, brzine, udaljenosti, visine i putanje radi kasnijeg napada sredstava za protivdejstvo. Predstavljeni sistem sastoji se od dve radne stanice koje omogućavaju četnim automatskim kon-

trolnim stanicama da imaju pun uvid u razvoj aktivnosti elektronskog rata i unose korekcije u računar, kada je to neophodno.

Osnovne karakteristike četnog automatizovanog kontrolnog centra (ČAKC) su:

- broj istovremeno obrađivanih ciljeva — do 20;
- period od trenutka prijema informacija od radarskog i elektronskog izvora do slanja podataka o cilju ka ometačima — nije više od 7 s;
- posada — 6 članova;
- vreme postavljanja — ne više od 45 minuta.

Komandni centar čine komandno i kontrolno vozilo, vozilo za vezu i generator električne energije montiran na šasiju kamiona URAL-43203. Signal pratećih radara automatski prati impulsne radare na distancama sve do 150 km i sprema informacije za ČAKC. Njihova upotreba, zajedno sa ČAKC, povećava efikasnost grupisanja u proseku za 30 %. Rad tri grupne ČAKC i sistema za ometanje kontroliše se bataljonskom automatizovanom kontrolnom stanicom (BACK) — centrom koji ima komandne i kontrolne radio-veze sa četnim stanicama. Podatak o vazdušnoj situaciji, poslat do BAKC radarskim izvorom, numerički se obrađuje radi efikasnog pokrivanja štićenih postrojenja i šalje na tri ČAKC.

Osnovne karakteristike bataljonskih stanica su:

- broj istovremeno obrađivanih ciljeva — do 50;
- vremenski period od prijema informacija do slanja podataka do ometača — ne više od 5 sekundi;
- efikasnost kontrole na distanci — do 40 km;
- posada — 7 članova;
- vreme postavljanja — ne duže od 45 minuta.

Bataljonska stanica sastoji se od komandnog i kontrolnog vozila, vozi-

la veze i generatora električne energije montiranog na šasiju vozila URAL-43203. Radi održavanja sistema u stalnoj gotovosti izvršene su pripreme za automatsku proveru opreme, kao i održavanje i remont uređaja. Sistem je obezbeđen kompletom rezervnih delova, alata i pribora.

M. Krbavac

JAHONT — PROTIVBRODSKA RAKETA NOVE GENERACIJE*

Ruska protivbrodka raketa JAHONT (Rubin) namenjena je za borbu sa površinskim vojnomorskim sastavima i pojedinačnim brodovima u uslovima snažnog vatreneog i radio-elektronskog protivdejstva.

Lansiranjem krilate rakete P-5 sa podmornice, pre više od četiri decenije, pojavila se nova etapa u proizvodnji raketa. Na P-5 prvi put je realizovana varijanta starta neposredno iz kontejnera sa kratkim usmerivačima, uz naknadno širenje krilaca u letu, isključujući ručne montažne operacije na palubi podmornice, što je bilo karakteristično za rakete P-10 i zapadne rakete REGULUS koje su građene u to vreme.

Ovo inženjersko otkriće omogućilo je da se znatno uveća broj raketa na nosačima, uprosti eksploatacija i poveća borbeni gotovost sistema »podmornica-oružje« u celini. To je uticalo da se sistem P-5 ubrzo proširi na grupacije podmornica i postane moćno sredstvo, jedno od prvih koje je bilo sposobno da rešava strategijske zadatke na okeanskim ratištima.

Kasnije su ta rešenja priznata kao klasična u proizvodnji raketa, kako u Rusiji, tako i u svetu. Bez njih bi,

praktično, teško bilo zamisliti razvoj i široku primenu krilatih raketa.

Na osnovu oprobanih rešenja na P-5 i drugih principijelnih novina stvoreno je nekoliko generacija krilatih raketa, koje su napravile revoluciju u razvoju ruske flote i njenog naoružanja. Sve su one imale svoj »zaštitni znak« — nadzvučne, visokointeligentne, zaštićene u letu i na nosačima, opremljene moćnim bojnim glavama. Nije slučajnost što su ovim raketama naoružavane podmornice — nosači protivbrodskih kompleksa i većina površinskih brodova, uključujući i atomske krstarice tipa »Petar Veliki« i admiralski brod ruske flote — tešku avionošeću krstaricu »Admiral Kuznjecov«.

Osnovna principijelna iskustva u izgradnji oružja prethodnih generacija, u sprezi sa novim naučnotehničkim dostignućima, omogućili su razvoj protivbrodskih raketa nove četvrte generacije. Protivbrodka krilata raketa (PKR) JAHONT karakteristična je po:

- prekohorizontalnoj daljini gađanja;
- potpunoj autonomnosti borbeni primene (»opali-zaboravi«);
- skupu gipkih putanja (»nis-ka«, »visoka-niska«);
- visokoj nadzvučnoj brzini na svim delovima leta;
- potpunoj unifikaciji za široku nomenklaturu nosača (površinskih brodova svih osnovnih klasa, podmornica i lansirnih uređaja na kopnu).

Tehnička realizacija tih parametara i taktičko-tehnički podaci koji su navedeni u tabeli, uslovljeni su primenom originalnih konstrukcijskih rešenja i visoke tehnologije. To su, pre svega, marševski nadzvučni linijski motor, radarska glava za samonavođenje adaptivna na smetnje i snažni sopstveni računarski sistem. Pri izgradnji rakete korišćen je sistemski pristup: raznorodni elementi složenog sistema pomoću izlaznih parametara uvezani su jedan s drugim tako da pri funkcion-

* Prema podacima iz časopisa MILITARY PARADE, mart-april, 1998.

sanju čine jedinstven složeni mehanizam za bezuslovno izvršenje postavljene zadatka, uz maksimalnu efikasnost.

Zahvaljujući kratkom vremenu leta (brzina rakete je 2,5 puta veća od brzine zvuka) i velikoj daljini dejstva glave za samonavođenje, PKR JAHONT ne iziskuje veliku tačnost informacija o cilju. Uvid u celu zonu položaja cilja sa velike visine, u sprezi sa odgovarajućim mogućnostima sistema za upravljanje, PKR stvara mogućnosti i uslove za prethodnu raspodelu raketa po realnim ciljevima i selekciju lažnih ciljeva. Blagovremeno spuštanje rakete iza radio-horizonta u odnosu na gađani cilj, obezbeđuje prekid praćenja PKR sistemima PVO, što uporedo sa visokim nadzvučnim brzinama i granično malom visinom leta na delu samonavođenja, naglo smanjuje mogućnosti za presretanje PKR JAHONT čak i od strane najsnažnijih brodskih sistema PVO.

Ne manje važan zahtev, koji je u mnogome odredio oblik rakete, jeste kompaktnost i minimalni obim opsluživanja na nosaču. Pre svega, to se objašnjava kompaktnošću rakete, koja nema premca po stepenu integracije. U suštini, cela raketa, od čelnog skupljača vazduha do preseka izduvnog kolektora, predstavlja motorni uređaj organski objedinjen sa planerom. Sa

izuzetkom centralnog tela skupljača vazduha, u kojem su smešteni blokovi sistema za upravljanje i bojna glava, svi unutrašnji prostori rakete, uključujući vazdušni trakt linijskog motora, iskorišćeni su za smeštaj goriva za kretanje i ugradnju startnoubrzavajućeg stepena sa čvrstim gorivom. Raketa je zatvorena u hermetički transportno-startni kontejner. O kompaktnosti izrade svedoči gotovo potpuno odsustvo zazora između tela krilate rakete i unutrašnje površine transportno-startnog kontejnera. Gabariti rakete dozvoljavaju dvokratno i trokratno povećanje borbenog kompleta nosača PKR slične klase.

Transportno-startni kontejner je nerazdvojni deo rakete. U njemu se, posle potpune pripreme za borbenu upotrebu, raketa transportuje, čuva i donosi na nosač. Bez izvlačenja iz kontejnera kontroliše se tehničko stanje rakete i njenih sistema.

Transportno-startni kontejner je krajnje jednostavan u eksploataciji, ne iziskuje dovod tečnosti i gasa i ne zahteva dopunske uslove mikroklimе na mestima čuvanja i na nosačima. Sve to pojednostavljuje eksploataciju, i služi kao garancija visoke pouzdanosti za ceo vek trajanja.

Korišćenje transportno-startnog kontejnera, veliki dijapazon mogućih



Protivbrodska raketa JAHONT

uglova starta, način puštanja u rad, koji ne zahteva poseban odvod gasova reaktivne struje, dozvoljavaju laku ugradnju rakete u konstrukciju velikog broja nosača. Pri tome se mogu koristiti lansirni uređaji najrazličitijih konstrukcija. Na primer, vrlo jednostavan lansirni uređaj stelažnog tipa, koji je namenjen za malotonažne brodove klase »raketni čamac-korveta«, kao i modulni vertikalni uređaji za površinske brodove velike tonaže (fregate, razarači i krstarice). Uporedo s tradicionalnim nagibom i vertikalnim razmeštajem protivbrodskih raketa na podmornicama i lansirnim uređajima na kopnu, razrađen je niz novih načina njihovog smeštaja i starta, što je pomoglo i pri konstrukciji rakete JAHONT.

Sa sigurnošću se može tvrditi da slične ukupne tehničke karakteristike i eksploataciona svojstva nema ni jedan od postojećih protivbrodskih raketnih sistema, što je od principijelnog značaja pri sagledavanju najnovijih tendencija u razvoju pomorskih snaga. Početkom devedesetih godina, zbog ekonomskih razloga u planovima većine zemalja, prednost je data izgradnji i nabavci brodova ograničene tonaže, što ima za posledicu znatno povećanje zahteva za borbenim mogućnostima sistema naoružanja tih brodova. Sa tim u vezi predviđa se proces smene generacija protivbrodskog oružja, kada će dozvučne rakete prve generacije ustupiti mesto novim nadzvučnim krilatim raketama povećanog dometa i efikasnosti.

Osnovne karakteristike protivbrodske rakete JAHONT

Vatreni domet (km):	
— mešovita putanja do	300
— niska putanja	120
Brzina (Maha)	2 do 2,5
Visina leta, završna faza (m)	5 do 15
Masa bojne glave (kg)	≈ 200
Upravljanje (vođenje)	aktivno-pasivno, radarska glava za samonavođenje
Minimalni domet za otkrivanje cilja u aktivnom načinu (km)	50
Maksimalni ugao glave za samonavođenje (°)	± 45
Pogoni	čvrsto gorivo potisni stepen; tečno gorivo vazdušno-reaktivni motor
Tip lansera	nadvodni, površinski, zemaljski
Način lansiranja	iz zatvorenog podnožja lansirni kontejner
Ugao lansiranja (°)	15 do 90
Masa (kg):	
— lansirna	≈ 3000
— u lansirnom kontejneru	≈ 3900
Dimenzije lansirnog kontejnera (m):	
— dužina	8,9
— prečnik	0,7

Naoružani raketama JAHONT čak i laki borbeni brodovi dobijaju mogućnosti koje su ranije imali samo veliki borbeni brodovi, što obezbeđuje visoku efikasnost borbenih jedinica ratne mornarice.

M. Krbavac

PRECIZNO VOĐENO ORUŽJE I ELEKTRONSKI RAT*

Precizno vođeno oružje milimetarskog talasnog područja razlikuje se od oružja opremljenog laserskim i IC vođenim sistemima. Njegove karakteristike su:

- manja zavisnost od vremena i doba dana;

- povećane mogućnosti za savladavanje smetnji, kao što su prašina, sunčev blesak, aerosoli, dim (uključujući i dim proizveden gorenjem belog fosfora);

- ne iziskuje osvetljivanje cilja posebnim izvorom svetlosti, kao što je slučaj kod laserskih sistema;

- poboljšana autonomnost funkcionisanja zbog upotrebe jedinstvenog sklopa koji obezbeđuje otkrivanje cilja, njegovu identifikaciju i samonavođenje;

- sposobnost da otkrije metal i ciljeve koji se kreću malom brzinom;

- koristi kombinaciju aktivnog radara i radiometričkih načina u jedinstvenom sistemu vođenja.

Precizno vođeno oružje koje koristi milimetarsko talasno područje (MMWB — millimeter wave band) u sistemima vođenja jeste oružje od kojeg se najviše očekuje u borbi sa zemaljskim ciljevima. Faktički ta sred-

stva se najviše približavaju zahtevima koncepta »opali i zaboravi«.

Napori u izradi MMWB precizno vođenog oružja za sisteme vazduh-zemlja i zemlja-zemlja danas su ostvarivi u svim industrijski razvijenim zemljama koje poseduju najnovije tehnologije. Analize napretka u razvoju precizno vođenog oružja ukazuju na to da bi 2005. godine udeo precizno vođenog oružja opremljenog MMWB vođenim sistemima mogao dostići 30 do 40 %.

Napori za razvoj precizno vođenog oružja vazduh-zemlja primarno su usmereni na izradu raznih projektila projektovanih da nose fiksne bojne glave (američke MAVERICK AGM-65H, HELFIRE ATGV AGM-114), kasetne bojne glave (amer. AGM-137) ili vođenu kasetnu municiju (engl. ASR-1238). Precizno vođeno oružje u toj kategoriji je, u najvećem delu, opremljeno radar-skim tragačima.

U toku su radovi na razvoju MMWB radara za stratejsku i taktičku avijaciju, bespilotne letelice i jurišne helikoptere. To su radar MMWB, integrisan u avionski sistem za upravljanje oružjem LONGBOW (SAD), helikopterski sistem ROMEO (Francuska) i SWALLOW (Nemačka).

Avio-radari projektovani su tako da obezbede najnovije podatke o poziciji cilja u realnom vremenu i siguran let na malim visinama. Helikopteri koriste radare za otkrivanje ciljeva malih razmera, usmeravanje vođenih raketa i, takođe, obezbeđenje sigurnog leta na malim visinama.

Danas su precizno vođena oružja zemlja-zemlja najrasprostranjenija, a moguće ih je klasifikovati prema: kategoriji primene, tipu bojne glave, načinu vođenja, tipu sistema vođenja itd.

Prema kategorijama primene savremena precizno vođena oružja najzastupljenija su u: vođenim artiljerijskim projektilima (155 mm ADS, CGSP i BOSS artiljerijski projektili), vođenim minobacačkim granatama (britanske MERLIN i francuske GRIF-FIN), vođenim potkalibarnim artilje-

* Prema podacima iz časopisa MILITARY PARADE, novembar—decembar, 1997.

rijskim projektilima i kasetnim bojnim glavama za rakete (američka SA-DARM, TCM i TGW rakete, nemačka ZELLER municija i dr.).

S obzirom na način vođenja postojeće precizno vođeno oružje može biti samonavođeno, opremljeno tragačima, i samociljano, opremljeno senzorima za otkrivanje cilja.

Prema tipovima sistema za vođenje ovo oružje se deli na sisteme sa aktivnim radarom, radio-metričkim i hibridno vođenim (kasnije izrađenim kao kombinacija radara i radiometričkog vođenja, radara i IC, ili neka druga kombinacija uređaja za vođenje).

Perspektivni sistemi zemlja-zemlja uglavnom su projektovani za uništenje pokretnih zemaljskih ciljeva. Oni se izrađuju sa kumulativnim ili kinetičkim bojnim glavama koje obezbeđuju tačno vođenje i direktne pogotke.

Precizno vođeno oružje sistema vazduh-zemlja i zemlja-zemlja poseduje radarske tragače i efikasno dejstvuje u MMWB pasivnom radiometričkom načinu pojačanja samonavođenja municije na njihovoj konačnoj putanji.

Hibridni tragači, koji koriste radarske tragače i radiometričke senzore, najčešće su ugrađeni na vođene rakete vazduh-zemlja i neke tipove potkalibarnih projektila zemlja-zemlja (SAD-TGWs).

Aktivni radarski tragači korišćeni su za novije minobacačke granate i vođena kompaktna artiljerijska zrna.

S obzirom na postojeće naoružanje i taktiku mogu se efikasno upotrebiti za zaštitu sopstvenih objekata od protivničkog oružja sa MMWB sistemom vođenja, za pojačanje postojećih sredstava za PEB sredstvima dejstvujućim sa MMWB.

Najnoviji aktivni tragači upotrebljeni su protiv:

— radara ugrađenih na avione, helikoptere i bespilotne letelice;

— radarskih i hibridnih tragača precizno vođenog oružja vazduh-zemlja i zemlja-zemlja;

— radiometričkih senzora na precizno vođenoj municiji.

Za efikasnu zaštitu sopstvenih zemaljskih objekata, oprema za PEB, koja funkcioniše na principu MMWB, trebalo bi da izvršava sledeće zadatke:

— da neutrališe protivničke avio-radare za vazdušno izviđanje;

— da neutrališe pokušaje protivnika da efikasno upotrebi svoja precizno vođena oružja;

— da ometa usmeravanje protivničkog precizno vođenog oružja ka sopstvenim objektima.

Da bi se ispunili ovi zadaci neophodno je da sredstva za PEB obavezno sadrže sredstva za pariranje: protivničkim avio-radarima, aktivnim radarskim tragačima, radiometričkim senzorima oružja i radiometričkim senzorima integrisanim u hibridne tragače.

Analize pokazuju da se sopstveni zemaljski objekti mogu efikasno štiti od protivničkih avio-radara upotrebom kombinovanih prostornih i mešanih mera za PEB. Odbrambeni prostor sopstvenih objekata može se obezbediti upotrebom jedne ili više visokoefikasnih stanica za ometanje ili preko sistema efikasnih ometača.

Za zaštitu najosetljivijih instalacija trebalo bi koristiti dodatna sredstva za PEB, postavljena na licu mesta ili u određenom prostoru. U tom slučaju sredstva za PEB se postavljaju i dovode u sklad sa sopstvenim položajima objekata i očekivanim pravcima napada.

Kako se oprema i taktika upotrebe zemaljskih objekata vrlo razlikuje, razmotrićemo samo glavna sredstva PEB koja se koriste za zaštitu stacionarnih i pokretnih sopstvenih objekata.

Za zaštitu sopstvenih objekata od protivničkih sistema vazduh-zemlja i zemlja-zemlja, opremljenih radarskim

tragačima, treba primeniti kombinovana sredstva PEB usmerena na grupnu i individualnu odbranu. U stvari, to je tehnika koja se koristi za PEB, a funkcioniše u centimetarskom talasnom području i služi za: ometanje maskiranja sopstvenih dometa i pravaca, kao i druga tehnička sredstva projektovana da razbiju samotragajuće ciljeve ili znatno smanje verovatnoću pogađanja. Ti ciljevi mogu zahtevati upotrebu tehničkih sredstava koja su sposobna da menjaju fokus emitovane energije sopstvenih položaja putem osvetljavanja okolnog prostora i pozadine, korišćenjem različitih aktivnih i pasivnih reflektora, prevlaka, itd.

Kod poznatih oružja koja rade u MMWB, poslednji zadatak jeste da se parira pasivnim radiometričkim senzorima koje nose precizno vođene rake- te zemlja-zemlja i spreče radiometričke načine uticaja precizno vođenih raketa vazduh-zemlja.

Svi metalni objekti koji su radiometričkim senzorima opaženi odozgo, imaju negativan kontrast. Ciljevi se otkrivaju putem kontrastnog raspoznavanja radiometričkim senzorom, uz naknadnu kompjutersku obradu. Početak prepoznavanja usmeren je na vidljivu površinu pozadine objekta koja nije uvek uniformna. Za identifikaciju se, takođe, koristi, raspoznavanje po uzorku. Čim je cilj utvrđen, formira se i komanda za upotrebu municije.

Radi postizanja veće verovatnoće pogađanja, radiometrički senzori se koriste sa IC senzorima (američka municija SADARM). Prateći otkrivanje cilja sa oba senzora realizuje se kinetička energija bojne glave, a vreme oslobađanja određuje IC senzor vremenom relevantnog »pik-apa« cilja. Ako se cilj otkriva samo radiometričkim senzorom, uz neaktivan IC senzor, oslobađanje municije obezbeđeno je radiometričkim senzorom posle jedne sekunde od pretraživanja cilja.

Hibridni tragači aktiviraju pasivni radiometrički način na udaljenosti ci-

lja od 100 do 1000 m. Ta mogućnost poboljšava preciznost vođenja municije kroz promičuće svetlosne prizore.

Zadaci PEB, da se neutrališu precizno vođena oružja koja nose radiometričke sisteme, mogu biti rešeni negiranjem radio i toplotnih kontrastnih signala štićenih objekata, maskiranja tih signala ili kreiranjem lažnih ciljeva, stvarajući kontraste koji su jednaki ili veći od onih koje stvaraju pravi objekti.

Radio i toplotni signali objekata mogu se eliminisati na dva načina: upotrebom lakoapsorbirajućih premaza i emitovanjem širokopojasnog signala šuma čiji nivo treba prilagoditi površini pozadine.

Radio-upijajući materijali imaju ograničenu upotrebu, posebno ako se odnose na maskiranje pokretnih objekata. To, prvenstveno, proizilazi iz nejednolikosti podloge površine pozadine i njihovog nivoa, što zavisi od promene vremena. Drugi nedostatak jeste što su njihove tehničke izvedbe suviše komplikovane. Ipak, čini se sve da se povećava njihova efikasnost u raznim parirajućim sistemima za PEB.

Kontrastni signali sopstvenih objekata mogu se maskirati stvaranjem serije širokopojasnih ometajućih signala iz spoljnog izvora, u zavisnosti od parirajućeg protivničkog radara ili korišćenjem mreža od ugljeničnih vlakana za pokrivanje kritičnih objekata.

Lažni ciljevi mogu se stvarati osvetljavanjem površine pozadine iz sopstvenog uređaja, kao i stvaranjem širokopojasnih faznih signala šuma radi gušenja protivničkih radara.

Upoređujući ih sa njihovim »srodnicima« u centimetarskom talasnom području, MMWB vođeni sistemi imaju karakteristike koje ih čine sigurnim u prenosu ili ometanju i omogućavaju upotrebu:

— modela uskog direktnog zračenja sa neznatno izraženim bočnim uticajem;

— kratkotrajnih impulsa sa širokopojasnom intrainpulsnom modulacijom;

— višefrekventnih pojasa (35, 94, 140 GHz);

— heterogenih fizičkih principa primenjenih u sisteme vođenja, itd.

Ove karakteristike, čine sredstva za protivelektronsku borbu komplikovanijim i povećavaju njihovu cenu. Međutim, to su oruđa kojima se obezbeđuje zaštita zemaljskih ciljeva od protivničkog napada savremenim precizno vođenim oružjem.

M. Krbavac

PIROTEHNIČKA SREDSTVA U SAVREMENIM SISTEMIMA NAORUŽANJA*

Ruski Naučno-istraživački institut primenjene hemije, koji je osnovan 1945. godine, a 1997. godine preimenovan u Federalni naučno-proizvodni centar, smatra se vodećim u oblasti razvoja i proizvodnje pirotehničkih sredstava.

Danas nomenklatura razrađenih i osvojenih specijalnih pirotehničkih sredstava, namenjenih za opremanje svih rodova vojske, prelazi 450 stavki.

Osnovni pravci aktivnosti instituta usmereni su na proizvodnju:

— pasivnih toplotnih lažnih ciljeva i protivradarskih sredstava;

— maskirnih, zaštitnih i ometačkih aerosolnih sredstava i sredstava širokog spektralnog dejstva;

— termobaričkih smesa kombinovanog dejstva;

— metaliziranih zapaljivih smesa i sastava;

— osvetljavajućih, fotoosvetljavajućih i signalnih sredstava;

— plazmenih lažnih ciljeva i sredstava za izobličavanje;

— čvrstogorivne pirotehničke izvore niskotemperaturnog azota za sisteme upravljanja i orijentacije;

— čvrstih pirotehničkih goriva za reaktivne linijske motore, vazdušno-reaktivne motore i hidro-reaktivne motore;

— uređaja za paljenje i sredstava pirotehničke;

— autonomnih pirotehničkih malogabaritnih električnih izvora za sisteme napajanja i aktiviranja municije.

U periodu od 1970. do 1995. institut je razvio i proizveo kompleks aerosolnih sredstava i sredstava koja obezbeđuju maskiranje i zaštitu jedinica od dejstva savremenih vidova oružja i sredstava za izviđanje. Stvorena je naučna baza za projektovanje pirotehničkih aerosolnih sredstava, koja obuhvata četiri osnovna aspekta:

— utemeljeni izbor tipa aerosola za rešenje konkretnog zadatka s obzirom na optička svojstva, koja karakterišu efikasnost uzajamnog dejstva aerosola sa elektromagnetnim zračenjem;

— stvaranje receptura sastava za generaciju aerosola sa zadatim svojstvima, uz uvažavanje specifičnih zahteva pirotehničke proizvodnje;

— projektovanje konkretne municije, u prvom redu njenog aerosolnog punjenja, koja obezbeđuje izvršenje postavljenih taktičko-tehničkih zahteva;

— kvantitativnu ocenu maskirnog i zaštitnog dejstva pirotehničkih aerosola.

Postavljene su zakonitosti prenošenja video informacija o maskirnim objektima, svetlosnog zračenja atomske

* Prema podacima iz časopisa MILITARY PARADE, mart-april, 1998.

eksplozije i laserskog zračenja u pirotehnici aerosolima. Na osnovu njih formulisani su kriterijumi efektivnosti aerosolnih sastava i zahtevi za optičkim karakteristikama aerosola koji obezbeđuju maksimalni maskirni i zaštitni efekat.

Stvorene su savremene metode razvoja pirotehničkih aerosola i metodologija njihove primene, koja omogućava prognozu karakteristika municije u fazi projektovanja, putem određivanja optičkih karakteristika elementarne zapremine aerosola u laboratorijskim uslovima i naknadnog matematičkog modelovanja širenja zračenja u aerosolnim smesama i primenu na stvarne uslove. Za punjenje aerosolnih sredstava nove generacije razrađena su četiri tipa visokoefikasnih aerosolnih sastava, koji obezbeđuju maskirna zaštitna i ometačka svojstva u širokom spektralnom dijapazonu optičkog zračenja. Razvijeni aerosolni sastavi poslužili su kao osnova za stvaranje savremenih tipova aerosolnih sredstava za potrebe kopnene vojske i ratne mornarice.

Za potrebe kopnene vojske izrađene su: dimne kutije ŠD-MM, ŠD-B i dimne granate ZD6, ZD17, RDG-P, kao i zapaljivi dimni metak ZDP. Za potrebe ratne mornarice izrađene su: morske dimne kutije MDŠ-1, MDŠ-2, MDŠ-3 i DŠB.

Navedena sredstva namenjena su za zaštitu ličnog sastava, kopnenih, nadvodnih i obalskih objekata od savremenih sredstava za uništavanje, putem stvaranja maskirnih dimnih zavesa i lažnih ciljeva. Dijapazon maskirnog i ometajućeg dejstva zavesa nalazi se u vidljivoj i infracrvenoj oblasti spektra.

Jedan od najvažnijih pravaca aktivnosti je razvoj zapaljivih i termobaričkih sastava i smesa. Do danas je stvorena principijelno nova generacija visokoefikasnih metaliziranih zapaljivih smesa i pirotehničkih sastava za punjenje raznih vrsta municije. Proiz-

vedene metalizirane zapaljive smese poseduju kvalitativno nova svojstva, koja se, u osnovi, svode na sledeće:

- imaju visoku temperaturu gorenja i sposobne su da progore materijale borbene tehnike;

- stvaraju postojana žarišta požara u drvenim objektima, na transportu i zemljištu;

- drobe se na sitnije efikasne komadiće pri dejstvu municije;

- sigurno se pale na temperaturama od -40 do $+50^{\circ}\text{C}$ i na snežnom pokrivaču;

- prilepljuju se i drže na vertikalnim i nagnutim površinama cilja pri različitim brzinama susreta sa preprekom;

- poseduju termičku i drugu stabilnost u procesu dugog čuvanja.

Osim toga, institut je razvio specijalne metalizirane smese, koje poseduju kombinovano dejstvo (dimno i zapaljivo), sposobne da gore u uslovima povećane vlažnosti, stvarajući visokotemperaturne toplotne zone u prizemnom sloju.

Na osnovu zapaljivih metaliziranih smesa stvoren je principijelno novi vid punjenja, kasnije nazvan termobarički. Specifičnost oružja punjenog termobaričkim sastavom, po kojem se razlikuje od onih punjenih kondenzovanim eksplozivnim materijama, jeste snažnije fugasno dejstvo, pri čemu su na visokom nivou sačuvani drugi parametri uništavajućih faktora.

Stvaranje nove generacije visokoefikasnih zapaljivih i termobaričkih smesa omogućilo je, u saradnji sa konstruktorskim organizacijama razvoj i serijsku proizvodnju različitih vrsta oružja. To je aviomunicija: zapaljive i parčadno-fugasne bombe, kasetne bombe, rezervoari (ZAB-2,5S, ZAB-2,5SM, ZAB-500Š, ZAB-500TBM, FZAB-500M, OFAB-500, KAB-500OF, AZB-5, RBK-500ZAB, ZB-500GD), kao i municija za naoružanje KoV: za reaktivne sisteme

plotunske vatre (RSZO URAGAN i TOS-1), za reaktivne bacače plamena pešadije (RPO-A, RPO-Z, RPO-D) i za bacače granata TBG-7B.

M. Krbavac

TENK NA PRAGU 21. VEKA*

Poboljšana pokretljivost je ključ povećanja borbene efikasnosti tenka. U prvom kvartalu 21. veka može se očekivati samo neznatno povećanje specifične snage, sve do 27—29 kW/t, odnosno 1288—1472 kW za tenk od 50 t, jer svako dalje povećanje je problematično, sve dok se tenkovi kreću u marševskim kolonama ili u borbenim formacijama na bojnopolju. Prosečne brzine tenkova pri kretanju u marševskim kolonama mogu dostizati 35—40 km/h. Autonomija kretanja se neće menjati, ostaje 350—400 km, zavisno od putnih i terenskih uslova. Tenkovi će izvršavati duge marševe, 1500—2000 km, pri čemu će dnevni marševi iznositi 350—400 km.

Višegorivni dizel motori i gasne turbine nastaviće da se takmiče. Višegorivni dizel motori još nisu iscrpili sve mogućnosti, štaviše, primenom adijabatskog principa minimalno toplotno zračenje u atmosferu može se radikalno uvećati njihova snaga i efikasnost, pored znatnih projektnih prednosti zbog ugradnje kompaktnijeg sistema hlađenja. Međutim, biće potrebno vreme za adaptaciju motora koji će biti sposoban da radi na visokim temperaturama.

Gasne turbine za sada ne mogu da ostvare znatno veće očekivane prednosti, uključujući snagu po jedinici zapremine, laki start po hladnom vremenu, dug životni ciklus i povoljnost za pojednostavljenje transmisije. Me-

đutim, uprkos teoretskim i projektnim prednostima koje obećavaju, još nema značajnijeg prodora u primeni. One imaju veliku potrošnju goriva u poređenju sa dizel motorima (30—40 % više). Treba istaći da, ako su na kraju i dobile prioritet, u kopnenim transportnim sredstvima gasne turbine ne mogu ostvariti revolucionarne promene, kao što je to slučaj u avijaciji.

U poboljšanjima transmisije jasne su tendencije da se koristi kompaktna hidrodinamička transmisija sa planetarnim prenosnikom na glavnoj kaskadi i hidrostatičkim prenosnikom koji je ugrađen u upravljački mehanizam. U međuvremenu, veliki napredak je ostvaren poboljšanjem hidrodinamičke transmisije.

Elektromehanička transmisija ne može da funkcioniše, bar u sadašnje vreme, kao hidromehanička transmisija zbog niskog faktora efikasnosti. U budućnosti, elektromehaničke transmisije se mogu ugrađivati u tenkove novih projekata, gde će faktor »fleksibilnost« transmisije imati ključnu ulogu.

Hodni deo koristiće hidropneumatsko ovešanje. Ono će omogućiti vozaču da menja klirens i položaj hodnog dela i tako povećava brzinu i mekoću kretanja u zavisnosti od puta i zemljišnih uslova. Takvo »adaptivno« ovešanje biće od velikog značaja za tenkove, koji se u borbenim operacijama uglavnom kreću van puteva.

Broj komandi za upravljanje biće minimalan: upravljački točak, pedala gasa i nožna pedala za kočenje. To će obezbediti vozaču da se koncentriše na put, teren, bojište i tako povećava svoju radnu sposobnost.

Komandirski upravljački sistem postaće standardna oprema u tenku.

Upravljivost tenka

Tenkovske posade retko koriste sve mogućnosti koje poseduje tenk u toku izvođenja borbenih dejstava. Mo-

* Prema podacima iz časopisa MILITARY PARADE, januar—februar, 1998.

gućnosti tenkovskih odeljenja mogu se znatno proširiti automatizacijom svih radnji koje izvršavaju članovi posade, kako u svom odeljku, tako i u okviru svog odeljenja, obezbeđenjem posade i komandira potrebnim informacijama i uslovima za očuvanje komfora.

Jedan ugrađeni kompjuter trebalo bi da obezbedi automatsku paljbu, kretanje i upravljanje tenkovskom zaštitom. Članovi posade trebalo bi da dobiju informacije u vidljivoj formi, koje predočavaju borbenu situaciju, pokazuju mogućnosti tenka i njihov trenutni položaj. Komandir tenka trebalo bi da bude u mogućnosti da se vizuelno orijentiše po terenu bez otvaranja poklopca na tenku. Sve rutinske radnje na tenku, koje spadaju u oblast upravljanja, trebalo bi isključiti. Članovi posade izvršavaće minimum zahtevanih aktivnosti, što će ih usmeravati ka borbenim zadacima.

Komandir jedinice treba da bude svestan situacije i stanja svojih tenkova i da ima detaljne informacije o neprijatelju, kako po frontu, tako i po dubini. Helikopter, ili bespilotna letelica, mogu se koristiti za te svrhe. Tako će komandir jedinice biti sposoban da deluje u promenjenoj situaciji, da brzo donosi odluke, brzo menja već date komande i lično upravlja vatrom tenka, ako se ukaže potreba. Kompleksnost i dinamičnost prirode borbenih dejstava i slaba vidljivost iziskuju ugradnju u tenkove IFF sistema. Sve to će proširiti efikasnost tenkovskih odeljenja. Jedinice će postati mobilnije i manje osetljive na vatrene sisteme u bliskoj borbi i moći će brzo i racionalno da odgovore na promenu situacije.

Automatizacija omogućava izradu tenka robota, koji bi se u doglednoj budućnosti mogao koristiti za rešavanje specijalnih zadataka, uključujući otkrivanje neprijateljevog vatreneog sistema, uništavanje njegovih vitalnih instalacija, aktivnosti na terenima sa visokim stepenom radijacije, itd.

Autonomnost tenka

Konfuzna i brza promena situacije na bojištu urgentno zahteva da tenkovi budu autonomni u odnosu na gorivo, municiju i uslove za život posade. Međutim, tenk se ne sme pretvoriti u »depo« municije i goriva. Za njihovo snabdevanje treba koristiti isturene logističke jedinice koje imaju oklopna vozila opremljena da nose municiju, gorivo i hranu i vrše mehanizovano popunu tenkova. Članovima posade neophodno je obezbediti čiste ergonomske uslove za rad. Tenkovi treba da budu autonomni za efikasno dejstvo na bojištu do 24 časa neprekidnih borbenih dejstava ili tri dana u borbenim dejstvima sa kratkim prekidima.

Pouzdanost

Složenost izrade budućih tenkova ugradnjom elektronike, automatike, hidraulike, itd., i težnja za još kompaktijim uređenjem njegovih glavnih odeljenja i mehanizama, s jedne strane, i izdvojeni uslovi njihove borbene upotrebe, s druge strane, čine problem njihove pouzdanosti veoma akutnim. Smatra se da se on uspešno može rešiti obezbeđujući dostizanje očekivanog nivoa industrije za proizvodnju tenkova. Uredan razvoj proizvodnje tenkova, korišćenje novih materijala i tehnologija, vrhunske metode proračuna i testova obezbediće visoke osnovne pokazatelje pouzdanosti: 0,6—0,7 otkaza na 1000 km i ukupnu kilometražu 16.000—18.000 km. To će dozvoliti tenkovskoj posadi da se podvrgne dužoj borbenoj obuci u mirno vreme, njihovom učešću u 2—3 borbene operacije i održavanje borbene gotovosti na nivou 0,9—0,95.

Prevenција i efikasno otklanjanje kvarova obezbediće se automatizovanim informaciono-dijagnostičkim sistemom, uz primenu modulnog principa izrade.

Napredak u poboljšanju efikasnosti i izdržljivosti tenka može se ostvariti novim izgledom, jer konvencionalna konfiguracija sa topom montiranim u rotirajućoj kupoli postavljenoj na sredini, udoban smeštaj komandira i nišandžije, smeštaj odeljka vozača napred u korpusu, a motorno-transmisionog odeljka nazad, nije efikasno za duži period. Korišćenje automatskog, elektronskog i sistema daljinskog upravljanja dozvoljava tročlanoj posadi da bude razmeštena na prednjem delu korpusa u specijalno oklopljenom modulu sa komfornim automobilskim sedištim i sistemom za kondicioniranje vazduha. Poželjno je smestiti motorni pogon u niže prednje delove korpusa, ispred odeljka za smeštaj ljudstva, što će obezbediti dodatnu zaštitu posade. Slična konfiguracija za tenk od 50 t radikalno će proširiti zaštitu i tenka i njegove posade, povećati zalihe municije i goriva, stvoriti izvanredne ergonomske uslove i dozvoliti ugradnju topa kalibra većeg od 125 mm.

Dve gasne turbine u sklopu sa generatorima elektrotransmisije mogu se smestiti u prostoru korpusa iznad gusenica, dozvoljavajući tako da ostali prostor bude racionalnije iskorišćen.

Kombinacija modularnih projekata s visokim stepenom unifikacije omogućiće brzu promenu proizvodnje sredstava za izradu borbenih vozila pešadije umesto tenkova na tenkovskim šasijama.

Novi izgled, bez topa visoke balistike i čak bez kupole, može postati stvarnost samo kada bude ostvareno pouzdano, otporno na ometanje, vođeno reaktivno naoružanje, sa kompaktnom municijom, uz razumnu cenu,

sposobno da se efikasno suprotstavi različitim ciljevima. Projektili će se lansirati kroz krov borbenog odeljka. To će smanjiti ukupnu masu za 12 do 15 tona, što može da se iskoristi za povećanje zaštite vozila. Masa tenka retko je dostizala 60—65 t zbog gabaritnih i težinskih ograničenja.

Automatizacija radnji posade smanjiće njihov broj na dva člana. Ipak, funkcionalno razmišljanje primereno je vraćanju na tročlanu posadu, pri čemu bi jedan član bio usmeren na praćenje bojišta, neprijatelja i sadejstvjućih tenkova, na orijentaciju na zemljištu i na održavanje veze sa pretpostavljenom komandom.

Tako, analizirajući verovatne trendove razvoja tenkova i tenkovskog naoružanja u prvom kvartalu 21. veka i uzimajući u obzir ostvarivost pojave fundamentalno novih sredstava oružane borbe, moguće je pretpostaviti da će to borbeno sredstvo u suštini ostati nepromenjeno.

Sistem naoružanja za borbena vozila će se i dalje poboljšavati. Borbena vozila istog nivoa zaštite kao i tenkovi sadejstvovaće u okviru prednjeg borbenog ešelona. Za izvođenje mobilnih zadataka koristiće se i sva druga mobilna borbena vozila, uključujući amfibijska i avio-prenosna.

Izgled tenka mogao bi se drastično promeniti, u skladu sa razvojem nauke i tehnološkog progressa. Najveće promene javiće se i u snabdevanju potrebnim podacima na bojištu, automatizaciji upravljanja vatrom, pokretu i borbenim aktivnostima, pouzdanom otkrivanju malih ciljeva, čak i u nepovoljnim uslovima, korišćenju novih metoda za povećanje zaštite i stvaranje dobrih ergonomskih uslova za rad posade.

M. Krbavac



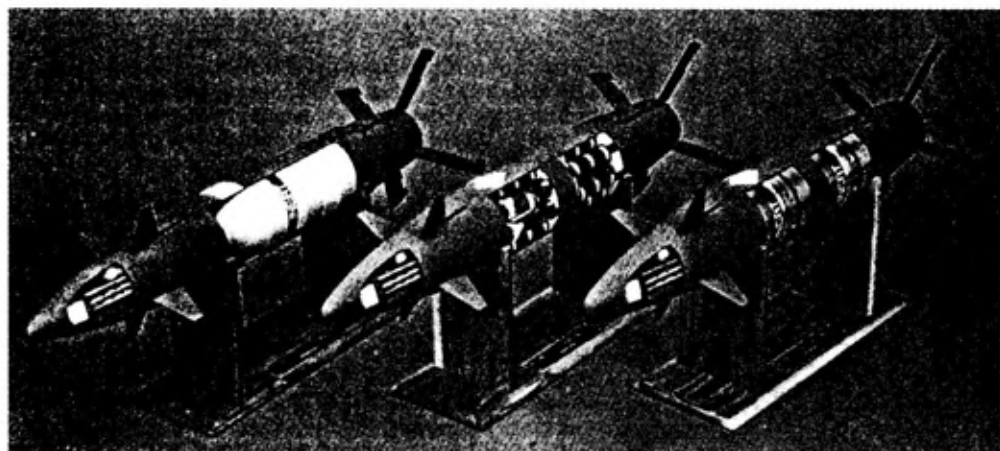
tehničke novosti i zanimljivosti

NOVI ARTILJERIJSKI PROJEKTILI POVEĆANOG DOMETA*

Američki istraživačko-razvojni centri TACOM i ARDEC planiraju da potpišu ugovor o razvoju i proizvodnji projektila XM982 155 mm povećanog

potrebom kasetne municije dvostruke namene M483A1 i M864.

Oruđa koja će se opremiti novom vrstom municije su vučna haubica M198, laka haubica 155 mm XM777, haubica M109A6 PALADIN i samohodna haubica XM2001 CRUSADER. Projektil XM982 namenjen je za uništava-



Artiljerijski projektili XM982 155 mm povećanog dometa

dometa. Do sada su ciljevi, kao što su stanice za snabdevanje, radari, laka oklopna vozila i ljudstvo uništavani u-

* Prema podacima iz časopisa INTERNATIONAL DEFENCE REVIEW, 1/1998.

nje baterija samohodnih haubica razvijenih u tipično ruskoj formaciji, na daljinama 37 km (40 km ako se tako zahteva), kada se gađa haubicama 39 ka-

libara ili 47 km (50 km) kada se gađa artiljerijom kalibra 52.

Razvoj i proizvodnja projektila trajaće 45 meseci, a treba da započne 2003. godine, dok se prvi prototip očekuje 2007. godine. Planirana je proizvodnja 200.000 projektila. Projektil, inače, kombinuje aerodinamički oživalni oblik sa raketnim motorom visokog potiska smeštenim u prednjem oživalnom prostoru, koji sagoreva 15 s u letu do dostizanja zahtevanog dometa.

Kompanije koje se bave razvojem i proizvodnjom naglašavaju da će verzija dvonamenske kasetne municije i tipa SADARM imati domet 41 km kada se ispaljuju iz cevi kalibra 39, a 57 km ako se ispaljuju iz cevi kalibra 52. U svim slučajevima minimalni domet je 4,5 km (u poređenju sa 8,5 koji se traži ili 6 ako se izričito zahteva).

Osnovna varijanta projektila, koji nosi 100 granata M80, ima masu 47,7 kg i dužinu od 935 mm (za XM982 zahteva se masa od 48,2 kg i dužina 1 m). Metak SADARM, dužine 975 mm, radi minimizacije submunicije, ima ugrađen GPS (Global Positioning System) translatore, koji počinje da prima signale sa satelita 10 s nakon opaljenja, obrađuje ih i koriguje vatru. Projektil XM982 ima u sebi GPS prijemnik i paket za vođenje (isti kao i za mornarički projektil 127 mm EX171).

Kompanija RTIS prihvatila je obavezu da srednje kružno odstupanje (CET) pri gađanju ciljeva bude 20 m na 40 km, što omogućava da se sa 16 metaka uništi nominalni cilj baterije samohodnih haubica. Osnovna verzija projektila ima 64 granate M85, opremljene upaljačima M234 sa mogućnošću samodestrukcije.

Cena projektila biće oko 5 000 američkih dolara u serijskoj proizvodnji, što je znatno manje nego za par SADARM submunicije, koji košta oko 30 000 američkih dolara. Kompanija Aerojet već je izvršila nadešavanja za

primenu SADARM varijante u višecevnim raketnim bacačima, a kompanija RTIS izvršila je ispitivanja validnosti konstrukcije projektila XM982. Sredinom oktobra, kako je planirano, izvršiće se ispitivanja sa avionom T-33 na poligonu China Lake u Kaliforniji. U prvom od njih projektil će se pustiti sa visine od 6860 m i leteti oko 30 s u seriji programiranih manevara tokom ispitivanja u vazдушnom prostoru.

V.R.

NOVI KONCEPT ORUŽJA ZA ODBRANU OD DOLAZEĆIH PROJEKTILA*

Poslednjih godina izuzetna pažnja posvećuje se problemu odbrane od dolazećih projektila u neposrednoj blizini branjenog objekta. Jedno od takvih oružja koje se nalazi u operativnoj upotrebi je poznati ruski sistem ARENA. Kombinujući radarsku tehniku i mnogobrojne cevi za lansiranje malih projektila sistem stvara »metalnu zavesu« u neposrednoj okolini tenka koja uništava dolazeći projektil.

Na gotovo istom principu australijska kompanija »Metal Storm« (metalna oluja) razvila je koncept višecevnih lansera projektila (granata) za blisku odbranu kopnenih vozila i brodova. Koncept se razrađuje u SAD i Australiji. Osnovni koncept sistema objedinjuje municiju i višecevno oružje u jedinstveni sklop tipa kontejnera, koji se može puniti nekom vrstom okvira sa više granata ili menjati kompletan. Svaka cev sadrži nekoliko zrna i punjenja koja se kompiuterski aktiviraju. Budući da sistem nema pokretnih mehaničkih elemenata tipa zatvarača, brzina paljbe praktično zavisi samo od

* Prema podacima iz časopisa INTERNATIONAL DEFENCE REVIEW, 11/1997.

želje operatora. Za ilustraciju ovakve tvrdnje, prototipskim modelom demonstrirane su brzine paljbe od 600 metaka u minuti do milion metaka u minuti, odnosno u jednoj stotinki sekunde ispaljeno je 180 metaka.

Ovakav koncept pokazuje brojne prednosti. Ukupna masa lansera-kontejnera neznatno je veća od ukupne mase same municije u njenom pakovanju. Zrna se mogu ispaljivati (lansirati) selektivno radi postizanja željenih površina rasturanja na različitim udaljenostima od štićenog objekta, čime se postiže zaštita od dolazećih projektila različite namene.

Predstavljeni koncept rešava mnoge probleme u oblasti bliske odbrane kopnenih vozila i brodova. Za razliku od klasičnih sistema za blisku borbu, ovaj sistem nema pokretnih komponenta, što znatno povećava njegovu efektivnost, drastično smanjujući vreme odgovora na potencijalnu pretnju u vidu dolazećeg projektila. Sistem za upravljanje vatrom i mehanizam za okidanje mogu biti objedinjeni u jedinstven, lak i kompaktan uređaj, dok eventualnim oštećenjima mogu da budu izložene samo cevi iz kojih se ispaljuju projektili.

Lansirni kontejneri se na pogodan način raspoređuju na vozilu ili brodu i aktiviraju u najpogodnijem trenutku, tj. kada radar montiran na štićenom objektu detektuje dolazeći projektil, odredi njegove parametre i, na osnovu njih, donese odluku o aktiviranju i aktivira odgovarajući kontejner, ili više njih.

U toku razvoja ovog koncepta testovi su obavljani na nekoliko helikoptera i aviona.

Helikopter je standardno nosio ukupno 6000 projektila (granata) od 40 mm, ukupne mase 2270 kg, od čega 908 kg u kontejneru i 1362 kg u spremištu. Pri lansiranju su stvarani »zastori« dimenzija 272x654 m, ili sa 50 projektila po širini i 120 po dužini sa razmakom između projektila od 3,6 m.

Lansiranje granata je potpuno kompjuterski upravljano.

U sličnim testovima na helikoptere tipa BLACK HAWK stavljano je po 4199 kg, na helikopter HEUY po 1952 kg, a na avion za borbu protiv tenkova tipa A-10 po 7264 kg navedenih granata.

Zbog potpunog elektronskog upravljanja i aktiviranja ovakav koncept omogućava veću taktičku fleksibilnost od klasičnih rešenja, a u prednosti je i u pogledu odnosa mase i efikasnosti.

Zbog atraktivnosti i efikasnosti ovog koncepta za njega su zainteresovane i najveće američke kompanije koje se bave proizvodnjom naoružanja.

M.S.

OKLOPNO VOZILO WIESEL 2*

Najnovije višenamensko oklopno vozilo WIESEL 2 počće da se proizvodi krajem sledeće godine. Vozilo će biti adaptirano za veći broj specijalnih uloga nemačke armije. WIESEL 2 razvijen je na osnovu prethodne verzije WIESEL 1, a u periodu 1989—1992. godine izrađeno je 345 ovih vozila za vazdušno-desantne snage.

Izrađene su dve verzije vozila: Mk 20 sa posadom od dva člana i topom RHEINMETALL Mk 20 Rh 20 mm u kupoli kompanije KUKA, i WIESEL TOW sa posadom od tri člana sa sistemom protivtenkovskih vođenih raketa TOW, dometa 3750 m. Mada je prototip WIESEL 2 kompletiran još sredinom 1994. godine, WIESEL 1 se još uvek proizvodi.

Vozilo WIESEL 2 ima dvostruko veću unutrašnju zapreminu od prethod-

* Prema podacima iz časopisa JANE'S DEFENCE WEEKLY, mart, 1998.

dne verzije zbog duže šasije. Takođe, ima novu pogonsku grupu koja se sastoji od četvoro-cilindričnog TDI dizel motora AUDI transmisije ZF sa hidrostatičkim upravljanjem. Ostvaruje maksimalnu brzinu od 70 km/h, a operativni radijus kretanja iznosi 550 km.

WIESEL 2 ima mnoge karakteristike koje su poboljšane u odnosu na prethodnu verziju, što uključuje nižu siluetu, mali pritisak na tlo, veću mobilnost, zaštitu od dejstva pancirnih metaka 7,62 mm, poseduje sistem za ventilaciju i uređaj za NHB zaštitu. Potpuno je prilagođen za transport helikopterima CH-47 i CH-53, kao i taktičkim transportnim avionima.



Višenamensko oklopno vozilo WIESEL 2

Da bi se zadovoljili dodatni zahtevi, firma MaK je razvila novu familiju komandnih i transportnih vozila u četiri verzije: ambulantna, inženjersko-izviđačka, za transport municije i komandna.

Na šasiju WIESEL 2 ugrađen je minobacač 120 mm, a u dve kompanije izvršena su njegova ispitivanja. Minobacač je smešten u zadnjem delu tela vozila i balistički je istovetan sa minobacačem koji se ugrađuje u američki oklopni transporter M113. Pošto WIESEL 2 ima lakšu šasiju od M113, u kompaniji Rheinmetall razvijen je sistem koji ublažava trzanje i apsorbuje udar kada se gađa iz minobacača. Minobacač ima azimut od 25° levo i

desno i elevaciju od +40° do +85°, a poslužuju ga tri člana: nišandžija, punilac i vozač. Ovakvo vozilo može da ponese 30 mina 120 mm.

V.R.

VOJNI KAMIONI IZ RUSIJE*

Uralska fabrika automobila specijalizovana je za proizvodnju kamiona sa dizel pogonom, poznatih po velikoj prohodnosti. Projektanti fabrike »Ural« proizveli su vozila konfiguracija 4x4, 6x6 i 8x8, nosivosti od 4,5 do 22 t.

Pouzdanost, visoka prohodnost i sposobnost da rade na temperaturama okoline od -50 do +50°C i terenima do 4500 m nadmorske visine čine ove kamione pogodnim za izvršenje različitih zadataka.

Visoke dinamičke karakteristike i pouzdanost omogućavaju korišćenje ovih vozila zajedno sa oklopnim vozilima, kako na maršu, tako i za vreme borbenih dejstava. Sveopšta standardizacija jedinica, agregata, sklopova i delova raznih modela, kao i snabdevanje rezervnim delovima, znatno uvećava ukupnu borbenu gotovost.

URAL 4320-31 je osnovni model poznate konfiguracije vozila 6x6. Njegova čelična oklopno-pločasta konstrukcija, projektovana je da vuče artiljerijska oruđa mase do 12 t, da nosi teret 6 t i prevozi 27 vojnika. Ugrađen mu je dizel motor snage 176 kW, klimens iznosi 400 mm, a poseduje centralnu regulaciju pritiska vazduha u pneumaticima i čekrk vučne sile 7 do 9 t. Zbog svega toga, mnoga borbena sredstva, kao što su raketni sistemi GRAD i PRIMA, montirani su na šasije ovih vozila. Na šasije ovog modela mogu se

* Prema podacima iz časopisa MILITARY PARADE, novembar-decembar 1997.

montirati razna sredstva mase do 12 t, uključujući remontna kola, dizalice, opremu za popunu gorivom, vozila za regeneraciju, pokretna komandna mesta jedinica, opremu za prelaz reka, protivpožarnu opremu, itd.

Danas firma »Ural« AZ JSC proizvodi sledeće serije vozila:

— URAL-43206, sa konfiguracijom 4x4, koji je projektovan da nosi do 4,5 t materijala i vuče prikolicu sa punim teretom do 7 t. Pokreće ga dizel motor snage 132 kW;

— URAL-5323-20, konfiguracije 8x8, koji je projektovan da nosi teret mase do 10 t i vuče prikolicu sa punim teretom do 16 t. Trenutno taj kamion prevozi topovsko-raketni sistem PAN-CIR-S1 AD. Pokreće ga dizel motor snage 220 kW;

— URAL-5423-20, koji je projektovan da vuče teške poluprikolice sa oko 10 t tereta i agregat.

Sledeći tradiciju proizvodnje teških kamiona sa pogonom na sve točkove firma »Ural« AZ započela je proizvodnju kamiona sledeće generacije URAL-6301 sa dizel motorom snage 200 kW, uz ispunjavanje najbitnijih zahteva vezanih za zaštitu okoline i udobnost.

M. K.

POVRŠINSKA ZAŠTITA AVIONA*

Američko ratno vazduhoplovstvo, zajedno sa firmom »Lockhead Martin« nastavilo je istraživanje na području primene specijalnih materijala osetljivih na pritisak koji se na principu adhezije nanose na vojne letelice radi zamene boja. Firma eksperimentiše sa materijalima na bazi metalnih para

kojima pokriva oko 56 m² površine lovca F-16 (koji je inače obojen), uključujući gornji deo trupa aviona i krilne površine. Ova faza usledila je nakon testiranja koja je sprovedla Mornarička avijacija na letelici S-3 sa zaštitnim filmovima na bazi polimera. Letelica je korišćena više od godinu dana u ekstremnim uslovima radi ispitivanja izdržljivosti primenjene zaštite.

Firma »Lockhead« tvrdi da su materijali na bazi metalnih para verovatno pogodniji u pogledu robustnosti, ali da je zaštita na bazi polimernog filma pogodnija za nanošenje. Ova kompanija realizovala je 150 časova leta avionom C-130 na koji je bio nanet polimerni film, a u planu je i let drugim avionom istog tipa koji će u potpunosti biti prekriven polimernim filmom. Film pokriva materijal u vidu »mikrorebara«, čime poboljšava laminarnost vazdušne struje oko krila, što dovodi do smanjenja otpora i povećanja iskorišćenosti goriva.

M.S.

OPTIKA ZA SVE USLOVE*

Optički instrument 1PN-86 je mnogostrani IC davač slike, koji se, u zavisnosti modifikacije, može koristiti kao nišan za protivtenkovske raketne sisteme za pretraživanje, određivanje cilja i precizno gađanje. Pored toga, može služiti za osmatranje terena, jer obezbeđuje visoku efikasnost u izvršenju naznačenih zadataka u svako vreme dana i noći, uprkos prirodnim i veštačkim smetnjama.

Noćni nišan 1PN83 sa optroničkim pretvaračem omogućava osmatranje bojišta i upravljanje vatrom u uslovima osvetljenog neba, i u uslovima pot-

* Prema podacima iz časopisa INTERNATIONAL DEFENCE REVIEW, 12/1997.

* Prema podacima iz časopisa MILITARY PARADE, januar—februar 1998.

Daljina otkrivanja cilja (tipa tenka) (m):	
— pri užem vidnom polju	2500
— pri širem vidnom polju	1800
Daljina identifikacije cilja (tipa tenka) (m):	
— pri širokom vidnom polju	1800
Vidno polje (°):	
— pri užem vidnom polju	1,8x3,6
— pri širem vidnom polju	3,6x7,2
Masa u operativnom stanju (kg) (u zavisnosti od modifikacije)	9,00; 16,00

punog mraka, zahvaljujući osvetljavanju cilja pomoću ugrađenog laserskog IC iluminatora.

Karakteristike nišana IPN83

Daljina identifikacije cilja (čoveka u uspravnom položaju) (m):	
— pri pasivnom načinu dejstva (bez osvetljavanja), pri svetlosti zvezda, 1/4 meseca	300
— pri aktivnom načinu dejstva (uz osvetljavanje), u potpunom mraku	300
Vidno polje: (°)	7
Uvećanje	x3
Ukupne dimenzije (mm)	300x216x70
Masa (kg)	1,45

Laserski binokularni daljinomer LRP-2 namenjen je za merenje rastojanja do osmatranih objekata, određivanja polarnih koordinata i orijentacije na terenu pri dnevnom vremenu ili u sumrak, i pri temperaturama od -40°C do $+50^{\circ}\text{C}$. Očitavanje kodirane informacije i mogućnost daljinskog upravljanja olakšavaju operatorima korišćenje ovih sredstava u sistemu za automatsko upravljanje vatrom. On koristi samostalni izvor za napajanje električnom energijom, a može se priključiti i na bilo koji spoljni sistem za napajanje.

Daljina merenja rastojanja (m)	od 50 do 20000
Uvećanje viziranja	x8
Ugao viziranja (°)	6
Ukupne dimenzije (mm)	100x185x190
Masa (kg)	1,6

Prizmatični dvogledi namenjeni su za osmatranje udaljenijih objekata i zemljišta u dnevno vreme i pri temperaturama od -50°C do $+50^{\circ}\text{C}$. BPO 10x42 se razlikuje od sličnih dvogleda po boljoj reprodukciji slike u celom vidnom polju i pojačanim fotometričkim karakteristikama, pa obezbeđuje uspešno osmatranje po oblačnom vremenu i u sumrak.

Karakteristike dvogleda BPO 10x42

Uvećanje	x10
Vidni ugao (°)	5,86
Linija vidnog polja na rastojanju 1000 m	102 m
Broj dioptrijske	5
Ukupne dimenzije (mm)	220x220x70
Masa (kg)	1,35

Noćni dvogled, sa visoko kvalitetnim optroničkim pretvaračem, BN-3 namenjen je za osmatranje bojišta, proučavanje i izviđanje terena u uslovima slabe vidljivosti i pri temperaturama od -50°C do $+50^{\circ}\text{C}$.

Karakteristike dvogleda BN-3

Uvećanje	x4,5
Daljina identifikacije čoveka u stojećem stavu i pri svetlosti od 0,003 do 0,005 Lx (m)	500
Broj dioptrijske	4
Ukupne dimenzije (mm)	290x130x75
Masa (kg)	1,1

M. K.

FORMIRANJE SNAGA ZA BRZI ODGOVOR U SLUČAJU HEMIJSKO-BIOLOŠKOG RATA*

Ministarstvo odbrane SAD započinje sa integrisanjem nekih organizacionih celina u »Tim za brzi odgovor na hemijsko-biološki udar« koji bi se aktivirao u slučaju potrebe. Tim se formira na zahtev ministra odbrane, a njegovo formiranje i održavanje aktivnosti treba da omogući brzi odgovor na terorističke akcije unutar zemlje, koje bi mogle da preduzmu različite terorističke organizacije uz upotrebu oružja za masovno uništenje.

Kopnena vojska je koordinator širih napora oružanih snaga, angažovanih u zajedničkoj obuci lokalnih zajednica u SAD, koje bi učestvovala na ovakvom zadatku.

Sastav tima sačinjavale nekoliko organizacionih celina kopnene vojske, kao što su: pomoćne tehničke jedinice, Medicinski institut za istraživanje infektivnih bolesti, Medicinski istraživački institut za hemijsku odbranu i neke laboratorije komande pozadine.

Pored jedinica i organizacija Kopnene vojske angažovane su i institucije Ratne mornarice, kao što su: Medicinski istraživački institut, Jedinica za preventivnu medicinu i okolinu i Mornarička istraživačka laboratorija. Timu

će se pridružiti i Snage za odgovor na hemijske i biološke incidente iz sastava marinaca SAD.

Radna grupa za tehničku podršku (TSWG — Technical Support Working Group), kao deo mešovite radne grupe za borbu protiv terorizma, i u 1998. godini nastaviće razvoj tehnologija koje će moći da se koriste u kriznim situacijama. Razvoj teče pod nadzorom sekretara za snage i resurse za specijalne operacije i konflikte niskog intenziteta u Ministarstvu odbrane, a obuhvata:

- definisanje sistema za dekontaminaciju bez rizika,

- razvoj naprednih tehnika za dekontaminaciju uz pomoć pene,

- razvoj ogrtača za jednokratnu upotrebu pri evakuacijama,

- razvoj baze podataka opasnih — rizičnih materija koja bi bila instalirana na prenosnom ručnom računaru,

- razvoj kompleta sa vrlo sličnim agensima, koji bi omogućio brzu detekciju detektorima.

Pored navedenog razvoja, zajedno sa zemljama saveznicima SAD, radni tim testira i različitu opremu za ublažavanje posledica i ocenjuje kvalitet opreme za detekciju i preduzimanje protivmera u urbanim sredinama.

M. S.

* Prema podacima iz časopisa JANE'S DEFENCE WEEKLY, 12 November 1997.

Uputstvo saradnicima

Vojnotehnički glasnik je stručni i naučni časopis Vojske Jugoslavije.

Svojom programskom koncepcijom časopis obuhvata sistem tehničkog obezbeđenja, tehniku vidova, rodova i službi, razvoj, proizvodnju, upotrebu, tehnologiju, metodologiju, organizaciju i stručna, naučna, teoretska i praktična dostignuća, koja doprinose razvoju vojne misli i usavršavanju pripadnika Vojske Jugoslavije.

Članak se dostavlja Redakciji u dva primerka, a treba obavezno da sadrži: propratno pismo sa kratkim sadržajem članka, članak, spisak grafičkih priloga, spisak literature i podatke o autoru.

U propratnom pismu treba istaći da li se radi o originalnom, naučnom, stručnom radu ili kompilaciji, koji su grafički prilozi originalni, a koji pozajmljeni.

Članak treba da sadrži rezime (u najviše osam do deset redova), i ključne reči na srpskom i engleskom jeziku, uvod, razradu i zaključak. Obim članka treba da bude do jednog autorskog tabaka (16 stranica sa dvostrukim proredom). Tekst mora biti jezički i stilski do-teran, sistematizovan, sa jasnim mislima, bez daktilografskih grešaka, bez skraćenica (osim standardnih), uz upotrebu stručne terminologije. Sve fizičke veličine moraju biti izražene u zakonski dozvoljenim mernim jedinicama. Matematičke izraze, koji se ne mogu pisati mašinom, ispisati rukom, pri čemu voditi računa o tačnom pisanju slova grčke azbuke, o velikim i malim slovima, o indeksima i eksponentima. Redosled obra-za (formula) označavati rednim brojevima, sa desne strane u okruglim zagradama. Fotografije i crteži treba da budu jasni, pregledni i pogodni za reprodukciju. Ne treba ih lepiti, već samo naznačiti njihovo mesto u tekstu. Crteže treba raditi tušem na paus-papiru. Tabele treba pisati na isti način kao i tekst, a označavati ih rednim brojevima sa gornje strane.

Spisak grafičkih priloga treba da sadrži naziv slike — crteža i nazive pozicija na njima.

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.

Svi radovi podležu stručnoj recenziji, a objavljeni radovi i stručne recenzije se honorišu prema važećim propisima VJ.

Podaci za autora sadrže: ime i prezime, čin, titulu, adresu radne organizacije (VP), kućnu adresu, telefon na radnom mestu i kućni telefon, žiro-račun banke i SO mesta stanovanja.

Rukopis slati na adresu: Redakcija »Vojnotehničkog glasnika«, 11002 Beograd, Birčaninova 5, VE-1.

LEKTOR

Dobrila Miletić, profesor

KORICE

Milijko Milinković

KOREKTOR

Bojana Uzelac

Cena: 15,00 dinara

Tiraž 1300 primeraka

Rešenjem Ministarstva za nauku i tehnologiju Republike Srbije, broj 413-00-222/95-0101 od 19. 06. 1995. godine časopis »Vojnotehnički glasnik« je oslobođen plaćanja opšteg poreza na promet proizvoda.

UDC: Jugoslovenski bibliografsko-informacijski institut

