

NACELNIK
Pukovnik
STANOJE JOVANOVIĆ

UREĐIVAČKI ODBOR

General-major
dr JUGOSLAV KODZOPELJIĆ, dipl. inž.
(predsednik Odbora)

General-major
dr SINISA BOROVIĆ, dipl. inž.
(zamenik predsednika)

General-major
dr NOVIĆA ĐORĐEVIĆ, dipl. inž.

General-major
MILISAV BRKIĆ, dipl. inž.

Pukovnik
dr IVAN ĐOKIĆ, dipl. inž.

Profesor
dr JOVAN TODOROVIĆ, dipl. inž.

Profesor
dr BORIVOJE LAZIĆ, dipl. inž.

Pukovnik
dr NIKOLA VUJANOVIĆ, dipl. inž.

Pukovnik
dr MILUN KOKANOVIĆ, dipl. inž.

Pukovnik
dr MILAN SUNJEVARIĆ, dipl. inž.

Pukovnik
mr DESIMIR BOGDANOVIĆ, dipl. inž.

Pukovnik
dr DRAGO TODOROVIĆ, dipl. inž.

Pukovnik
dr SLOBODAN BURSAC, dipl. inž.

Pukovnik
MIROSLAV ČOJBASIĆ, 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.

●
GLAVNI I ODGOVORNI
UREDNIK

Pukovnik
Miroslav Čojbašić, dipl. inž.
(tel. 646-277, 23-59-133 ili 33-133)

Urednik
Potpukovnik
Stevan Josifović, 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, Birčaninova 5,
Pretpiata 645-020 i 22-584, žiro-račun: NIU
„VOJSKA“ (za Vojnotehnički glasnik)
40823-849-0-2393 Beograd. Polugodišnja
pretpiata 25,00 dinara. Rukopisi se ne
vraćaju. Štampa: Vojna štamparija —
Beograd, Generala Zdanova 40 b.

STRUČNI I NAUČNI ČASOPIS
VOJSKE JUGOSLAVIJE

VOJNOTEHNIČKI

GLASNIK

5

S A D R Ž A J

- | | | |
|--|-----|--|
| Mr Dušan Korolija,
major, dipl. inž. | 517 | Optimizacija rezervnih delova za održavanje modularno građenih elektronskih uređaja |
| Dr Momčilo P. Milinović,
docent, dipl. inž.
Mr Nenad M. Dodić,
dipl. inž. | 525 | Problem susreta projektila i cilja u sistemu automatskog upravljanja vatrom protivavionskog topa |
| Sc Milisav Jakovljević,
pukovnik, dipl. inž. | 533 | Statička zakrivljenost cevi artiljerijskog oruđa |
| Dr Milan Novaković,
dipl. inž. | 543 | Efikasnost protivpešadijskih minsko-eksplozivnih prepreka parčadnog dejstva |
| Dr Radun Jeremić,
potpukovnik, dipl. inž. | 557 | Analiza teorijskih osnova WLF jednačine i metoda za određivanje faktora pomaka kod čvrstih raketnih goriva |
| Dr Ljubinka V. Rajaković,
dipl. inž.
Mr Draško Milosavljević,
kapetan I klase, dipl. inž. | 570 | Mogućnosti primene piezoelektričnih senzora za detekciju eksploziva na bazi nitroaromatičnih jedinjenja |
| Dr Slavko Tomović,
dipl. inž. | 577 | Ocena parametra oblika Vejbulovog zakona raspodele preko koeficijenta varijacije |
| Dr Dragoljub M. Brkić,
dipl. inž. | 583 | Analiza i primena dvoparametarske Vejbulove raspodele zasečene sa leve strane |
| Dr Miloško Jevtović,
profesor, dipl. inž. | 591 | Metrika kvaliteta softvera korišćena kod jednog telekomunikacionog terminala |
| Ivan Miletić,
dipl. inž. | 599 | Analiza performansi DS/CDMA mobilnog komunikacionog sistema |
| Svetislav Lj. Marković,
dipl. inž. | 607 | Neke karakteristike regenerisanih zupčanika sa cementiranim radnim površinama zubaca izloženih habanju i krunjenju |
| Dr Svetomir Minić,
potpukovnik, dipl. inž. | 617 | Sigurnost funkcionisanja — standardi IEC TC 56 — prikaz knjige |

PRIKAZI IZ INOSTRANIH ČASOPISA

- 621 Samohodna haubica 152 mm 2S3 AKACIJA — P.M.
- 625 Oklopno vozilo pešadije ACHZARIT — P.M.
- 628 Oklopno vozilo TVT sa podižućom platformom — P.M.
- 630 Budućnost evropskih vozila za logističku podršku — P.M.
- 635 Osmatrački helikopter Ka-31 — M.S.
- 637 Avijacijska protivpodmornička raketa APR-2E — M.S.
- 640 Torpedo dugog dometa tipa 53-65KE — M.S.

Mr Dušan Korolija,
major, dipl. inž.
VP 6684 Zrenjanin

OPTIMIZACIJA REZERVNIH DELOVA ZA ODRŽAVANJE MODULARNO GRAĐENIH ELEKTRONSKIH UREĐAJA

UDC: 621.38.044.75.004.54

Rezime:

U radu je prikazan model procesa snabdevanja rezervnim delovima za jednu vrstu modularno građenih elektronskih uređaja u višenivojskom sistemu održavanja. Objasnen je postupak optimizacije rezervnih delova za održavanje ovakvih uređaja i dat primer optimizacije rezervnih delova za jedan hipotetički elektronski uređaj. U primeru je predočena i analiza finansijskih ulaganja za rezervne delove u zavisnosti od logističkih parametara.

Ključne reči: modularno građeno elektronsko sredstvo, snabdevanje rezervnim delovima, popravljivi rezervni delovi, optimizacija.

SPARE PARTS OPTIMIZATION FOR MAINTENANCE OF ELECTRONIC MODULE CONSTRUCTED DEVICES

Summary:

The paper presents spare parts model supply for one type of electronic module constructed devices, in a multilevel maintenance system. The procedure of spare parts optimization for maintenance of such devices is explained and an example of spare parts optimisation of a hypotetic electronic device is presented. The example includes the spare parts saving analysis in the dependance on logistics parameters.

Key words: electronic module constructed devices, spare parts supply, repairable spare part, optimization.

Uvod

Važan element za postizanje visoke operativne gotovosti modularno građenog elektronskog uređaja predstavljaju zalihe rezervnih delova i njihova alokacija. U analizi procesa snabdevanja rezervnim delovima može se poći od neograničenih količina koje stoje na raspolaganju na svim nivoima održavanja, što je najgori slučaj, pošto je držanje prevelikih količina neekonomično. Sa druge strane nepostojanje dovoljnih zaliha može anulirati misiju uređaja. Radi postizanja maksimalne

operativne gotovosti elektronskog uređaja, uz minimalne troškove, nužno se nameće potreba proračuna optimalnih količina rezervnih delova.

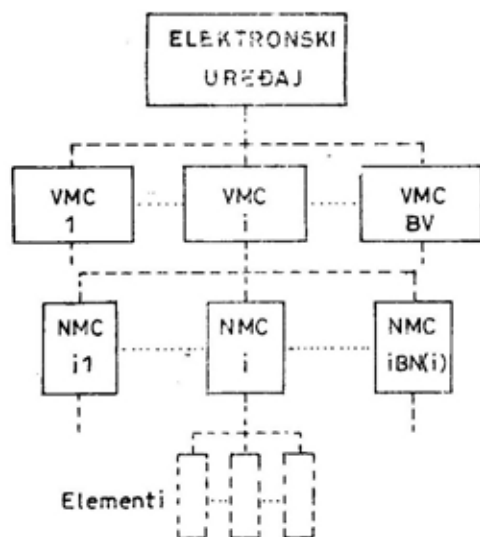
Proračun optimalnih količina rezervnih delova za održavanje modularno građenog elektronskog uređaja relativno je složen. Kod ovih uređaja, pored delova potrebnih za popravak, pojavljuju se i delovi za popravak popravljivih celina elektronskog uređaja. Model snabdevanja rezervnim delovima modularno građenih elektronskih uređaja u sistemu održavanja sa četiri nivoa prikazan je u literaturi [3]. Na os-

novu ovog modela u radu je, za jednu vrstu elektronskih uređaja i jednu varijantu njihovog održavanja, prikazan model procesa snabdevanja rezervnim delovima. Njegovom primenom, kao i primenom metode približnog dinamičkog programiranja realizovan je program za optimizaciju rezervnih delova — OPTIM. Radi ilustracije postupka optimizacije, pomoću ovog programa je za jedan hipotetički uređaj izvršen proračun optimalnih zaliha rezervnih delova i dati su rezultati proračuna i analiza uticaja logističkih parametara na visinu finansijskih ulaganja za rezervne delove.

Koncept održavanja i snabdevanja rezervnim delovima za koje se radi optimizacija

Konstrukcija elektronskih uređaja, za koje je izrađen model snabdevanja rezervnim delovima i izvršena optimizacija rezervnih delova, prikazana je na slici 1.

Uređaj se sastoji od viših modularnih celina (VMC). Svaka VMC sastoji



Sl. 1 — Blok-šema konstrukcije elektronskih uređaja za koje se radi optimizacija rezervnih delova

ji se od određenog broja nižih modularnih celina (NMC), koje su sastavljene od elemenata. Više i niže modularne celine su popravljive, a elementi nepopravljivi.

Radi dovođenja elektronskog uređaja i njegovih popravljivih sastavnih delova (VMC i NMC) u ispravno stanje, na njima se izvode sledeći korektivni tehnološki programi [4]:

— KO-4 popravak uređaja zamenom VMC bez podešavanja,

— KO-6 popravak VMC zamenom NMC bez podešavanja,

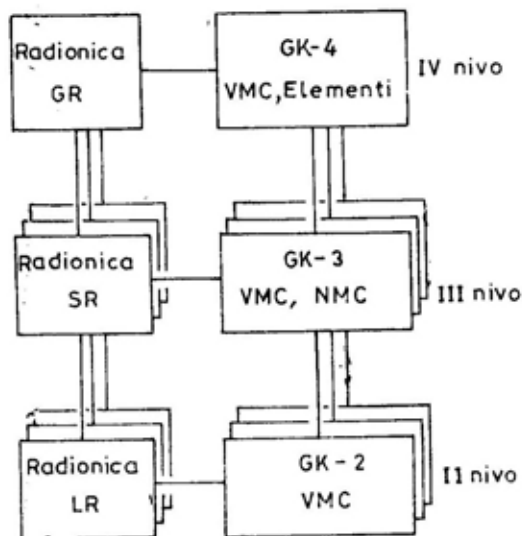
— KO-8 popravak NMC zamenom elemenata bez podešavanja.

Kod razmatranog uređaja primenjena je sledeća varijanta nadležnosti održavanja po nivoima:

- II nivo (LR) — KO-4,
- III nivo (SR) — KO-6,
- IV nivo (GR) — KO-8.

Na II nivou održavanja uređaj se popravlja zamenom VMC. Ispravna VMC uzima se iz grupnog kompleta-2 (GK-2), ako je ima u tom kompletu. Ako VMC nema u grupnom GK-2 vanredno se transportuje sa III nivoa iz grupnog kompleta-3 (GK-3). Ako celine nema ni u tom kompletu, neispravna VMC se vanrednim transportom šalje do radionice na III nivou održavanja i takvim transportom, nakon popravke, vraća na II nivo održavanja. Na III nivou održavanja neispravna VMC se popravlja zamenom NMC. Proces snabdevanja sa potrebnom NMC je analogan snabdevanju sa VMC. Na IV nivou održavanja neispravna NMC se popravlja zamenom elementa. Ispravni element uzima se iz grupnog kompleta-4 (GK-4). Kako je ovaj komplet na najvišem nivou snabdevanja, a elementi su nepopravljivi, u njemu se moraju nalaziti neiscrpane zalihe elemenata. Optimizacija ovih zaliha je nezavisna od optimizacije ostalih zaliha rezervnih delova, pa se neće razmatrati. Šema snabdevanja

i alokacija rezervnih delova po nivoima snabdevanja, za potrebe održavanja uređaja, prikazana je na slici 2.



Sl. 2 — Alokacija rezervnih delova

Matematički model procesa obezbeđenja rezervnih delova

Matematički model razvijen je uz sledeće pretpostavke:

— šema snabdevanja rezervnim delovima je simetrična (sve grane šeme su identične),

— svi uređaji imaju iste uslove eksploatacije (isti koeficijent eksploatacije K_e),

— intenziteti otkaza rasterećenih sastavnih delova (λ_2) i rezervnih delova u kompletima (λ_3) jednaki su nuli,

— svi sastavni delovi uređaja su različiti,

— koeficijenti eksploatacije svih sastavnih delova jednaki su koeficijentu eksploatacije uređaja.

Srednje vreme zastoja elektronskog uređaja na II nivou održavanja, zbog nedostatka VMC, iznosi:

$$t_z = \sum_{i=1}^{BV} q_{i2} t_{z12} \quad (1)$$

gde je:

BV — broj VMC od kojih se sastoji uređaj,

q_{i2} — verovatnoća popravke uređaja zamenom i-te VMC na II nivou održavanja,

t_{z12} — srednje vreme zastoja uređaja na II nivou održavanja zbog nedostatka i-te VMC.

Verovatnoća q_{i2} dobija se pomoću izraza:

$$q_{i2} = \frac{\lambda_{i2}}{\sum_{i=1}^{BV} \lambda_{i2}} \quad (2)$$

gde je:

λ_{i2} — intenzitet otkaza i-te VMC.

Srednje vreme zastoja uređaja t_{z12} je:

$$t_{z12} = t'_{i23} P_{i23} (1 - P_{i3r}) + P_{i2r} P_{i3r} + t'_{i3r} P_{i2r} P_{i3r} \quad (3)$$

gde je:

t'_{i23} — srednje vreme vanredne popune GK-2 sa i-tom VMC iz GK-3,

t'_{i3r} — srednje vreme dato izrazom:

$$t'_{i3r} = t_{i3r} + t_{i0} + t_{ip} \quad (4)$$

gde je:

t'_{i3r} — srednje vreme vanrednog transporta i-te VMC od radionice na II nivou do radionice na III nivou održavanja,

t_{i0} — srednje vreme opravke i-te VMC na III nivou održavanja,

t'_{ip} — srednje vreme zastoja i-te VMC na III nivou održavanja zbog nedostatka NMC, pri njenoj vanrednoj popravci.

P_{i23} predstavlja verovatnoću otkaza GK-2 u slučaju na je na II nivou održavanja potrebna i-ta VMC, pod uslovom da taj deo postoji u GK-3, i ona iznosi:

$$P_{i23} = \frac{A_{i23}^{n_i}}{n_i! \sum_{z=0}^{\infty} A_{i23}^z / z!} \quad (5)$$

gde je:

n_i — broj i-tih VMC u GK-2,

$$A_{i23} = t_{i23} \lambda_{i2uk} \quad (6)$$

t_{i23} — srednje vreme redovne popune GK-2 sa i-tom VMC iz GK-3,

λ_{i2uk} — ukupni intenzitet svih i-tih VMC, koji se obnavljaju u GK-2.

P_{i2r} predstavlja verovatnoću otkaza GK-2 u slučaju da je na II nivou održavanja potrebna i-ta VMC, pod uslovom da tog dela nema u GK-3, i iznosi:

$$P_{i2r} = \frac{A_{i2r}^{n_i}}{n_i! \sum_{z=0}^{\infty} A_{i2r}^z / z!} \quad (7)$$

gde je:

$$A_{i2r} = t_{i2r} \lambda_{i2uk} \quad (8)$$

$$t_{i2r} = t_{i23} + t_{itr} + t_{io} + t_{ip} \quad (9)$$

t_{i23} — srednje vreme redovne popune G-2 sa i-tom VMC iz GK-3,

t_{itr} — srednje vreme redovnog transporta i-te VMC od radionice na II nivou do radionice na III nivou održavanja,

t_{ip} — srednje vreme zastoja i-te VMC na III nivou održavanja zbog nedostatka NMC, pri njenoj redovnoj popravci.

P_{i3r} predstavlja verovatnoću otkaza GK-3 u slučaju potrebe i-te VMC i ona iznosi:

$$P_{i3r} = \frac{A_{i3r}^{m_i}}{m_i! \sum_{z=0}^{\infty} A_{i3r}^z / z!} \quad (10)$$

gde je:

m_i — broj i-tih VMC u GK-3,

$$A_{i3r} = t_{i3r} \lambda_{i3uk} \quad (11)$$

λ_{i3uk} — ukupni intenzitet svih i-tih VMC, koje se obnavljaju u GK-3

$$t_{i3r} = t_{itr} + t_{io} + t_{ip} \quad (12)$$

Pošto je proces snabdevanja NMC analogan snabdevanju VMC, srednje vreme zastoja VMC na III nivou održavanja, zbog nedostatka NMC, dobija se na isti način kao i srednje vreme zastoja elektronskog uređaja na II nivou održavanja, zbog nedostatka VMC (izrazi (1) do (12)).

Postupak optimizacije

Za optimizaciju zaliha rezervnih VMC i NMC korištena je metoda približnog dinamičkog programiranja. Suština ove metode je uvođenje one VMC ili NMC u grupni komplet, za koje je odnos priraštaja novčanih sredstava za rezervne delove i priraštaja vremena zastoja uređaja, zbog nedostatka VMC, minimalan:

$$D = \frac{\Delta C}{\Delta t_z} \quad (13)$$

Srednje vreme zastoja elektronskog uređaja, zbog nedostatka rezervnih celina, funkcija je broja svih celina koje se nalaze u kompletima GK-2, GK-3 i GK-4:

$$t_z = t_z(n_i, m_i, m_{ij}, r_{ij}) \quad (14)$$

gde je:

m_{ij} — broj j-tih NMC koje pripadaju i-toj VMC u GK-3,

r_{ij} — broj j-tih NMC koje pripadaju i-toj VMC u GK-3.

Za VMC u GK-2 odnos D je:

$$D_{1i} = \frac{c_i N_2}{t_z(n_i, m_i, m_{ij}, r_{ij}) - t_z(n_i + 1, m_i, m_{ij}, r_{ij})} \quad (15)$$

gde je:

c_i — cena i-te VMC,

N_2 — broj GK-2.

Za VMC u GK-3 odnos D je:

$$D_{2i} = \frac{c_i N_3}{t_z(n_i, m_i, m_{ij}, r_{ij}) - t_z(n_i, m_i + 1, m_{ij}, r_{ij})} \quad (16)$$

gde je:

N_3 — broj GK-3.

Za NMC u GK-3 odnos D je:

$$D_{3ij} = \frac{c_{ij} N_3}{t_z(n_i, m_i, m_{ij}, r_{ij}) - t_z(n_i, m_i, m_{ij} + 1, r_{ij})} \quad (17)$$

gde je:

c_{ij} — cena j-te NMC, koja pripada i-toj VMC.

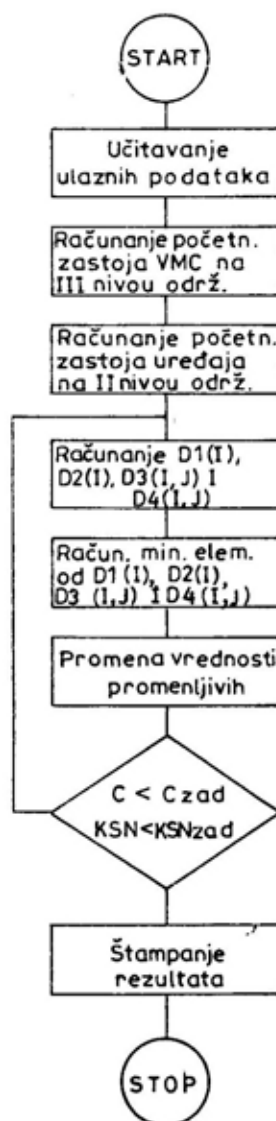
Za NMC u GK-4 odnos D je:

$$D_{4ij} = \frac{c_{ij}}{t_z(n_i, m_i, m_{ij}, r_{ij}) - t_z(n_i, m_i, m_{ij}, r_{ij} + 1)} \quad (18)$$

Pri optimizaciji od svih elemenata vektora D_{1i} , D_{2i} , D_{3ij} i D_{4ij} traži se element sa minimalnom vrednošću. Indeks tog elementa $(1_i, 2_i, 3_{ij}, 4_{ij})$ određuje komplet i rezervni deo za koji se uvećava taj komplet. Iterativni postupak

završava se kada se zadovolji postavljeno ograničenje.

Prema ovom postupku optimizacije zaliha rezervnih delova razvijen je program OPTIM, koji ima dve opcije. Jedna opcija je kada ograničenje predstavljaju raspoloživa novčana sredstva, a druga kada je ograničenje koeficijent snabdevenosti. Dijagram toka programa OPTIM prikazan je na slici 3.



Sl. 3 — Dijagram toka programa OPTIM za optimizaciju zaliha rezervnih delova

Primer proračuna optimalnih zaliha rezervnih delova

Pomoću programa OPTIM izvršen je proračun optimalnih zaliha za elektronski uređaj koji je sastavljen od 4 VMC i odgovarajućeg broja NMC. U tabeli 1 dati su intenziteti otkaza i cene VMC i NMC elektronskog uređaja.

Tabela 1

Intenziteti otkaza i cene delova uređaja

Sastavni deo	Intenzitet otkaza ($\times 10^{-6}$)	Cena US \$
VMC-1	300	2000
NMC-11	80	1000
NMC-12	120	300
NMC-13	100	700
VMC-2	350	1500
NMC-21	50	400
NMC-22	95	450
NMC-23	90	400
NMC-24	115	250
VMC-3	100	500
NMC-31	70	300
NMC-32	30	200
VMC-4	250	5000
NMC-41	40	1000
NMC-42	50	900
NMC-43	60	1000
NMC-44	55	900
NMC-45	45	1200

Pri optimizaciji su korišćene sledeće vrednosti logističkih parametara sistema snabdevanja:

- srednje vreme redovnog transporta NMC od GK-4 do GK-3 i od radionice na III nivou do radionice na IV nivou — 120 h
- srednje vreme vanrednog transporta dela od GK-4 do GK-3 i od radionice na III nivou do radionice na IV nivou — 35 h
- srednje vreme redovnog transporta dela od GK-3

do GK-2 i od radionice na II nivou do radionice na III nivou — — — 100 h

- srednje vreme vanrednog transporta dela od GK-3 do GK-2 i od radionice na II nivou do radionice na III nivou — 30 h
- srednje vreme opravke NMC na IV nivou održavanja — — — — 5 h
- srednje vreme opravke VMC na III nivou održavanja — — — — 1 h
- broj GK-2 oslonjenih na GK-3 — — — — 10
- broj GK-3 oslonjenih na GK-4 — — — — 10
- broj uređaja koji se održavaju u radionici II nivoa — — — — — 20

U tabeli 2 prikazane su proračunate količine rezervnih VMC i NMC po nivoima snabdevanja, za različite koeficijente snabdevnosti, odnosno za različite iznose uloženi finansijskih sredstava za rezervne delove. Može se uočiti da se tek za veće iznose novčanih sredstava pojavljuju VMC na II nivou. Kao orijentacija može poslužiti da najveći iznos uloženi sredstava od 1853000 US \$ predstavlja oko 10% cene svih uređaja za koje se izvodila optimizacija rezervnih delova.

Zavisnost cene zaliha rezervnih delova od vremena vanredne popune: GK-2 sa VMC iz GK-3 i GK-3 sa NMC iz GK-4 prikazana je na slici 4.

Može se uočiti da vreme popune GK-2 sa VMC iz GK-3 daleko više utiče na visinu finansijskih ulaganja od vremena popune GK-3 sa NMC iz GK-4.

Zavisnost cene zaliha rezervnih delova od broja uređaja, koji su oslonjeni na II nivo održavanja, prikazana je na slici 5.

Povećanje broja uređaja ne doводи direktno do proporcionalnog povećanja

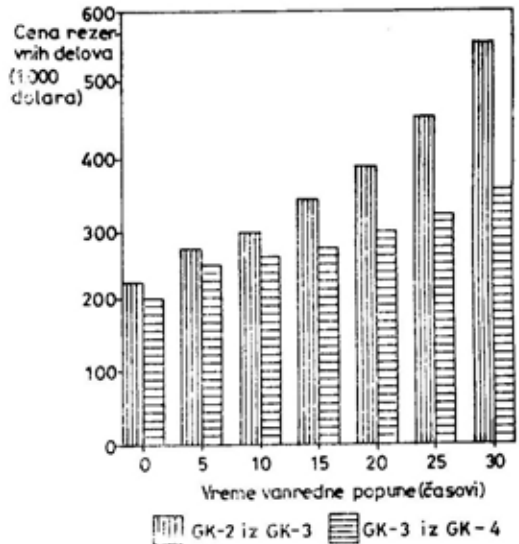
Tabela 2

Rezultati proračuna

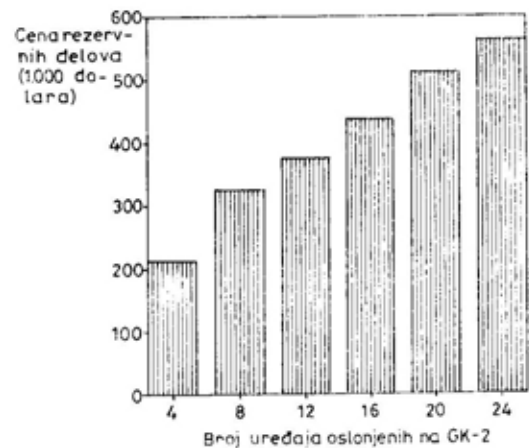
Sastavni deo	Količine zaliha r/d za uloženi US \$			
	950	76000	370000	1853000
VMC NA II NIVOU (GK-2)				
VMC-1	0	0	0	1
VMC-2	0	0	0	2
VMC-3	0	0	0	1
VMC-4	0	0	0	1
VMC NA III NIVOU (GK-3)				
VMC-1	0	0	4	6
VMC-2	0	0	5	7
VMC-3	0	2	3	4
VMC-4	0	0	0	5
NMC NA III NIVOU (GK-3)				
NMC-11	0	0	1	2
NMC-12	0	2	4	4
NMC-13	0	0	2	3
NMC-21	0	0	1	2
NMC-22	0	1	2	3
NMC-23	0	1	2	3
NMC-24	0	3	4	4
NMC-31	0	1	1	2
NMC-32	0	1	1	1
NMC-41	0	0	1	2
NMC-42	0	0	1	2
NMC-43	0	0	1	2
NMC-44	0	0	1	2
NMC-45	0	0	0	2
NMC NA IV NIVOU (GK-4)				
NMC-11		0	11	13
NMC-12	0	18	20	21
NMC-13	0	11	15	16
NMC-21	0	8	9	9
NMC-22	0	13	15	16
NMC-23	0	13	15	15
NMC-24	3	18	19	19
NMC-31	0	10	12	12
NMC-32	1	6	6	6
NMC-41	0	0	7	8
NMC-42	0	1	8	9
NMC-43	0	0	9	11
NMC-44	0	2	9	10
NMC-45	0	0	7	9
Srednje vreme čekanja uređaja na rezervne delove				
	140	100	54	5

nja cene zaliha rezervnih delova, zbog čega je ekonomično da se što više uređaja oslanja na jedan komplet rezervnih delova.

Ovakve analize zavisnosti finansijskih ulaganja u rezervne delove od vrednosti logističkih parametara mogu korisno poslužiti za optimizaciju sistema snabdevanja rezervnim delovima.



Sl. 4 — Zavisnost cene zaliha rezervnih delova od vremena vanredne popune



Sl. 5 — Zavisnost cene zaliha rezervnih delova od broja uređaja oslonjenih na radio II nivoa održavanja

Zaključak

Radi poboljšanja pogodnosti za održavanje vojnih sistema i uređaja, sve više se primenjuje njihova modularna konstrukcija. Kod aviona, tenka, radara i drugih sistema i uređaja takve konstrukcije se popravljaju zamenu viših modularnih celina i to, zbog relativno jednostavne defektacije i zamene celine, na nižim nivoima održavanja.

Zamenjena celina se popravlja na višim nivoima održavanja. Ovakav način održavanja bitno poboljšava operativnu gotovost sistema i uređaja, jer je održavanje bliže korisniku, ali zahteva i veća finansijska ulaganja u rezervne delove. Zbog toga je optimizacija re-

zervnih delova za potrebe održavanja ovakvih sistema i uređaja još izražena.

Program OPTIM se ne može upotrebiti za optimizaciju zaliha rezervnih delova realnog elektronskog uređaja, jer je razvijen za specifičnu vrstu elektronskih uređaja, uprošćenu šemu snabdevanja rezervnim delovima i jednu od alternativna njihovog održavanja. Imajući u vidu značaj optimizacije zaliha rezervnih delova za oružane snage, neophodno je da stručnjaci za kreiranje održavanja uređaja i sistema raspolažu univerzalnim programskim paketima za optimizaciju zaliha rezervnih delova.

Literatura:

- [1] Kuljbač, L. I.: Osnovi račeta obespećenija elektronoj aparaturi zapasnama elementami, Sovetskoe radio, Moskva, 1970.
- [2] Blanchard, B.: Logistics engineering and management, Prentice Hall, New Jersey, Prentice Hall, 1986.
- [3] Korolija, D.: Model snabdevanja modularno građenih elektronskih uređaja rezervnim delovima, Magistarski rad, Zagreb, ETF, 1988.
- [4] Petrović, J., Barković, M.: Tehnologija održavanja TMS KoV OS i sistema snabdevanja rezervnim delovima, Zagreb, VVTS KoV, 1985.
- [5] Korolija, D.: Snabdevanje modularno građenih tehničkih sredstava rezervnim delovima, Brioni, Zbornik radova SYMOPIS'88, 1988.
- [6] Korolija, D.: Polazne osnove za matematičku formalizaciju sistema snabdevanja modularno građenih tehničkih sredstava rezervnim delovima u sistemu održavanja sa više nivoa, VTG 1/90, str. 17-22.
- [7] Korolija, D.: Vreme zastoja modularno građenog elektronskog sredstva zbog snabdevanja rezervnim delovima, VTG 4/90, str. 376-381.

Dr Momčilo P. Milinović,
docent, dipl. inž.
Mašinski fakultet, Beograd
Mr Nenad M. Dodić,
dipl. inž.
Vojnotehnički institut VJ,
Beograd

PROBLEM SUSRETA PROJEKTILA I CILJA U SISTEMU AUTOMATSKOG UPRAVLJANJA VATROM PROTIVAVIJSKOG TOPA

UDC: 623.418.2.02:531.567

Rezime:

U radu je predstavljen automatski sistem za upravljanje vatrom na protivavionskom artiljerijskom sistemu. Sistem je projektovan tako da zadovoljava potrebe mobilnih i stacionarnih protivavionskih sistema za trupnu i stacionarnu protivvazdušnu odbranu. Ukazano je na glavne probleme preciznosti gađanja i date su teorijske i praktične metode za njegovo poboljšanje. Predložen je novi pristup praćenju manevrišućih ciljeva, koji obezbeđuje povećanu tačnost gađanja.

Ključne reči: automatski sistem, balistički problem, gađanje, Kalmanov filter, ocenjivanje, protivvazdušna odbrana, tačka susreta, upravljanje vatrom, vreme leta.

THE PROBLEM OF IMPACT OF THE ROUND ON THE TARGET AND THE AUTOMATIC FIRE CONTROL SYSTEM OF THE AIR DEFENCE GUN

Summary:

An automatic fire control system for an antiaircraft artillery weapon is presented. It is designed to fulfil the demands of mobile and stationary defence systems. A description of the system and a solution to the impact of the round on the target problem are given as well as a general solution to the airborne target tracking problem.

Key words: automatic system, ballistic problem, hitting, Kalman filter, estimation, air defence, point of impact, fire control, time of flight.

Uvod

Sistemi upravljanja vatrom u protivvazdušnoj odbrani predstavljaju naj-složenije sisteme upravljanja vatrom u naoružanju uopšte. Naime, sistemi upravljanja vatrom doživeli su svoj preporod automatizacijom proisteklom iz potrebe rešavanja zadatka susreta projektila i cilja u protivvazdušnoj odbrani. Svi ostali sistemi upravljanja vatrom predstavljaju manje složen zadatak sa aspekta pogađanja cilja, s obzirom na to da je vreme boravka cilja u

zoni dejstva neuporedivo duže nego kod protivavionskih sistema.

Moderan razvoj vazduhoplovnih sredstava, pored usavršavanja ostalih karakteristika, posebnu pažnju posvećuje efikasnosti letelica pri gađanju ciljeva na zemlji pri veoma velikim brzinama i relativno malim visinama leta. Adekvatno praćenje (u tehničkom smislu) novih letelica ovakvih performansi upravo je glavni zadatak automatskog sistema za upravljanje vatrom u protivavionskoj odbrani. Iz toga se može jasno zaključiti da je, sa aspekta siste-

ma upravljanja vatrom, nova generacija letelica ovakvih performansi nametnula još oštrije zahteve u pogledu kratkotrajnosti vremena boravka u zoni odbrane. Time stari postupci i metode, matematički i tehnički realizovani u dosadašnjim sistemima za upravljanje vatrom u protivvazdušnoj odbrani, postaju nedovoljno efikasni. Novi, brzo-manevrišući avioni, koji dejstvuju na cilj pri velikim brzinama leta, traže i nova rešenja za pravilnu predikciju tačke susreta.

Sistem za upravljanje vatrom u protivavionskoj odbrani

Automatski sistem za upravljanje vatrom, bez neposrednog učešća čoveka, upravlja pomeranjem cevi topa, na osnovu informacija koje dobija od osmatračkog radara i sopstvenih senzora, tako da obezbeđuje otvaranje vatre s velikim verovatnoćama pogađanja i uništenja cilja. Osnovni zadatak sistema upravljanja vatrom (SUV) jeste da obezbedi susret projektila i cilja, tj. da projektil s trenutnim (udarnim) upaljačem udari u cilj, odnosno da se projektil s blizinskim upaljačem i parčadnim dejstvom (prefragmentirani) nađe dovoljno blizu cilja, kako bi se upaljač aktivirao. Dakle, prostor u kome treba da se nađe projektil s trenutnim upaljačem jeste zapremina aviona, a prostor u kome treba da se nađe projektil s blizinskim upaljačem omeđen je obvojnomicom oko svera sa centrima u svim tačkama letelice i poluprečnicima jednakim odstojanju na kome se aktivira blizinski upaljač (označeno tačkasto na slici 2). Time se višestruko povećava fiktivna zapremina u kojoj projektil treba da se nađe, odnosno površina siluete kroz koju projektil treba da prođe. Dakle, municija s blizinskim upaljačem fiktivno povećava cilj koji se gađa, što znatno povećava verovatnoću pogađanja cilja, naročito kada je on mali (raketa).

Pri gađanju cilj može da se kreće pravolinijski, konstantnom brzinom ili

da manevriše, tj. da menja ubrzanje, krećući se po pravoj ili krivoj liniji. Gađanje cilja u manevru postavlja konstruktoru sistema za upravljanje vatrom stroge zahteve zbog složene dinamike pokretanja topa i senzora za merenje položaja cilja, kao i zbog složenijeg postupka ocenjivanja kinematskih veličina cilja. Za rešavanje susreta projektila i cilja u manevru, pored ocene vektora položaja i brzine cilja, treba obezbediti i ocene vektora ubrzanja i viših izvoda vektora položaja cilja visoke tačnosti. Glavni problem jeste nepoznavanje načina kretanja cilja, s obzirom na to da letelica može da ima proizvoljnu trajektoriju, ograničenu jedino njenim tehničkim mogućnostima i fizičkom sposobnošću pilota.

Rad sistema oruđe-SUV

Protivavionski sistem opremljen topom postavljen je na obrtnu platformu oklopnog vozila, zajedno sa senzorima za precizno merenje položaja cilja. Senzori su postavljeni na nosaču koji se nalazi na istoj platformi kao i top i koji po visini rotira nezavisno od kretanja topa, a po pravcu rotira relativno u odnosu na platformu topa. Senzori i top pokreću se električnim ili hidrauličnim motorima. Zadatak senzora jeste da preuzmu ulogu nišanske sprave, što znači da prepoznaju cilj i odrede njegove koordinate sa zadatom pouzdanošću. Osa senzora predstavlja nišansku liniju i kreće se nezavisno od kretanja ose cevi topa — linije gađanja. Na osnovu podataka od senzora i matematičkog modela za predikciju kretanja cilja, linija gađanja dovodi se preko sistema za upravljanje vatrom u adekvatni pravac.

Na slici 1 šematski je prikazan rad sistema za upravljanje vatrom protivavionskog sistema. Senzori su upravljani ka cilju i mere sverne koordinate položaja cilja u odnosu na oruđe: uglove azimuta i elevacije i daljinu cilja. Na osnovu ovih merenja ocenjuju se kinematske veličine cilja: vektori položaja,

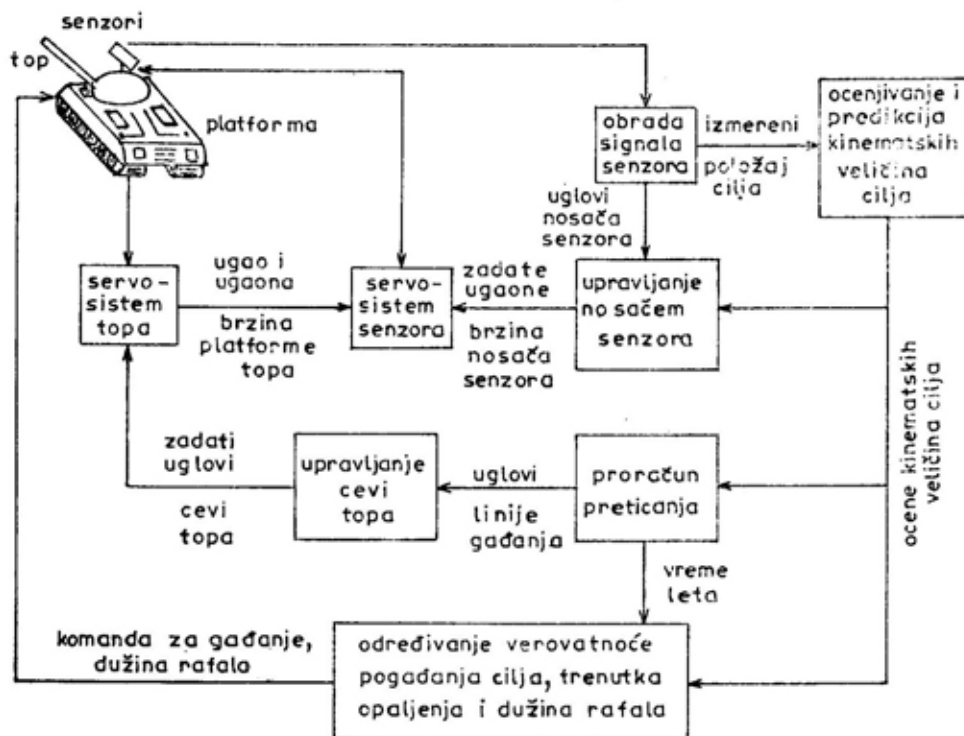
brzine i ubrzanja, kao i viši izvodi vektora položaja cilja. Senzori treba da budu žiroskopski stabilisani, kako bi se kompenzovale oscilacije vozila prilikom njegovog kretanja ili otvaranja vatre. U intervalima kada se položaj cilja ne meri (privremeni »gubitak« cilja zbog zaklonjenosti, ometanja senzora, itd.), senzor se usmerava na osnovu predikcije položaja cilja. Na osnovu ocena kinematskih veličina, balističkih parametara i meteoroloških podataka rešava se problem preticanja u cilju susreta projektila i cilja. Proračunom u okviru sistema za upravljanje vatrom u realnom vremenu praćenja određuje se položaj linije gađanja. Servosistem pokreće oruđe (top), tako da osi zauzme izračunati položaj linije gađanja.

Proračunski podaci o cilju, dobijeni na osnovu praćenja senzorom, obezbeđuju stalnu korekciju nišanske linije

(linije praćenja) u odnosu na cilj, težeći da minimiziraju grešku praćenja. S druge strane, za svaki položaj senzora, na osnovu dobijenih podataka o cilju, balističkih podataka za top i municiju, kao i meteoroloških podataka, u realnom vremenu se proračunavaju koordinate tačke susreta i tačke usmeravanja oruđa. Koordinate ovih tačaka izračunavaju se na osnovu jednakosti vremena leta projektila i cilja do tačke susreta. Prema statističkim pokazateljima i oceni greške gađanja određuje se trenutak opaljenja i dužina rafala za zadanu proračunsku verovatnoću uništenja, kao ulaznu karakteristiku oruđa.

Glavni senzori i njihove funkcije

Osnovni senzori su TV-kamera i laserski daljinomer. TV-kamera služi za otkrivanje cilja i merenje uglova cilja u odnosu na optičku liniju kamere, ko-



Sl. 1 — Funkcionalna šema protivavionskog sistema

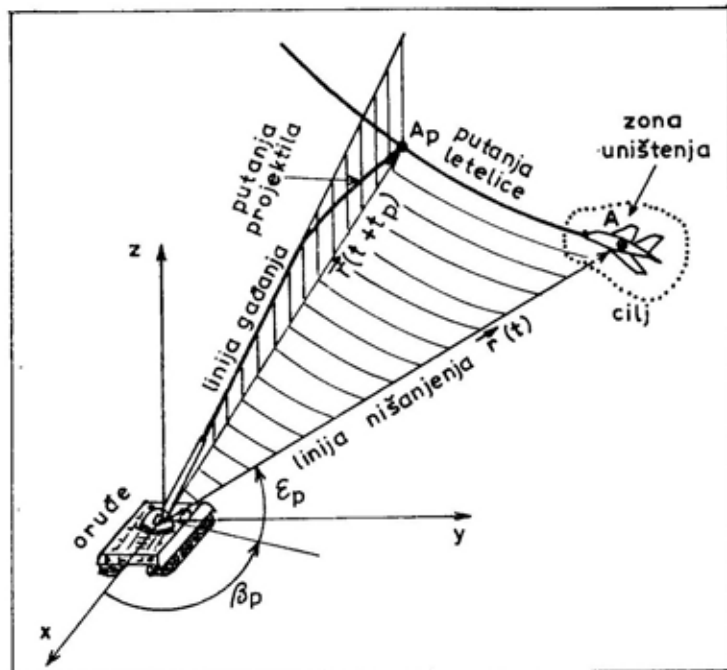
ja je zadata prethodnim pozicioniranjem nosača kamere po elevaciji i azimutu. Laserski sistem za akviziciju položaja cilja predstavlja daljinar koji je paralelno spregnut sa osom kamere. Korišćenje termovizijske kamere omogućuje da se uglovi cilja mere i noću, što je vrlo bitno, s obzirom na to da se većina avio-napada može odvijati noću. Upotreba nišanskog radara, kao paralelnog dodatnog sistema za akviziciju cilja, obezbeđuje određivanje koordinata cilja u noćnim i dnevnim uslovima. Ovakav sistem služi kao pomoćni u uslovima kada se sprema kamere i lasera iz bilo kog razloga ne može koristiti (veća daljina, loši vremenski uslovi i slično). Ipak, primarni sistem koji će biti razmatran u ovom radu je optički termovizijskolaserski senzorski sklop.

Uporedne karakteristike različitih senzorskih podsistema teško je analizirati, s obzirom na to da svaki ima prednosti i nedostatke u određenim oblastima upotrebe i uslovima primene. Ipak,

mala prednost može se dati sklopu termovizijska kamera — laser za samohodne trupne PA sisteme.

Određivanje položaja tačke susreta projektila i cilja i linije gađanja

Usvojena je pretpostavka da se cilj kreće u najopštijem slučaju kontinualno pravolinijski, a da se elementi gađanja prate i zauzimaju diskretno u zadatim trenucima. Vremenski interval T između ovih diskretnih trenutaka određen je TV (termovizijskom) kamerom, kao osnovnim sensorom za merenje položaja cilja. S obzirom na to da kamere, po evropskom CCIR standardu, daju 25 slika, odnosno 50 poluslika u sekundi, navedeni vremenski interval mora biti $T=0,04$ s, odnosno $T=0,02$ s. Obe vrednosti obezbeđuju precizno praćenje savremenih borbenih aviona.



Sl. 2 — Susret projektila i cilja

Na slici 2 šematski su prikazani vektorski parametri susreta projektila i cilja. Trajektorija cilja proračunava se u inercijalnom koordinatnom sistemu Oxyz, sa koordinatnim početkom u centru oruđa. Vektor položaja cilja \vec{r} određen je svernim koordinatama: uglovima azimuta β i elevacije ε i daljinom d , odnosno pravouglim koordinatama: x , y i z . Indeks »p« odnosi se na tačku susreta projektila i cilja (tačka A_p). Tako su β_p i ε_p uglovi azimuta i elevacije, a x_p , y_p i z_p pravougle koordinate tačke susreta.

Senzori, tj. nišanska linija, upravljani su ka cilju (tačka A) i mere vektor položaja cilja. Koristeći izmerene veličine, uz zadate balističke karakteristike topa i municije, kao i integrisane meteorološke podatke, izračunava se vreme leta t_p projektila, vektor položaja \vec{r}_p tačke susreta, kao i uglovi azimuta β_g i elevacije ε_g linije gađanja. Postavljanje topa u pravcu linije gađanja obezbeđuje susret projektila i cilja u tački A_p sa zadatom verovatnoćom.

Tačnost rešenja zadatka susreta u mnogome zavisi od usvojene hipoteze o načinu kretanja cilja od tačke gde ga je senzor detektovao do tačke susreta s projektilom. U dosadašnjoj praksi usvajane su različite hipoteze o načinu kretanja cilja. U ovom radu, pri rešavanju zadatka susreta, smatra se da se cilj kreće krivolinijski, sa svim mogućim varijantama ubrzanja. Geometrijska slika susreta počiva, dakle, na prostornoj površi koju opisuje vektor položaja cilja pri kretanju cilja do tačke susreta i balističkom trouglu, koji se nalazi približno u vertikalnoj ravni, u kome leži putanja projektila i prolazi kroz tačku susreta.

Matematički uslov susreta jeste da se projektil i centar cilja u trenutku susreta nađu u istoj tački:

$$\vec{r}_z(t+t_p) = \vec{r}(t+t_p)$$

gde je:

- \vec{r}_z — vektor položaja projektila (zrna),
- \vec{r} — vektor položaja centra cilja,
- t — trenutak opaljenja,
- t_p — vreme leta.

Vektor $\vec{r}_z(t+t_p)$ dobija se rešavanjem jednačina kretanja projektila — balistički problem, a $\vec{r}(t+t_p)$ rešavanjem jednačine kretanja cilja. Vektorska diferencijalna jednačina kretanja projektila može se napisati u opštem obliku:

$$\frac{d^2\vec{r}_z(t)}{dt^2} = \vec{F}_a(\vec{r}_z, \frac{d\vec{r}_z}{dt}, \vec{w}, h, \tau) + m\vec{g}$$

gde je:

- \vec{F}_a — vektor aerodinamičke sile projektila,
- \vec{w} — vektor brzine vetra,
- h — pritisak vazduha,
- m — masa projektila,
- \vec{g} — vektor ubrzanja Zemljine teže.

S obzirom na to da je usvojeno da način kretanja cilja u toku leta projektila može biti proizvoljan, vektor položaja cilja u trenutku susreta izračunava se korišćenjem Tejlorovog polinoma reda n , koji nije unapred fiksiran:

$$\vec{r}(t+t_p) = \vec{r}(t) + \sum_{i=1}^n \frac{t_p^i}{i!} \frac{d^i\vec{r}(t)}{dt^i}$$

Pošto stvarni vektori položaja cilja i njegovih izvoda nisu poznati, umesto navedenih veličina, u prethodni izraz se unose njihove ocene.

Dakle, simultano se rešavaju jednačine kretanja cilja i projektila, a tačka susreta određuje iz uslova jednakosti vremena leta projektila i cilja. Aerodinamička sila projektila je nelinearna funkcija svojih argumenata, što celu

jednačinu kretanja projektila čini analitički nerešivom. To znači da se vreme leta, koje zadovoljava navedeni uslov susreta, mora računati iterativno. Za realizaciju iterativnog postupka preporučuje se korišćenje Njutn-Rapsonove formule [1].

Balistički problem može se rešavati sledećim metodama [2]:

— proračunom putanje — rešava se vektorska diferencijalna jednačina kretanja projektila, npr. metodom Runge-Kutta;

— korišćenjem tabela balističkih karakteristika;

— korišćenjem aproksimativnih formula balističkih zavisnosti — ove formule ili aproksimiraju tabele balističkih karakteristika ili su izvedene iz vektorske jednačine kretanja projektila uz uvođenje određenih aproksimacija.

S obzirom na to da se ovde razmatra trupni sistem PVO i da je usvojena senzorska tehnika čija akvizicija pokriva radijus gađanja od najviše četiri kilometra, može se smatrati da je treća metoda primenljiva u ovom slučaju.

Određivanje kinematskih veličina cilja

Hipoteze o kretanju cilja

Da bi se na osnovu merenja položaja cilja ocenile vrednosti njegovih kinematskih veličina potrebno je poznavati varijanse i kovarijanse izmerenih koordinata cilja i formirati matematički model njegovog kretanja. Iz teorije ocenjivanja je poznato da, ukoliko je model koji se koristi jednostavniji, dobijene ocene parametara i stanja modela su tačnije. Do sada su korišćene različite hipoteze o kretanju cilja i svrha svake bila je da odgovarajući model bude što nižeg reda i što jednostavniji. Hipoteza o potpuno proizvoljnom kretanju cilja, sa korišćenjem punog, nelinearnog matematičkog modela dvana-

estog reda [3] nije pogodna za primenu Kalmanovog filtra. Zato se za praćenje ciljeva u sistemima za upravljanje vatrom u protivavionskoj odbrani, uglavnom, koriste sledeće hipoteze o kretanju cilja:

- a) cilj se kreće približno konstantnom brzinom,
- b) cilj se kreće približno konstantnim ubrzanjem,
- c) cilj vrši kružni zaokret.

Svaka od ovih hipoteza omogućuje formiranje relativno jednostavnog matematičkog modela kretanja cilja. S obzirom na to da letelica u toku napada na zemaljske ciljeve menja način kretanja, pojedinačna primena bilo koje od navedenih hipoteza je manje ili više nefleksibilna za ocenjivanje kinematskih veličina letelice u dužem vremenskom periodu. Stoga je uputno ne vezivati se unapred za jednu, unapred usvojenu hipotezu, već na osnovu informacija o kretanju cilja, koje se dobijaju u procesu njegovog praćenja, usvojiti hipotezu adekvatnu trenutnom načinu kretanja cilja.

Ocenjivanje kinematskih veličina cilja prema usvojenoj hipotezi

Bez obzira na to koja je hipoteza usvojena, kretanje cilja može se opisati diskretizovanim linearnim matematičkim modelom u sledećem opštem obliku:

$$x(k) = A(k)x(k-1) + B(k)u(k) + G(k)w(k-1)$$

gde je:

- k — diskretni vremenski trenutak,
- x — vektor (matrica-kolona) stanja — sadrži kinematske veličine cilja,
- u — vektor ulaza,
- w — vektor koji izražava grešku proračuna trajektorije cilja,
- A, B, G — matrice.

Ukoliko je matematički model kretanja cilja dobar, opravdano je da u bude vektor belog šuma malog intenziteta i nultog matematičkog očekivanja. Navedenom modelu pridružuje se model merenja:

$$y(k) = C(k)x(k) + v(k)$$

gde je:

y — vektor (matrica-kolona) merenih veličina (sverne ili pravouglo koordinatne cilja),

v — vektor greške merenja,

C — matrica.

Ukoliko su merni senzori precizni, izbaždareni i rektifikovani, što je uslov za kvalitetno praćenje i precizno gađanje, onda se vektor greške merenja može smatrati vektorom belog šuma malog intenziteta i nultog matematičkog očekivanja. Za dobijanje ocene vektora stanja x koristi se Kalmanov filter [4, 5]:

$$\hat{x}(k|k-1) = \hat{A}x(k-1|k-1) + B(k)u(k-1)$$

$$x(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + K(k)[y(k) - C(k)x(k|k-1)]$$

$$K(k) = P(k|k-1)C^T(k)[C(k)P(k|k-1) - 1]C^T(k) + R(k)^{-1}$$

$$P(k|k-1) = A(k)P(k-1|k-1) - 1)A^T(k) + G(k)Q(k-1)G^T(k)$$

$$P(k|k) = P(k|k-1) - K(k)C(k)P(k|k-1)$$

gde je:

$\hat{x}(k|k-1)$ — predikcija ocene stanja,

$\hat{x}(k|k)$ — korekcija ocene stanja,

$P(k|k-1)$ — predikcija kovarijansne matrice ocene stanja,

$P(k|k)$ — korekcija kovarijansne matrice ocene stanja,

Q — kovarijansna matrica vektora w (statistički pokazatelj greške proračuna trajektorije cilja),

R — kovarijansna matrica vektora v (statistički pokazatelj greške merenja),

T — oznaka za transpoziciju matrice.

Opisani Kalmanov filter predstavlja rekurentni estimator stanja. U slučaju da su w i v vektori belih šumova, Kalmanov filter daje ocenu stanja x koja je praktično optimalna. S obzirom na to da $\hat{x}(k|k)$ sadrži ocene kinematskih veličina, jasno je da je pravilnim izborom hipoteze o kretanju cilja i primenom Kalmanovog filtra praktično rešen problem optimalnog ocenjivanja kinematskih veličina cilja.

Izbor reda Tejlorovog polinoma za predikciju tačke susreta

Predikcija tačke susreta za vreme leta t_p obavlja se korišćenjem Tejlorovog polinoma:

$$\hat{r}(t+t_p) = \hat{r}(t) + \sum_{i=1}^n \frac{t_p^i}{i!} \hat{r}^{(i)}(t)$$

gde je:

$\hat{r}(t)$ — ocena vektora položaja cilja,

$\hat{r}^{(i)}(t)$, $i = 1, 2, \dots, n$ — ocene njegovih izvoda.

Ako je usvojena hipoteza da se cilj kreće konstantnom brzinom, potreban red Tejlorovog polinoma je $n=1$, a ako je usvojena hipoteza da se cilj kreće približno konstantnim ubrzanjem, onda je $n=2$. Ako se cilj kreće po kružnoj putanji, preporučuje se [6] da red Tejlorovog polinoma bude peti ili viši. U ovom slučaju, treći i viši izvodi vektora položaja cilja mogu se izračunati na osnovu poznatih vektora brzine i ubrzanja cilja.

Zaključak

U radu je opisano rešenje automatskog sistema za upravljanje vatrom i u okviru njega rešenje problema susreta

projektila i cilja i problema ocenjivanja kinematskih veličina cilja, koja obezbeđuju efikasno praćenje i gađanje novih borbenih letelica poboljšanih performansi. Rešenja su pogodna za primenu u mobilnim i stacionarnim protivavionskim artiljerijskim sistemi-

ma i omogućuju uspešnu blisku odbranu od niskoletećih aviona i vođenih projektila. Radi postizanja još veće efikasnosti sistema za upravljanje vatrom, predlaže se dalji rad na poboljšanju tačnosti ocena kinematskih veličina cilja, prema datim smernicama.

Literatura:

- [1] Simonović, V.: Numeričke metode, Mašinski fakultet, Beograd 1979.
- [2] Gajić, M.: Sistem upravljanja vatrom brodskih oruđa (OEUVV) — elementi balističkog modula, elaborat, VTI VJ, oznaka VTI-02-01-0276, dec. 1983, Beograd.
- [3] Nenadović, M.: Stabilnost i upravljivost letelica — 1. deo, Mašinski fakultet, Beograd 1971.
- [4] Kalman, R.: A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, Transaction on ASME — Journal of Basic Engineering, Series 82D, pp. 35—45, Mar. 1960.
- [5] Sorenson, H.: Kalman Filtering: Vtheory and Application, IEEE Press, New York 1985.
- [6] Berg, R.: Estimation and Prediction for Maneuvering Target Trajectories, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 28, p. 294—304, March 1983.

Rezime:

U radu su prikazani različiti modeli i metode analitičkog određivanja statičke zakrivljenosti cevi. Tabelarno su prikazani uporedni rezultati ugiba i ugla nagiba za jednu cev artiljerijskog oruđa, dobijeni primenom različitih metoda i modela analitičkog rešenja. Na osnovu analize dobijenih rezultata predložena je metoda sa modelom analitičkog rešenja koja daje rezultate najbliže stvarnim vrednostima.

Ključne reči: cev artiljerijskog oruđa, statička zakrivljenost, ugib, ugao nagiba.

STATIC CURVATURE OF AN ARTILLERY TUBE

Summary:

Different model and methods of a tube static curvature analytical determination are presented. The results of the bending and the deflection angle of an artillery tube, obtained by different methods and analytical solution models, are compared in a tabular way. Based on the analysis of obtained results, the method with the analytical solution model is proposed, its results being the closest to the real values.

Key words: artillery tube, static curvature, bending, deflection angle.

Uvod

Cevi artiljerijskih oruđa, s obzirom na moguća konstruktivna rešenja, karakterišu relativno velike gabaritne dimenzije, velika ukupna masa, neravnomeran raspored mase duž cevi i promenljive veličine poprečnog preseka. Pored toga, iz funkcionalnih razloga na cev se ugrađuje gasna kočnica, ejektorski uređaj, navlaka i sl.

Zbog relativno velike dužine i mase cevi i ugrađenih delova javlja se statička zakrivljenost cevi.

Zakrivljenost usled statičkog opterećenja, kao i konstruktivna zakrivljenost neizbežne su za svaku projektovanu cev datih konstruktivnih karakteristika i mogu bitno uticati na

iznos odskočnog ugla γ u vertikalnoj ravni (ravan gađanja).

Konstruktivna zakrivljenost određuje se merenjem i u zavisnosti od njene veličine može se, u većoj ili manjoj meri, kompenzirati statičkom zakrivljenošću.

Za razliku od ugla γ_p koji nastaje usled konstruktivne zakrivljenosti kanala cevi i koji se ne može unapred matematički odrediti, veličina ugla γ_q koji nastaje kao posledica statičke zakrivljenosti cevi zbog sopstvene mase i mase delova i uređaja pričvršćenih za cev može se izračunati primenom odgovarajućih modela oblika i metoda proračuna.

Ako se realno izvedena cev definiše preko mehaničkog modela (tipa gre-

de, konzole i sl.) za koji postoje, pod određenim pretpostavkama, tačna analitička rešenja, postavlja se pitanje koji od primenjenih modela, oblika i metoda proračuna daje dovoljno pouzdane i tačne rezultate.

Cilj ovog rada jeste da se ukaže na moguće načine analitičkog određivanja ugiba i ugla nagiba cevi za usvojeni model oblika cevi, i kroz primer ilustruju dobijeni rezultati. Analizom dobijenih rezultata, predlaže se metoda i relacije koje tačnije opisuju pojavu i daju verodostojnije rezultate. Ideja za ovakav pristup proistekla je iz činjenice da se u razmatranju ovog problema u široj literaturi susreću relacije i izrazi izvedeni sa različitim pretpostavkama u opisu problema.

Određivanje statičkog ugiba i ugla nagiba cevi

Pri određivanju statičkog ugiba i ugla nagiba cevi, koji nastaju kao posledica elastičnog savijanja usled sopstvene mase i koncentrisane sile, cev se posmatra kao greda sa prepustom kontinualno opterećena po čitavoj dužini sa ili bez koncentrisane sile na ustima cevi. U rešavanju problema koriste se poznate metode iz otpornosti materijala.

Prvi i najjednostavniji način jeste da se ukupna masa cevi ravnomerno rasporedi po čitavoj dužini, tj. poprečni presek cevi je konstatovan [1, 2, 3, 4].

Drugi način je da se ukupna masa cevi deli na deo koji se oslanja na kolovku (prosta greda) i deo od prednjeg oslonca do usta cevi (prepust).

I u ovom slučaju mase su ravnomerno raspoređene duž cevi, s tom razlikom što duž proste grede veličina poprečnog preseka ima jednu vrednost, a duž prepusta drugu vrednost [5].

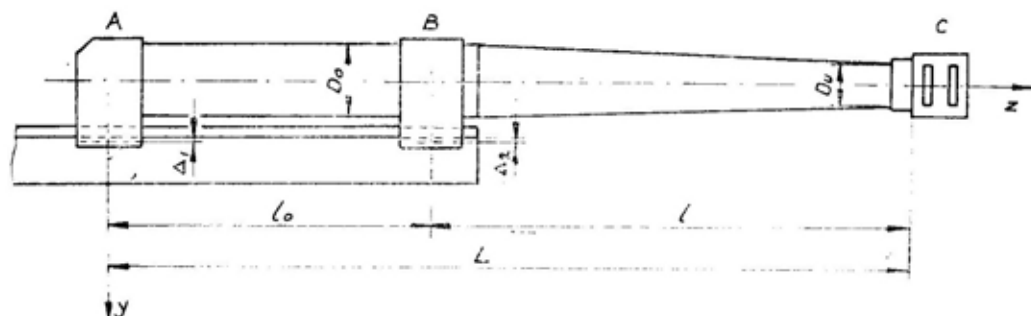
Treći način je da se umesto kontinualnog opterećenja uzimaju koncentrisane sile koje deluju u središtu mase proste grede i središtu mase konzole. Poprečni presek proste grede je konstantan, a za poprečni presek konzole uzima se njegoja srednja vrednost.

Četvrti način je sličan drugom. Razlika je u tome što se za konzolni deo cevi uzima da je poprečni presek promenljiv duž cevi. Pri tome je unutrašnji prečnik cevi konstantan, a spoljni se linearno smanjuje duž cevi.

Peti način je segmentalni. Cev se deli na više segmenata i, zavisno od oblika, može da bude sa konstantnim ili promenljivim poprečnim presekom. U slučaju velikog broja segmenata, umesto analitičkog načina rešenja, može se koristiti neka od numeričkih metoda.

S obzirom na to da je rešenje diferencijalne jednačine elastične linije, koje se dobija u prva tri slučaja, lako, a izrazi za ugib i ugao nagiba relativno jednostavni, u postojećoj literaturi se daju i koriste.

U ovom radu, pored opšteg načina rešenja za slučaj konstantnog po-



Sl. 1 — Cev artiljerijskog oruđa

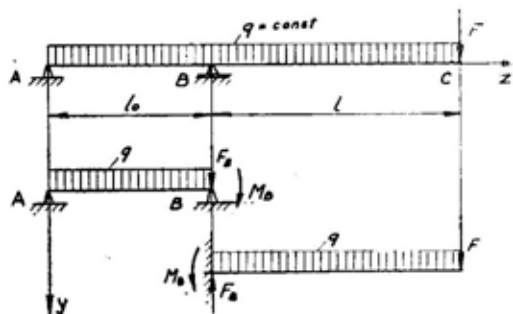
prečnog preseka, prikazan je i način određivanja elastične linije za promenljiv poprečni presek (koji je realniji s obzirom na konstruktivno rešenje cevi).

Za ilustraciju problema razmatra se cev artiljerijskog oruđa oslonjena na kolevku preko dva oslonca (slika 1).

Usvaja se da je koordinatni početak na sredini zadnjeg oslonca sa pozitivnim pravcem ose z prema ustima cevi. Pretpostavlja se da je cev između oslonca A i B konstantnog poprečnog preseka. Deo cevi od oslonca B do usta cevi (tačka C) posmatra se dvojako: u prvom slučaju, cev je sa konstantnim poprečnim presekom, a u drugom sa promenljivim poprečnim presekom. Na ustima cevi je gasna kočnica čija je masa m_{gk} . Na mestima oslonca cevi na kolevku postoje zazor Δ_1 i Δ_2 .

OPŠTI NAČIN REŠENJA ZA CEV KONSTANTNOG POPREČNOG PRESEKA

Cev se analizira kao greda sa prepustom, opterećena ravnomerno podeljenim opterećenjem q i silom F na kraju prepusta (slika 2).



Sl. 2 — Greda sa prepustom

Radi lakšeg određivanja elastične linije, greda sa prepustom se seče u osloncu B, pa se dobija prosta greda AB i konzola BC. Uticaj desnog dela

(prepusta) grede na prostu gredu AB zamenjuje se silom F_B i momentom M_B .

$$F_B = F + q \cdot l$$

$$M_B = F \cdot l + \frac{q \cdot l^2}{2}$$

Uticaj levog dela na desni zamenjuje se silom F_B i momentom M_B suprotnog smera. Na taj način dobija se prosta greda AB opterećena kontinualnim opterećenjem q po čitavoj dužini, momentom M_B i silom F_B na desnom osloncu i konzola opterećena kontinualnim opterećenjem q , silom F na slobodnom kraju, momentom M_B i silom F_B na mestu ukleštenja (slika 2).

Kako sila F_B ne utiče na savijanje grede (deluje na mestu oslonca) njeno dejstvo se ne uzima u obzir, pa ostaje slučaj proste grede opterećene kontinualnim opterećenjem po čitavoj dužini i momentom na mestu oslonca. Kod konzole, na mestu ukleštenja nema savijanja, pa se izostavlja delovanje momenta M_B i sile F_B . Tako ostaje samo kontinualno opterećenje po čitavoj dužini i sila na kraju konzole (slika 3).

Kao što je prikazano na slici 3, za određivanje ugiba i ugla nagiba elastične linije može se analizirati svako opterećenje posebno, a zatim algebarski sabrati ugibi i uglovi nagiba svakog opterećenja.

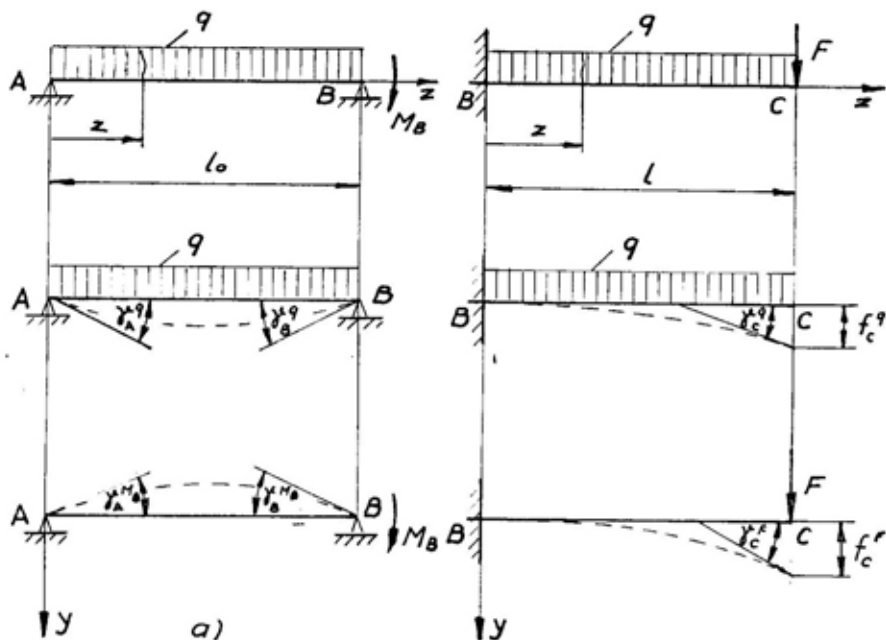
U slučaju opterećenja proste grede i konzole (slika 3), pod pretpostavkom da je krutost ($B = EI$) konstantna, izrazi za određivanje ugiba i ugla nagiba lako se određuju [5 i 6].

Kod proste grede na mestima oslonca ugib je jednak nuli, a uglovi nagiba tangente elastične linije su:

— od kontinualnog opterećenja

$$\gamma_A^q = \frac{q l_0^3}{24EI} \quad (1)$$

$$\gamma_B^q = - \frac{q l_0^3}{24EI} \quad (2)$$



Sl. 3 — Ugib i ugao nagiba
a — grede, b — konzole

— od momenta

$$\gamma_A^{M_B} = - \frac{M_B \cdot l_0}{6 EI} \quad (3)$$

$$\gamma_B^{M_B} = \frac{M_B \cdot l_0}{3 EI} \quad (4)$$

Kod konzole na mestu ukleštenja ugib i ugao nagiba jednaki su nuli, a na kraju konzole uglovi nagiba tangente elastične linije su:

— od kontinualnog opterećenja

$$\gamma_c^q = \frac{q l^3}{6 EI} \quad (5)$$

— od sile

$$\gamma_c^F = \frac{F \cdot l^3}{3 EI} \quad (6)$$

a ugib je:

— od kontinualnog opterećenja

$$f_c^q = \frac{q l^4}{8 EI} \quad (7)$$

— od sile

$$f_c^F = \frac{F \cdot l^3}{3 EI} \quad (8)$$

gde je:

E — modul elastičnosti,

I — moment inercije.

Ukupan ugao nagiba slobodnog kraja grede sa prepustom dobija se zbirom izraza (2), (4), (5) i (6):

$$\gamma = \gamma_B^q + \gamma_B^M + \gamma_c^q + \gamma_c^F \quad (9)$$

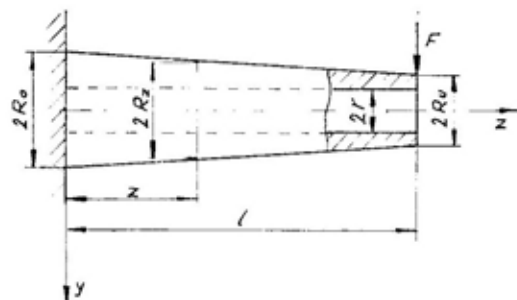
Ukupan ugib slobodnog kraja grede sa prepustom dobija se ako se zbiru ugiba konzole od sile F i kontinualnog opterećenja q, tj. izrazima (7) i (8), doda ugib koji nastaje usled ugla nagiba grede u osloncu B, jer prepust predstavlja elastično uklještenu konzolu:

$$f = f_c^q + f_c^F + (\gamma_B^q + \gamma_B^{M_B}) \cdot l \quad (10)$$

REŠENJE ZA CEV SA PROMENLJIVIM POPREČNIM PRESEKOM

Linearna promena spoljnog prečnika cevi

Kao i u prethodnom slučaju, cev se posmatra kao greda sa prepustom kod koje je poprečni presek između oslonca A i B nepromenljiv, a deo cevi od oslonca B do usta cevi (tačka C) ima promenljiv poprečni presek. Pretpostavlja se da je unutrašnji prečnik cevi d nepromenljiv duž cevi, a da se spoljni prečnik linearno smanjuje od vrednosti D_0 do D_u (slika 4). U postupku određivanja ugiba i ugla nagiba cevi, kao i u prethodnom slučaju, cev se deli na dva dela — prostu gredu i konzolu.



Sl. 4 — Konzolni deo cevi

Za određivanje nagiba proste grede na mestu B koriste se izrazi (2) i (4). Vrednost napadnog momenta M_B , zbog uticaja mase konzole i sile na njenom kraju, iznosi:

$$M_B = F \cdot l + m_k \cdot g \cdot l_q = F \cdot l + \frac{\pi \cdot \gamma_T \cdot l^2}{12}$$

$$[(R_0 - R_u)^2 + 2(R_u^2 - r^2) - 4r^2]$$

gde je:

m_k — masa konzolnog dela cevi,

l_q — rastojanje središta mase konzolnog dela cevi od oslonca B,

γ_T — specifična težina cevi.

Ugib i ugao nagiba konzolnog dela cevi, čiji je poprečni presek promenljiv (slika 4) određuje se kao zbir ugiba i ugla nagiba usled dejstva sile F i sopstvene mase.

Ugib i ugao nagiba usled dejstva sopstvene mase

U opštem slučaju, diferencijalna jednačina elastične linije konzole opterećene kontinualnim opterećenjem je četvrtog stepena i na mestu preseka z iznosi:

$$y^{IV}(z) = \frac{d^4 y}{dz^4} = \frac{qz}{EIz} \quad (11)$$

Za promenljiv poprečni presek konzole moment inercije je promenljiv i na mestu preseka z iznosi:

$$I_z = \frac{(R_z^4 - r^4) \pi}{4} \quad (12)$$

pri čemu je veličina poluprečnika

$$R_z = R_0 - (R_0 - R_u) \frac{z}{l} \quad (13)$$

Veličina kontinualnog opterećenja, usled sopstvene mase za jedinicu dužine na mestu preseka z je:

$$q_z = (R_z^2 - r^2) \cdot \pi \cdot \gamma_T \quad (14)$$

Ako se u izraz (11) uvrste izrazi (12), (13) i (14) dobija se:

$$y^{IV}(z) = \frac{4 \cdot \gamma_T}{(R_z^2 + r^2) \cdot E} \quad (15)$$

U izrazu (15) umesto promenljive z javlja se nova promenljiva R_z čija je veza data relacijom (13) i za koju vredi odnos:

$$dR_z = - \frac{R_0 - R_u}{l} \cdot dz \quad (16)$$

Integraljenjem izraza (15) i određivanjem integracionih konstanti iz uslova da su na mestu ukleštenja $z = 0$, tj. $R_x = R_0$, ugib i ugao nagiba jednaki nuli, dobijaju se izrazi za ugib i ugao nagiba na kraju konzole:

— ugao nagiba je

$$\gamma_c^a = y' = \frac{2 \gamma_T \cdot l^3}{E \cdot r (R_0 - R_u)^3} \cdot [(R_0^2 - r^2) \cdot r \cdot \frac{R_0 - R_u}{r^2 + R_0 R_u} - R_0 \cdot r \cdot \ln \frac{R_0^2 + r^2}{R_u^2 + r^2} + r (R_0 - R_u)] \quad (17)$$

— ugib je

$$f_c^a = y = \frac{\gamma_T \cdot l^4}{3E \cdot r (R_0 - R_u)^4} \{ [4R_0^3 - 6R_u (R_0^2 - r^2)] \cdot r \cdot \frac{R_0 - R_u}{r^2 + R_0 R_u} - [r^3 + 3R_0 \cdot r (R_0 - 2R_u)] \cdot \ln \frac{R_0^2 + r^2}{R_u^2 + r^2} + r (R_0 - R_u) (R_0 - 5R_u) \} \quad (18)$$

Ugib i ugao nagiba usled dejstva koncentrisane sile

Diferencijalna jednačina elastične linije na preseku z za konzolu opterećenu silom F na kraju je:

$$y''(z) = \frac{F(1-z)}{EIz} \quad (19)$$

Ako se uzmu u obzir relacije (12), (13) i (16) i izvrši integraljenje, a iz graničnih uslova odrede konstante integracije, dobiće se jednačine ugiba i ugla nagiba.

Za kraj konzole:

— ugao nagiba je

$$\gamma_c^F = y' = \frac{F \cdot l^2}{E \cdot \pi \cdot r^3 (R_0 - R_u)^2} [r \cdot \ln \frac{(R_u^2 + r^2) (R_0^2 - r^2)}{(R_u^2 - r^2) (R_0^2 + r^2)} - R_u \cdot$$

$$\cdot \ln \frac{(R_u + r) (R_0 - r)}{(R_u - r) (R_0 + r)} + 2R_u \cdot r \frac{R_0 - R_u}{r^2 + R_0 R_u}] \quad (20)$$

— ugib je

$$f_c^F = y = \frac{F \cdot l^3}{E \cdot \pi \cdot r^3 (R_0 - R_u)^3} [2R_u \cdot r \cdot \ln \frac{(R_u^2 - r^2) (R_0^2 + r^2)}{(R_u^2 + r^2) (R_0^2 - r^2)} - (R_u^2 + r^2) \cdot \ln \frac{(R_u - r) (R_0 + r)}{(R_u + r) (R_0 - r)} - 2(R_u^2 - r^2) \cdot r \cdot \frac{R_0 - R_u}{r^2 + R_0 R_u}] \quad (21)$$

Ukupan ugao nagiba slobodnog kraja grede sa prepustom, gde je preput sa promenljivim poprečnim presekom, dobija se isto kao i za gredu sa konstantnim poprečnim presekom, tj. ako se u izraz (9) uvrste vrednosti izraza (2), (4), (17) i (20), odnosno u izraz (10) vrednosti izraza (2), (4), (18) i (21).

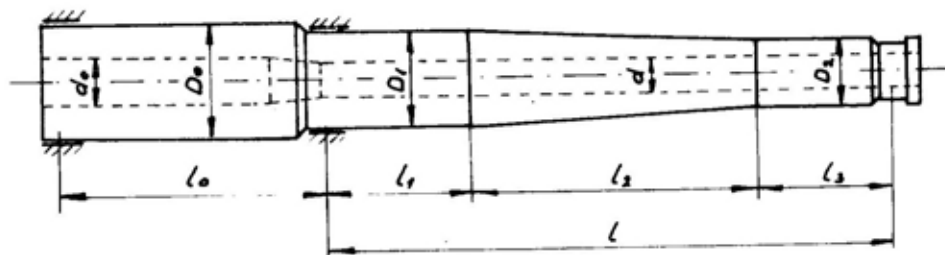
Stepenasta promena spoljašnjeg prečnika cevi — segmentni oblik

Iz konstruktivnih razloga unutrašnji prečnik i spoljašnji prečnik cevi duž ose kanala su promenljivi.

Unutrašnji prečnik duž ležišta meka najčešće je konstantan ili sa blagom linearnom promenom. Na mestu prelaznog konusa linearno se smanjuje da bi duž vodišta projektila zadržao konstantnu vrednost. Spoljašnji prečnik cevi je, najčešće, na prvom delu konstantan, a zatim se prema ustima cevi kontinualno ili skokovito smanjuje. Zbog toga je pri određivanju statičke zakrivljenosti cevi potrebno izdeliti cev na segmente, a zatim, zavisno od broja segmenata, problem rešiti analitički ili numerički.

Za ilustraciju analitičkog rešenja može poslužiti cev prikazana na slici 5.

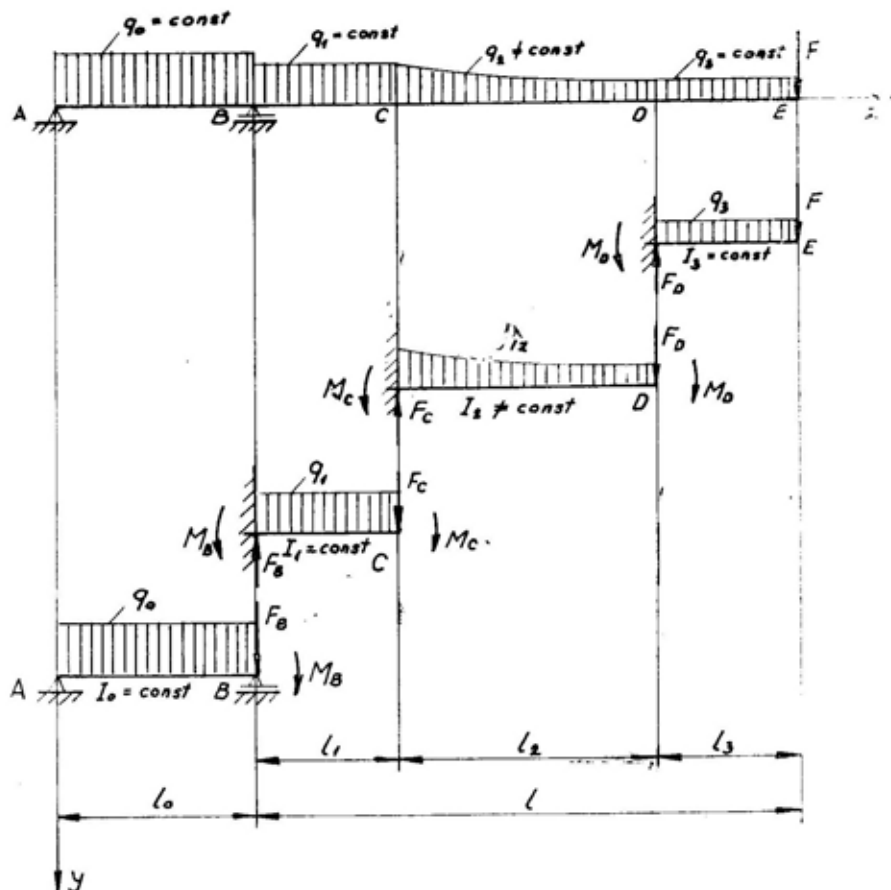
Pri određivanju ugiba i ugla nagiba ovakve grede analizira se svaki seg-



Sl. 5 — Segmentni oblik cevi artiljerijskog oruđa

Ovakva cev može se prikazati kao greda sa prepustom, podeljena na četiri karakteristična segmenta (slika 6).

ment pojedinačno, određuje se njihov ugib i ugao nagiba, a zatim se sabiraju, vodeći računa o međusobnoj vezi i uti-



Sl. 6 — Segmentni oblik grede sa prepustom

caju svakog segmenta na gredu kao celinu. U konkretnom slučaju ugao nagiba na kraju prepusta (tačka E) određuje se izrazom:

$$\gamma = \gamma_E + \gamma_D + \gamma_C + \gamma_B \quad (22)$$

gde je:

$$\gamma_E = \gamma_E^F + \gamma_E^{q_3}$$

— ugao nagiba segmenta DE na mestu E usled dejstva sile F i opterećenja q_3

$$\gamma_D = \gamma_D^{F_D} + \gamma_D^{M_D} + \gamma_D^{q_2}$$

— ugao nagiba segmenta CD na mestu D usled dejstva sile F_D , momenta M_D i opterećenja q_2

$$\gamma_C = \gamma_C^{F_c} + \gamma_C^{M_c} + \gamma_C^{q_1}$$

— ugao nagiba segmenta BC na mestu C usled dejstva sile F_c , momenta M_c i opterećenja q_1

$$\gamma_B = \gamma_B^{q_0} + \gamma_B^{M_B}$$

— ugao nagiba segmenta AB na mestu B usled dejstva momenta M_B i opterećenja q_0

Ugib na kraju prepusta određuje se izrazom:

$$f = f_E + f_D + f_c + \gamma_B (l_1 + l_2 + l_3) + \gamma_c (l_2 + l_3) + \gamma_D \cdot l_3 \quad (23)$$

gde je:

$$f_E = f_E^F + f_E^{q_3}$$

— ugib segmenta DE na mestu E usled dejstva sile F i opterećenja q_3

$$f_D = f_D^{F_D} + f_D^{M_D} + f_D^{q_2}$$

— ugib segmenta CD na mestu D usled dejstva sile F_D , momenta M_D , i opterećenja q_2 .

$$f_c = f_c^{F_c} + f_c^{M_c} + f_c^{q_1}$$

— ugib segmenta BC na mestu C usled dejstva sile F_c , momenta M_c i opterećenja q_1 .

Način određivanja ugiba i ugla nagiba svakog segmenta za pojedine slučajeve opterećenja objašnjen je u prethodnom delu rada osim za segmente BC i CD koji su prikazani kao konzola opterećena momentom na kraju konzole.

Za segment BC sa konstantnim momentom inercije duž segmenta ($I_1 = \text{const.}$) koji je opterećen momentom M_c na kraju, izraz za ugao nagiba je:

$$\gamma_c^{M_c} = \frac{M_c \cdot l_1^2}{EI_1} \quad (24)$$

a za ugib:

$$f_c^{M_c} = \frac{M_c \cdot l_1}{EI_1} \quad (25)$$

Za segment CD koji predstavlja konzolu sa promenljivim momentom inercije ($I \neq \text{const.}$) i opterećen momentom M_D na kraju konzole, ugib i ugao nagiba određuju se na sledeći način.

Polazeći od oznaka na slici 4 i uzimajući u obzir da je na kraju konzole umesto sile F momentat M_D , može se napisati da je diferencijalna jednačina elastične linije drugog stepena na mestu preseka z:

$$y''(z) = -\frac{M_z}{EI_z} \quad (26)$$

Ako se uzme u obzir da je $M_z = -M_D$, kao i relacije (12), (13) i (16), dobiće se diferencijalna jednačina pogodna za integraljenje. Polazeći od graničnih uslova za konzolu i određivanjem integracionih konstanti dobijaju se jednačine za ugib i ugao nagiba na kraju konzole:

— ugao nagiba je

$$\gamma_D^{M_D} = y' = \frac{M_D \cdot l}{E \cdot \pi \cdot r^3 (R_o - R_u)} \left[\ln \frac{(R_u + r)(R_o - r)}{(R_u - r)(R_o + r)} - 2 \cdot r \frac{R_o - R_u}{r + R_o R_u} \right] \quad (27)$$

— ugib je

$$f_D^{M_D} = y = \frac{M_D \cdot l^2}{E \cdot \pi \cdot r^3 (R_o - R_u)^2} \left[r \cdot \ln \frac{(R_u^2 + r^2)(R_o^2 - r^2)}{(R_u^2 - r^2)(R_o^2 + r^2)} - R_u \ln \frac{(R_u + r)(R_o - r)}{(R_u - r)(R_o + r)} + 2 R_u \cdot r \frac{R_o - R_u}{r^2 + R_o R_u} \right] \quad (28)$$

Bez obzira na način određivanja ugiba i ugla nagiba, izrazi po kojima se određuju njihove vrednosti važe u slučaju kad je težište cevi iza prednjeg oslonca, tj. između tačkaka A i B. U slučaju kada je težište cevi ispred prednjeg oslonca treba uzeti u obzir postojanje zazoru na mestu oslonca A. U tom slučaju maksimalni ugao nagiba cevi je

$$\gamma_{\max} = \gamma + \frac{\Delta_1}{l_0} \quad (29)$$

a maksimalni ugib cevi je

$$f_{\max} = f + \frac{\Delta_1 \cdot l}{l_0} \quad (30)$$

Rezultati proračuna

Za ilustraciju dobijenih ugiba i ugla nagiba usta cevi uzeta je cev čiji je osnovni oblik prikazan na slici 5, a vrednost osnovnih dimenzija u tabeli 1.

Masa gasne kočnice je $m_{gk} = 150$ kg, a zazor na mestu oslonca A je $\Delta_1 = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m. Specifična težina čelika od kojeg je izrađena cev je $\gamma_T = 7,85 \cdot 10^4 \frac{N}{m^3}$, a modul elastičnosti je $E = 21,6 \cdot 10^{10} \frac{N}{m^2}$.

Vrednost ugiba i ugla nagiba cevi određivana je na svih pet opisanih načina. Proračun je rađen na osnovu programskog rešenja pomoću računara, a rezultati su prikazani u tabeli 2.

Tabela 2

Ugao nagiba i ugib cevi

Način proračuna	γ	γ_{\max}	f	f_{\max}
	$10^{-3}(\text{rad})$	$10^{-3}(\text{rad})$	$10^{-3}(\text{m})$	$10^{-3}(\text{m})$
I	1,59	2,59	5,53	9,93
II	1,92	2,92	6,23	10,63
III	1,33	2,33	4,58	8,98
IV	1,71	2,71	4,94	9,34
V	1,26	2,26	3,78	8,18

Dobijene vrednosti ugiba i ugla nagiba (prikazane u tabeli 2) dovoljno jasno govore da nije svejedno na koji način se vrši proračun i određuju vrednosti ugiba i nagiba cevi.

Dimenzije cevi

Tabela 1

d	d ₀	D ₀	D ₁	D ₂	l ₀	l ₁	l ₂	l ₃
(mm)								
155	162	320	260	203	1500	1400	2600	400

S obzirom na to da se za jednu konkretnu cev u postupku rešenja mogu koristiti različiti modeli sa različitim pretpostavkama i pojednostavljenjima, to su i razlike u rezultatima proračuna logične.

Kako je model segmentne grede u petom načinu proračuna najbliži stvarnom izgledu cevi i rezultati proračuna su najbliži stvarnim vrednostima.

Na veličinu ugiba i ugla nagiba značajno utiče zazor u osloncima cevi. U ilustrovanom primeru, zbog postojanja zazora, vrednost ugiba je povećana od 71% do 116%, a ugla nagiba 52% do 79%, zavisno od načina proračuna.

Zaključak

Komponenta odskočnog ugla γ_q koja nastaje zbog zakrivljenosti cevi usled sopstvene mase i mase uređaja

ugrađenih na cev je značajna. Kako se komponenta odskočnog ugla γ_p , koja nastaje kao posledica konstruktivne zakrivljenosti, može kompenzirati dejstvom sopstvene mase, a uticaj rezultirajuće statičke zakrivljenosti otkloniti rektifikacijom ili uzimanjem u obzir njene vrednosti u toku samog nišajenja, neophodno je da se što tačnije odredi vrednost ugiba i ugla nagiba cevi.

Kao metodu proračuna treba koristiti onu koja u postupku definisanja problema najvernije opisuje stvarni proces.

Navedeni model za segmentni oblik cevi, koji uzima u obzir geometrijski oblik cevi, omogućuje da se sa dovoljnom tačnošću odrede veličine ugiba i ugla nagiba cevi.

Literatura:

- [1] Orlov, B. V., Larman, E. K., Malikov, V. G.: *Ustrojstvo i projektovanje strolova artiljerijskih oruđia*, Mašinstvo, Moskva, 1976.
- [2] Milosavljević, M.: *Konstrukcija i proračun cevi i zatvarača artiljerijskih oruđia — Teorijske osnove*, Beograd, 1985.
- [3] Kalezić, M.: *Projektovanje cevi artiljerijskih oruđia*, — Primeri proračuna, Beograd, 1985.
- [4] Ristić, Z.: *Uticaj statičkog i dinamičkog progiba cevi artiljerijskih oruđia na odskočni ugao*, VTG, Beograd, 3/1989.
- [5] Toločkov, A. A.: *Teorija lafetova artiljerijskih ustanovak*, Moskva, 1960.
- [6] Pavelić, V.: *Tehnologija proizvodnje naoružanja*, CVTŠ KoV JNA, Zagreb, 1988.
- [7] Rašković, D.: *Otpornost materijala*, Građevinska knjiga, Beograd, 1990.
- [8] Čukić, R., Ružić, D.: *Otpornost materijala*, Mašinski fakultet, Beograd, 1982.

Dr Milan Novaković,
dipl. inž.
naučni saradnik
Vojnotehničkog instituta VJ,
Beograd

EFIKASNOST PROTIVPEŠADIJSKIH MINSKO-EKSPLOZIVNIH PREPREKA PARČADNOG DEJSTVA

UDC: 623.454.36.016

Rezime:

U radu je prikazan opšti matematički model efikasnosti ubojnih sredstava sa podvarijantama za nuklearna ubojna sredstva i projektele parčadnog i kumulativnog dejstva. Izveden je i opšti matematički model efikasnosti minsko-eksplozivnih prepreka parčadnog dejstva i partikularne varijante matematičkih modela efikasnosti minsko-eksplozivnih prepreka izrađenih od jedne protivpešadijske (PP) mine parčadnog dejstva, zatim od jednog reda PP mina parčadnog dejstva i minsko polje od dva i više redova PP mina parčadnog dejstva. Tabelarno su prikazani komparativni računski dobijeni rezultati za tri karakteristične PP mine parčadnog dejstva. Ključne reči: kopnene mine, protivpešadijske mine, rasprskavajuće mine, minsko polje.

EFFICIENCY OF ANTIPERSONNEL FRAGMENTATION-TYPE MINE OBSTACLES

Summary:

The paper presents the general mathematical model of the efficiency of explosives (especially types for nuclear weapons and projectiles with fragmentation and hollow charge effects). The general mathematical model of the efficiency of fragmentation-type mine obstacles (consisting of one antipersonnel fragmentation-type mine, then consisting of one row of antipersonnel fragmentation-type mines and finally of a mine field with two or more rows of antipersonnel fragmentation-type mines) is also derived. The calculated results for three characteristic antipersonnel fragmentation-type mines are compared and presented in a tabular way.

Key words: land mines, antipersonnel mines, fragmentation-type mines, mine field.

Uvod

Prema osnovnim taktičko-tehničkim karakteristikama minsko-eksplozivne prepreke mogu biti protivpešadijske, protivoklopne, protivtransportne i prepreke protiv plovnih objekata i desantnih sredstava. Najčešće se izrađuju u obliku minskih (fugasnih) polja, grupa mina (fugasa), pojedinačnih mina (fugasa) i mina iznenađenja.

Protivpešadijskim minsko-eksplozivnim i drugim preprekama neposred-

no se štite jedinice, objekti i druga materijalna sredstva, od dejstva protivničke pešadije i diverzanata, a nanose se efektivni gubici pri pokušaju prelaska preko prepreka bez izrade prolaza. Načelno, koriste se na zemljištu na kome je otežana upotreba oklopnih jedinica ili se kombinuju sa protivoklopnim preprekama.

Pod nagaznim protivpešadijskim minsko-eksplozivnim preprekama podrazumevaju se minska polja, grupe mina i prepreke izrađene od pojedinačnih

protivpešadijskih mina koje se aktiviraju na pritisak (nagaz), tj. minsko-eksplozivne prepreke izrađene od nagaznih protivpešadijskih mina.

Pod protivpešadijskim minsko-eksplozivnim preprekama parčadnog dejstva podrazumevaju se minska polja, grupe mina i prepreke izrađene od pojedinačnih protivpešadijskih rasprskavajućih mina (mina parčadnog dejstva). U literaturi do sada nije teorijski definisana efikasnost protivpešadijskih minsko-eksplozivnih prepreka, već je samo opisno predstavljena kao zaprečna vrednost, bez jasnih kvantitativnih kriterijuma i merila. Kod nas je u [1] teorijski kvantitativno definisana zaprečna vrednost protivpešadijskih minsko-eksplozivnih prepreka (nagaznih i parčadnog dejstva), kao verovatnoća uništenja pešaka pri napadu preko prepreka bez izrade prolaza. U [2] je teorijski definisana efikasnost nagaznih minsko-eksplozivnih prepreka preko dva međusobno različita kriterijuma: verovatnoće uništenja pešaka i zaprečne vrednosti. U [3, 4 i 5] u potpunosti su teorijski definisani osnovni parametri efikasnosti protivpešadijskih mina parčadnog dejstva.

Prema opštoj klasifikaciji ratnih materijalnih sredstava, minsko-eksplozivna sredstva (MES) i minsko-eksplozivna prepreke (MEP) spadaju u ubojna sredstva (UbS), što se mora uvažavati i pri definisanju i matematičkom modeliranju efikasnosti protivpešadijskih minsko-eksplozivnih prepreka parčadnog dejstva.

Srednja verovatnoća uništenja pojedinačnih i grupnih objekata pri dejstvu bilo koje vrste UbS, zavisi od karaktera i jačine UbS, karakteristika tla, lokacije objekata i njihove otpornosti prema dejstvu pojedinih UbS, i ima opšti matematički oblik [2, 4]:

$$M(P(x, y)) = P_{sr}^u = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) f(x, y) dx dy \quad (1)$$

gde je:

- $M(P(x, y))$ — matematičko očekivanje verovatnoće uništenja objekata, jednako srednjoj verovatnoći uništenja P_{sr}^u ,
- $P(x, y)$ — koordinatni zakon uništenja objekata pri dejstvu UbS,
- $f(x, y)$ — gustina raspodele objekata u ravni Oxy.

Poznato je da neka UbS mogu istovremeno ispoljiti različite oblike (efekte) dejstva (fizičke, hemijske i sl.), a time imati i različite zakone uništenja $P(x, y)$ koji se mogu superponirati. Tako, na primer, kod nuklearnih UbS postoje sledeći oblici dejstva sa različitim zakonima uništenja objekata $P(x, y)$:

- rušeće dejstvo $P_1(x, y)$,
- toplotno dejstvo $P_2(x, y)$,
- radioaktivno dejstvo $P_3(x, y)$,

a superponirano dejstvo iznosi:

$$P(x, y) = P_1 + P_2 + P_3 - P_1P_2 - P_1P_3 - P_2P_3 - P_1P_2P_3 \quad (2)$$

Kod UbS kumulativnog i parčadnog dejstva redovno se, pored osnovnog dejstva $P_1(x, y)$, javlja i dejstvo vazdušnog udarnog talasa (blast) $P_2(x, y)$, pa za njih zakon uništenja ima oblik:

$$P(x, y) = P_1 + P_2 - P_1P_2 \quad (3)$$

Opšti matematički model efikasnosti protivpešadijskih minsko-eksplozivnih prepreka parčadnog dejstva

Minsko-eksplozivne prepreke načelno se postavljaju ispred prednjeg kraja prvog i narednih položaja odbrane, a pri neposrednom dodiru između jurišnog položaja protivničke pešadije i prve linije sopstvenih rovova.

Iz načelnih taktičko-tehničkih pretpostavki izvođenja napada pešadije i rasporeda protivpešadijskih minsko-eksplozivnih prepreka, može se definisati taktičko-tehnički model napad streljačkog stroja pešadije sa jurišnog položaja na prednji kraj odbrane preko minsko-eksplozivnih prepreka (slika 1), koji omogućava uspostavljanje dinamičke veze između borbenog stroja (b/s) i MEP, i matematičku interpretaciju njihovog uzajamnog dejstva.



Sl. 1 — Taktičko-tehnički model napada b/s pešadije preko MEP parčadnog dejstva

Matematička veza između b/s pešaka, definisanog gustinom raspodele $f(x, y)$ u ravni Oxy i minsko-eksplozivne prepreke, postavljene u istoj ravni, uspostavlja se preko koordinatnog sistema Oxy.

Kada streljački vodovi izvode juriš streljačkim odeljenjima u streljačkom stroju (najčešći oblik b/s) nastoji se da streljački stroj bude u jednoj liniji, sa rastojanjem između pešaka 5 do 6 m, kako bi što veći broj pešaka istovremeno upao u protivnikove robove i međusobno sadejstvovao. U praksi, međutim, može doći do većeg ili manjeg poremećaja pri kretanju pešaka, tako da se oni više ne kreću u liniji već su u većoj ili manjoj meri razasuti po nekoj površini. Do poremećaja u streljačkom stroju dolazi, uglavnom, po dubini, duž y-ose, dok je u pravcu x-ose približno ravnomerno raspodeljen. To znači da su gustine raspodele pešaka duž x-ose $f(x)$ i duž y-ose $f(y)$ nezavisne, pa je

$$f(x, y) = f(x) f(y) = \frac{1}{x_2 - x_1} f(y) \neq \text{const.} \quad (4)$$

Poznato je da sa rastojanjem r od mesta eksplozije projektila ili PP mine parčadnog dejstva istovremeno opadaju gustina i kinetička energija parčadi, a time i verovatnoća uništenja $P(x, y)$, pa je $P(x, y) \neq \text{const.}$ i $f(x, y) \neq \text{const.}$ U takvim uslovima srednja verovatnoća uništenja pešaka pri prelasku preko MEP bez izrade prolaza definisana je izrazom (1).

Izraz (1) predstavlja opšti matematički model efikasnosti MEP parčadnog dejstva, ali ne predstavlja opšti matematički model nagaznih MEP, jer je kod njih $P(x, y) = \text{const.}$ [2], što daje:

$$P_{sr}^u = P(x, y) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dx dy = \\ = P(x, y) = \text{const.}$$

jer je po definiciji $\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dx dy = 1, 0$

Pri definisanju efikasnosti projektila parčadnog dejstva uzima se da su živi ciljevi ravnomerno raspodeljeni u celoj ravni Oxy i da je $f(x, y) = \text{const.}$ Kada se ta vrednost $f(x, y)$ uvrsti u (1) dobija se:

$$P_{sr}^u = \frac{1}{D} \int_D P(x, y) dx dy = \frac{V}{D}$$

gde je:

D — posmatrani domen ravni Oxy,

V — zapremina ispod površine u prostoru $P(x, y)$.

U teoriji efikasnosti projektila parčadnog dejstva kao mera efikasnosti uzima se površina efikasnosti A_E , koja je brojačno jednaka zapremini ispod površine u prostoru $P(x, y)$:

$$A_E = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) dx dy = V = D P_{sr}^u \quad (5)$$

Zaprečna vrednost protivpešadijskih MEP predstavlja proizvod između veličine zaprečene površine A i srednje verovatnoće uništenja P_{sr}^u pešaka koji se nalaze na površini A [2, 4, 5]:

$$Z_v = A P_{sr}^u \quad (6)$$

Zaprečna vrednost MEP izrađene od jedne PP mine parčadnog dejstva brojčano je jednaka površini efikasnosti mine definisanoj po metodama za projektele parčadnog dejstva:

$$Z_v = A P_{sr}^u = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) dx dy = V = A E \quad (7)$$

Zaprečna vrednost, kao i površina efikasnosti A_E , predstavlja potencijalnu efikasnost, definisanu pod pretpostavkom da su živi ciljevi ravnomerno raspodeljeni u celoj ravni Oxy . Streljački stroj, međutim, nije u ravni Oxy raspodeljen ravnomerno već neravnomerno prema izrazu (4).

Matematički model efikasnosti minko-eksplozivne prepreke izrađene od jedne PP mine parčadnog dejstva

Savremene PP mine parčadnog dejstva mogu se podeliti na dve osnovne vrste:

— mine kružnog dejstva, čiji ugao dejstva iznosi 360° kao kod projektila parčadnog dejstva;

— mine usmerenog dejstva čiji je ugao dejstva manji od 360° .

Prema uslovima aktiviranja, PP mine parčadnog dejstva mogu biti:

— statičke, koje detoniraju u statičkim uslovima,

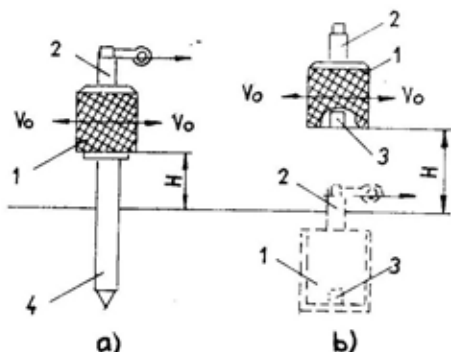
— odskočne, koje detoniraju u dinamičkim uslovima.

Statičke mine se ne ukopavaju već se postavljaju na kolac ili nožice na unapred određenu visinu H i na toj vi-

sini se aktiviraju. Odskočne mine se, u principu, ukopavaju u zemlju i aktiviraju u dve faze:

— u prvoj fazi se preko osnovnog upaljača aktivira izbacno (barutno) punjenje koje minu izbacuje vertikalno u vis;

— u drugoj fazi se na visini H , ili posle određenog vremena usporenja, aktivira donji upaljač koji aktivira eksplozivno punjenje.



Sl. 2 — Aktiviranje statičke i odskočne mine
a) statička mina, b) odskočna mina;

1 — mina, 2 — osnovni upaljač, 3 — donji upaljač, 4 — kolac

Košuljice statičkih PP mina parčadnog dejstva najčešće se izrađuju od sivog ili nodularnog liva. Mine usmerenog dejstva umesto košuljice imaju samo fragmentacionu oblogu na prednjem kraju, izrađenu od čeličnih kuglica ulivenih u plastičnu masu. Košuljice odskočnih mina najčešće se izrađuju kovanjem.

Eksplozivna punjenja statičkih PP mina najčešće su od presovanog ili livenog trotila, a punjenja odskočnih PP mina od heksolita.

Upaljači statičkih PP mina mogu biti mehanički i potezni, a upaljači odskočnih PP mina mehanički nagazno-potezni ili elektronski sa prekidnim bifilarnim kablom. PP mine usmerenog parčadnog dejstva kompletirane su, najčeš-

će, ručnim induktorima za dirigovano aktiviranje električnim putem i sa standardnim mehaničkim poteznim upaljačima.

Efikasnost ručnih bombi i MES parčadnog dejstva ispituje se po standardu SNO 5565/85 rasprskavanjem u oboru, izrađenom od rezane jelove-smrčove građe, debljine 25 mm. Obor se, načelno, sastoji od 4 sektora, uglovne širine 90°, postavljenih na propisanom rastojanju od centra u koji se postavlja mina ili ručna bomba (tabela 1). Rasprskavanje se vrši u realnim uslovima: statičke PP mine u statičkim uslovima, a odskočne u dinamičkim uslovima.

Tabela 1

R(m)	5	10	15	20	30	40
1	I	II	III	IV	—	—
2		I	II	III	IV	—
3			I	II	III	IV

Varijanta 1 iz tabele odnosi se na ručne bombe, a varijante 2 i 3 na PP mine parčadnog dejstva.

Gustina proboja mete (broj proboja po jedinici površine mete) po sektorima izračunava se po formuli:

$$n_i = N_i / G_i A_i \quad (\text{proboja/m}^2) \quad (8)$$

gde je:

N_i — broj proboja po sektoru,

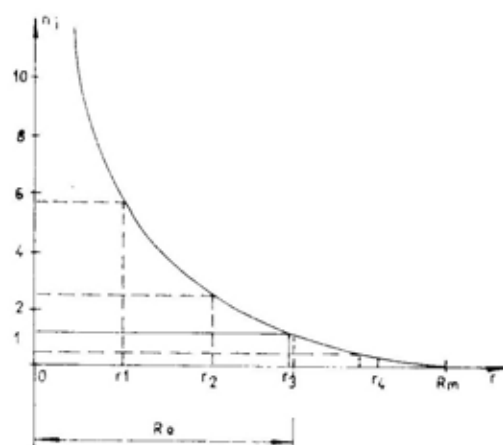
A_i — površina sektora (m^2),

G_i — broj ispitanih mina (bombi).

Gustina proboja n_i prikazuje se dijagramom (slika 3) u funkciji rastojanja R iz tabele 1 i određuje radijus efikasnog dejstva (mine, bombe) R_e koji odgovara rastojanju R na kome je gustina proboja $n_i = 1$ proboj/ m^2 , ako u TTZ nije drugačije definisano.

Ako je raspodela parčadi pri razletanju Poasonova (bez grupisanja pro-

boja po parovima ili trojkama), tada je verovatnoća da će bar jedno parče probiti standardnu metu površine S na



Sl. 3 — Dijagram zavisnosti gustoće proboja od rastojanja

rastojanju $r = (x^2 + y^2)^{0.5}$ (u koordinatnom sistemu Oxy):

$$P(x, y) = P(r(x, y)) = 1 - e^{-n_i(r)S} = 1 - e^{-n_i r} \quad (9)$$

jer je, prema navedenom standardu, $S = 1 \text{ m}^2$.

Rastojanje na kome je gustina proboja $n_i = 0$ predstavlja maksimalni domet efikasne parčadi (parčadi koja probijaju standardnu metu) R_m , koji nije definisan standardom, što znači da standard ne omogućuje potpuno definisanje zakona uništenja živih ciljeva $P(x, y)$ prema izrazu (9).

Izraz (9), kao podintegralna funkcija izraza (1), nije pogodan za integraciju, pa se mora pribeci iznalaženju pogodne aproksimacije. U [4] je pokazano da je za PP mine parčadnog dejstva pogodna aproksimacija:

$$P(r(x, y)) = 1 - e^{-n_i r} = 1 - \left(\frac{r}{R_m} \right)^z \quad (10)$$

gde je:

$z = \text{const.}$ — parametar koji definiše srednju gustinu efikasne parčadi.

Parametar z može se približno odrediti metodom najmanjih kvadrata, a brzo i manje tačno (ali dovoljno u najvećem broju slučajeva) pomoću izraza (10), odakle je:

$$z = \frac{n_i}{1_n \frac{r}{R_m}}$$

Pošto je pri $r = R_e$, $n_i = 1,0$, to je za određenu konstrukciju mine

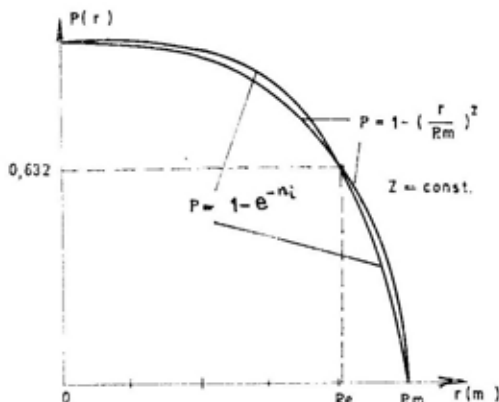
$$z = \frac{-1}{1_n \frac{R_e}{R_m}} = \text{const.} \quad (11)$$

Verovatnoća uništenja $P(x, y)$ u izrazu (1) u principu obuhvata i dejstvo vazdušnog udarnog talasa. Eksplozivno punjenje kod PP mina parčadnog dejstva ima relativno malu masu, 100 do 600 g, osim mina usmerenog dejstva kod kojih masa eksplozivnog punjenja iznosi 800 do 1000 g. Većina PP mina kružnog parčadnog dejstva ima relativno masivne košuljice, pa se veliki deo energije detonacije troši na rasprskavanje i transformiše u kinetičku energiju parčadi. Ako se tome doda da pritisak u vazdušnom udarnom talasu opada srazmerno trećem stepenu rastojanja od tačke eksplozije, verovatnoća uništenja živih ciljeva usled dejstva vazdušnog udarnog talasa mnogo je manja od verovatnoće uništenja usled parčadnog dejstva. Tako je, na primer, kod mina usmerenog parčadnog dejstva, čija masa eksplozivnog punjenja iznosi oko 0,8 kg, verovatnoća uništenja živih ciljeva usled dejstva vazdušnog udarnog talasa na rastojanju $r = 15$ m od tačke eksplozije približno nula, dok verovatnoća uništenja parčadnim dejstvom iznosi 0,99. Kod PP mina kružnog parčadnog dejstva verovatnoća uni-

štenja parčadnim dejstvom iznosi na rastojanjima oko 5 m od tačke eksplozije $P(r(x, y)) > 0,95$, a na rastojanjima oko 10 m približno $P(r(x, y)) = 0,9$, dok je verovatnoća uništenja usled dejstva vazdušnog udarnog talasa na tim rastojanjima približno $P(r(x, y)) = 0,3$ i $P(r(x, y)) < 0,1$ respektivno.

Energija vazdušnog udarnog talasa veoma malo doprinosi povećanju verovatnoće uništenja živih ciljeva $P(r(x, y))$ u realnim uslovima primene PP mine parčadnog dejstva, pa se može zanemariti. Stoga, izraz (10) za verovatnoću uništenja parčadnim dejstvom predstavlja konačan matematički model.

Ako su poznate vrednosti parametara R_e i R_m lako se može, pomoću izraza (10) i (11), definisati verovatnoća uništenja $P(r, z)$ za svaku vrednost rastojanja $r(x, y)$ od tačke eksplozije mine, čiji je dijagram prikazan na slici 4.



Sl. 4 — Dijagram verovatnoće uništenja $P(r(x, y)) = P(r, z)$
 $1 - P(r(x, y)) = 1 - e^{-n_i}$, $2 - P(r, z) = 1 - (r/R_m)^2$

Pomoću izraza (10) može se za određenu vrednost parametra z (konstrukciju mine) odrediti zaprečna vrednost Z_v i srednja verovatnoća uništenja P_{sr} ravnomerno raspodeljenih živih ciljeva u ravni Oxy. Kako je

$$Z_v = V = \int_0^{R_m} P(r, z) dA = \int_0^{R_m} (1 - (r/R_m)^2) r dr,$$

posle integracije u datim granicama dobija se:

$$Z_r = V = \bar{u} R_m^2 \left(1 - \frac{2}{z+2} \right) = A P_{sr} \quad (12)$$

U tabeli 2 prikazani su komparativni računski podaci za PP mine kružnog parčadnog dejstva PMR-3, PROM-1 i PROM-2. Mina PMR-3 je statička mina sa košuljicom od sivog ili nodularnog liva i eksplozivnim punjenjem od liveog TNT ili heksolita. Mina PROM-1 je odskočna mina sa košuljicom od kovanog granatnog čelika i eksplozivnim punjenjem od heksolita. Mina PROM-2 je

malnom raspodelom može definisati raspodela slučajnih veličina sa veoma malom (streljački stroj u liniji) i veoma velikom disperzijom (streljački stroj razasut po dubini), tako da se približava ravnomernoj raspodeli kada je disperzija veoma velika. Tako, na primer, pri disperziji $D=0,5$ streljački stroj se kreće skoro u liniji (dubina 3 do 4 km), a pri disperziji $D=40$ razasut je po dubini od nekoliko desetina metara i veoma blizak ravnomernoj raspodeli.

U teoriji verovatnoće gustina normalne raspodele slučajne veličine Y definisana je izrazom:

Tabela 2

Mina	Masa mine (kg)	Masa punjenja (kg)	R_m (m)	R_s (m)	z	A (m ²)	P_{sr}	Z_r
PMR-3	3,0	0,6	31	19	2	3020	0,5	1510
PROM-1	2,8	0,5	30	18	2	2827	0,5	1414
PROM-2	1,4	0,35	50	35	3	7854	0,6	4712

odskočna mina sa prefragmentisanom košuljicom i eksplozivnim punjenjem od presovanog TNT. Inicijacija detonacije punjenja se kod mina PMR-3 i PROM-1 vrši u jednoj tački, a kod mine PROM-2 pomoću posebno konstruisanog detonacionog procesora [4], [6].

Iz table 2 se vidi da PP mina PROM-2 ima dva puta manju ukupnu masu, za preko 40% manju masu znatno jeftinijeg i tehnološki pogodnijeg presovanog eksploziva (TNT), i više od tri puta veću zaprečnu vrednost (potencijalnu efikasnost) od PP mina PMR-3 i PROM-2.

Pošto pešaci nisu ravnomerno raspodeljeni u streljačkom stroju, za kvantitativnu ocenu efikasnosti PP mina parčadnog dejstva i MEP izrađenih od njih neophodno je definisati raspodelu duž y-ose u izrazu (4). Iz teorije verovatnoće je poznato da se sa tzv. nor-

$$f(y) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(y-m_y)^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (13)$$

gde je:

m_y — matematičko očekivanje slučajne veličine Y ,

$\sigma_y = (D_y)^{0,5}$ — standardna devijacija,

D_y — disperzija slučajne veličine Y .

Pri normalnoj raspodeli slučajne veličine Y , u intervalu $m_y = \pm 3\sigma_y$, obuhvaćeno je 99,86% svih mogućih vrednosti (pešaka u b/s), pa se može uzeti da dubina b/s iznosi:

$$d = 6\sigma_y \quad (14)$$

Uvrštavanjem relacije (14) u izraz (13) i (4) dobija se konačan matematič-

ki model gustine raspodele pešaka u b/s:

$$f(x, y) = f(x) f(y) = \frac{2,39}{d(x_2 - x_1)} \exp\left(-\frac{18(y - m_y)^2}{d^2}\right) \quad (15)$$

Ako se sa c obeleži rastojanje čela b/s od postavljene mine (x-ose) u praksi mogu nastati sledeći slučajevi:

— kada streljački stroj napada bez podrške tenkova ili se kreće ispred tenkova (BVP, OT), pešaci aktiviraju mine, pa je $c=0$ i $m_y=d/2$;

— kada se streljački stroj kreće iza tenkova (BVP, OT), tenkovi (BVP, OT) aktiviraju mine, pa je $c>0$ i $m_y=c+d/2$;

— kada se mine aktiviraju dirigovano u najpovoljnijem trenutku $c=-d/2$ i $m_y=0$.

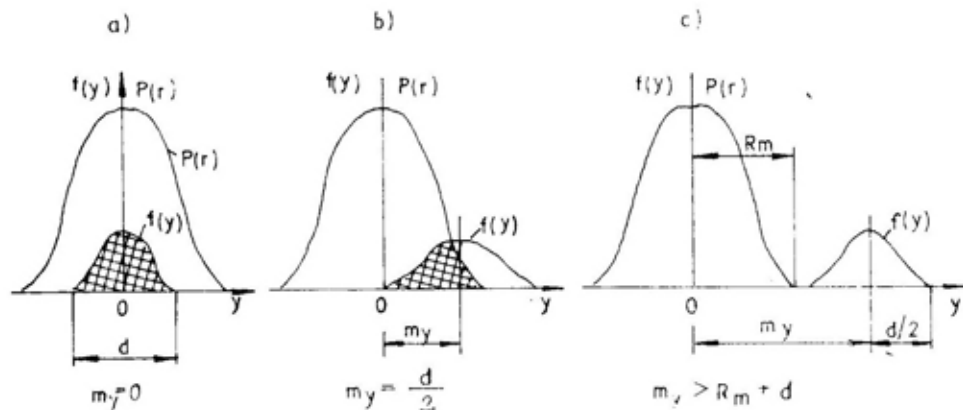
Kada se streljački stroj kreće iza tenkova (BVP, OT) rastojanje čela stroja od tenkova (BVP, OT) najčešće je veće od maksimalnog dometa efikasne parčadi ($c>R_m$), tako da u trenutku kada tenkovi aktiviraju mine streljački stroj još nije ušao u zonu efikasnog

dejstva mina (MEP), usled čega je srednja verovatnoća uništenja b/s $P_{sr}^u=0$. Na slici 5 ilustrovan je uticaj načina aktiviranja mina u minsko-eksplozivnim preprekama na verovatnoću uništenja b/s.

U tabeli 3 prikazani su komparativni računski rezultati verovatnoće uništenja P_{sr}^u i matematičko očekivanje broja uništenih pešaka $M(N^u)$ iz sastava b/s streljačkog odeljenja pri prelasku preko MEP izrađenih od pojedinačnih PP mina PROM-1 i PROM-2, iz koje se, takođe, jasno vidi uticaj načina aktiviranja na realnu efikasnost MEP.

Može se uočiti da povećanje matematičkog očekivanja broja uništenih pešaka iznosi 20% do 50% pri dirigovanom aktiviranju mina PROM-1 i 10% do 35% pri dirigovanom aktiviranju mina PROM-2. Iz tabele, takođe, sledi da je pri istim uslovima aktiviranja matematičko očekivanje broja uništenih pešaka kod MEP izrađene od jedne PP mine PROM-2 veće 2 do 2,5 puta pri dejstvu protiv plitkih b/s, a 5 do 5,7 puta kod dubokih b/s nego kod MEP izrađena od jedne mine PROM-1.

Jedna mina PROM-2 može da zapreči front širine 100 m sa verovatnoćom uništenja 0,54 do 0,851, a mina



Sl. 5 — Uticaj načina aktiviranja mina na verovatnoću P_{sr}^u uništenja b/s:

a) pri dirigovanom aktiviranju, b) pri aktiviranju od strane pešaka iz b/s, c) pri aktiviranju mina tenkovima (OT, BVP)

Mina	$R_m(m)$	$d(m)$	$m_j(m)$	z	N	P_{sr}^u	$M(N^o)$
PROM-1	30	30	15	2	6	0,455	2,73
"	"	30	0	"	"	0,633	3,80
"	"	18	9	"	"	0,560	3,36
"	"	18	0	"	"	0,680	4,08
"	"	48	24	"	"	0,162	0,97
"	"	48	0	"	"	0,243	1,46
PROM-2	50	30	15	3	10	0,680	6,80
"	"	30	0	"	"	0,750	7,50
"	"	18	9	"	"	0,721	7,21
"	"	18	0	"	"	0,851	8,51
"	"	48	24	"	"	0,540	5,40
"	"	48	0	"	"	0,730	7,30

PROM-1 front širine 60 m sa verovatnoćom uništenja 0,162 do 0,68.

Konačan matematički model efikasnosti MEP izrađene od jedne PP mine parčadnog dejstva glasi:

$$P_{sr}^u(1m) = \frac{2,39}{d(x_2 - x_1)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left(1 - \left(\frac{r}{R_m}\right)^z\right) \exp\left(-\frac{18(y - m_j)^2}{d^2}\right) dx dy \quad (16)$$

Integral (16) ne može se rešiti analitički već numerički za određene vrednosti promenljivih u podintegralnoj funkciji. Rezultati, prikazani u tabeli 3, dobijeni su metodom Monte Karlo.

Matematički model efikasnosti minsko-eksplozivne prepreke od jednog reda PP mina parčadnog dejstva

Na slici 6 prikazana je šema nailaska streljačkog stroja na minsko polje od dva reda PP mina parčadnog dejstva, sa parametrima efikasnosti.

Može se uočiti da streljački stroj prvo nailazi na prvi red mina u minskom polju, a zatim ostatak streljačkog

stroja (ako produži napad) nailazi na drugi red mina. To znači da se nailazak streljačkog stroja na prvi red mina može posmatrati i kao nailazak na MEP izrađenu od jednog reda PP mina parčadnog dejstva.

Mine se u svakom redu postavljaju na međusobnom rastojanju L , koje je najčešće konstantno. Zbog moguće interakcije susednih mina rastojanje L je, po pravilu, veće od maksimalnog dometa efikasne parčadi R_m , pa na bilo kog pešaka u stroju mogu delovati samo dve susedne mine, koje se u trenutku aktiviranja nalaze na rastojanjima r_1 i r_2 od bilo kog pešaka koji se nalazi u nekoj tački $C(x, y)$, kao što je prikazano na slici 7.

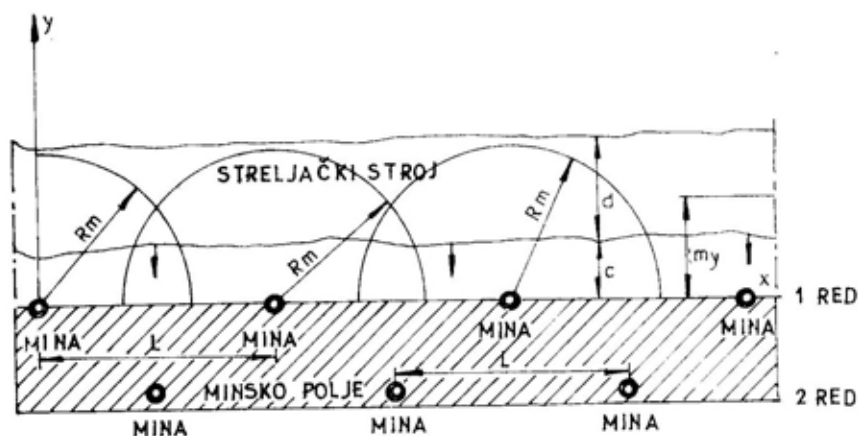
Iz slike 7 se vidi da je: $r_1 = (x^2 + y^2)^{0,5}$ a $r_2 = ((L - x)^2 + y^2)^{0,5}$.

Na osnovu vrednosti r_1 i r_2 određuju se, po izrazu (10), verovatnoće uništenja pešaka P_1^m (od dejstva prve mine) i P_2^m (od dejstva druge mine), a zatim ukupna verovatnoća uništenja pri prelasku preko MEP između dve susedne mine:

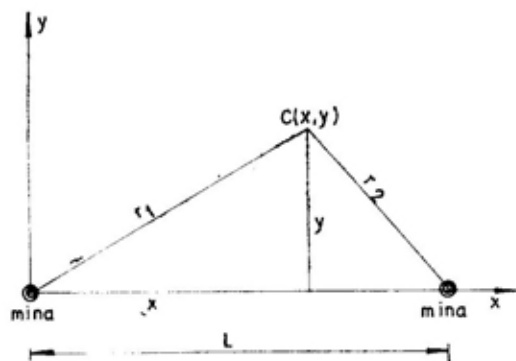
$$P(r(x, y)) = P(r, z) = 1 - (1 - P_1^m)(1 - P_2^m) = P_1^m + P_2^m - P_1^m P_2^m \quad (17)$$

Pošto su rastojanja r_1 i r_2 slučajne veličine, to je i verovatnoća uništenja pešaka $P(r(x, y)) = P(r, z)$ slučajna veli-

Kada se izvrše odgovarajuće zame-
ne u izrazima (16) i (17) dobija se dosta
složen i glomazan izraz sa podintegral-



Sl. 6 — Parametri efikasnosti minskog polja izrađenog od dva reda PP mina parčadnog dejstva



Sl. 7 — Položaj pešaka iz sastava bls u odnosu na dve susedne mine u trenutku aktiviranja jedne ili obe mine

čina, što zahteva odgovarajući postupak pri određivanju verovatnoće uništenja P_{sr}^u .

Verovatnoća $P_1^m = 1 - \left(\frac{r_1}{R_m}\right)^2$, a ve-

rovatnoća $P_2^m = 1 - \left(\frac{r_2}{R_m}\right)^2$.

nom funkcijom koja se ne može integraliti analitičkim putem.

U tabeli 4 prikazani su komparativni računski rezultati, dobijeni metodom Monte Karlo, za MEP izrađene od jednog reda PP mina PROM-1 i PROM-2. Razmaci između susednih mina L uzimani su različito za jednu i drugu minu, kako se, zbog različitih vrednosti parametara efikasnosti ne bi dobili nepotrebni rezultati. Samo je, radi upoređenja, za obe mine uzet razmak $L = 60$ m.

Iz table 4 se vidi da je u svim slučajevima zadovoljavajuća efikasnost MEP izrađene od jednog reda PP mina PROM-2, čak i sa razmakom između susednih mina $L = 100$ m $= 2R_m$, dok kod MEP izrađene od jednog reda mina PROM-1 efikasnost nije zadovoljavajuća u velikom broju slučajeva, čak ni pri minimalnom razmaku između susednih mina $L = 30$ m $= R_m$.

Mina	$R_m(m)$	$d(m)$	$m_y(m)$	z	$L(m)$	$P_{sr}^u(1)$
PROM-1	30	30	15	2	60	0,455
"	"	30	0	"	60	0,633
"	"	18	9	"	60	0,560
"	"	18	0	"	60	0,682
"	"	48	24	"	30	0,310
"	"	48	0	"	30	0,381
PROM-2	50	30	15	3	60	0,930
"	"	30	15	"	100	0,680
"	"	30	0	"	100	0,751
"	"	18	9	"	100	0,721
"	"	48	24	"	100	0,540
"	"	48	0	"	100	0,730

Matematički model efikasnosti minskog polja izrađenog od PP mina parčadnog dejstva

Razmak između susednih redova mina u minskom polju je, kao i kod susednih mina u istom redu, veći od maksimalnog dometa efikasne parčadi R_m . U takvim uslovima može se smatrati da je prelazak b/s preko pojedinih redova nezavisan, pa verovatnoća uništenja b/s ne zavisi od pretrpljenih gubitaka pri prelasku preko prethodnih redova mina, već samo od karakteristika reda mina preko koga prelazi. Ako su redovi mina identični, verovatnoća uništenja P_{sr}^u jednaka je za sve redove mina u minskom polju, ali je različito matematičko očekivanje broja uništenih pešaka $M(N^u) = NP_{sr}^u$ zbog pretrpljenih gubitaka (smanjenja broja pešaka N u b/s) pri prelasku preko prethodnih redova mina. Stoga je verovatnoća uništenja b/s pri prelasku preko minskog polja od n identičnih redova PP mina parčadnog dejstva jednaka:

$$P_{sr}^u(n) = 1 - (1 - P_{sr}^u(1))^n \quad (18)$$

gde je:

$P_{sr}^u(1)$ — verovatnoća uništenja b/s pri prelasku preko prvog reda mina.

Ako redovi mina u minskom polju nisu identični (različit razmak između mina L , različit način aktiviranja ili različita vrednost m_y), verovatnoća uništenja b/s pri prelasku preko minskog polja od n redova mina iznosi:

$$P_{sr}^u(n) = 1 - (1 - P_{sr}^u(1)) (1 - P_{sr}^u(2)) \dots (1 - P_{sr}^u(n)) \quad (19)$$

Celishodno je da se prednji redovi mina u minskom polju automatski aktiviraju pri nailasku b/s, jer su udaljeniji, pa se teško kontrolišu. Takođe je celishodno da se poslednji (n -ti) red mina aktivira dirigovanim putem u najpogodnijem trenutku (kada je $m_y = 0$) i tako ostvari maksimalni efekat parčadnog dejstva.

U tabeli 5 prikazani su računski rezultati verovatnoće uništenja b/s pri prelasku preko minskog polja od dva reda PP mina parčadnog dejstva, prikazanog na slici 6, u dva različita slučaja:

— kada su oba reda identična i aktivira ih protivnik ($m_y = d/2$), a verovatnoća uništenja označena je sa $P_{sr}^u(1, 1)$;

— kada su oba reda identična, ali prvi aktivira protivnik ($m_y = d/2$), drugi

je dirigovan ($m_y=0$), a verovatnoća uništenja je označena sa $P_{sr}^{u(1,2)}$.

Iz prikazanih rezultata vidi se da dirigovano aktiviranje drugog reda PP mina povećava verovatnoću uništenja

preka. Moguće je, međutim, da se u najvećem broju praktičnih situacija primene uprošćene metode određivanja efikasnosti neslučajnim postupkom, na osnovu prikupljenih podataka

Tabela 5

Mina	$R_m(m)$	$d(m)$	z	$L(m)$	$P_{sr}^{u(1,1)}$	$P_{sr}^{u(1,2)}$
PROM-1	30	30	2	60	0,703	0,800
"	"	18	"	60	0,806	0,860
"	"	48	"	30	0,524	0,573
PROM-2	50	30	3	100	0,898	0,974
"	"	18	"	100	0,922	0,943
"	"	48	"	100	0,788	0,876
"	"	30	"	60	0,995	0,999

b/s za oko 10% u odnosu na slučajno aktiviranje oba reda PP mina od strane pešaka iz sastava b/s, što znači da će pri prelasku streljačkog odeljenja preko MEP od dva reda PP mina, pri dirigovanom aktiviranju biti uništen jedan pešak više, što nije beznačajno.

Iz prikazanih rezultata se, takođe, vidi da je za izradu efikasne zaštitne MEP dovoljan jedan red PP mina PROM-2, sa rastojanjem između susednih mina $L=100$ m ili dva reda PP mina PROM-1 sa rastojanjem između mina $L=30$ m.

Uprošćene metode određivanja efikasnosti PP minsko-eksplozivnih prepreka parčadnog dejstva

Izvedeni matematički modeli efikasnosti protivpešadijskih MEP parčadnog dejstva definisani su primenom teorije verovatnoće i slučajnih procesa i predstavljaju srednju vrednost svih mogućih varijanti b/s i MEP. Oni su osnova za dalja teorijska i razvojna istraživanja, za konstruisanje novih PP mina parčadnog dejstva i definisanje pravila za izradu minsko-eksplozivnih pre-

i iskustava u izvođenju napada pešadije preko MEP.

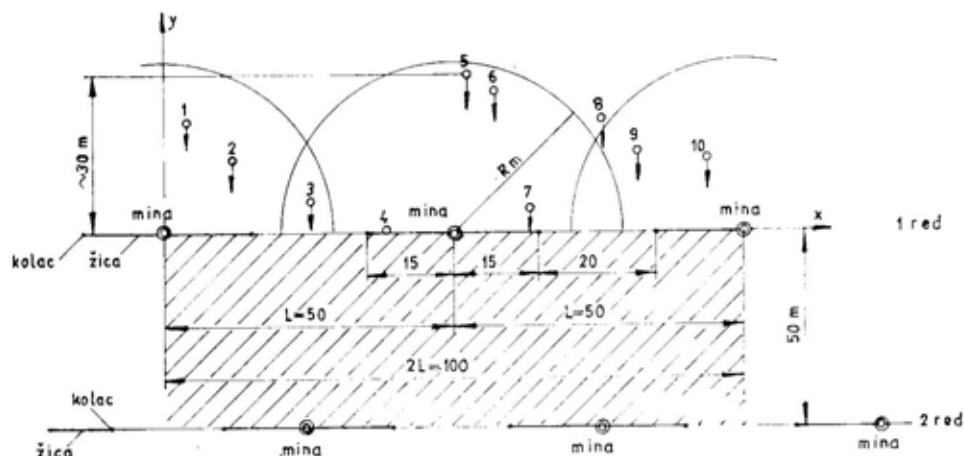
U okviru procene situacije pretpostavljaju se moguće varijante napada protivničke pešadije i raspodele pešaka u b/s pri prelasku preko MEP, a zatim se na osnovu ostalih elemenata procene situacije odredi taktički položaj MEP i potrebni nivo efikasnosti (verovatnoće uništenja b/s ili »zaprečne vrednosti«).

Ako se, na primer, proceni da protivnik izvodi juriš sa streljačkim strojem u kome se komandir odeljenja i snajperista kreću zajedno iza ostalih pešaka i da dozvoljava da se stroj razredi po dubini, kao što je prikazano na slici 8 i u tabeli 6, lako se može odrediti verovatnoća uništenja takvog b/s pri prelasku preko bilo koje minsko-eksplozivne prepreke. Na slici 8 je za primer uzeto minsko polje od dva reda PP mina PROM-1, sa rastojanjem između mina $L=50$ m i između redova takođe $L_r=50$ m.

Kao što se vidi sa slike 8, pešak br. 8 se ne nalazi u zoni efikasnog dejstva nijedne postavljene mine, dok se samo

pešak br. 3 nalazi istovremeno u zoni efikasnog dejstva prve i druge mine, a ostali u zoni dejstva samo jedne mine.

za red mina $P_{sr}^u(r) = \sum_{i=1}^{10} P_i^u = 0,487$;
za minsko polje $P_{sr}^u(m/p) = 0,737$.



Sl. 8 — Skica napada streljačkog odeljenja preko minskog polja od dva reda mina

Tabela 6

Pešaci	x(m)	y(m)	r ₁ (m)	r ₂ (m)	r ₃ (m)	P _{m1} ^u	P _{m2} ^u	P _{m3} ^u
1	4,0	20,0	20,40	50,17	98,10	0,538	0,0	0,0
2	13,0	12,0	17,70	39,17	87,83	0,652	0,0	0,0
3	26,0	6,0	26,68	24,74	73,25	0,209	0,32	0,0
4	38,0	0,0	38,00	12,00	62,0	0,0	0,84	0,0
5	52,0	28,0	58,00	28,07	55,57	0,0	0,124	0,0
6	56,0	26,0	61,74	26,68	52,84	0,0	0,209	0,0
7	63,0	4,0	13,60	13,60	37,22	0,0	0,794	0,0
8	75,0	20,0	77,62	32,00	32,02	0,0	0,0	0,0
9	84,0	15,0	85,33	38,80	21,93	0,0	0,0	0,466
10	95,0	13,0	95,88	46,84	13,93	0,0	0,0	0,784

Verovatnoća uništenja pešaka br. 3 superponira se po formuli:

$$P_3^u = P_1^u + P_2^u - P_1^u P_2^u = 0,209 + 0,32 - 0,209 \cdot 0,32 = 0,462.$$

Srednja verovatnoća uništenja b/s je:

Srednja verovatnoća uništenja svih mogućih kombinacija normalne raspodele pešaka u b/s, pri prelasku preko minskog polja prikazanog na slici 8, određenog metodom Monte Karlo, iznosi $P_{sr}^u = 0,75$ ili 1,3% više nego u iznetom primeru.

Verovatnoća uništenja b/s, prikazanog na slici 8, pri prelasku preko jednog reda PP mina PROM-2, sa međusobnim razmakom $L=100$ m, iznosi $P_{sr}^u=0,65$, a srednja verovatnoća uništenja svih kombinacija normalno raspodeljenih pešaka u b/s, određena metodom Monte Karlo, iznosi $P_{sr}^u=0,68$ ili 3% više. U oba slučaja, dakle, razlika se nalazi u sasvim prihvatljivim granicama.

Zaključak

Kao i matematički modeli efikasnosti nagaznih minsko-eksplozivnih prepreka [2], tako i matematički modeli efikasnosti minsko-eksplozivnih prepreka parčadnog dejstva izvedeni su iz opšteg matematičkog modela efikasnosti ubojnih sredstava, čime je dokazana hipoteza da matematički modeli efikasnosti svih vrsta minsko-eksplozivnih prepreka predstavljaju partikularne varijante opšteg matematičkog modela efikasnosti ubojnih sredstava.

Izvedeni matematički modeli efikasnosti raznih tipova minsko-eksplozivnih prepreka parčadnog dejstva primenljivi su u teorijskim i razvojnim istraživanjima, kao i u rešavanju praktičnih taktičko-tehničkih problema.

Kvantitativne analize definisanih matematičkih modela pokazuju da presudan uticaj na efikasnost minsko-eksplozivnih prepreka parčadnog dejstva imaju konstrukcioni parametri mina, pre svega maksimalni domet efikasne parčadi R_m i prosečna gustina parčadi z .

Za zaprečavanje odsečka zemljišta frontalne širine 100 m, sa srednjom verovatnoćom uništenja b/s, $P_{sr}^u=0,65$ do 0,70 potrebna je jedna PP mina parčadnog dejstva PROM-2 ili četiri PP mine parčadnog dejstva PROM-1, odnosno PMR-3, ili oko 2500 nagaznih PP mina sa nagaznom površinom oko 100 cm².

Za razliku od nagaznih protivpešadijskih minsko-eksplozivnih prepreka, protivpešadijskim minsko-eksplozivnim preprekama parčadnog dejstva se može, po potrebi, upravljati, što predstavlja dodatnu prednost u odnosu na nagazne protivpešadijske minsko-eksplozivne prepreke. Jedina prednost nagaznih protivpešadijskih minsko-eksplozivnih prepreka je u tome što mogu u celini biti nemetalne, pa se ne mogu detektovati minoistraživačima. Zabranom proizvodnje i upotrebe nagaznih PP mina koje se ne mogu detektovati povećava se značaj protivpešadijskih minsko-eksplozivnih prepreka i mina parčadnog dejstva.

Literatura:

- [1] Novaković, M.: Zaprečna vrednost protivpešadijskih i mešovitih minskih polja, Vojni glasnik 1/1979.
- [2] Novaković, M.: Efikasnost nagaznih protivpešadijskih minskoeksplozivnih prepreka, Vojnotehnički glasnik 3/1995.
- [3] Novaković, M.: Protivpešadijske rasprskavajuće mine, Naučno-tehnička informacija, VTI, 1974, br. 19.
- [4] Novaković, M.: Doprinos teoriji konstruisanja protivpešadijskih mina parčadnog dejstva, doktorska disertacija, VTA, 1993.
- [5] Novaković, M.: Osnovni parametri efikasnosti protivpešadijskih mina i projektila parčadnog dejstva, Naučno-tehnički pregled, 3/1995.
- [6] Novaković, M.: Funkcionalna veza između konstrukcionih parametara i parametara razlantanja parčadi protivpešadijskih mina parčadnog dejstva, Zbornik radova XV simpozijum JKEM, T. Užice, 1994.
- [7] Zaprečavanje i savlađivanje prepreka, VIZ, 1976.
- [8] Inženjerijski priručnik I, VIZ, 1975.

Dr Radun Jeremić,
potpukovnik, dipl. inž.
Vojnotehnička akademija VJ,
Beograd

ANALIZA TEORIJSKIH OSNOVA WLF JEDNAČINE I METODA ZA ODREĐIVANJE FAKTORA POMAKA KOD ČVRSTIH RAKETNIH GORIVA

UDC: 629.762.036.5.001.573

Rezime:

Radi provere teorijskih osnova WLF jednačine i njenog univerzalnog karaktera merena je slobodna zapremina za nekoliko tipova čvrstih raketnih goriva i analizirane su vrednosti empirijskih konstanti. Određivanje faktora pomaka izvršeno je na osnovu rezultata merenja temperaturno-vremenske zavisnosti relaksacionog modula, modula elastičnosti, maksimalnog naprezanja, maksimalne deformacije i podatljivosti ispitivanih goriva. Na osnovu analize dobijenih rezultata predložena je optimalna metoda za merenje faktora pomaka.

Ključne reči: čvrsta raketna goriva, reologija, strukturalna analiza, temperaturno-vremenska analogija, faktor pomaka.

WLF EQUATION THEORETICAL BASIS ANALYSIS AND A METHOD FOR DETERMINING THE SHIFT FACTOR IN SOLID PROPELLANTS

Summary:

In order to verify the WLF equation theoretical basis and its universal character, free volumes of several types of solid propellants were measured and the values of empirical constants were analysed. The shift factor was determined on the basis of measuring temperature-time dependence of relaxation modulus, elasticity modulus, ultimate stress, maximal deformation and compliance of examined propellants. An optimal method for shift factor measuring is proposed on the basis of the analysis of obtained results.

Key words: solid propellants, rheology, structure analysis, temperature-time analogy, shift factor.

Uvod

Da bi pogonska punjenja raketnih motora na čvrsta goriva, pod dejstvom različitih opterećenja u procesu skladištenja i eksploatacije, očuvala svoj strukturalni integritet, neophodno je da poseduju odgovarajuće reološke karakteristike. U protivnom, pri aktiviranju i u toku leta rakete, usled narušenog režima sagorevanja pogonskog punjenja i porasta pritiska u komori iznad dozvoljene vrednosti, može doći do eksplozije raketnog motora.

U inženjerskoj praksi, za utvrđivanje strukturalnog integriteta, pouzdanosti i veka upotrebljivosti raketnih motora sa čvrstim gorivom, uobičajena je strukturalna analiza. Jedna od najvažnijih faza strukturalne analize je utvrđivanje reoloških karakteristika raketnih goriva pri različitim temperaturama i režimima opterećenja.

Po svom sastavu i strukturi čvrsta raketna goriva (dvobazna i kompozitna) spadaju u grupu polimernih materijala, pa njihova fizičko-mehanička

svojstva imaju viskoelastični karakter. Kod viskoelastičnih materijala zavisnost između naprezanja i deformacije je mnogo složenija nego kod klasičnih materijala, jer istovremeno uključuje uticaj vremena, temperature i brzine deformacije, koji izrazito utiču na reološke karakteristike.

Za eksplicitno izražavanje uticaja vremena, temperature i brzine deformacije na reološke karakteristike raketnih goriva, vrlo je teško postaviti odgovarajući matematički model koji bi davao zadovoljavajuće rezultate za praktičnu upotrebu [1—5].

Za te potrebe još uvek se najčešće primenjuje princip temperaturno-vremenske analogije (TVA) koji se zasniva na postojanju ekvivalentnosti između temperature i vremena. Prema ovom principu, na ponašanje materijala smanjenje temperature ima isti efekt kao i skraćanje vremena, odnosno povećanje brzine deformacije, i obratno. Na taj način princip omogućava da se na osnovu kratkotrajnih laboratorijskih eksperimenata mogu odrediti vrednosti reoloških parametara za različite temperature i vremena, odnosno brzine deformacije.

Za primenu principa temperaturno-vremenske analogije neophodno je za ispitivani materijal poznavati zavisnost faktora pomaka od temperature. Radi izbora optimalne metode u radu izvršena analiza teorijskih osnova WLF jednačine, proverena njene univerzalnosti i prikazani rezultati određivanja faktora pomaka različitim metodama za jedno dvobazno raketno gorivo tipa NGR i tri kompozitna raketna goriva — na bazi poliuretana (PU), karboksi terminiranog polibutadiena (CTPB) i hidroksi terminiranog polibutadiena (HTPB).

Princip temperaturno-vremenske analogije

Princip temperaturno-vremenske analogije uočen je pre nego što su utvrđene njegove teorijske osnove, koje

leže u Rouseovoj teoriji molekularnih relaksacionih procesa [6]. U zoni prelaza iz staklastog u viskoelastično stanje, gde su viskoelastične karakteristike direktno u vezi sa koordiniranim kretanjem strukturnih jedinica, Rouse je dao izraz za opisivanje raspodele relaksacionog spektra:

$$H = \frac{\rho RT}{M} \sum_{i=1}^n \tau_i \delta(\tau - \tau_i) \quad (1)$$

$$\tau_i = \frac{a^2 \cdot z^2 \Psi}{6\pi^2 i^2 kT} \quad (2)$$

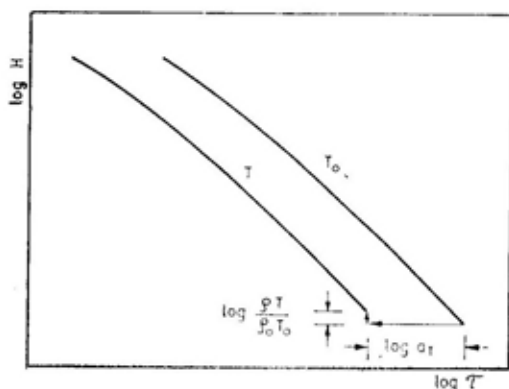
gde je:

- τ_i — vreme relaksacije *i*-te strukturne jedinice,
- ρ — gustina,
- M — molekularna masa,
- δ — Dirakova funkcija,
- a — karakteristična dimenzija polimernog lanca,
- z — stepen polimerizacije,
- Ψ — prosečan koeficijent trenja između strukturnih jedinica
- k — Boltzmanova konstanta,
- T — temperatura.

Na osnovu izraza (1) i (2) očigledno je da se na relaksacioni spektar temperatura utiče preko nekoliko parametara. Sa promenom temperature, u izvesnoj meri, dolazi i do promene gustine zbog dilatacije. Karakteristična dimenzija može se malo menjati, naročito ako postoje jake prepreke slobodnoj rotaciji u polimernom lancu. Uticaj temperature najizraženiji je kod koeficijenta trenja koji se izrazito smanjuje sa temperaturom. Ova tri efekta mogu se objediniti faktorom a_T , koji je jednak odnosu između vremena relaksacije τ_i na temperaturi T i nekoj referentnoj temperaturi T_0 :

$$\frac{(\tau_i)_T}{(\tau_i)_{T_0}} = a^2_T = \frac{(a^2\Psi)_T T_0}{(a^2\Psi)_{T_0} T} \quad (3)$$

Budući da je ovaj odnos isti za sve τ_i , efekat povećanja temperature T_0 do T na logaritamsku zavisnost spektra H ispoljava se u vertikalnom pomaku krive za vrednost $\log \rho T / \rho_0 T_0$ i horizontalnom pomaku za $\log a_T$, dok oblik krive ostaje isti (slika 1).



Sl. 1 — Efekat povećanja temperature od T_0 do T na relaksacioni spektar

Na taj način eksperimentalna kriva, dobijena na temperaturi T , može se redukovati na poziciju koju bi imala na temperaturi T_0 prikazivanjem zavisnosti $H_p = HT_0 \rho_0 / T \rho$ u funkciji τ/a_T . Ako se rezultati eksperimentalnih merenja na nekoliko različitih temperatura redukuju na T_0 za odgovarajuću vrednost a_T , trebalo bi da se dobije zajednička, kompleksna kriva, koja predstavlja relaksacioni spektar H na temperaturi T_0 .

Analogno tome, i druge funkcije viskoelastičnosti mogu se redukovati na temperaturu T_0 .

WLF jednačina

U daljem razvoju principa temperaturno-vremenske analogije naponi su bili usmereni na iznalaženje eksplicitne zavisnosti vrednosti $\log a_T$ od temperature. Williams, Landell i Ferry su 1953. godine za ovu zavisnost dali analitički izraz zasnovan na teoriji slobod-

ne zapremine, poznat kao ULF izraz [7]. Kao polazna osnova poslužio im je Doolittleov izraz za viskozitet:

$$\ln \eta = \ln A + B (v_0/v_f) \quad (4)$$

gde je:

A i B — konstante,

v_0 — zauzeta zapremina,

v_f — slobodna zapremina.

Doolittleov izraz može se izvesti analizom molekuskog transporta tečnosti koja sadrži čvrste kuglice [8].

Sva kretanja strukturnih jedinica moguća su zahvatajući slobodnoj zapremini. Da bi došlo do kretanja potrebno je da se preskoči neka energetska barijera, što se može definisati izrazom za verovatnoću, koji je sličan Arrhenijusovom izrazu:

$$P = \exp(-E/kT) \quad (5)$$

gde je:

E — energija aktivacije procesa kretanja strukturnih jedinica.

Verovatnoća P povećava se sa temperaturom i vremenom. Teorijski, vrednost tP mora dostići određeni iznos da bi došlo do kretanja, što se može izraziti na sledeći način:

$$\ln(tP) = \text{const} = \ln t - E/kT \quad (6)$$

odavde je:

$$\ln t = \text{const} + E/kT \quad (7)$$

Diferencijal ovog izraza daje nešto jasniji izraz za analizu:

$$\Delta \ln t = - \frac{E}{kT^2} \Delta T \quad (8)$$

Na osnovu ovog izraza očigledno je da povećanje vremena ima isti efekat kao i smanjenje temperature, što treba shvatiti u kontekstu relacije između temperature i vremena potrebnih za početak određenog kretanja.

Iznos energije aktivacije povezan je sa veličinom slobodne zapremine, pa se može očekivati da se ona smanjuje ako se slobodna zapremina povećava, što se može predstaviti na sledeći način:

$$\frac{E}{kT} = \frac{B'}{f} \quad (9)$$

gde je:

B' — konstanta,

f — frakciona slobodna zapremina koja iznosi:

$$f = \frac{v_t}{v_o + v_t} \quad (10)$$

Uočavajući sličnost između izraza (4) i (10) uzeto je da su B i B' ekvivalentni. Tada izraz (5) poprima oblik:

$$P = \exp(-B/f) \quad (11)$$

Iznos tP još uvek ostaje konstantan za određeni tip razmatranih parametara:

$$\ln(tP) = \text{const} = -\frac{B}{f} + \ln t \quad (12)$$

Uzimajući u obzir diferencijal dobija se:

$$\Delta \ln t = B \Delta(1/f) \quad (13)$$

Izraz (13) pokazuje da je promena u frakcionoj slobodnoj zapremini ekvivalentna promeni logaritma vremenske skale.

Ekspanzija u staklastom stanju odvija se pri približno konstantnoj slobodnoj zapremini (realno, slobodna zapremina se mora blago povećavati sa temperaturom, čak i u staklastom stanju). Koeficijent ekspanzije izrazito se povećava kod temperature ostakljivanja, T_g , čime se povećava i slobodna zapremina iznad T_g . Uzimajući da je α_t — koeficijent ekspanzije slobodne zapremine, a f_g — frakciona slobodna zapremina pri T_g , zavisnost slobodne

zapremine od temperature može se napisati u sledećem obliku:

$$f = f_g + \alpha_t(T - T_g) \quad (14)$$

Izraz (13) može se rastaviti, tako da se dobija:

$$\Delta \ln t = B(l/f - l/f_g) \quad (15)$$

Zamenom izraza (14) u (15) dobija se:

$$\Delta \ln t = B \left[\frac{1}{f_g + \alpha_t(T - T_g)} - \frac{1}{f_g} \right] \quad (16)$$

odnosno:

$$\Delta \ln t = B \left\{ \frac{f_g - [f_g + \alpha_t(T - T_g)]}{f_g [f_g + \alpha_t(T - T_g)]} \right\} \quad (17)$$

Sređivanjem izraza (17) dobija se:

$$\Delta \ln t = -\frac{(B/f_g)(T - T_g)}{f_g/\alpha_t + T - T_g} \quad (18)$$

Razmatrajući značenje $\Delta \ln t$ dobija se:

$$\Delta \ln t = \ln t - \ln t_g = \ln(t/t_g) = \ln a_T \quad (19)$$

gde je:

a_T — faktor pomaka.

Sada se može napisati i konačni teorijski izraz WLF jednačine:

$$\ln a_T = -\frac{(B/f_g)(T - T_g)}{f_g/\alpha_t + T - T_g} \quad (20)$$

ili u formi dekadnog logaritma:

$$\log a_T = -\frac{B}{2,303f_g} \left(\frac{T - T_g}{f_g/\alpha_t + T - T_g} \right) \quad (21)$$

Supstitucijom $C_1 = B/2,303f_g$ i $C_2 = f_g/\alpha_t$ dobija se WLF izraz u eksplicitnom obliku koji se, uglavnom, sreće u literaturi:

$$\log a_T = \frac{-C_1(T - T_0)}{C_2 + T - T_0} \quad (22)$$

Ovaj postupak izvođenja WLF izraza sugeriše generalizovanu vremensku zavisnost.

Interpretacija konstanti C_1 i C_2 jasnija je na osnovu razmatranja originalnog postupka izvođenja izraza koji su prezentirali Williams, Landel i Ferry [7]. Polazeći od Doolittleovog izraza (4), uz pretpostavku da je za malo v_f .

$$f = \frac{v_f}{v_0 + v_f} \approx \frac{v_f}{v_0} \quad (23)$$

dobija se:

$$\ln \eta = \ln A + B/f \quad (24)$$

Uzimajući u obzir uslove pri T_g izraz (24) može se proširiti tako da glasi:

$$\ln \eta - \ln \eta_g = \ln A - \ln A + \frac{B}{f} - \frac{B}{f_g} \quad (25)$$

$$\ln \left(\frac{\eta}{\eta_g} \right) = B \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{f_g} \right) \quad (26)$$

Očigledna je analogija između izraza (26) i (15), pa se na osnovu izraza (19) može postaviti relacija

$$\ln \left(\frac{\eta}{\eta_g} \right) = \ln a_T = \ln \left(\frac{t}{t_g} \right) \quad (27)$$

Time je dokazano da izrazi (20) i (21) slede direktno iz Doolittleovog izraza. Na osnovu ove činjenice i na osnovu mnogih literaturnih podataka eksperimentalnih merenja viskoziteta, tvrdi se da za mnoge linearne amorfne polimere, nezavisno od hemijske strukture, konstante C_1 i C_2 imaju univerzalne vrednosti:

$$\log \left(\frac{\eta}{\eta_g} \right) = \frac{-17,44(T - T_g)}{51,6 + T - T_g} \quad (28)$$

Takođe je utvrđeno da ovaj izraz vredi u intervalu temperatura od T_g do $T_g + 100$ K. U tom smislu predloženo je da se, umesto T_g u izrazu (22) koristi neka referentna temperatura T_0 , koja je za približno 50 K iznad T_g . U

tom slučaju konstante poprimaju nove vrednosti:

$$\log a_T = \frac{-8,86(T - T_g)}{101,6 + T - T_g} \quad (29)$$

Značaj WLF jednačine jeste u njejoj generalnosti. Ona je, sve do danas, ostala osnova mnogih teorijskih i praktičnih istraživanja iz područja polimera i reologije.

Opis eksperimenta

Za određivanje faktora pomaka odabrane su četiri vrste čvrstih raketnih goriva, jedno dvobazno raketno gorivo tipa NGR i tri vrste kompozitnih raketnih goriva, na bazi poliuretana (PU), karboksi terminiranog polibutadiena (CTPB) i hidroksi terminiranog polibutadiena (HTPB).

Faktori pomaka za navedena goriva određivani su na osnovu rezultata ispitivanja sledećih reoloških parametara: podatljivosti,* relaksacionog modula, modula elastičnosti, maksimalnog naprežanja i maksimalne deformacije.

Podatljivost raketnih goriva, $D(t)$, ispitivana je na termomehaničkom analizeru »Du Pont — 943«, na osnovu rezultata merenja dubine penetracije kvarcne sonde u uzorak sa vremenom, pri konstantnom opterećenju sonde tegom mase 100 g, u temperaturnom intervalu od 213 do 323 K. Merenje podatljivosti vršeno je za vreme od 60 minuta. Eksperimenti su izvođeni sa po pet ponavljanja pri istim uslovima. Koeficijent varijacije kretao se u granicama do 12%.

Ostali reološki parametri određivani su na kidalici tipa »MTS — 810«. Za razliku od klasičnih kidalica, koje omogućavaju brzinu deformisanja do 1 m/min. kidalica »MTS — 810« omogućava konstantnu brzinu deformisa-

* Pogodnost za deformisanje.

nja do 120 m/min. Snabdevena je temperaturnom komorom za rad u temperaturnom intervalu od -130 do 300°C .

Merenja relaksacionog modula, $E(t)$, vršena su na uzorcima goriva u obliku »JANNAF« epruveta [5] u temperaturnom intervalu od 193 do 313 K u trajanju od 30 minuta, pri konstantnoj početnoj deformaciji. Vreme temperiranja uzorka na radnu temperaturu iznosilo je dva sata.

Određivanje modula elastičnosti, E , maksimalnog naprezanja, σ_m , i maksimalne deformacije, ϵ_m , za odabrana raketna goriva, vršeno je na osnovu rezultata ispitivanja jednoosnim zatezanjem »JANNAF« epruveta u temperaturnom intervalu od 193 do 313 K sa brzinama istezanja 0,7; 7; 700; 7000 i 126000 mm/min, što odgovara brzinama deformacije 0,01; 0,1; 1; 10; 100 i 1800 min^{-1} .

Pre ispitivanja uzorci su temperirani na radnu temperaturu u trajanju od 2 sata. Eksperimenti su izvođeni sa po pet ponavljanja pri istim uslovima. Koeficijent varijacije nije prelazio 15%.

Na termomehaničkom analizeru određeni su i koeficijenti dilatacije ispitivanih goriva u području ispod temperature ostakljivanja, α_g , i u području iznad temperature ostakljivanja, α_r .

Rezultati ispitivanja i diskusija

Analiza teorijskih osnova WLF jednačine

Kao što je već istaknuto, autori WLF jednačine zasnovali su njeno izvođenje na teoriji slobodne zapremine. Pri tome su pošli od Doolittleovog izraza koji se odnosi na viskozitet razređenih rastvora i prihvatili da je konstanta B u izrazu (20), odnosno (21) jednaka jedinici i za slučaj polimera. Zatim su, na osnovu literaturnih podataka, zaključili da konstante C_1 i C_2 u izrazu (22) (WLF jednačina) imaju univerzalno značenje za većinu polimera.

Polazeći od teorijskih oblika, koji slede iz izraza (21):

$$C_1 = B/2,303 f_g = 17,44 \text{ i } C_2 = f_g/\alpha_t = 51,6$$

uz uslov da je $B=1$, može se izračunati vrednost slobodne zapremine, f_g , pri $T=T_g$, kao i koeficijent dilatacije slobodne zapremine, α_t

$$f_g = 0,025$$

$$\alpha_t = 4,8 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$$

Radi provere ovih postavki, za slučaj raketnih goriva, na termomehaničkom analizeru su izvršena merenja koeficijentata dilatacije, α_r i α_g (tabela 1). Uz pretpostavku da je α_g konstantna vrednost, mogu se izračunati koeficijent dilatacije slobodne zapremine,

Tabela 1

Eksperimentalne vrednosti parametara za testiranje WLF jednačine

Tip goriva	$\alpha_r, \text{K}^{-1} \cdot 10^{-4}$	$\alpha_g, \text{K}^{-1} \cdot 10^{-4}$	$\alpha_t, \text{K}^{-1} \cdot 10^{-4}$	f_g	B
NGR	1,44	4,14	2,70	0,065	1,16
PU	1,98	4,26	2,28	0,049	0,89
CTPB	2,13	3,09	0,96	0,019	0,22
HTPB	2,13	3,93	1,80	0,037	0,86

$\alpha_t \approx \alpha_r - \alpha_g$, na osnovu kojeg se može izračunati slobodna zapremina pri $T=T_g$, $f_g = \alpha_t T_g$.

Na osnovu eksperimentalnih vrednosti f_g i α_t , kao i empirijskih konstanti C_1 i C_2 , može se izvršiti provera da li je konstanta B u izrazu (21) zaista ravna jedinici.

Vrednosti ovih parametara prikazane su u tabeli 1.

Analizom dobijenih rezultata može se uočiti sledeće:

— vrednosti α_t za sva goriva manje su od one koja sledi iz WLF jednačine,

— vrednosti f_g , izuzev kod goriva tipa CTPB, veće su od odgovarajuće vrednosti koja sledi na osnovu WLF izraza, a i međusobno se razlikuju,

— vrednost konstante B kod kompozitnih goriva manja je od jedinice, a kod dvobaznog goriva veća od jedinice.

I u literaturi se mogu naći različite vrednosti ovih parametara. Simha i Boyer [9] su na osnovu različitih literaturnih podataka našli da je $f_g = 0,113$. Sharma [10] je pokazao da je α_f približno konstantna i iznosi $3,2 \cdot 10^{-4} K^{-1}$. Wrasidlo [11] je za f_g sugerisao vrednost od 0,023, Hirai i Eyring [12] su dobili vrednost 0,08, Miller 0,12, itd. Williams je kasnije pokazao da se konstanta B razlikuje od jedinice i iznosi 0,91.

Na osnovu ovih činjenica može se zaključiti da se slobodna zapremina ne može tretirati kao konstantna vrednost. Uzevši u obzir i eksperimentalno određene vrednosti empirijskih konstanti C_1 i C_2 , očigledno je da WLF jednačina ne može imati univerzalni karakter, što znači da se empirijske konstante moraju određivati za svaki ispitivani materijal.

Određivanje faktora pomaka

Radi određivanja faktora pomaka eksperimentalne vrednosti reoloških parametara ispitivanih raketnih goriva predstavljene su u polulogaritamskim koordinatama, kao što je šematski prikazano na slici 1. Modul elastičnosti, maksimalno naprezanje, maksimalna deformacija i relaksacioni modul množeni su faktorom T_0/T , a podatljivost faktorom T/T_0 , u skladu sa kinetičkom teorijom gumolike elastičnosti [1]. Maksimalno naprezanje množeno je i sa faktorom $\alpha = 1 + \epsilon_m$, kojim se uzima u obzir promena poprečnog preseka sa deformacijom uzorka. Za referentnu temperaturu uzeta je temperatura koja je za 50 K iznad temperature ostakljivanja.

Srednje rastojanje između krive koja opisuje promenu nekog reološkog parametra na određenoj temperaturi T i referentne krive na temperaturi T_0 , predstavlja vrednost faktora pomaka, $\log a_T$. Predznak se utvrđuje na osnovu položaja u odnosu na referentnu krivu.

Na slici 2, za ilustraciju, prikazani su rezultati promene relaksacionog modula sa vremenom, na različitim temperaturama, za kompozitno raketno gorivo tipa HTPB.

Zavisnost faktora pomaka od temperature za ispitivana raketna goriva,

Tabela 2

Vrednosti empirijskih konstanti u WLF izrazu za različite načine određivanja

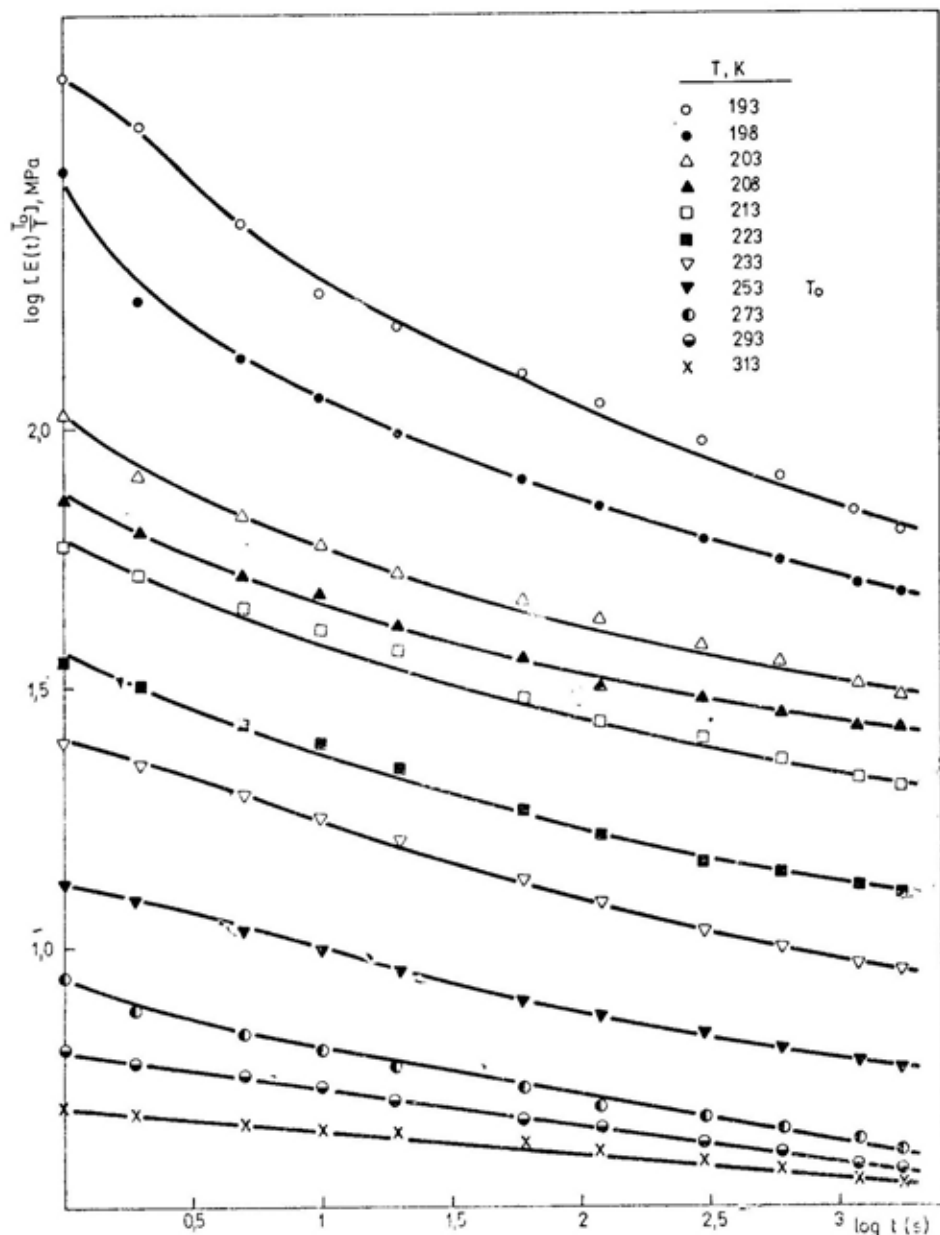
Tip goriva	Zavisnost	C_1	C_2	\bar{C}_1	\bar{C}_2
NGR	E(t)	20,9	204,2	19,3	183,8
	E($\dot{\epsilon}$)	21,3	186,6		
	$\sigma_m(\dot{\epsilon})$	13,42	138,6		
	D(t) _(TMA)	21,5	205,9		
PU	E(t)	10,28	151,5	11,20	151,1
	E($\dot{\epsilon}$)	20,8	202,8		
	$\sigma_m(\dot{\epsilon})$	13,21	154,4		
	D(t) _(TMA)	8,30	127,8		
CTPB	E(t)	7,91	124,5	8,02	125,1
	E($\dot{\epsilon}$)	7,54	116,1		
	$\sigma_m(\dot{\epsilon})$	10,24	122,4		
	D(t) _(TMA)	9,44	140,9		
HTPB	E(t)	12,70	157,3	12,85	158,2
	E($\dot{\epsilon}$)	14,94	158,5		
	$\sigma_m(\dot{\epsilon})$	7,02	106,9		
	D(t) _(TMA)	13,11	159,1		

mereni na osnovu temperaturno-vremenske zavisnosti različitih reoloških parametara, zbirno su prikazane na slikama 3 do 6.

Regresionom analizom WLF izraza određene su pojedinačne i srednje

vrednosti empirijskih konstanti C_1 i C_2 za sve načine određivanja faktora pomaka. Sve vrednosti prikazane su u tabeli 2.

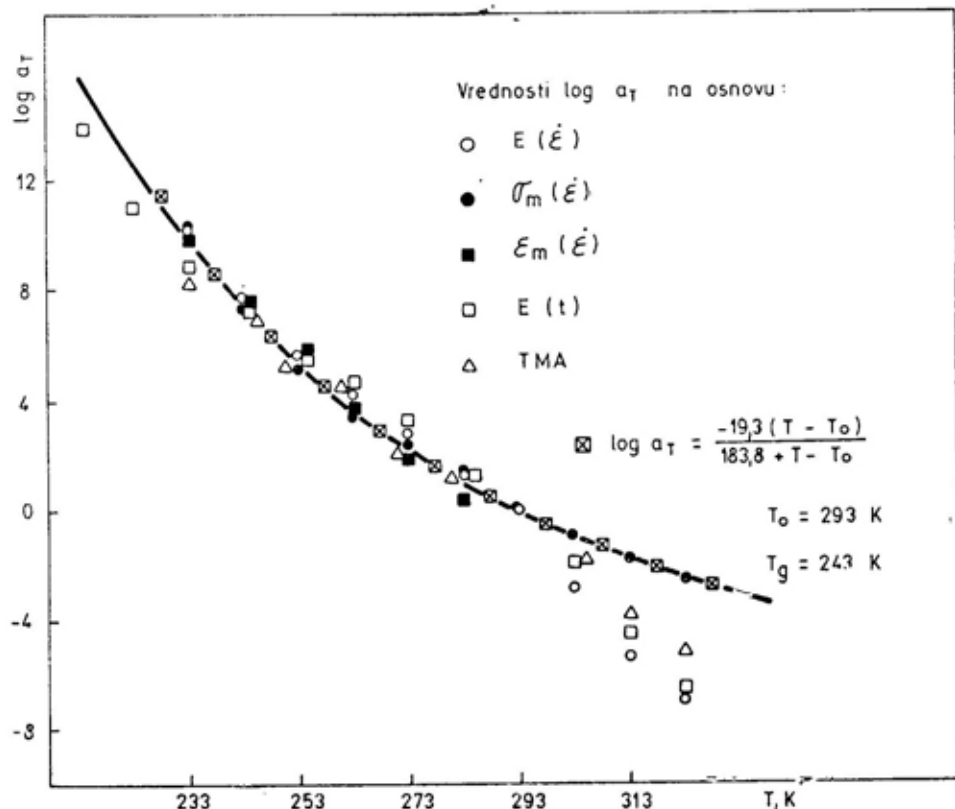
Na slikama 3 do 6 prikazane su i odgovarajuće teorijske zavisnosti fak-



Sl. 2 — Rezultati ispitivanja relaksacionog modula HTPB goriva

tora pomaka od temperature, izračunate na osnovu srednjih vrednosti konstanti C_1 i C_2 . Statističkom analizom utvrđeno je da srednji koeficijent varijacije za sva goriva ne prelazi 10%.

određivanja, pri merenju na termomehaničkom analizeru nije potrebno vršiti proračun podatljivosti, već se faktori pomaka mogu direktno određivati na osnovu temperaturno-vremenske



Sl. 3 — Zavisnost faktora pomaka NGR goriva od temperature

Može se zaključiti da su odstupanja u granicama eksperimentalne greške, i da vrednosti faktora pomaka ne bi trebalo da zavise od načina određivanja. To znači da se i na termomehaničkom analizeru mogu određivati faktori pomaka, što je, sa praktičnog stanovišta, vrlo značajno. Prednost ove metode je očigledna ako se uzmu u obzir ekonomičnost (mali uzorci, mala potrošnja energije i rashladne tečnosti), jednostavnost i preciznost instrumenta. Pošto je dokazano da vrednosti faktora pomaka ne zavise od načina

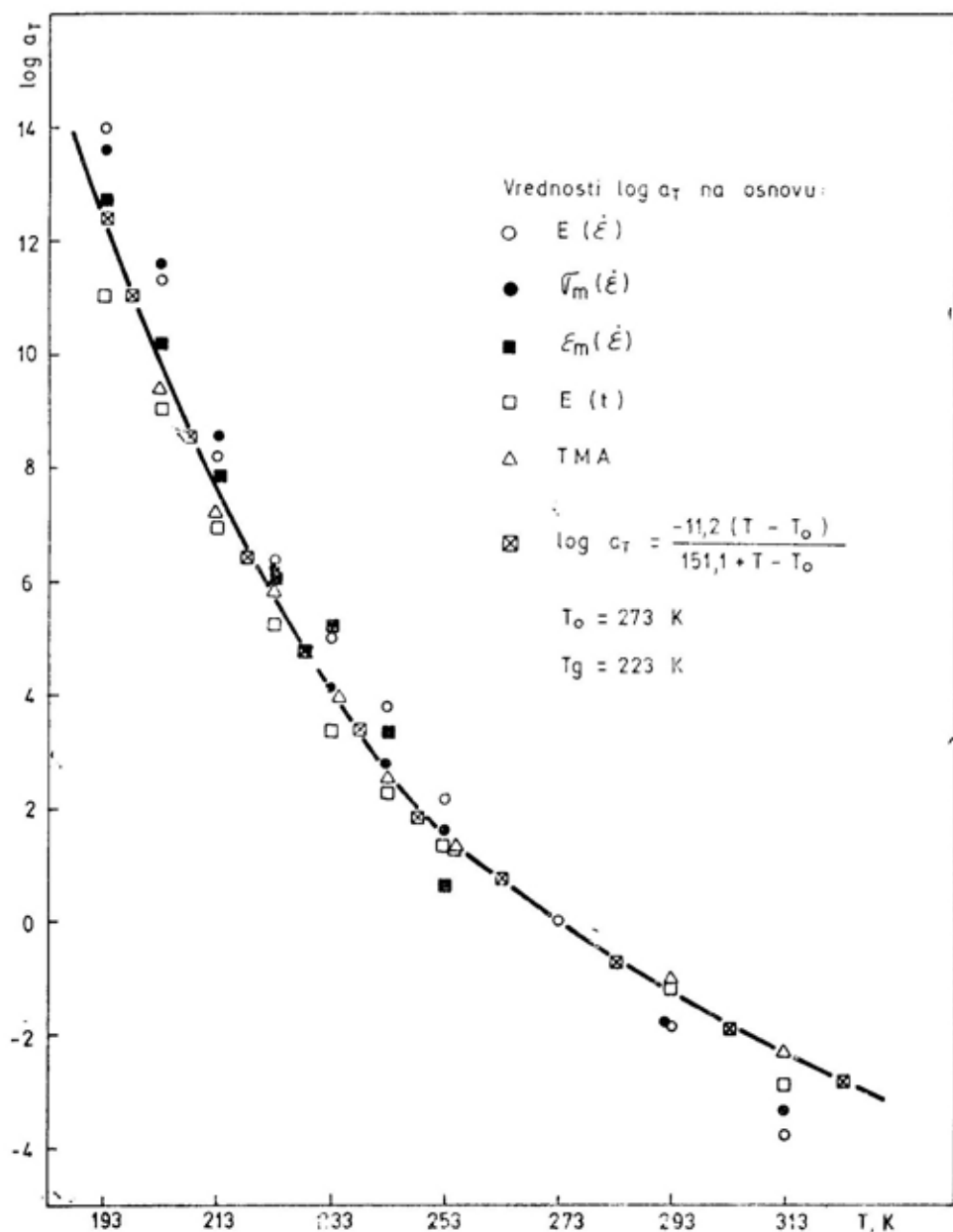
zavisnosti dubine penetracije kvarcne sonde u uzorak, čime se metoda dodatno pojednostavljuje.

Analiza odstupanja od originalnog WLF izraza

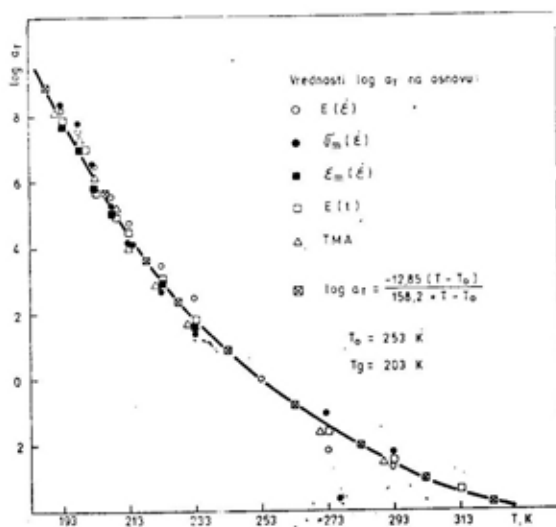
Interesantno je, i sa praktičnog stanovišta, analizirati »univerzalni karakter« empirijskih konstanti u WLF izrazu. Radi toga su na slici 7, za ispitivana goriva predstavljene temperaturne zavisnosti faktora pomaka na os-

novu eksperimentalno utvrđenih vrednosti konstanti C_1 i C_2 i na osnovu originalnih vrednosti koje su utvrdili autori WLF izraza. Očigledno, slaganje je zadovoljavajuće samo pri višim temperaturama, dok na nižim odstupanje

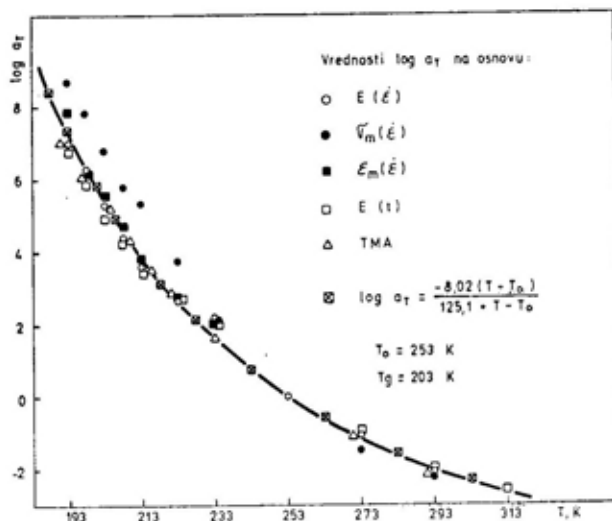
iznosi i do 50%. Ukoliko bi se u praksi koristile ove vrednosti, došlo bi do značajnih grešaka u prognoziranju ponašanja raketnih goriva pri različitim temperaturama i režimima deformisanja.



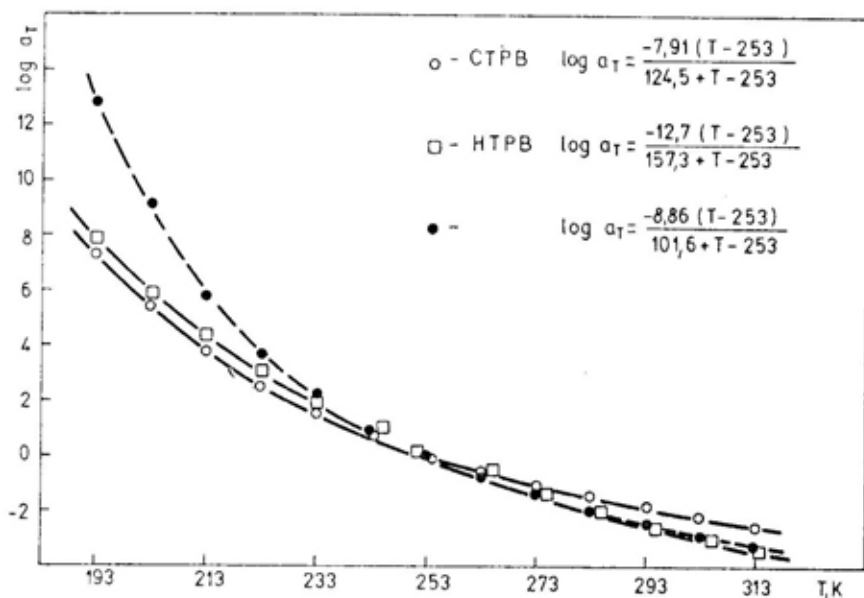
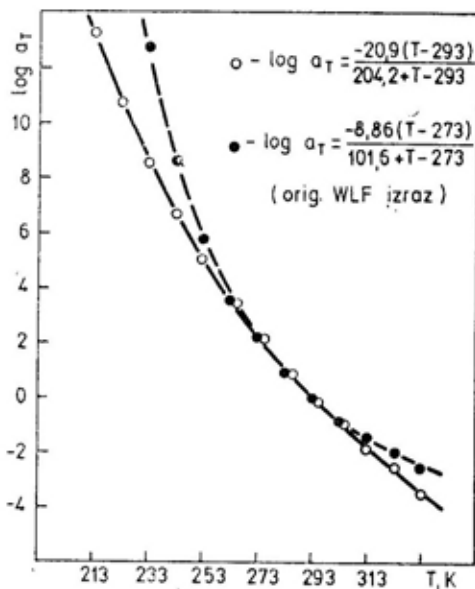
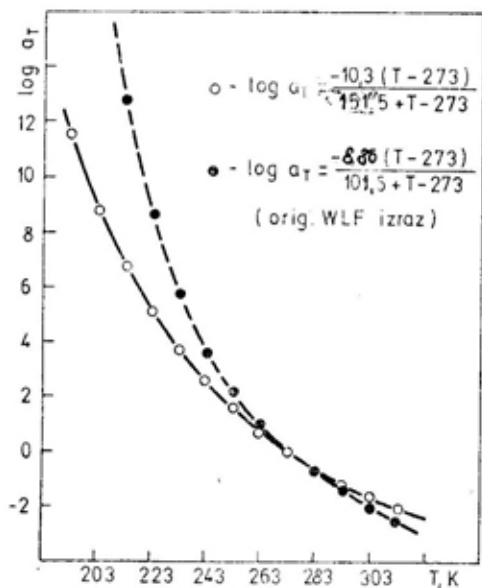
Sl. 4 — Zavisnost faktora pomaka PU goriva od temperature



Sl. 5 — Zavisnost faktora pomaka od temperature CTPB goriva



Sl. 6 — Zavisnost faktora pomaka HTPB goriva od temperature



Sl. 7 — Odstupanje faktora pomaka od originalnog WLF izraza
 a) PU gorivo; b) NGR gorivo; c) CTPB i HTPB gorivo

Zaključak

Merenjem slobodne zapremine ispitivanih raketnih goriva, na kojoj je teorijski i zasnovana WLF jednačina, dokazano je da ona nema konstantnu vrednost. Takođe je dokazano da konstanta B u Doolittleovom izrazu varira i da je različita od jedinice. Na osnovu toga može se zaključiti da empirijske konstante C_1 i C_2 u WLF jednačini ne-

maju univerzalni karakter, pa je potrebno da se određuju posebno za svaki tip goriva.

Rezultati merenja faktora pomaka različitim metodama pokazuju da njegova vrednost ne zavisi od načina određivanja. Imajući to u vidu, može se zaključiti da je najpogodnija metoda određivanja na termomehaničkom analizeru, s obzirom na njenu jednostavnost, ekonomičnost i pouzdanost.

Literatura:

- [1] Ferry, J. D.: *Viscoelastic Properties of Polymers*, J. Wiley and Sons, Inc., New York-London, 1961.
- [2] Nielsen, L. E.: *Mechanical Properties of polymers and Composites*, Marcel Dekker, Inc., New York, 1974.
- [3] Tobolsky, A. V.: *Properties and Structure of Polymers*, J. Wiley, New York, 1960.
- [4] Jeremić, R.: *Temperaturno-vremenska analogija u reološkoj karakterizaciji raketnih goriva*, doktorska disertacija, VVTŠ, Zagreb, 1991.
- [5] Fitzgerald, J. E., Huford, W. L.: *Handbook for The Engineering Structural Analysis of Solid Propellants*, CPIA pub. 214, 1971.
- [6] Rouse, P. E., *J. Chem. Phys.*, Vol. 21, 1272, 1953.
- [7] Williams, M. L., Landel, R. F., Ferry, J. D., *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 77, 3701, 1955.
- [8] Doolittle, A. K., *J. Appl. Phys.*, Vol. 22, 1471, 1951.
- [9] Simha, R., Boyer, R. F., *J. Chem. Phys.*, Vol. 37, 1003, 1962.
- [10] Sharma, S. C., Mandelkern, L., Stehling, F. C., *J. Polym. Sci.*, B10, 345, 1971.
- [11] Sperling, L. H.: *Introduction to Physical Polymer Science*, J. Wiley and Sons, New York, 1986.
- [12] Hirai, N., Eyring, H., *J. Polym. Sci.*, Vol. 37, 51, 1959.
- [13] Williams, M. L., *J. Chem. Phys.*, Vol. 29, 1396, 1958.

Dr Ljubinka V. Rajaković,
dipl. inž.
Tehnološko-metalurški
fakultet, Beograd
Mr Draško Milosavljević,
kapetan I klase, dipl. inž.
VP 9808, Beograd

MOGUĆNOSTI PRIMENE PIEZOELEKTRIČ- NIH SENZORA ZA DETEKCIJU EKSPLOZI- VA NA BAZI NITROAROMATIČNIH JEDINJENJA

UDC: 681.586:537.226.86

Rezime:

U radu je prikazano određivanje para nitroaromatičnih jedinjenja, pored ostalih i trinitrotoluola (TNT), piezoelektričnim senzorima u vazduhu. Postignuta je zadovoljavajuća osetljivost senzora, jer su određene vrlo niske koncentracije ispitivanih jedinjenja, i to na sobnoj temperaturi. Time se otvara put za primenu piezoelektričnih senzora kao detektora nitroaromatičnih jedinjenja. Krajnji cilj je konstrukcija portabl uređaja — detektora za otkrivanje prisustva eksploziva na bazi nitroaromatičnih jedinjenja u nekoj sredini, što bi znatno olakšalo rad na pronalaženju i uklanjanju eksplozivnih naprava.

Ključne reči: hemijski senzor, piezoelektrični senzor, nitroaromatična jedinjenja, trinitrotoluen.

POSSIBILITIES OF APPLICATION OF PIEZOELECTRIC SENSORS FOR THE DETECTION OF EXPLOSIVES BASED ON NITROAROMATIC COMPOUNDS

Summary:

Determination of nitroaromatic compounds vapours (trinitrotoluene (TNT) among others) in the air using piezoelectric sensors has been presented in the paper. Satisfactory sensor sensitivity has been achieved since very low concentrations of the examined compounds were determined even at room temperature. This opens possibilities to use piezoelectric sensors as detectors of nitroaromatic compounds. The final goal is to construct a portable device — detector for detecting the presence of explosives based on nitroaromatic compounds in a surrounding medium, which would make detecting and removing of explosive devices much easier.

Key words: chemical sensor, piezoelectric sensor, nitroaromatic compounds, trinitrotoluene.

Uvod

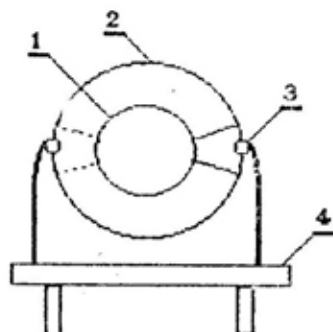
Neka nitroaromatična jedinjenja, a posebno trinitrotoluen (TNT) primenjuju se kao eksplozivna punjenja u bojevim glavama artiljerijskih i nekih raketnih projektila, te minsko-eksplozivnih sredstava. Tokom rata na prostorima prethodne Jugoslavije, a i drugde po svetu, rasuti su milioni protivpešadijskih mina u obeleženim i neobeležanim »minskim poljima«. Te mine, kojima je najčešće osnovno ili čak je-

dino punjenje TNT, odnele su do sada, i svakodnevno odnose, mnoge živote. Osoba koja preživi njihovo dejstvo ostaje težak invalid. Takođe, ova sredstva se koriste i u terorističke svrhe.

Zbog štetnosti i opasnosti koje predstavljaju, poslednjih godina porastao je interes za razvoj pogodnih analitičkih metoda za otkrivanje prisustva para nitroaromatičnih jedinjenja u vazduhu i uređaja za njihovu detekciju, što bi omogućilo jednostavnije pronalaženje i uklanjanje eksplozivnih mate-

rijala. U okviru toga, posebna pažnja i interes posvećen je izučavanju i primeni piezoelektričnih senzora (PES-a) zbog njihove velike osjetljivosti i selektivnosti u detekciji mnogih zagađivača u vazduhu, kao i zbog jednostavnosti, niske cene i mogućnosti izrade malih portabl uređaja — detektora.

Hemijski senzori, koji kao svoj osnovni elemenat imaju piezoelektrični kristal, nazivaju se piezoelektrični senzori. To su mikrogravimetrijski uređaji čiju promenu rezonantne frekvencije izaziva promena mase nastala interakcijom između analizirane hemijske vrste i hemijski aktivne prevlake na površini senzora [1—3].



Sl. 1 — Piezoelektrični senzor rezonantne frekvencije 9 MHz

1 — metalna elektroda; 2 — kvarcna pločica; 3 — električni kontakt; 4 — nosač sa keramičkom izolacijom

Smanjenje rezonantne frekvencije PES-a proporcionalno je povećanju mase koje nastaje sorpcijom ispitivane supstance, odnosno, povećanju njene koncentracije u vazduhu, Δc , u skladu sa Saurbrejevom jednačinom [1]:

$$\Delta c = k \cdot \Delta F \quad (1)$$

gde je:

ΔF — promena rezonantne frekvencije,

k — konstanta koja uključuje osnovnu rezonantnu frekvenciju kri-

stala (najčešće 5 ili 9 MHz), hemijski aktivnu površinu kristala i faktor konverzije mase u koncentraciju ispitivane supstance.

Na osnovu niza istraživanja [1, 4, 5, 6] utvrđeno je da je teorijska granica određivanja mase ovim senzorima približno 10^{-12} g, a eksperimentalno je dokazano da PES rezonantne frekvencije 9 MHz smanjuje frekvenciju za približno 400 Hz ukoliko se na površini kristala sorbuje približno 1 μ g mase ispitivane supstance.

Hemijska prevlaka je izuzetno važan elemenat PES-a koji ima funkciju da obezbedi adekvatnu osjetljivost i selektivnost senzora prema određenoj supstanci ili grupi jedinjenja u vazduhu. Nalazi se na površini senzora i prilikom određivanja supstance stupa u hemijsku interakciju koja može biti različitog karaktera. Suština svih istraživanja sa ovim tipom senzora je pronaći dovoljno osjetljivu i selektivnu prevlaku za detekciju ispitivane supstance ili grupe jedinjenja.

Eksperiment

Ispitivana nitroaromatična jedinjenja u ovom radu su nitrobenzen (NBL), o-nitrotoluen (o-MNT), dinitrobenzen (DNB), dinitrotoluen (DNT) i trinitrotoluen (TNT).

Eksperimenti su izvedeni na sobnoj temperaturi (20°C), a za niskoisparljiva nitroaromatična jedinjenja (DNB, DNT i TNT) i na temperaturi od 60°C. Podaci o naponu para i koncentraciji ispitivanih jedinjenja delom su preuzeti iz literature [7, 8], a delom izračunati primenom R. E. COX — C. ANTOINE-ove jednačine [9, 10].

U ovom radu korišćeni su piezoelektrični kristali čiji je proizvođač Leigh Instruments Ltd, Don Mills, Ontario, Canada. Njihova rezonantna frekvencija je 9 MHz, a elektrode od zlata, srebra i aluminijuma. Pre ispitiva-

nja nitroaromatičnih jedinjenja PES-om u gasnoj fazi potrebno je na površinu senzora naneti hemijski aktivnu prevlaku. Da bi se to moglo učiniti, prethodno se pripreme rastvori prevlaka u odgovarajućim organskim rastvaračima koncentracije 1 mg/ml. Zatim se mikrošpicom od 10 μ l ravnomerno nakapava taj rastvor na obe površine kristala. Nakon nanošenja rastvora materijala prevlaka na njihovu površinu kristali se suše 24 sata u eksikatoru, pri čemu rastvarač isparava.

Posle sušenja na površini senzora ostaje tanak film materijala hemijske

ja su korišćena kao hemijske prevlake u ovom radu dat je u tabeli 1.

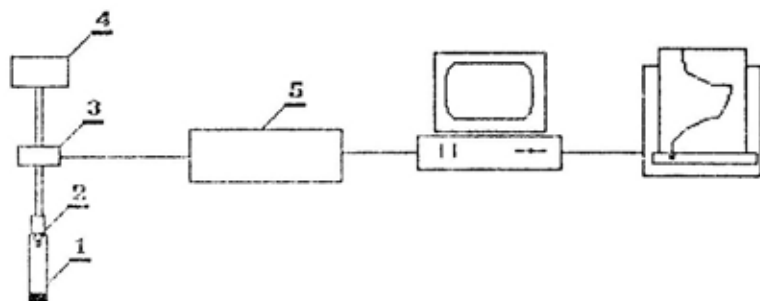
Određivanje para nitroaromatičnih jedinjenja u vazduhu PES-om vršeno je u statičnom i protočnom gasnom sistemu.

Statični gasni sistem prikazan je na slici 2. Koncentrisanje ispitivanog nitroaromatičnog jedinjenja postiže se u staklenoj epruveti zapremine 100 cm^3 , u koju je smešteno 10 g uzorka. Za one supstance koje imaju nisku vrednost napona pare potrebno je izvesno vreme (oko 1 sat) da uspostave ravnotežu sa parnom fazom, odnosno, da se u zapre-

Tabela 1

Pregled jedinjenja koja se koriste kao prevlake

Oznaka	Hemijski naziv	Najpogodniji rastvarač
TX-100	Polietilenglikol - p - (1,1,3,3-tetrametil butil) fenil etar	etanol
PVA	Polivinilalkohol (-CH ₂ CHOH-) _n	destilovana voda
PVP	Polivinilpirolidon	etanol
TNT	Trinitrotoluen	acetone
DNT	Dinitrotoluen	acetone
CENTRALIT I	dietil-difenil karbamid	acetone



Sl. 2 — Statični sistem za ispitivanje nitroaromatičnih jedinjenja PES-om u gasnoj fazi

1 — staklena epruveta sa uzorkom; 2 — PES; 3 — oscilator; 4 — ispravljач napona; 5 — merač frekvencije

prevlake. Time je PES spreman za određivanje prisustva ispitivane supstance u gasnoj fazi. Pregled jedinjenja ko-

mini vazduha iznad njih stvori koncentracija njihovih para koja odgovara naponu pare na temperaturi eksperimen-

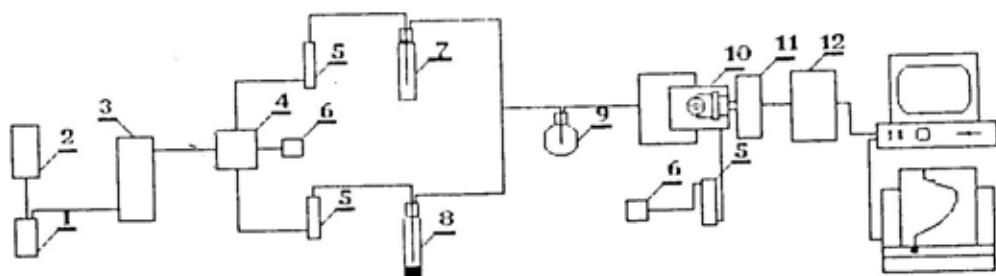
ta. Nakon toga, u epruvetu sa uzorkom uvodi se senzor kojim treba pažljivo rukovati jer se radi o osetljivom uređaju. Hemijska prevlaka na površini kristala dolazi u dodir sa parama ispitivane supstance, pri čemu se odvija proces određenih hemijskih interakcija između njih, što dovodi do adekvatnog odziva senzora. Odziv senzora utvrđuje se pomoću sistema za merenje, snimanje i prikazivanje rezultata, a meri se pomoću oscilatora i merača frekvencije. Merač frekvencije je direktno spojen sa personalnim računarom Sunix 8088 XT-IBM koji je opremljen odgovarajućim akvizicijskim programom za obradu i grafičko prikazivanje rezultata.

Protočni gasni sistem prikazan je na slici 3.

Protok vazduha usmerava se pomoću rotometra i mehaničkog ventila. U radu je korišćen protok od $50 \text{ cm}^3/\text{min}$, jer se na osnovu dosadašnjih ispitivanja smatra za najpogodniji [4]. Koncentrisanje ispitivane supstance obavlja se na isti način kao i kod statičnog sistema. U toku ispitivanja senzor je smešten u staklenu ćeliju. Cev za dovod vazduha se račva, tako da vazduh obliva kristal sa obe strane, što omogućava bolji kontakt prevlake i para ispitivanog jedinjenja, te omogućuje brži i kvalitetniji odziv senzora.

Rezultati i diskusija

Rezultati određivanja nitroaromatičnih jedinjenja piezoelektričnim senzorima u gasnoj fazi prikazani su u ta-



Sl. 3 — Protočni sistem za ispitivanje nitroaromatičnih jedinjenja PES-om u gasnoj fazi

1 — pumpa za vazduh; 2 — filter; 3 — odvlaživač; 4 — ventil; 5 — rotometar; 6 — filter sa aktivnim ugljem; 7 — ispiralica bez uzorka; 8 — ispiralica sa uzorkom; 9 — prazna ispiralica za ublažavanje vazдушnih udara; 10 — PES; 11 — oscilator; 12 — merač frekvencije

Sastoji se od tri celine:

— dinamičke aparature za simultano i kontinualno generisanje čistog vazduha, sa mogućnošću njegovog usmeravanja direktno na senzor ili prvo kroz ispiralicu u kojoj je izvršeno koncentrisanje uzorka, pa onda na senzor;

— staklene ispiralice za koncentrisanje para ispitivanog jedinjenja do vrednosti napona pare na datoj temperaturi;

— sistemi za merenje, snimanje i prikazivanje rezultata.

beli 2 (odziv senzora) i tabeli 3 (osetljivost senzora).

Organske prevlake primenjene u ovom radu TNT, DNT i CENTRALIT I izabrane su zbog svoje hemijske sličnosti sa ispitivanim supstancama po principu »slično se rastvara u sličnom«. Međutim, one nisu pokazale očekivanu osetljivost i selektivnost prema nitroaromatičnim jedinjenjima. DNT se pokazao kao izrazito nestabilna prevlaka, pa se odziv senzora, modifikovanog ovom prevlakom, ili uopšte nije mogao

meriti ili se dobijene vrednosti nisu mogle smatrati pouzdanim. CENTRALIT I je pokazao nedovoljnu osetljivost prema nitroaromatičnim jedinjenjima da bi izazvao posebno interes-

ke na površini senzora. Selektivnost prevlake TNT je, takođe, nedovoljna, jer su vrednosti odziva senzora na različite supstance sa visokim naponom pare približne, a isto se dešava i sa do-

Tabela 2

Odziv piezoelektričnog senzora, modifikovanog različitim prevlakama, prilikom određivanja para nitroaromatičnih jedinjenja u statičnom gasnom sistemu ($t=20^{\circ}\text{C}$)

Jedinjenje	Koncentracija (mmol/dm ³) (µg/L)		Odziv senzora -ΔF (Hz)				
			Prevlake				
			PVP	PVA	TNT	TX-100	C-1
MNB	$8,2 \times 10^{-3}$	1 010	460	370	760	3 500	650
DNB	$9,6 \times 10^{-3}$	16	25	20	16	60	—
MNT	$5,5 \times 10^{-3}$	748	400	300	400	2 000	450
DNT	$4,2 \times 10^{-4}$	77	70	40	20	150	—
TNT	$1,2 \times 10^{-7}$	0,03	15	20	40	120	10

Tabela 3

Osetljivost piezoelektričnog senzora, modifikovanog različitim prevlakama, prema ispitivanim jedinjenjima u statičnom gasnom sistemu ($t=20^{\circ}\text{C}$)

Jedinjenje	Koncentracija (mmol/dm ³) (µg/L)		Osetljivost senzora -ΔF/c (Hz L/µg)				
			Prevlake				
			PVP	PVA	TNT	TX-100	C-1
MNB	$8,2 \times 10^{-3}$	1 010	0,45	0,36	0,75	3,46	0,64
DNB	$9,6 \times 10^{-3}$	16	1,56	1,25	1,00	3,75	—
MNT	$5,5 \times 10^{-3}$	748	0,53	0,40	0,53	2,67	0,60
DNT	$4,2 \times 10^{-3}$	77	0,91	0,52	0,26	2,00	—
TNT	$4,2 \times 10^{-7}$	0,03	500	666	1 330	4 000	333

vanje i da bi se uopšte mogla analizirati selektivnost tako modifikovanog senzora. Od organskih prevlaka jedino je TNT pokazao zadovoljavajuću osetljivost prema ispitivanim supstancama, ali ostaju nerešeni problemi vezani za stabilnost ove prevlake i način njenog nanošenja na površinu kristala, jer se metodom nakapavanja mikrošpicom ne dobija ravnomerna debljina prevla-

bijenim vrednostima za niskoisparljiva nitroaromatična jedinjenja.

Polimerne prevlake primenjene u ovom radu — polietilenglikol — p — (1, 1, 3, 3 — tetrametil butil) fenil etar TRITON TX-100, polivinilalkohol i polivinilpirolidon — pokazale su primernu stabilnost i osetljivost prema nitroaromatičnim jedinjenjima. Polivinilalkohol se, kao prevlaka, ponašao izuzetno

stabilno, a pokazao je i kvalitetnu osetljivost, reverzibilnost i reproduktivnost odziva prema ispitivanim supstancama. Polivinilpirolidon je, takođe, pokazao kvalitetna svojstva kao prevlaka u svim uslovima ispitivanja. Slabu osetljivost je pokazao prema niskoisparljivim nitroaromatičkim jedinjenjima u protočnom gasnom sistemu, a zapaženo je i duže vreme oporavka senzora nakon prestanka izlaganja dejstvu ispitivane supstance nego što je to slučaj sa drugim prevlakama.

TRITON TX-100 se pokazao kao najefikasnija hemijska prevlaka primenjena za određivanje nitroaromatičnih jedinjenja u ovom radu, jer je izuzetno stabilna i osetljiva prema svim ispitivanim nitroaromatičnim jedinjenjima i u statičnom i u protočnom gasnom sistemu.

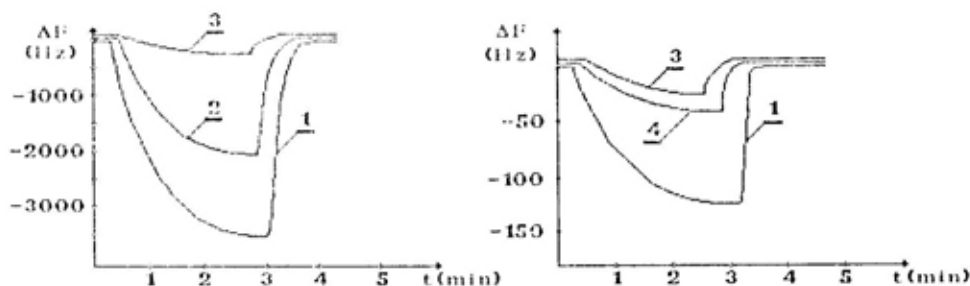
Osnovne karakteristike odziva senzora, modifikovanog ovom prevlakom, gotovo su idealne. Za kratko vreme dobija se maksimalni odziv koji se zadržava na približno istom nivou sve vreme izlaganja parama kontaminanta, a vreme oporavka senzora, nakon toga, takođe je vrlo kratko. Isto tako, prisutna je i kvalitetna reproduktivnost odziva, što znači da senzor reaguje na

jedinjenja u statičnom i protočnom gasnom sistemu.

Osetljivost ovakvog senzora je zadovoljavajuća u svim uslovima ispitivanja, a najveća je kod supstanci sa najnižom vrednosti napona pare. Vrlo je značajno da su se, primenom PES-a modifikovanog prevlakom TX-100, uspele detektovati i tako male koncentracije para ispitivanog jedinjenja kao što je 0,03 mg/L kod uzorka TNT na 20°C. Ako se zna da je dozvoljena koncentracija TNT u vazduhu 1,5 µg/L, time je prekoračen taj prag detekcije, što ima veliki i tehnički i praktični značaj.

Zaključak

Postignuta osetljivost i selektivnost rada senzora zadovoljava u sprovedenim eksperimentalnim uslovima analitičke i tehničke potrebe određivanja nitroaromatičnih jedinjenja, ali je to i dalje jedan od ozbiljnijih problema koji ograničavaju širu primenu PES-a. Stabilnost rada senzora, te reverzibilnost i reproduktivnost odziva senzora omogućuju višekratnu upotrebu PES-a za određivanje nitroaromatičnih jedinjenja u gasnoj fazi, ali, jasno, u ograničenom vremenskom roku upotrebe,



Sl. 4 — Aktivnost prevlake TRITON TX-100 prema nitroaromatičnim jedinjenjima u statičnom (levo) i protočnom (desno) gasnom sistemu ($t=20^{\circ}\text{C}$)
1 — NBL; 2 — o-MNT; 3 — TNT; 4 — DNT

isti način svaki put kada se izloži dejstvu određenog uzorka. Na slici 4 grafički je predstavljena osetljivost ove prevlake na različita nitroaromatična

koji, prema dosadašnjim rezultatima, ne bi smeo biti duži od 30 dana.

Osnovni pravac daljih istraživanja u ovoj oblasti treba da bude usmeren

ka izboru hemijskih prevlaka još osjetljivijih i selektivnijih prema nitroaromatičnim jedinjenjima, čime bi se dobili bolji rezultati određivanja. Pored toga, treba rešiti i neke probleme konstrukcije samog uređaja za detekciju. Tada bi se moglo preći na eksploataci-

ona ispitivanja primene takvog uređaja, kojima bi se odredile granice njegove praktične upotrebljivosti i, na osnovu toga, konkretni zadaci daljih istraživanja u oblasti detekcije nitroaromatičnih jedinjenja piezoelektričnim senzorima u gasnoj fazi.

Literatura:

- [1] Sauerbrey, G.: Verwendung von Schwingquarzen zur Wagung dünner Schichten und zur Microwagung, Zeitschrift für Physik, 155, 206 — 222, 1959.
- [2] King, W. H.: Piezoelectric Sorption Detector, Anal. Chem., 36, 1735 — 1739, 1964.
- [3] Stockbridge, C. D., Behrnt, K. H. (ed): Vacuum Microbalance Techniques, 5. Plenum Press, New York, 193 — 206, 1966.
- [4] Rajković, Lj., Cavić — Vlasak, B.: Mogućnost primene akustičnih senzora za detekciju eksploziva i njihovih komponenti, Naučno-tehnički pregled, 42, 2, 3 — 7, 1992.
- [5] Cavić — Vlasak, B.: Proučavanje primene piezoelektričnih senzora u analitičkoj hemiji, doktorska disertacija, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1992.
- [6] Milanko, O.: Teorijske i praktične mogućnosti razvoja piezoelektričnih senzora za određivanje para organofosfornih jedinjenja, magistrski rad, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1991.
- [7] Obradović, M. i dr.: Hemijski i fizički podaci i veličine, Rad, Beograd, 1987.
- [8] Stojanović, O., Stojanović, N., Kosanović, D.: Štetne i opasne materije, Rad, Beograd, 1984.
- [9] Rašajski, S., Petrović — Đakov, D.: Priručnik za približno izračunavanje osobina gasova i tečnosti, Minerva, Subotica — Beograd, 1974.
- [10] Đorđević, S. i dr.: Fizičko-hemijske metode, Rad, Beograd, 1985.
- [11] Maksimović, P.: Eksplozivne materije, Vojno-izdavački zavod, Beograd, 1985.
- [12] Krzysztof, Ren: Piezoelectric sensor sensitive to nitrobenzene based on a cyclohexanone-formaldehyde coating, Anal. Chem. Acta, 286, 197 — 203, 1994.

OCENA PARAMETRA OBLIKA VEJBULOVOG ZAKONA RASPODELE PREKO KOEFICIJENTA VARIJACIJE

UDC: 519.248:519.213

Rezime:

Data je metoda za procenjivanje parametara funkcije pouzdanosti, kada je u pitanju dvoparameterska Vejbulova raspodela koja se često koristi kao model sa širokim mogućnostima za aproksimaciju stvarne raspodele. Metoda koristi koeficijent varijacije koji zavisi samo od parametra oblika β . Umesto zaobilaznog računa preko vrednosti gama funkcija, predložen je brz način za izračunavanje preko stepene funkcije koja aproksimira vezu parametra β i koeficijenta varijacije. Pri tome se postiže veoma zadovoljavajuća tačnost što je ilustrovano praktičnim primerom.

Ključne reči: funkcija pouzdanosti, koeficijent varijacije, standardna devijacija, srednja vrednost, parametri distribucije, gama funkcija, slučajna promenljiva.

ESTIMATION OF THE TWO-PARAMETER WEIBULL DISTRIBUTION PARAMETERS USING THE COEFFICIENT OF VARIATION

Summary:

This paper presents a method for estimating the reliability function parameters when reliability function is the 2-parameter Weibull regression. This model is often used in a reliability analysis in wide variety of situations to approximate successfully many empirical distributions, especially for the purpose of accelerated exte tests. The method supposes that calculation of estimator for β can be performed by fusing the ratio of standard deviation to mean voluo of the random variable. This ratio depends only on the parameter β and that dependence can be presented by an approximative function. The application of this method is illustrated by an example.

Key words: reliability function, coeficient of variation, standard deviation, mean value, distribution parameters, gama function, random variable.

Uvod

Pri statističkim analizama, posebno iz pouzdanosti tehničkih proizvoda, važnu ulogu ima zakon raspodele slučajne veličine koja se statistički posmatra. U opštem slučaju ovaj zakon se ne poznaje, pa se na osnovu ispitivanja mora proceniti na osnovu statističkih podataka.

Postoje i takvi zakoni raspodele koji pokrivaju šire područje raznih raspodela, naime, koji se u tom području preklapaju sa drugim raspodelama. Takav je i Vejbulov zakon raspodele. Posmatraće se slučaj dvo-parameterske Vejbulove raspodele, na primer vremena rada do otkaza nekog proizvoda za koji funkcija pouzdanosti (verovatnoća da će proizvod bez otkaza i propisno o-

bavljati svoju namenu duže od vremena t) ima oblik

$$R(t) = \exp(-\gamma t^\beta) \quad (1)$$

gde je:

β — parametar oblika,

γ — parametar razmere.

Za razne vrednosti parametra oblika vremenski oblik funkcije $R(t) = f(t)$ može da poprimi oblike gama-raspodele, normalne raspodele, a za $\gamma = 1$ svodi se na eksponencijalnu raspodelu. Zbog svoje »elastičnosti«¹ vrlo je pogodna za mnoge praktične slučajeve, a naročito da zameni nepoznatu stvarnu raspodelu. Sem toga, u slučaju proizvoda koji relativno brzo stare ili se intenzivno habaju ova raspodela se dobro primenjuje.

Pokazatelji koji karakterišu slučajnu veličinu jesu srednja vrednost, standardna devijacija i koeficijent varijacije. Definisani su izrazima

$$T_{sr} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (2)$$

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - T_{sr})^2} \quad (3)$$

$$v_t = \frac{\sigma_t}{T_{sr}} \quad (4)$$

gde su T_{sr} , σ_t i v_t srednja vrednost, standardna devijacija i koeficijent varijacije vremena rada do otkaza respektivno, a t_i je vreme do otkaza.

T_{sr} i σ_t imaju dimenziju slučajne veličine t_i , a v_t je bezdimenzionalna veličina. Njena vrednost se kreće od 0 do 1 i karakteristična je za razne raspodele. Tako je do vrednosti 0,33 obično u pitanju normalna raspodela, od 0,4 do 1 Vejbulova, a za $v = 1$ eksponencijalna raspodela [2]. Kada je u pitanju neprekidna slučajna veličina (kao što je vreme t_i), koeficijent varijacije u slučaju

dvoparametarske Vejbulove raspodele ima oblik

$$v = \sqrt{\frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right)}{\left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right]^2} - 1} \quad (5)$$

gde je sa Γ predstavljen indeks gama-funkcije.

Određivanje parametra oblika Vejbulove dvoparametarske raspodele

Za uspešnu statističku analizu neophodno je poznavati parametre raspodele. Za Vejbulovu raspodelu to su parametri β i γ . Ovi parametri mogu se na razne načine oceniti preko statističkih podataka [3] npr. po metodi maksimalnog poverenja, metodom momenata, na osnovu empirijske funkcije raspodele, itd. Postoje razni prilazi u ovoj metodologiji [1].

Razmatraće se jednostavna i direktna metoda koeficijenta varijacije. Iz izraza (5) vidi se da za slučaj dvoparametarske raspodele koeficijent varijacije vremena rada do otkaza zavisi samo od parametra oblika β .

Preko vrednosti gama-funkcije $\Gamma(1 + 1/\beta)$ i $\Gamma(1 + 2/\beta)$ može se indirektno, pomoću tabela za vrednosti gama-funkcije, izračunati za poznatu vrednost koeficijenta varijacije v ona vrednost za β za koji je zadovoljen izraz (5). To nije jednostavan put, a ni praktičan za primenu računara. Zbog toga će biti prikazan jedan približan metod koji sa dovoljnom tačnošću dovodi brzo do rešenja, i posebno je upotrebljiv za ugradnju u primenjeni statistički softver. Pretpostaviće se da se umesto izraza (5) može prikazati koeficijent varijacije preko neke druge funkcije. Neka je to stepena funkcija oblika

$$\beta = a v^b \quad (6)$$

gde su a i b konstante. Ove konstante se na osnovu više poznatih vrednosti za β i ν mogu odrediti po metodi najmanjih kvadrata. Za tu svrhu prethodno će se izraz (6) logaritmovanjem transformisati u oblik

$$\ln \beta = \ln a + b \ln \nu \quad (7)$$

$$\delta = \left| \frac{\beta^* - \beta}{\beta} \right| \cdot 100 \quad (11)$$

dobija se procentualna greška. Vrednosti za β^* i grešku δ date su u tabeli 1. Vidi se da je za dijapazon β iz tabele 1 maksimalna greška manja od 0,73%, što je veoma dobra tačnost ako se uz-

Tabela 1

ν	0,91022	0,77572	0,67897	0,60548	0,54745	0,50029	0,46108	0,42791	0,39942	0,37466
β	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9
β^*	1,092	1,301	1,506	1,707	1,906	2,104	2,301	2,497	2,69	2,89
δ %	0,730	0,087	0,378	0,417	0,336	0,200	0,048	0,107	0,252	0,383

U tabeli 1 dato je 10 vrednosti za β i njima odgovarajućih vrednosti za ν , po izrazu (5).

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N (\ln \nu_i - X) (\ln \beta_i Y)}{\sum_{i=1}^N (\ln \nu_i - X)^2} \quad (8)$$

$$a = \exp(Y - bX) \quad (9)$$

ovde su

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^N \ln \beta_i}{N} \quad \text{i} \quad X = \frac{\sum_{i=1}^N \ln \nu_i}{N}$$

Za vrednosti niza β_i , ν_i , prema tabeli 1, dobija se

$$a \approx 0,985$$

$$b = -1,096$$

Na osnovu ovakvih podataka izraz (6) dobija oblik

$$\beta = 0,985 \nu^{-1,096}$$

Ako se za razne vrednosti ν iz tabele 1 izračuna 10 vrednosti β^* i na osnovu njih greška δ

me statistička tačnost koja potiče od drugih faktora.

U praksi se ova greška može čak i umanjiti ako se parametri a i b odrede za neki uži dijapazon (na primer za β od 1,05 do 0,5).

U praksi se odabere n ispitnih primeraka proizvoda i na osnovu normalnih ili skraćenih [1] ispitivanja odredi statistički niz vremena rada do otkaza. Na osnovu statističkih podataka odrede se srednja vrednost T_{sr} i standardna devijacija, po izrazima (2) i (3), i na osnovu njih koeficijent varijacije ν' po izrazu (4).

Sada se po izrazu (10) izračuna ocena parametra β Wejbulove raspodele vremena rada do otkaza. Ako ovako izračunato β izlazi izvan područja β iz tabele 1 onda se po opisanoj metodologiji nađu za drugo područje β (koje obuhvata i približnu ocenu) nove konstante a i b i onda se odredi preciznija vrednost ocenjenog parametra.

Kada se po opisanoj metodi odredi vrednost parametra oblika β lako se izračuna i vrednost parametra razmere γ iz izraza za srednje vreme rada do otkaza. Za Wejbulovu dvoparametarsku

raspodelu za koju važi izraz za funkciju pouzdanosti (1) izraz glasi

Iz izraza (12) parametar razmere se računa kao

$$T_{sr} = \frac{1}{\gamma^{\beta}} \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \quad (12)$$

$$\gamma = \left[\frac{\Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)}{T_{sr}} \right]^{\beta} \quad (13)$$

Tabela 2

p	$\Gamma(p)$	p	$\Gamma(p)$	p	$\Gamma(p)$	p	$\Gamma(p)$	p	$\Gamma(p)$
1,01	0,99433	1,21	0,91558	1,41	0,88676	1,61	0,89468	1,81	0,93408
1,02	0,98884	1,22	0,91311	1,42	0,88636	1,62	0,89592	1,82	0,93685
1,03	0,98355	1,23	0,91075	1,43	0,88604	1,63	0,89724	1,83	0,93969
1,04	0,97844	1,24	0,90852	1,44	0,88581	1,64	0,89864	1,84	0,94261
1,05	0,97350	1,25	0,90640	1,45	0,88566	1,65	0,90012	1,85	0,94561
1,06	0,96874	1,26	0,90440	1,46	0,88560	1,66	0,90167	1,86	0,94868
1,07	0,96415	1,27	0,90250	1,47	0,88503	1,67	0,90330	1,87	0,95184
1,08	0,95973	1,28	0,90072	1,48	0,88575	1,68	0,90500	1,88	0,95507
1,09	0,95546	1,29	0,89904	1,49	0,88595	1,69	0,90678	1,89	0,95838
1,10	0,95135	1,30	0,89747	1,50	0,88623	1,70	0,90864	1,90	0,96177
1,11	0,94740	1,31	0,89600	1,51	0,88659	1,71	0,91057	1,91	0,96523
1,12	0,94359	1,32	0,89464	1,52	0,88704	1,72	0,91258	1,92	0,96877
1,13	0,93993	1,33	0,89338	1,53	0,88757	1,73	0,91467	1,93	0,97240
1,14	0,93642	1,34	0,89222	1,54	0,88817	1,74	0,91683	1,94	0,97640
1,15	0,93304	1,35	0,89115	1,55	0,88887	1,75	0,91906	1,95	0,97988
1,16	0,92980	1,36	0,89018	1,56	0,88964	1,76	0,92137	1,96	0,98374
1,17	0,92670	1,37	0,88931	1,57	0,89049	1,77	0,92376	1,97	0,98768
1,18	0,92373	1,38	0,88854	1,58	0,89142	1,78	0,92623	1,98	0,99171
1,19	0,92089	1,39	0,88785	1,59	0,89243	1,79	0,92877	1,99	0,99581
1,20	0,91817	1,40	0,88726	1,60	0,89352	1,80	0,93138	2,00	1,00000

Za izračunavanje po izrazu (13) treba poznavati vrednosti gama-funkcije $\Gamma(1+1/\beta)$. Pošto se ove vrednosti ne daju tako često u statističkoj literaturi, u tabeli 2 su date vrednosti gama-funkcije $\Gamma(p)$ za vrednosti parametra p na 2 decimale od 1,00 do 2,00.

Poznato je da za gama-funkciju važi relacija

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

pomoću koje se mogu lako izračunati vrednosti funkcije za parametre p izvan onih koje su date u tabeli 2.

Praktičan primer:

Dato je 25 vremena rada do otkaza nekog proizvoda prikazanih u tabeli 3. Prema podacima iz tabele izračunavaju se po izrazima (2, 3, 4) sledeće vrednosti:

$$\beta = 0,985 \cdot 0,72165^{-1,096} = 1,408$$

Preko izraza (13) izračuna se i vrednost ocene parametra razmere γ

$$\begin{aligned} \gamma &= \left[\frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{1,408}\right)}{350,22} \right]^{1,408} = \\ &= \left(\frac{0,91062}{350,22} \right)^{1,408} = 2,3 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

Zaključak

S obzirom na značaj određivanja zakona raspodele i njenih parametara pri analizama u oblasti pouzdanosti tehničkih proizvoda proučavaju se metode za brzo proračunavanje ovih parametara sa potrebnom tačnošću. Kao

Tabela 3

R. br.	Ti [h]	R. br.	Ti [h]	R. br.	Ti [h]	R. br.	Ti [h]	R. br.	Ti [h]
1	475,56	6	117,32	11	190,44	16	448,85	21	338,39
2	420,86	7	380,18	12	304,78	17	23,27	22	418,87
3	1093,65	8	169,75	13	141,50	18	154,42	23	366,01
4	386,95	9	738,74	14	860,22	19	217,33	24	141,74
5	113,94	10	566,17	15	331,47	20	129,04	25	226,01

$$T_{sr} = \frac{1}{25} \sum_{i=1}^{25} t_i = 350,22 \text{ h}$$

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{24} \sum_{i=1}^{25} (t_i - T_{sr})^2} = 252,74 \text{ h}$$

$$v_t = \frac{\sigma_t}{T_{sr}} = 0,72165$$

Prema ovoj vrednosti za v_t izračuna se po izrazu (10) ocena za parametar oblika β Weibulove raspodele

prvi zadatak postavlja se određivanje zakona raspodele slučajne veličine. Pod pretpostavkom da važi dvo-parametarski Weibulov zakon raspodele znatno se pojednostavljuje prilaz. Ova pretpostavka ima opravdanje u osobinama Weibulove raspodele, zbog čega se u praksi sve više uvažava.

Da bi se proračuni za procenu parametara Weibulove raspodele pojedno-

stavili uvedena je stepena funkcija za aproksimaciju relacije koja povezuje parametar oblika β i koeficijent varijacije v . Data aproksimacija, pored svoje

jednostavnosti, omogućava i malu relativnu grešku. Predložen način veoma je pogodan za upotrebu u primenjenim statističkim softverima.

Literatura:

[1] Tomović, S.: Nove metode za procenjivanje parametara funkcije pouzdanosti sistema, Beograd, Naučno-tehnički pregled, Vol XXXII, br. 2 1982.

[2] Mihlin, V. M.: Prognozirovanije tehničkog sastojanja mašina, Moskva, Kolos, 1976.

[3] Petrić, J., Jevtić, M., Stojanović, V.: Analiza pouzdanosti, Beograd, Savremena administracija, 1979.

ANALIZA I PRIMENA DVOPARAMETAR- SKE VEJBULOVE RASPODELE ZASEČENE SA LEVE STRANE

UDC: 519.248:519.676

Rezime:

Polazeći od izraza za dvoparametarsku Vejbulovu raspodelu, izvedeni su izrazi za osnovne funkcije ove raspodele zasečene sa leve strane. Takođe, izvedeni su izrazi za tačkaste ocene parametara i karakteristika ove raspodele. Valjanost i primena izvedenih izraza proveravana je pomoću računara na skupovima pseudoslučajnih brojeva koji su direktno generisani kao brojevi koji se podvrgavaju dvoparametarskoj Vejbulovoj raspodeli zasečenoj sa leve strane sa parametrima: l — parametar zaseka, b — parametar skale i c — parametar oblika, ili kao brojevi koji se podvrgavaju dvoparametarskoj Vejbulovoj raspodeli sa parametrima: b i c koji su odabrani tako da njihova vrednost bude veća ili jednaka parametru zaseka l . Veličina uzorka n i parametri l , b , c imali su usvojene i nepromenjene vrednosti u oba slučaja generisanja pseudoslučajnih brojeva. Ova provera je ponavljana na računaru više puta, a dobijeni rezultati su zadovoljavajući.

Ključne reči: zasečena Vejbulova raspodela, pouzdanost, parametri raspodele.

ANALYSIS AND APPLICATION OF THE TWO-PARAMETER WEIBULL DISTRIBUTION LIMITED ON THE LEFT

Summary:

Based on the two-parameter Weibull distribution expressions, the expressions of the primary functions of the two-parameter Weibull distribution limited on the left are derived as well as the expressions of its parameters and characteristics point evaluation. Validity and application of derived expressions were verified by a computer on the sets of pseudorandom numbers directly generated as numbers following the two-parameter Weibull distribution limited on the left with the parameters: l — limit parameter b — scale parameter and c — shape parameter, or as numbers following the two-parameter Weibull distribution with the parameters b and c chosen so that their value is greater or equal to the limit parameter l . The sample size of n and the parameters l , b and c had accepted and unchanged values in both cases of pseudorandom numbers generation. This computer checking was repeated for several times and the obtained results were satisfactory.

Key words: Weibull distribution limited on the left, reliability, distribution parameters.

Uvod

Neka jedna od važnih karakteristika proizvoda ima dvoparametarsku Vejbulovu raspodelu sa parametrom oblika c i parametrom skale b . Pretpostavka je da za prijem ovog proizvo-

da odlučujuću ulogu ima vrednost ove posmatrane karakteristike. Tako, na primer, pojedinačni proizvod čija je vrednost ove karakteristike manja od unapred zahtevane vrednosti l , neće biti prihvaćen. Dakle, prihvataju se samo oni proizvodi čije su vrednosti ove

karakteristike jednake ili veće od 1. Vrednosti posmatrane karakteristike ovako odabranih proizvoda imaju dvoparametarsku Vejbulovu raspodelu zasečenu sa leve strane. Vrednost parametra oblika c i parametra skale b ostaje nepromenjena posle »zasecanja«, ali se menjaju srednja vrednost $E(t)$ i standardna devijacija σ , kao i druge karakteristike raspodele (medijana, mod, ...). Polazeći od izraza za funkciju gustine dvoparametarske Vejbulove raspodele, izvedeni su izrazi za osnovne funkcije ove raspodele zasečene sa leve strane: $f_1(t)$ — funkcija gustine raspodele, $F_1(t)$ — funkcija raspodele, $R_1(t)$ — funkcija pouzdanosti i $z_1(t)$ — funkcija intenziteta otkaza. Takođe, izvedeni su izrazi za tačkaste ocene parametara i karakteristika ove raspodele. Za proveru valjanosti izvedenih izraza i ilustraciju njihove praktične primene korišćeni su skupovi pseudoslučajnih brojeva koji su direktno generisani kao brojevi koji se podvrgavaju zakonu dvoparametarske Vejbulove raspodele zasečene sa leve strane, sa parametrima raspodele: l — parametar zaseka, b — parametar skale i c — parametar oblika, ili kao brojevi koji se podvrgavaju zakonu dvoparametarske Vejbulove raspodele sa parametrima b i c i koji su odabrani tako da njihova vrednost bude veća ili jednaka parametru zaseka l . U ilustrativnom primeru prikazan je histogram i funkcija gustine raspodele $f_1(t)$ za skupove pseudoslučajnih brojeva dobijene na oba navedena načina.

Teorijska osnova

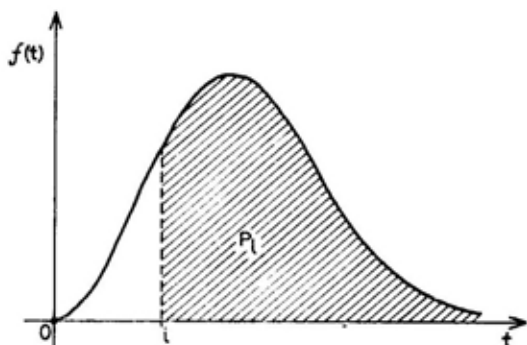
Funkcija gustine raspodele

Neka slučajna promenljiva t ima dvoparametarsku Vejbulovu raspodelu sa parametrom skale b i parametrom oblika c . Pretpostavka je da je uvedeno ograničenje da slučajna promenljiva t ne sme imati vrednost manju od unapred utvrđene vrednosti $l > 0$. Funkcija gustine ove dvoparametarske

Vejbulove raspodele data je sledećim izrazom:

$$f(t) = \frac{c}{b} \left(\frac{t}{b}\right)^{c-1} e^{-\left(\frac{t}{b}\right)^c}; \quad c, b > 0, t \geq 0 \quad (1)$$

Neka je sa l , na slici 1, označena granica ispod koje se vrednosti slučajne promenljive t ne uzimaju u obzir,



Sl. 1 — Funkcija gustine dvoparametarske Vejbulove raspodele

tj. one se razmatraju kao da se nisu ni pojavile. Da bi ovako »zasečena« funkcija i dalje predstavljala funkciju gustine raspodele, potrebno je da površina P_1 (šrafirana površina na slici 1) bude jednaka jedinici.

Polazeći od izraza (1), ova površina se može odrediti na sledeći način:

$$P_1 = \int_l^{+\infty} f(t) dt = R(l) = e^{-\left(\frac{l}{b}\right)^c} \quad (2)$$

Deljenjem izraza (2) sa $\exp\left[-\left(\frac{l}{b}\right)^c\right]$ dobija se

$$\int_l^{+\infty} \frac{f(t)}{e^{-\left(\frac{l}{b}\right)^c}} dt = 1$$

Podintegralna funkcija

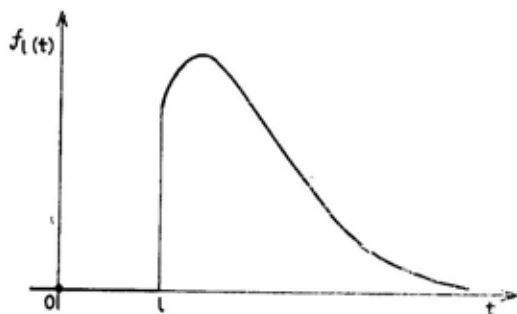
$$\frac{f(t)}{-\left(\frac{1}{b}\right)^c e^{-\left(\frac{t}{b}\right)^c}}$$

ispunjava sve uslove da može predstavljati funkciju gustine raspodele. Može se napisati u sledećem obliku:

$$f_1(t) = \frac{c}{b} \left(\frac{t}{b}\right)^{c-1} \left[-\left(\frac{t}{b}\right)^c - \left(\frac{1}{b}\right)^c \right];$$

$$c, b > 0, t \geq 1 \quad (3)$$

Ova funkcija grafički je prikazana na slici 2.



Sl. 2 — Funkcija gustine dvoparameterske Vejbulove raspodele zasečene sa leve strane

Funkcija raspodele

Funkcija raspodele, $F_1(t)$, data je sledećim izrazom:

$$F_1(t) = 1 - e^{-\left[\left(\frac{t}{b}\right)^c - \left(\frac{1}{b}\right)^c\right]};$$

$$c, b > 0, t \geq 1 \quad (4)$$

Funkcija pouzdanosti

Funkcija pouzdanosti data je sledećim izrazom:

$$R_1(t) = e^{-\left[\left(\frac{t}{b}\right)^c - \left(\frac{1}{b}\right)^c\right]};$$

$$c, b > 0, t \geq 1 \quad (5)$$

Funkcija intenziteta otkaza

Polazeći od opšteg izraza za funkciju intenziteta otkaza:

$$z(t) = -\frac{R'(t)}{R(t)}$$

dobija se

$$z_1(t) = \frac{c}{b} \left(\frac{t}{b}\right)^{c-1}; \quad c, b > 0, t \geq 1 \quad (6)$$

Matematičko očekivanje

Polazeći od definicione formule za matematičko očekivanje ili srednju vrednost slučajne promenljive t , koja je data sledećim izrazom:

$$E_1(t) = \int_1^{+\infty} t f_1(t) dt \quad (7)$$

dobija se

$$E_1(t) = b e^{\left(\frac{1}{b}\right)^c} \gamma_L \left(1 + \frac{1}{c}\right) \quad (8)$$

γ_L je nepotpuna Γ funkcija, koja je data sledećim izrazom:

$$\gamma_L = \int_L^{+\infty} s^{\left(1 + \frac{1}{c}\right)^{-1}} e^{-s} ds$$

gde je:

$$L = \left(\frac{1}{b}\right)^c$$

Varijansa i standardna devijacija

Polazeći od definicionih formula za početni moment l -tog reda dobijaju se izrazi za moment prvog i drugog reda:

$$m_1 = E_1(t) = b e^{\left(\frac{1}{b}\right)^c} \gamma_L \left(1 + \frac{1}{c}\right) \quad (9)$$

$$m_2 = E_1(t^2) = b^2 e^{\left(\frac{1}{b}\right)^c} \gamma_L \left(1 + \frac{2}{c}\right) \quad (10)$$

Varijansa $V(t)$ može se odrediti na osnovu ova dva momenta, pomoću sledećeg izraza:

$$V(t) = m_2 - m_1^2 = \sigma^2, \quad (11)$$

odakle se dobija

$$\sigma = b \left[e^{\left(\frac{1}{b}\right)^c} \gamma_L \left(1 + \frac{2}{c}\right) - e^{2\left(\frac{1}{b}\right)^c} \cdot \gamma_L^2 \left(1 + \frac{1}{c}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

Generisanje pseudoslučajnih brojeva

Niz pseudoslučajnih brojeva koji imaju dvoparametarsku Vejbulovu raspodelu zasečenu sa leve strane može se odrediti korišćenjem izraza (4). Tako, ako se izraz (4) reši po promenljivoj t , dobija se:

$$t_i = b \left[\left(\frac{1}{b}\right)^c - \ln(1 - F_i) \right]^{\frac{1}{c}}, \quad (13)$$

gde je $F_i = x_i$ pseudoslučajni broj koji pripada intervalu $(0, 1)$.

Vrednost broja x_i može se odrediti pomoću jednog od sledećih izraza [3, 4]:

$$x_{i+1} = [997x_i]_D; \quad i=0,1,2,\dots; \quad x_0 = 0,5284163 \quad (14)$$

ili

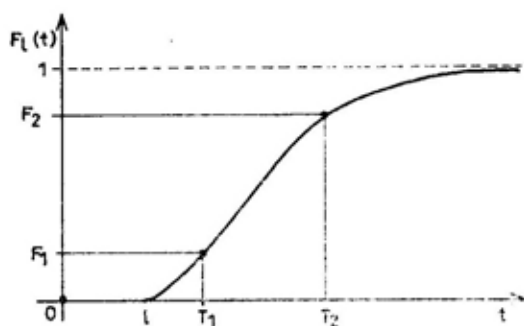
$$x_{i+1} = [9821x_i + 0,211327]_D; \quad i=0,1,2,\dots, \quad (15)$$

x_0 je proizvoljno odabrani broj, kao i korišćenjem generatora pseudoslučajnih brojeva računara.

U navedenim izrazima $[Q]_D$ označava decimalni deo od broja Q . Kada se u izrazu (13) stavi $l=0$, onda se pomoću tog izraza mogu generisati pseudoslučajni brojevi koji imaju dvoparametarsku Vejbulovu raspodelu koja nije zasečena. Ako se iz ovako generisanog skupa pseudoslučajnih brojeva odaberu samo oni čije su vrednosti veće ili jednake parametru zaseka l , onda će ti brojevi imati dvoparametarsku Vejbulovu raspodelu zasečenu sa leve strane.

Ocenjivanje parametara b i c metodom kvantila

Usvajanjem tačkastih vrednosti za funkciju raspodele $F_i(t)$: F_1 i F_2 , dobijaju se njima odgovarajuće vrednosti promenljive t : T_1 i T_2 (slika 3).



Sl. 3 — Funkcija raspodele $F_i(t)$ i kvantili T_1 i T_2

Polazeći od izraza (4) za funkciju raspodele, mogu se napisati sledeći izrazi:

$$F_1 = 1 - e^{-\left[\left(\frac{T_1}{b}\right)^c - \left(\frac{1}{b}\right)^c\right]}; \quad c, b > 0 \quad (16)$$

$$F_2 = 1 - e^{-\left[\left(\frac{T_2}{b}\right)^c - \left(\frac{1}{b}\right)^c\right]} ; c, b > 0 \quad (17)$$

U ovim izrazima, donja granica (zasek) l određuje se tako što se za njenu vrednost uzme najmanja vrednost t_{\min} koju je uzela slučajna promenljiva t , tj.:

$$l \approx \hat{l} = t_{\min} \quad (18)$$

Rešavanjem jednačina (16) i (17) po b i c , dobijaju se rešenja za ove parametre u sledećem obliku:

$$\frac{\left(\frac{T_2}{l}\right)^c - 1}{\left(\frac{T_1}{l}\right)^c - 1} = \frac{\ln(1-F_2)}{\ln(1-F_1)} = K \quad (19)$$

$$b = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{T_1^c + l^c}{-\ln(1-F_1)} \right)^{\frac{1}{c}} + \left(\frac{T_2^c + l^c}{-\ln(1-F_2)} \right)^{\frac{1}{c}} \right] \quad (20)$$

Rešavanjem ovih izraza po b i c dobijaju se tačkaste ocene ovih parametara \hat{b} i \hat{c} .

Kvantili T_1 i T_2 su, u stvari, empirijski kvantili i mogu se odrediti pomoću histograma, tako što se integrali površina histograma od l do T_1 , odnosno T_2 , ispunjavajući, pri tom, uslove da površine budu jednake usvojenim vrednostima F_1 , odnosno F_2 , respektivno.

Medijana

Medijana je vrednost promenljive t , pri kojoj je funkcija raspodele $F(t) = 0,5$ ili je to vrednost levog kvantila t_p , pri vrednosti levog kvanta $p = 0,5$.

Polazeći od izraza za levi kvantil:

$$T_F = b \left[\left(\frac{1}{b} \right)^c - \ln(1-F) \right]^{\frac{1}{c}} \quad (21)$$

i dajući vrednost funkciji raspodele $F = 0,5$, dobija se izraz za medijanu:

$$T_{0,5} = b \left[\ln 2 + \left(\frac{1}{b} \right)^c \right]^{\frac{1}{c}} \quad (22)$$

Mod i amplituda funkcije gustine raspodele

Izjednačavanjem prvog izvoda funkcije gustine raspodele $f_1(t)$, date izrazom (3), sa nulom i rešavanjem te jednačine po t , dobija se

$$t = t_0 = b \left(1 - \frac{1}{c} \right)^{\frac{1}{c}} \quad (23)$$

Pri vrednosti argumenta $t = t_0$, funkcija $f_1(t)$ dostiže maksimum, čija je amplituda data sledećim izrazom:

$$f_{1\max} = f_1(t_0) = \frac{c}{b} \left(\frac{t_0}{b} \right)^{c-1} e^{-\left[\left(\frac{t_0}{b}\right)^c - \left(\frac{1}{b}\right)^c\right]} \quad (24)$$

Obeležimo mod sa T_1 , tj. vrednost promenljive t pri kojoj $f_1(t)$ dostiže maksimum, a sa A_1 amplitudu ovog maksimuma. S obzirom na parametar zaseka l , mod T_1 i amplituda A_1 dati su sledećim izrazima:

$$T_1 = \begin{cases} l; & \text{za } c \leq 1 \vee (c > 1 \wedge l > t_0) \\ t_0; & \text{za } c > 1 \wedge l \leq t_0 \end{cases} \quad (25)$$

$$A_1 = \begin{cases} \frac{c}{b} \left(\frac{1}{b} \right)^{c-1}; & \text{za } c \leq 1 \vee (c > 1 \wedge l > t_0) \\ \frac{c}{b} \left(\frac{t_0}{b} \right)^{c-1} e^{-\left[\left(\frac{t_0}{b}\right)^c - \left(\frac{1}{b}\right)^c\right]}; & \text{za } c > 1 \wedge l \leq t_0 \end{cases} \quad (26)$$

Ilustrativni primer

Usvajajući vrednosti parametara $l = 25$, $b = 100$ i $c = 2,5$ pomoću računara, generisana su sledeća dva sku-

ne, sa usvojenim vrednostima parametara raspodele.

Prvi skup pseudoslučajnih brojeva dobijen je direktnim generisanjem ovih brojeva primenom izraza (13), a

164,92	58,03	89,80	49,58	134,66	31,61	85,54	156,30	70,35	117,55
107,56	135,66	68,50	100,16	125,96	105,30	84,68	160,81	60,23	159,35
92,92	165,99	49,19	83,14	197,67	57,03	107,12	105,11	75,60	41,45
124,08	80,59	84,17	122,18	94,71	84,08	44,68	155,17	101,47	140,24
50,41	119,89	173,07	83,12	55,07	62,76	139,95	90,91	127,07	131,64
142,59	112,56	117,54	61,19	65,08	67,43	115,36	123,63	38,09	88,43
78,22	36,75	46,38	63,67	82,75	57,09	60,24	33,03	105,36	69,46
80,37	58,27	121,68	68,61	63,50	75,74	35,52	172,35	69,86	34,93
43,74	86,16	93,64	171,28	106,83	97,16	36,73	25,84	48,83	114,62
56,88	36,11	74,29	118,76	103,76	110,14	79,66	109,07	85,95	112,81
79,47	42,74	44,04	28,76	79,96	119,74	61,19	52,02	120,04	49,66
181,40	102,79	132,59	125,09	87,19	56,61	47,91	41,08	147,54	110,59
47,72	136,84	137,20	50,99	139,11	74,37	69,90	167,96	100,02	86,11
86,67	52,94	104,36	125,97	120,87	148,28	76,38	34,00	66,56	86,77
69,59	43,93	60,67	115,38	91,80	107,95	55,01	93,72	80,56	65,00
62,22	26,47	198,49	81,72	95,49	130,70	105,07	165,14	72,08	54,25
43,06	89,21	90,65	98,19	65,04	105,11	93,61	27,11	72,17	55,40
79,40	67,83	91,08	70,59	111,61	110,65	65,76	114,13	59,15	177,21
83,47	72,51	60,05	141,34	67,69	152,38	72,47	81,92	73,64	131,80
74,67	76,49	97,76	98,69	32,12	39,56	97,50	70,35	69,95	115,63

164,33	55,09	88,31	45,78	133,86	83,94	155,66	68,19	116,56	106,43
134,86	66,24	98,90	125,08	104,13	83,05	160,19	57,46	158,73	91,51
165,40	45,35	81,47	197,22	54,01	105,99	103,94	73,66	36,29	123,18
78,83	82,53	121,24	93,34	82,43	40,15	154,52	100,23	139,49	46,72
118,94	172,51	81,44	51,88	60,17	139,19	89,45	126,20	130,81	141,86
111,51	116,56	58,49	62,63	65,11	114,35	122,71	32,08	86,91	76,38
30,32	42,14	61,13	81,07	54,07	57,48	25,06	104,19	67,25	78,60
55,35	120,75	66,36	60,95	73,80	28,65	171,80	67,67	27,83	39,05
84,58	92,25	170,72	105,69	95,84	30,30	44,93	113,59	53,85	29,46
72,29	117,78	102,57	109,05	77,88	107,96	84,36	111,76	77,68	37,85
39,40	78,18	118,78	58,49	48,51	119,08	45,87	180,89	101,58	131,76
124,19	85,63	53,55	43,89	35,84	146,84	109,51	43,67	136,06	136,42
47,36	138,34	72,38	67,71	167,38	98,75	84,53	85,10	49,53	103,18
125,09	119,92	147,59	74,47	26,51	64,20	85,20	67,38	39,27	57,94
114,36	90,36	106,82	51,80	92,33	78,81	62,55	59,59	198,04	80,00
54,14	129,86	103,90	164,55	69,99	50,98	38,23	87,71	89,18	96,89
62,59	103,94	92,21	70,09	52,23	77,61	65,53	89,62	68,43	110,54
109,57	63,35	113,09	56,30	176,67	81,81	70,44	57,26	140,59	65,39
151,72	70,40	80,20	71,62	130,97	72,70	74,59	96,45	97,41	33,96
96,19	68,18	67,76	114,62	55,37	104,19	62,86	105,23	74,93	72,66

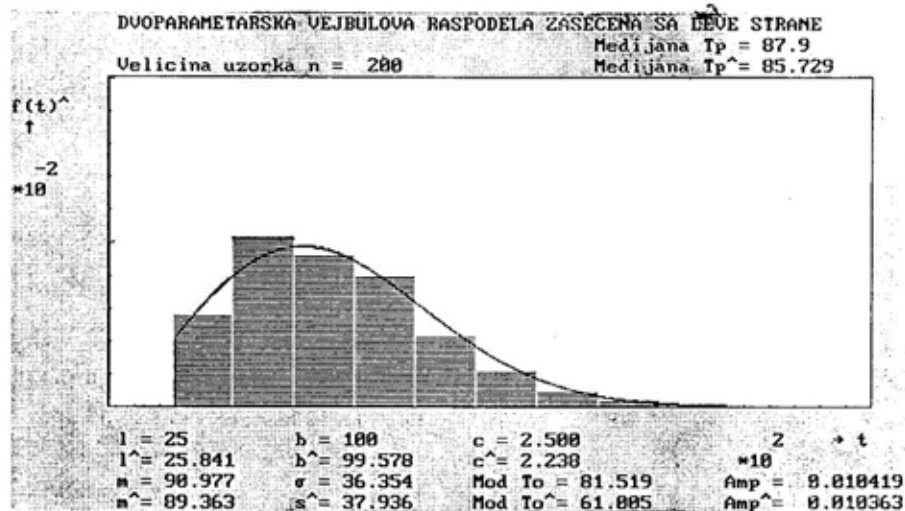
pa od po $n = 200$ pseudoslučajnih brojeva koji imaju dvoparametarsku Vejbulovu raspodelu zasečenu sa leve stra-

ni strani, drugi skup pomoću istog izraza u kojem je $l=0$ samo dok se vrši generisanje pseudoslučajnih brojeva, inače je l

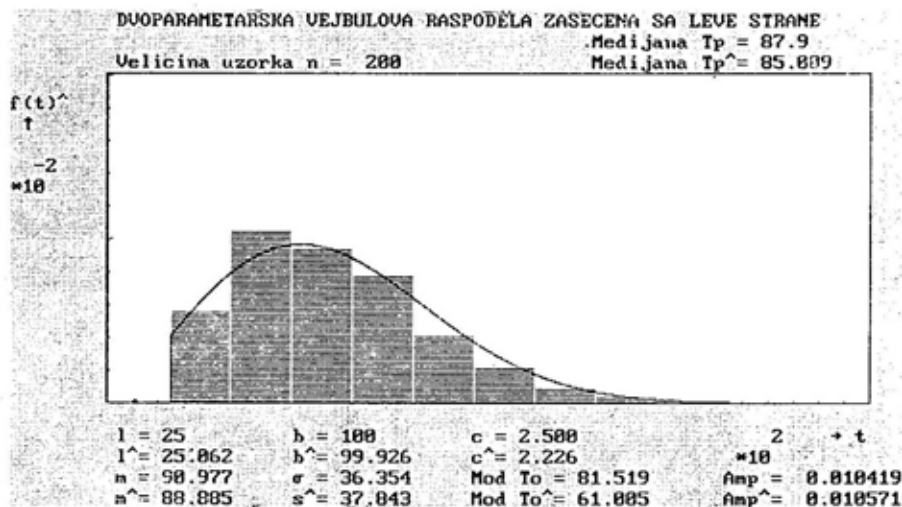
veće od nule, i odabiranjem samo onih vrednosti koje su veće ili jednake parametru zaseka l . Usvajanje istog broja podataka ($n = 200$) za jedan i drugi skup učinjeno je radi bolje uporednje dobijenih rezultata. Koristeći računarski program, koji je za to specijalno urađen, dobijeni su histogrami i funkcije gustine raspodele $f_1(t)$ za oba skupa prethodno navedenih pseudoslu-

čajnih brojeva. Ovi histogrami i funkcije $f_1(t)$ prikazani su na slici 4 za prvi skup i na slici 5 za drugi skup pseudoslučajnih brojeva.

Na slikama su date i vrednosti ocenjenih parametara i drugih karakteristika ove raspodele. Ocena parametra oblika \hat{c} dobijena je korišćenjem izraza (19), tako što su deset puta menjane



Sl. 4 — Grafički prikaz histograma i ocenjene funkcije gustine raspodele $F(t)^{\wedge}$



Sl. 5 — Grafički prikaz histograma i ocenjene funkcije gustine raspodele $F(t)^{\wedge}$ za drugi skup pseudoslučajnih brojeva

vrednosti za F_1 i F_2 : $F_1 \in [0,15; 0,35]$ i $F_2 \in [0,85; 0,99]$, metodom slučajnog izbora za F_1 i F_2 u odgovarajućim intervalima. Konačna ocena \hat{c} dobijena je kao srednja vrednost od izračunatih vrednosti. Unošenjem vrednosti za \hat{c} u izraz (20), kao i drugih, prethodno određenih vrednosti karakteristika, određivana je vrednost tačkaste ocene parametra skale b.

Zaključak

Poredeći grafike i dobijene rezultate na slikama 4 i 5, može se primetiti

da je podudarnost rezultata zadovoljavajuća za oba slučaja. To znači da odabrane vrednosti t_1 koje su veće ili jednake parametru zaseka l imaju isti zakon raspodele kao i one koje su dobijene direktnim generisanjem pseudo-slučajnih brojeva primenom izraza (13) u kojem je $l > 0$. Takođe, može se primetiti da su vrednosti ocenjenih parametara raspodele \hat{l} , \hat{b} i \hat{c} približne teorijski usvojenim vrednostima l, b i c, respektivno, što ukazuje na valjanost izvedenih izraza za određivanje tačkastih ocena parametara ove raspodele.

Literatura:

- [1] P. Chapouille et R. De Pazzis.: *Fiabilité des Systèmes*, Masson, Paris 1968.
[2] B. L. Van Der Waerden.: *Mathematische Statistik*, Springer-Verlag, Berlin 1965.

- [3] HP-65, Stat-Pac, U.S.A. March 1976.
[4] HP-41C, Standard Applications Handbook, Hewlett-Packard, U.S.A. 1979.

Dr Miloško Jevtović,
profesor, dipl inž.
Vojnotehnički institut VJ,
Beograd

METRIKA KVALITETA SOFTVERA KORIŠĆENA KOD JEDNOG TELEKOMUNIKACIONOG TERMINALA

UDC: 681.323.06.001

Rezime:

Glavne karakteristike kvaliteta softvera definisane ISO/IEC standardima ne omogućavaju direktno merenje. U radu je analiziran problem merenja kvaliteta softvera kod jednog složenog telekomunikacionog terminala. Kvalitet softvera posmatran je sa stanovišta projektanta (definicija zahteva za kvalitet, procedure za pripremu vrednovanja i procedure vrednovanja). Primenjena metrika kvaliteta obuhvatila je: merenje vremena izvršenja programskih modula, određivanje ciklomske složenosti po Meckolovoj metodi i proveru funkcionalnosti pri simuliranom i realnom okruženju.

Ključne reči: softver terminala, kvalitet, karakteristike, metrika, rezultati.

SOFTWARE QUALITY METRIC USED IN A TELECOMMUNICATION TERMINAL

Summary:

This paper deals with software quality metric used during development of a new now-voice message terminal. Metrics analysis of the terminal source code was performed using MacCale's cyclomatic complexity. The cyclomatic complexity has been correlated to the number of expected errors in a software module.

Key words: terminal software, quality, characteristics, metric.

Uvod

Osnovne funkcije jednog novog telekomunikacionog terminala za negovorne informacije [1] realizovane su primenom programskog upravljanja. U funkcionalnom pogledu terminal zamenjuje više tipova terminalnih uređaja klasične izvedbe, kao što su: teleprinter, terminali za podatke klase 1 do 6 prema preporuci X.1, uređaji za automatsku detekciju i korekciju grešaka, grafički videoterminal i dr. Integracija funkcija klasičnih terminala uticala je na složenost i veličinu softvera. Izvorni kod, pisan na assembleru, ima 350000 linija. Primenjeno je modularno programiranje, a osnovne funkcije terminala

podržane su sa 20 programskih paketa. Pojedini programski paketi sadrže od 50 do 200 programskih modula. Tako, na primer, programski paket koji obezbeđuje funkcije grafičkog videoterminala sadrži 159 programskih modula (tabela 1).

Pored pomenutih elemenata za kvalitet softvera je značajno i to što je na njegovom razvoju i pisanju programa bilo angažovano oko 15 inženjera.

Zahtevi za kvalitet softvera

U prvim fazama razvoja terminala nisu precizno definisani zahtevi za kvalitet softvera. Oni su se, prvenstveno,

Programski paketi terminala

Redni broj	Naziv programskog paketa	Broj softverskih modula
1	2	3
1.	Grafički LCD videoterminal	159
2.	Matrični štampač	192
3.	Centralni upravljački modul	200
4.	Lokalne funkcije terminala	156
5.	Procesor tekstualnih poruka	132
6.	Upravljanje fontovima, tipovima štamparskih slogova i azbukama	141
7.	Kodovanje/dekodovanje konvolucionim difuznim kodom (2,1)	139
8.	Sinhronizacija kodovanih signala	112
9.	Kodovanje-dekodovanje BCH kodovima (15,5 i (15,7)	146
10.	Upravljanje funkcijama čitača traka	127
11.	Upravljanje funkcijama bušača trake	139
12.	Funkcije paketskog terminala (X.25 nivoi 1, 2 i 3)	181
13.	Upravljanje komunikacijom u telegrafskoj mreži (signalizacija U.1B)	57
14.	Programski paket za zaštitu informacija (tekst, podaci) i kontrolu pristupa funkcijama	179
15.	Test-programi (ugrađen) za ispitivanje funkcionalnosti	89
16.	Kodovanje i dekodovanje BCH kodom (127,78) i učešljavanje	195
17.	Upravljanje komunikacionim protokolima	120
18.	Grafički i alfanumerički CRT terminali	156
19.	Programski paket za samotestiranje	50

odnosili na sadržaj i kvalitet softverske dokumentacije i funkcionalnost [2]. Složen i obiman softver u prvim fazama testiranja kvaliteta telekomunikacionog terminala pokazao je neprihvatljiv nivo pouzdanosti, a relativno veliki broj grešaka ugrožavao je osnovne funkcije terminala [1]. Zbog toga je bilo neophodno da se prošire zahtevi za kvalitet softvera, pri čemu se traži:

— funkcionalnost svakog programskog paketa u simuliranom i realnom okruženju;

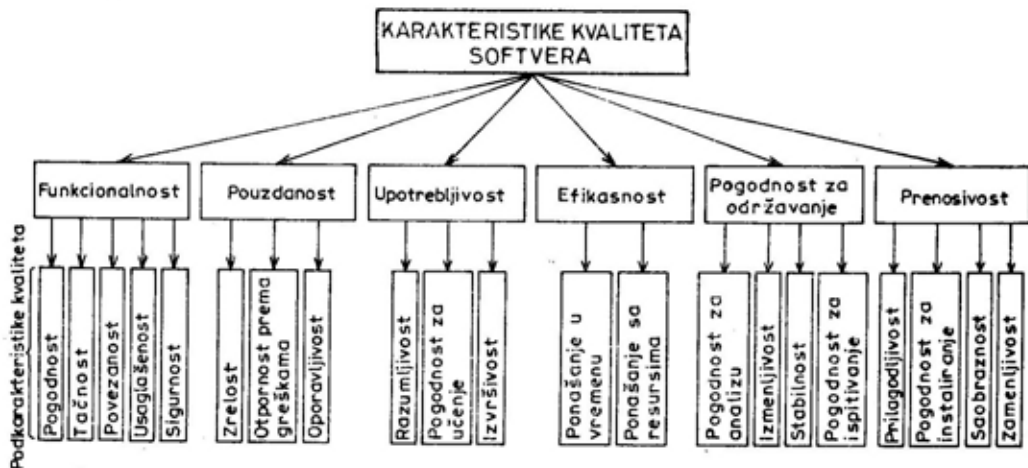
— vreme izvršenja svakog programskog paketa (koji obezbeđuje izvršenje nekog skupa funkcija terminala) mora biti kraće od trajanja jednog karaktera kodovanog standardnim ISO 7-bitskim kodom, pri prenosu brzinom 9,6 kb/s ili kraće od prenosa jednog karaktera kodovanog BCH kodom (15,5) pri prenosu brzinom 2,4 kb/s u duplesnoj komunikaciji;

— obezbeđenje tačnosti i sigurnosti u izvršavanju komunikacionih i lokalnih funkcija terminala;

— nisu dozvoljene softverske greške u izvršenju komunikacionih funkcija, a ukoliko do njih dođe treba obezbediti oporavljivost od grešaka;

— softverska dokumentacija treba da omogući vrednovanje kvaliteta softvera po određenim karakteristikama, kao što su pouzdanost, razumljivost, izmenljivost i dr.

Pomenuti zahtevi delom definišu zahteve za karakteristike kvaliteta softvera (funkcionalnost, pouzdanost, upotrebljivost, i dr.) slično zahtevima iz standarda ISO/IEC 9126 (sl. 1), ali ti zahtevi ne upućuju na metode merenja kvaliteta softvera, odnosno na to kako odabrati metriku. Pod metrikom se podrazumeva kvantitativna skala i metoda koja se koristi za određivanje vrednosti neke osobine datog softverskog proizvoda.



Sl. 1 — Zahtevi iz standarda ISO/IEC 9126

Izbor metrike i definicija kriterijuma ocenjivanja

Model procesa vrednovanja kvaliteta softvera, primenjen na telekomunikacionom terminalu, uglavnom odgovara standardnom modelu [3] koji je prikazan na slici 2. Na izbor metrike, koja je u konkretnom slučaju primenjena za vrednovanje karakteristika kvaliteta, uticala su dva faktora:

— postojanje kompletne softverske dokumentacije za telekomunikacioni terminal,

— zahtevi da se greške u softveru praktično u celini eliminišu, a u slučaju pojave greške mora se obezbediti oporavljivost terminala.

Softverska dokumentacija, rađena prema standardima [2], pored ostalog, sadrži: stablo funkcija, stablo potprograma (modula), sistemske dijagrame toka, detaljne dijagrame toka, listing izvornog koda i dr., za sve programske pakete telekomunikacionog terminala.

U lokalizaciji softverskih grešaka svakako je najvažnije da se utvrdi softverski modul u kome se javljaju ili se potencijalno mogu javiti softverske greške.

Imajući to u vidu, za ocenu kvaliteta softvera telekomunikacionog ter-

minala odabrana je Mekkolova (Mac-Call) metoda [4, 5], tzv. ciklomatske složenosti, zasnovana na teoriji grafova.

Ova metoda pruža mogućnost da se odredi stepen složenosti softvera, odnosno nekog softverskog proizvoda. Ciklomatska složenost (engleski termin: cyclomatic complexity) definiše se kao minimalan broj nezavisnih delova algoritamskog dijagrama toka koji se posmatra kao povezani graf. U takvom grafu blokovi obrade (P_i) i blokovi odlučivanja (D_i) (slika 3) predstavljaju čvorove, a linije koje ih povezuju predstavljaju grane grafa (L_i). Blok obrade (P_i) ima složenost 1, a blok odlučivanja (if/then) 2. To je jedna definicija složenosti, a moguće su i druge definicije u kojima se kao čvorovi u grafu broje samo blokovi odlučivanja.

Ciklomatska složenost izračunava se korišćenjem relacije:

$$V(G) = L_i - E_i + D_i$$

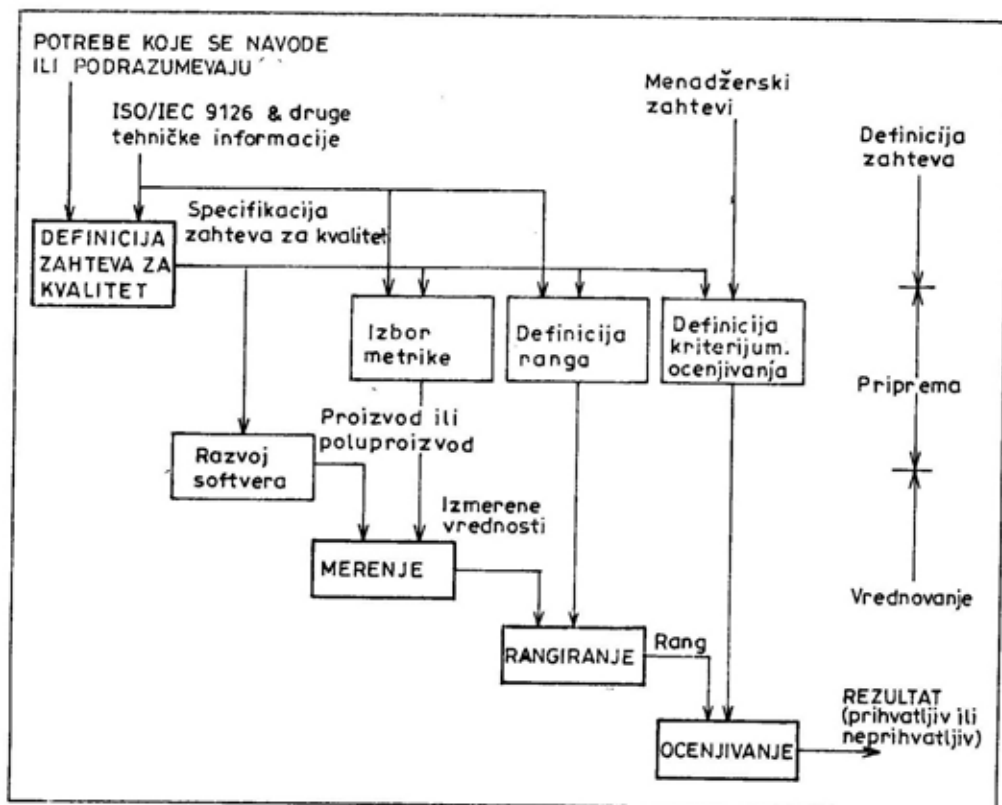
gde je:

$$E_i = P_i + D_i$$

P_i — čvor obrade,

D_i — čvor odlučivanja,

L_i — grana.



Sl. 2 — Model procesa vrednovanja kvaliteta softvera

Tako, na primer, programski modul, predstavljen dijagramom toka na slici 3a, ima složenost $V(G)=9-8+2=3$, a programski modul na slici 3b ima $V(G)=7-6+2=3$.

Algoritamski dijagrami toka, praktično primenjenih programskih modula u telekomunikacionom terminalu, znatno su složeniji od navedenih primera. Tako, na primer, programski modul **OTPREMA NA LINIJU**, prikazan na slici 4, ima ciklomatsku složenost:

$$V(G)=47-35+16=28$$

Ciklomatska složenost korelisana je brojem očekivanih grešaka u programskom modulu. Zbog toga se može uzeti kao pouzdana mera kvaliteta softvera. Broj grešaka raste sa složnošću dijagrama toka, odnosno sa porastom

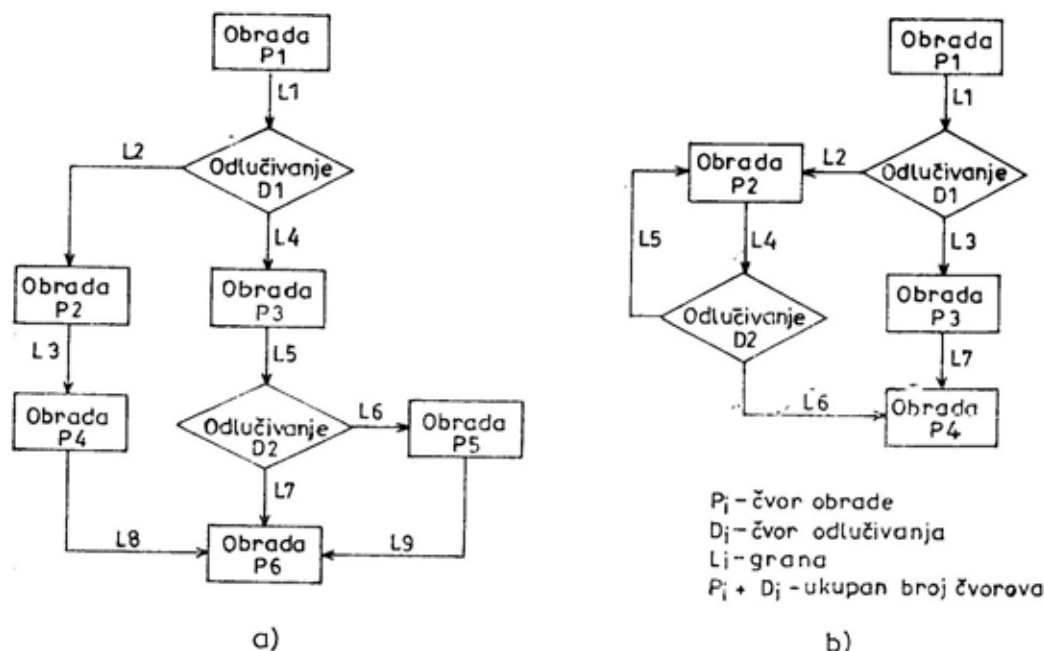
njegove kompleksnosti. Ciklomatska složenost programskog modula jednaka 10 ili veća znači da u funkcionisanju takav modul predstavlja izvor kontinualnih problema. U vezi s tim, cilj je da se preprojektovanjem i redizajnimanjem modula smanji njegova složenost kadgod je to izvodljivo. U velikim programima ciklomatska složenost može se koristiti ne samo kao mera kvaliteta, nego i kao putokaz kako neki programski paket treba izdeliti na module i potprograme.

Drugi vid primene ciklomatske složenosti izveden je direktno iz njene definicije. Broj nezavisnih delova u nekom softverskom modulu, takođe, predstavlja minimalan broj test-segmenta u modulu koji zahtevaju testiranje. Prema tome, utvrđivanje ciklomatske

ske složenosti predstavlja polazni podatak za definisanje test-plana i procedura za ispitivanje određenog softverskog modula.

Rangiranje i definisanje kriteriju

U opsegu vrednosti $V(G)$ od 1 do 10 moguće je postaviti i druge kriterijume, što zavisi od zahteva koji se postavlja ju konstruktoru — programeru.



Sl. 3 — Određivanje stepena složenosti softvera

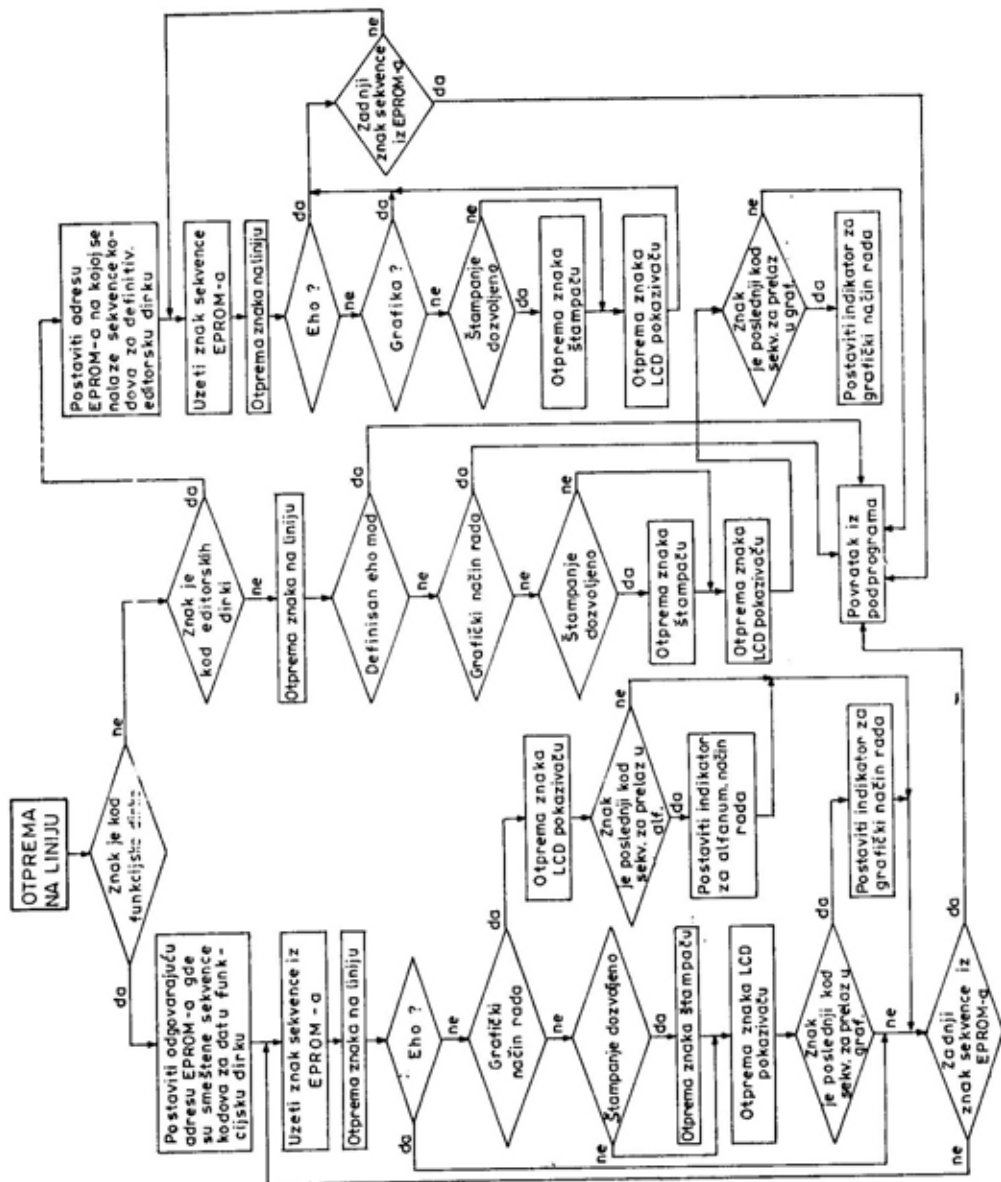
ma za ocenjivanje, na osnovu ciklomske složenosti, obavlja se prema granicama $V(G)$ koji zadovoljavaju odnosno ne zadovoljavaju u pogledu kvaliteta određenog programskog modula. Skup izmerenih vrednosti $V(G) = \{1, 2, 3 \dots 10, 11, 12, \dots N\}$ gde je N — ceo broj, deli se na rangove, pri čemu samo vrednost $V(G) > 10$ ne zadovoljava, što se može predstaviti izrazom:

$$V(G) = \left. \begin{array}{l} 1 \leq V(G) \leq 3, \text{ odlično} \\ 3 < V(G) \leq 6, \text{ dobro} \\ 6 < V(G) \leq 10, \text{ dovoljno} \\ V(G) > 10, \text{ loše — ne} \\ \text{zadovoljava} \end{array} \right\} \text{zadovoljava}$$

Merenje i ocenjivanje

Merenje i ocenjivanje kvaliteta softvera telekomunikacionog terminala obavljeno je na nekoliko programskih paketa, kod kojih je u funkcionisanju terminala bilo najviše grešaka, odnosno problema sa kvalitetom softvera. To su:

— centralni upravljački modul;



Sl. 4 — Dijagram toka programskog modula »Otprema na liniju«

Softverski moduli videoterminala

Redni broj	Naziv programskog modula terminala	Broj grana Li	Broj čvorova obrade Pi	Broj čvorova odluke Di	Ciklomatska složenost V(G)
1	2	3	4	5	6
1.	Glavni program	27	11	6	16
2.	Štampanje kopije slike sa ekrana	20	15	3	5
3.	Funkcije koje služe za »setovanje« terminala	45	29	8	16
4.	Prikaz slike u grafici na štampaču	9	6	2	3
5.	Prikaz slike u grafičkom modu na ekranu	21	18	2	3
6.	Štampanje karaktera iz bafera	7	5	1	2
7.	Postavljanje funkcija (status) terminala	11	10	0	1
8.	Prikaz statusa terminala	13	11	1	2
9.	Inicijalno stanje EPROM-a	8	7	0	1
10.	Prikaz demonstracione slike na ekranu	15	13	1	2
11.	Slanje karaktera štampaču	20	11	5	9
12.	Štampanje znaka	11	10	1	1
13.	Promena intenziteta osvetljenosti LCD ekrana	5	4	0	1
14.	Programiranje funkcionalnih tastera	6	5	0	1
15.	Programiranje kontrolnih tastera	7	6	0	1
16.	Funkcije terminala u lokalnu	10	6	2	4
17.	Lokalne alfanumeričke funkcije	9	6	2	5
18.	Grafičke funkcije LCD terminala u lokalnu	15	10	2	5
19.	Predaja znakova sa tastature na liniju	21	10	5	11
20.	Prijem znakova sa linije, slanje na LCD ekran i štampanje	27	17	5	10
21.	Potprogram za izbor statusa	25	20	2	5
22.	Potprogram za prikaz statusa	13	10	1	3
23.	Upis funkcijskih tastera	7	5	1	2
24.	Pomeranje kursora nagore	10	7	1	3
25.	Pomeranje kursora nadole	9	7	1	2
26.	Predaja znakova štampaču	7	6	1	1
27.	Predaja znakova na liniju	19	14	4	5
28.	Predaja znakova displeju	6	5	1	1

1	2	3	4	5	6
29.	Prijem znakova sa tastature	5	4	1	1
30.	Prekidni program NMI	6	5	1	1
31.	Obrada znakova iz linijskog bafera	14	12	2	2
32.	Grafički mod rada	21	16	5	5
33.	Prijem znakova od LCD-a	5	4	1	1
34.	Obrada znakova iz centralne jedinice	17	12	5	5
35.	Otprema na liniju	47	35	16	26

— kodovanje — dekodovanje BCH kodovima (15,7) i (15,5);

— programski paket za zaštitu informacija;

— grafički LCD videoterminal.

Rezultati merenja ciklomatske složenosti ne razlikuju se mnogo između pojedinih programskih paketa. U tabeli 2 prikazani su rezultati merenja složenosti nekih softverskih modula programskog paketa grafičkog LCD videoterminala. Programski paket grafičkog LCD terminala ima ukupno 159 modula. Zahtevani kvalitet, tj. $V(G) \leq 10$, nisu zadovoljila 3 (tri) modula. U toku laboratorijskih i eksploatacionih ispitivanja telekomunikacionog terminala zaista su se pojavljivale greške u tim modulima. Uvažavajući rezultate merenja kvaliteta, pomenuti moduli su redizajnirani, odnosno preprojektovani, tako da je i kod njih $V(G) \leq 10$. Na osnovu sličnih rezultata, dobijenih kod preostala tri modula, u kojima su se, inače, često javljale softverske greške, izvršena je revizija, odnosno preprojektovanje modula, tako da je $V(G)$ svedeno u

zahtevane granice. Ispitivanja telekomunikacionog terminala, odnosno pomenutih modula u realnom i simuliranom okruženju (na razvojnom sistemu), pokazala su da zadovoljavaju zahtevani kvalitet, tj. da su otklonjene softverske greške.

Zaključak

Merenje ciklomatske složenosti softverskih modula jednog telekomunikacionog terminala dalo je realnu sliku o kvalitetu softvera koja je prethodno dobijena na osnovu iskustava pri laboratorijskim i eksploatacionim ispitivanjima pomenutog terminala. Pokazalo se da postoji dobra korelacija između ciklomatske složenosti i broja softverskih grešaka koje su se javljale na pomenutom uređaju. Primena ove metode moguća je samo ukoliko za dati programski paket, modul ili potprogram, postoji kompletna softverska dokumentacija. Primenjena metrika kvaliteta ukazala je na kritična mesta u softveru terminala i gde se potencijalno mogu očekivati softverske greške.

Literatura:

[1] Jevtović, M.: Novi terminal za telegrafiju i podatke, Telekomunikacije, br. 3, 1990.
 [2] Standard SNO 6314, SNO 6315 i SNO 6316 — Kvalitet softvera i softverska dokumentacija.
 [3] Jugoslovenski standard: Vrednovanje softverskih proizvoda, Karakteristike kvaliteta i smernice za njihovu upotrebu, JUS/ISO/IEC 9126, 1996.

[4] Sincler, G., Stockman: Software Measurement, Proceedings of, First European Seminar on Software Quality, Brussels, Belgium, 1988.
 [5] Santic, A. John, Joner, F. Harry: Managing Software Quality, Journal of Electronic Defence, maj 1989. str. 36–55.

Rezime:

U radu su analizirane performanse DS/CDMA (Direct-Sequence Code Division Multiple-Access) mobilnog komunikacionog sistema u prisustvu aditivnog Gausovog šuma, uticaja senke i fedinga. Pri tome su razmatrane i BPSK (Binary Phase-Shift-Keying) u DPSK (Differential Phase-Shift-Keying) modulacija. Posmatrana je zavisnost verovatnoće creške (BER) od broja korisnika po mikročeliji, zavisnost verovatnoće greške od odnosa signal-šum (SNR) sa brojem korisnika po mikročeliji kao parametrom, kao i verovatnoća prekida rada sistema (P_{out}) od broja korisnika po mikročeliji. Pri tome su analizirani različiti oblici jediničnih impulsa kojima se u korisni signal «utiskuje» pseudoslučajna sekvenca.

Ključne reči: mikročelija, bazna stanica, feding, odnos signal-šum, BPSK modulacija, DPSK modulacija.

PERFORMANCE EVALUATION OF DS/CDMA MOBILE
COMMUNICATION SYSTEM

Summary:

In this paper the performances of DS/CDMA (Direct-Sequence Code Division Multiple-Access) mobile communication system in the presence of additive Gaussian noise, shadowing and fading are considered. Both Binary Phase-Shift-Keying (BPSK) and Differential Phase-Shift-Keying (DPSK) modulation schemes are considered. The average Bit Error Rate (BER) vs. number of users in the microcell, the BER vs. signal-to-noise ratio (SNR) for different number of users in the microcell, and outage probability of the system vs. number of users in the microcell are observed. The various unii pulse shapes are considered.

Key words: microcell, base station, mobile station, fading, signal to noise ratio, BPSK modulation scheme, DPSK modulation scheme.

Uvod

Sistemi sa prenosom u proširenom spektru metodom direktne sekvence se u poslednje vreme, pored njihove primene u radio-lokaciji, sistemima za navigaciju, kontrolu vazdušnog saobraćaja, vođenje raketnih projektila, koriste i u mobilnim komunikacijama.

Korišćenje ovih sistema omogućuje sledeće prednosti:

— otežano izviđanje,

- onemogućeno prisluškivanje,
- visok stepen zaštite od aktivnog ometanja,
- formiranje multipleksa u kome svi kanali rade na istoj frekvenciji istovremeno,
- realizacija selektivnog obraćanja korisnicima sistema,
- tačno određivanje lokacije stanice sa kojom se komunicira,

— kvalitetno komuniciranje preko medija u kome je formirana polikanalna struktura (multipath structure).

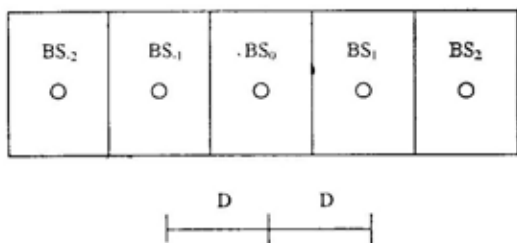
Interesantno je razmatranje ponašanja DS-SS sistema u mobilnim komunikacijama sa stanovišta verovatnoće greške po prenošenom bitu (a time i potrebe zaštitnog kodiranja) i verovatnoće prekida rada sistema.

Model sistema

Mobilne radio-komunikacije obavljaju se između fiksne bazne stanice (BS-Base Station) i većeg broja mobilnih stanica (MS-Mobile Station) u geografskoj oblasti koja se zove ćelija. Radijus ćelije može biti veoma veliki, čak i do 30 km.

Ćelije, poznate kao mikroćelije, mogu biti veličine samo do 100 m uzduž neke ulice grada.

Razmatraće se UPLINK prenos u linearnim mikroćelijama primenom BPSK i DPSK DSSS modulacije. Opšte prihvaćena linearna mikroćelijska struktura prikazana je na slici 1.



Sl. 1 — Linearna mikroćelijska struktura

Cela oblast podeljena je u sekcije, a svaka sekcija se zove mikroćelija. Pretpostavlja se da je bazna stanica centar mikroćelije, a rastojanje između dve bazne stanice je D.

Ako se pretpostavi da je »nulta« mikroćelija referentna, ulazni signal i-tog korisnika je:

$$r_{0,i}(t) = \sqrt{2P_0} \gamma_{0,i} a_{0,i}(t) b_{0,i}(t) \cos(2\pi \cdot f_c t) + \sum_{\substack{k=0, N_c \\ n=1, N \\ k, n \neq 0, i}} \sqrt{2P_0} \chi_{k,n} \gamma_{k,n} a_{k,n}(t - \tau_{k,n}) b_{k,n}(t - \tau_{k,n}) \cdot \sum_{\substack{k=0, N_c \\ n=1, N \\ k, n \neq 0, i}} \cos(2\pi \cdot f_c t + \Phi_{k,n}) + n(t) \quad (1)$$

Prvi indeks, k, odnosi se na mikroćeliju, a drugi, n, na korisnika unutar mikroćelije. P_0 je maksimalna snaga signala, $\chi_{k,n}$ zavisi od rastojanja bazne stanice i korisnika i od uticaja senke koja će biti prisutna u urbanoj sredini, a opisuje i uticaj fedinga na prostiranje talasa.

Pseudoslučajni signal $a_{k,n}(t)$ dat je relacijom:

$$a_{k,n}(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} a_j^{(k,n)} \psi(t - jT_c) \quad (2)$$

gde je:

- $a_j^{(k,n)}$ — pseudoslučajna sekvenca k-tog korisnika u n-toj mikroćeliji,
- $\psi(t)$ — oblik jediničnog impulsa, i
- T_c — trajanje bita pseudoslučajne sekvence.

Korisni signal (za BPSK ovo je informaciona sekvenca, dok je za DPSK diferencijalno kodirana verzija informacione sekvence), može se predstaviti izrazom:

$$b_{k,n}(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} b_j^{(k,n)} p(t - jT) \quad (3)$$

gde je:

- $p(t)$ — pravougaoni impuls trajanja T,
- $b_j^{(k,n)}$ — j-ti bit podataka u binarnoj informacionoj sekvenci,
- T — trajanje informacionog bita.

Veličine $\tau_{k,n}$ i $\Phi_{k,n}$ su vremensko i fazno kašnjenje, respektivno, f_c je frekvencija nosioca DSSS signala, $n(t)$ je

aditivni Gausov šum sa dvostranom spektralnom gustinom snage $N_0/2$.

Pretpostavlja se da se oba binarna informaciona simbola pojavljuju sa istom verovatnoćom, da svaka mikroćelija ima isti broj korisnika N , kao i da je uticaj susednih mikroćelija ograničen na N_c najbližih (smatra se da signali iz udaljenih mikroćelija nemaju bitan uticaj na prijem).

Prvi sabirak u (1) predstavlja korisni signal, a ostali smetnju. Pretpostavlja se da promenljiva γ ima Riceovu raspodelu, [1], a Riceov faktor K definisan je kao:

$$K = \frac{\alpha^2}{2\sigma_s^2} \quad (4)$$

Verovatnoća greške

BPSK modulacija

Izraz za verovatnoću greške i -tog korisnika u posmatranom slučaju može da se napiše kao [2]:

$$P_b(\Psi, \gamma_{0,i}) = Q \left[\frac{\gamma_{0,i}}{\sqrt{\Psi}} \right] \quad (5)$$

gde je $Q(x)$ komplementarna funkcija greške, koja je definisana kao:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-y^2/2) dy \quad (6)$$

Usrednjavanjem po $\gamma_{0,i}$ i korišćenjem standardne Gausove aproksimacije (SGA metoda) [4, 5], dobija se:

$$P_e = P_b(\mu_\psi) = Q(u, w) = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{\frac{d}{1+d}} \right) \cdot \exp\left(-\frac{u^2+w^2}{2}\right) \cdot I_0(uw) \quad (7)$$

Pri tome je $Q(u, w)$ Markumova Q -funkcija, koja je definisana kao:

$$Q(u, w) = \int_w^{\infty} z \cdot \exp[-(z^2+u^2)/2] \cdot I_0(uz) dz \quad (8)$$

$$u = \sqrt{k[1+2d-2\sqrt{d(1+d)}]/2(1+d)}$$

$$w = \sqrt{k[1+2d-2\sqrt{d(1+d)}]/2(1+d)} \quad (9)$$

$$d = \frac{1}{2(k+1)\mu_\psi}$$

Modifikovana Beselova funkcija prve vrste nultog reda I_0 definisana je izrazom:

$$I_0(x) = \left(\frac{1}{2\pi} \right) \cdot \int_0^{2\pi} \exp(x \cdot \cos \alpha) d\alpha \quad (10)$$

Srednja vrednost varijanse μ_ψ je:

$$\mu_\psi = E(\Psi) = \frac{N_0}{2E_b} + m_\psi \frac{M_x}{\eta} \quad (11)$$

Ostali parametri definisani su kao [2]:

$$\frac{N_0}{2E_b} = 10^{\frac{SNR}{20}} \quad (12)$$

$$m_\psi = \int_0^1 \left[\int_{t^*}^1 \Psi(t^*) \cdot \Psi(t^* - \tau^*) dt^* \right]^2 d\tau^* \quad (13)$$

$$M_x = N - 1 + N \cdot f_i \quad (14)$$

gde je:

SNR — odnos signal-šum

$t^* = \frac{t}{T_c}$ — normalizovano vreme,

f_i — parametar koji opisuje uticaj senke i broja N_c susednih mikroćelija,

$\eta = \frac{T}{T_c}$ — procesno pojačanje usled širenja spektra signala.

DPSK modulacija

Izraz za verovatnoću greške i-tog korisnika u posmatranom slučaju može da se napiše kao [2]:

$$P_b(\Psi, \gamma_{0,i}) = \frac{1}{2} \exp(-\gamma_{0,i}^2/2\Psi) \quad (15)$$

Usrednjavanjem po $\gamma_{0,i}$ dobija se [3]:

$$P_b(\Psi) = \frac{\Psi}{2\Psi + 1/(K+1)} \exp \left[-\frac{K}{2(K+1)\Psi + 1} \right] \quad (16)$$

Korišćenjem SGA metoda jednačina (6) poprima oblik:

$$P_e = P_b(\mu_\Psi) = \frac{\mu_\Psi}{2\mu_\Psi + 1/(K+1)} \exp \left[-\frac{K}{2(K+1)\mu_\Psi + 1} \right] \quad (17)$$

Verovatnoća prekida rada sistema

Ponekad je poželjno da se izračuna verovatnoća prekida rada sistema koja se definiše kao verovatnoća da uslovna ili trenutna verovatnoća greške pređu određenu brojnu vrednost P_e .

Verovatnoća prekida rada sistema i-tog korisnika data je izrazom:

$$\begin{aligned} P_{out} &= P_r\{P_b(\Psi, \gamma_{0,i}) > P_e\} = \\ &= E_\Psi \{E_{\gamma_{0,i}}\{U[P_b(\Psi, \gamma_{0,i}) - P_e] | \Psi\}\} = \\ &= E_\Psi [P_{out}(\Psi)] \end{aligned} \quad (18)$$

gde je:

$U(x)$ — jedinična step funkcija.

Za dato Ψ , $P_b(\Psi, \gamma_{0,i})$ monotono je opadajuća funkcija od $\gamma_{0,i}$. Zbog toga je događaj $\{P_b(\Psi, \gamma_{0,i}) > P_e\}$ ekvivalentan događaju $\{\gamma_{0,i} < \Gamma(\Psi, P_e)\}$, gde je

$\Gamma(\Psi, P_e)$ funkcija praga koja zavisi od Ψ , P_e i tipa primenjene modulacije.

Iz relacije (5), za BPSK je:

$$\Gamma(\Psi, P_e) = \sqrt{\Psi} \cdot Q^{-1}(P_e) \quad (19)$$

gde je:

$Q^{-1}(x)$ — inverzna funkcija komplementarne funkcije greške.

Iz relacije (16), za DPSK dobija se:

$$\Gamma(\Psi, P_e) = \sqrt{2\Psi} \cdot \ln(1/2P_e) \quad (20)$$

Konačno, za $P_{out}(\Psi)$ dobija se:

$$\begin{aligned} P_{out}(\Psi) &= \int_0^{\Gamma(\Psi, P_e)} f_{\gamma_{0,i}}(y) dy = \\ &= 1 - Q[\sqrt{2K}, \sqrt{2(K+1)} \cdot \Gamma(\Psi, P_e)] \end{aligned} \quad (21)$$

gde je:

$f_{\gamma_{0,i}}$ — funkcija gustine verovatnoće od $\gamma_{0,i}$.

Primenom SGA metoda, dobija se:

$$\begin{aligned} P_{out}(\Psi) &= P_{out}(\mu_\Psi) = \\ &= 1 - Q[\sqrt{2K}, \sqrt{2(K+1)} \cdot \Gamma(\mu_\Psi, P_e)] \end{aligned} \quad (22)$$

Oblici jediničnih impulsa

Posmatrani su sledeći oblici jediničnih impulsa:

Pravougaoni

$$\psi(t) = \text{rect}[0, T_c] \quad (23)$$

Polusinusni

$$\Psi(t) = \sqrt{2} \sin\left(\pi \frac{t}{T_c}\right) \cdot \text{rect}[0, T_c] \quad (24)$$

Podignuti kosinus

$$\Psi(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left(1 - \cos\left(2\pi \frac{t}{T_c}\right)\right) \cdot \text{rect}[0, T_c] \quad (25)$$

Cebiševljevi impuls četvrtog reda

$$\Psi(t) = 1,49860 \cdot \sum_{i=1}^2 A_i \cdot \cos\left(\omega_i \cdot \frac{t}{T_c} - \Phi_i\right) \cdot \sum_{i=1}^2 e^{\frac{\alpha_i t}{T_c}} \cdot \text{rect}[0, T_c] \quad (26)$$

$A_1=0,4023$; $A_2=0,7163$; $\omega_1=2,839$; $\omega_2=1,176$; $\Phi_1=0,7553$; $\Phi_2=0,1602$; $\alpha_1=0,4587$; $\alpha_2=1,107$.

Ošitov impuls («Oshita's pulse»),
 $\alpha=0,5$; $c=0,24953$

$$\Psi(t) = 1,62016 \cdot \frac{\sin \pi \frac{t}{T_c}}{\pi \frac{t}{T_c}} \cdot \left(c \cdot \cos \alpha \pi \frac{t}{T_c} + \frac{\sin \alpha \pi \frac{t}{T_c}}{\alpha \pi \frac{t}{T_c}} \right) \quad (27)$$

Jedinični impulsi (26) i (27) normalizovani su tako da imaju jediničnu snagu.

Na osnovu relacije (13), za jedinične impulse (23) do (27), izračunate su vrednosti parametra m_ψ i prikazane u tabeli 1.

Tabela 1

Vrednosti parametra m_ψ za razne oblike jediničnih impulsa

Impuls	(23)	(24)	(25)	(26)	(27)
m_ψ	1/3	0,29331	0,24054	0,24902	0,22057

Numerički rezultati

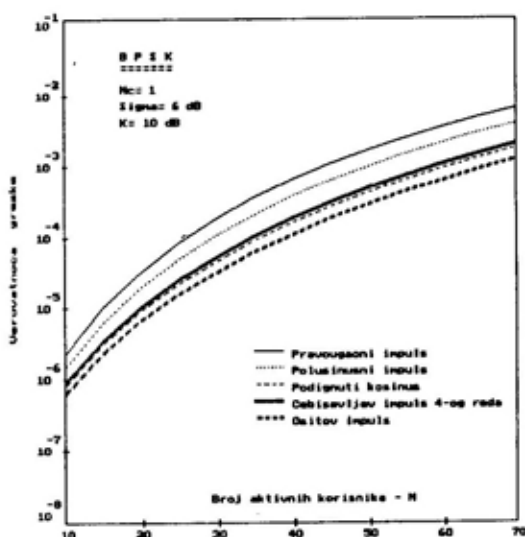
Uzete su sledeće vrednosti parametara: $\eta=511$, $K=10$ dB, $N_c=1$, $N_c=2$ i $N_c=3$. Dužina mikroćelije je $D=1$ km, a parametar koji opisuje uticaj senke je $\sigma=6$ dB. Vrednosti parametra f_i kao funkcije od σ i N_c prikazane su u tabeli 2.

Svi rezultati dobijeni su na PC-486 u programskom jeziku Turbo Pascal 7.0.

Tabela 2

Vrednosti parametra f_i u zavisnosti od σ i N_c

σ (dB)	$N_c=1$	$N_c=2$	$N_c=3$
0	0,1525	0,1525	0,1525
2	0,1886	0,1534	0,1534
4	0,3563	0,1580	0,1579
6	1,0288	0,1764	0,1730
8	4,5398	0,2514	0,2113

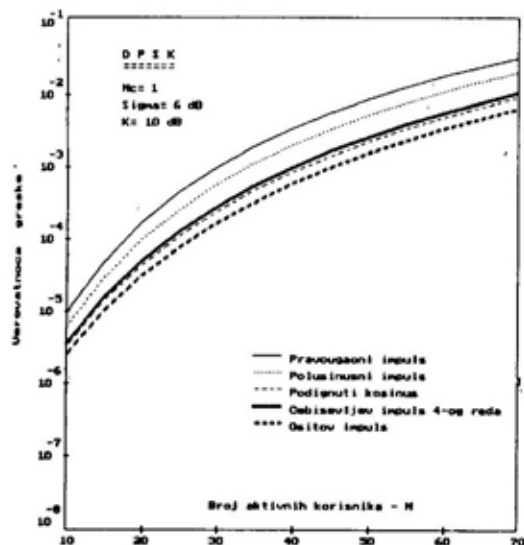


Sl. 2 — Zavisnost verovatnoće greške od broja korisnika po mikroćeliji za BPSK ($N_c=1$)

Zavisnost BER od broja korisnika po mikroćeliji prikazana je na slikama 2 (za BPSK) i 3 (za DPSK).

Primenjene su formule (7) za BPSK i (17) za DPSK.

Sa povećanjem broja aktivnih korisnika po mikroćeliji povećava se i verovatnoća greške. To je posledica povećanja srednje snage interferencije koja potiče od drugih korisnika. Za iste parametre bolje rezultate daje BPSK modulacija. Od svih oblika jediničnih impulsa, Ošitov impuls (Oshita's pulse) daje najbolje rezultate.

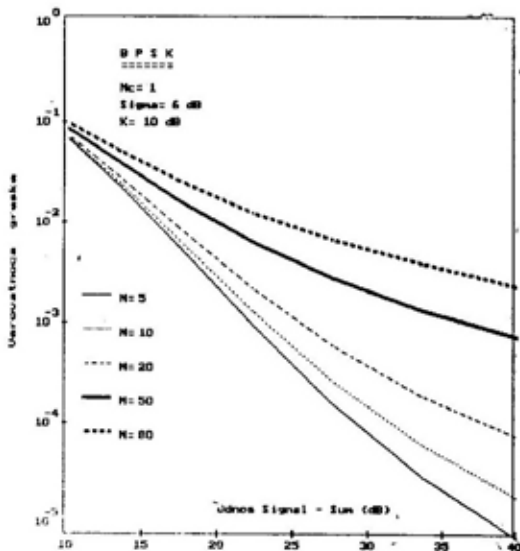


Sl. 3 — Zavisnost verovatnoće greške od broja korisnika po mikroćeliji za DPSK ($N_c=1$)

Zavisnost BER od SNR sa brojem korisnika po mikroćeliji kao parametrom, prikazana je na slikama 4 (za BPSK) i 5 (za DPSK).

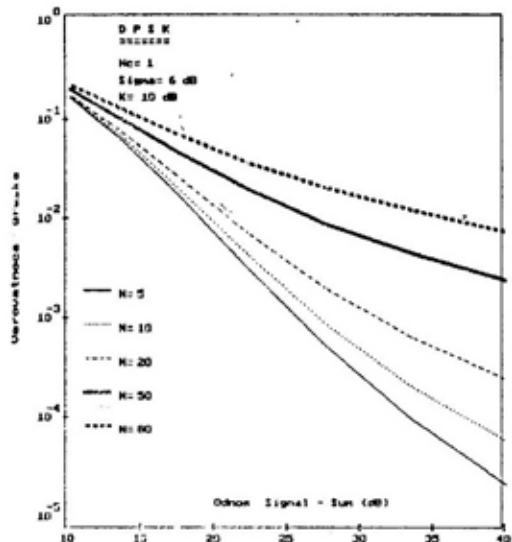
I u ovom slučaju primenjene su formule (7) za BPSK i (17) za DPSK.

Može se videti da se BER značajno povećava sa porastom broja korisnika

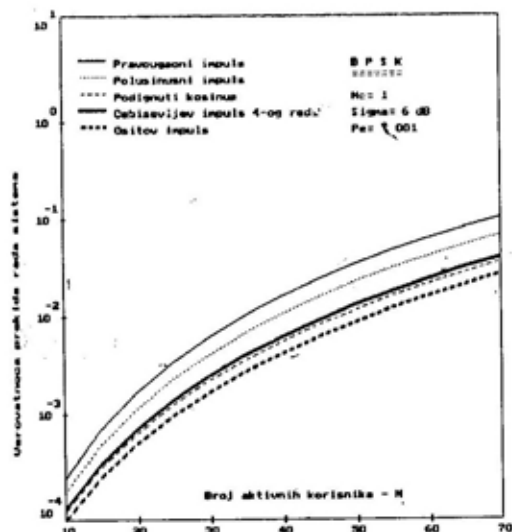


Sl. 4 — Zavisnost verovatnoće greške od odnosa signal-šum za BPSK ($N_c=1$)

po mikroćeliji. Za velike vrednosti odnosa signal-šum i sa porastom broja korisnika po mikroćeliji, BER postaje približno konstantno. I ovde BPSK modulacija daje bolje rezultate od DPSK modulacije.

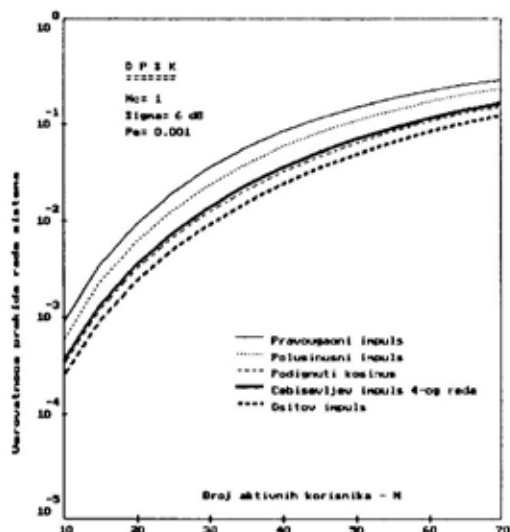


Sl. 5 — Zavisnost verovatnoće greške od odnosa signal-šum za DPSK ($N_c=1$)



Sl. 6 — Zavisnost verovatnoće prekida rada sistema od broja korisnika po mikročeliji za BPSK ($N_c=1$)

Zavisnost P_{out} (22), od broja korisnika po mikročeliji N prikazana je na slikama 6 (za BPSK) i 7 (za DPSK).



Sl. 7 — Zavisnost verovatnoće prekida rada sistema od broja korisnika po mikročeliji za DPSK ($N_c=1$)

Za parametar P_e uzeta je vrednost $P_e=0,001$. Posmatrano je svih pet oblika jediničnih impulsa.

Sa porastom broja korisnika po mikročeliji znatno raste i P_{out} , jer se porastom broja korisnika povećava i srednja snaga interferencije koja potiče od drugih korisnika. Kao i u prethodna dva slučaja, i u ovom BPSK modulacija daje bolje rezultate od DPSK modulacije.

Očigledno je da primena Ošitovog (Oshita) impulsa daje najbolje rezultate.

Zaključak

U ovom radu određene su performanse DS/CDMA linearnog mikročelijskog komunikacionog sistema u prisustvu fedinga, aditivnog Gausovog šuma i uticaja senke. Pri tome su razmatrane BPSK i DPSK modulacija.

Dobijeni rezultati pokazuju da za velike vrednosti odnosa signal-šum, pri velikom broju korisnika po mikročeliji, verovatnoća greške postaje približno konstantna. To znači da velika vrednost odnosa signal-šum kompenzuje negativan efekat interferencije usled velikog broja korisnika po mikročeliji.

Može se zaključiti da u slučaju analize verovatnoće greške u odnosu na broj korisnika po mikročeliji, kao i verovatnoće prekida rada sistema, nezavisno od broja korisnika po mikročeliji, najbolje rezultate pokazuje Ošitov impuls.

U svim slučajevima analize, dobijeni rezultati pokazuju da BPSK modulacija daje bolje rezultate od DPSK mo-

dulacije, kao i da od svih analiziranih oblika jediničnih impulsa Ošitov impuls daje najbolje rezultate.

Dobijeni rezultati mogu se koristiti pri projektovanju mobilnih komunikacionih sistema.

Literatura:

- [1] Lukatela, G.: Statistička teorija telekomunikacija i teorija informacija, Građevinska knjiga, Beograd, 1981.
- [2] Sun, C. M., Polydoros, A.: Performance Evaluation of Direct-Sequence Systems in Lineal Microcells, Proc. of 3rd IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and applications, 1994.
- [3] Polydoros, A. et al.: Integrated-Layer Communication Subsystem Study for IVHS, Communication Sciences Institute, University of Southern California, April, 1994.
- [4] Milstein, L., Rappaport, T., Barghouti, R.: Performance Evaluation for Cellular CDMA, IEEE Journal on Selected Areas in Commun., 9 vol. SAC-10, pp. 680-689, May, 1992.
- [5] Misser, H., Prasad, R.: Bit Error Probability of Microcellular Spread-Spectrum Multiple-Access System in a Shadowed Rician Channel, Proceedings of the 42nd IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 439-442, 1992.

Svetislav Lj. Marković,
dipl. inž.
Tehnički remontni zavod,
Čačak

NEKE KARAKTERISTIKE REGENERISANIH ZUPČANIK SA CEMENTIRANIM RADNIM POVRŠINAMA ZUBACA IZLOŽENIH HABANJU I KRUNJENJU

UDC: 621.833.1.01.004.54

Rezime:

U radu su prikazani rezultati ispitivanja na istovetnim uzorcima regenerisanih zupčanika sa cementiranim radnim površinama zubaca, koji su izbačeni iz eksploatacije zbog prekomernog habanja i krunjenja. Kontrolisane su geometrijske mere, profili, pravci bokova i radijalnog bacanja zubaca, kvalitet obrade i tvrdoća regenerisanih kontaktnih površina zubaca. Ispitivana je i tvrdoća po preseku zubaca, kvalitet navarenog sloja (defektoskopskim ispitivanjima) i mikrostruktura regenerisanih zubaca. Pored toga, analizirana je i ekonomičnost regeneracije u odnosu na novu izradu.

Ključne reči: zupčanik, regeneracija.

SOME CHARACTERISTICS OF REGENERATED GEARS WITH CEMENTED WORKING SURFACES OF COGS EXPOSED TO WEAR AND ABRASION

Summary:

The paper deals with the results of testing identical samples of regenerated gears with cemented working surfaces of cogs, put out of exploitation because of excessive wear and abrasion. Geometric measures, profiles, directions of flanks and cog radial eccentricity, quality of working and hardness of regenerated contact surfaces of cogs are controlled. The hardness of the cog cross section and the quality of welded-on layer are examined by defectoscopic tests as well as the microstructure of regenerated cogs. Finally the paper analyses the regeneration efficiency referred to completely new manufacturing.

Key words: gear, regeneration.

Uvod

Regeneracija zupčanika obuhvata otkrivanje njihovih oštećenja, uzroka i karaktera, primenu najracionalnijeg i najpouzdanijeg metoda regeneracije i metoda ojačanja radnih površina zubaca.

U toku eksploatacije na zupčanicima nastaju raznovrsna oštećenja venca i tela, kao što su: pohabanost rad-

nih površina, mehanička oštećenja, deformacije oblika i dimenzija, naprsline i lomovi. Većina zupčanika oštećenih u eksploataciji može se uspešno i pouzdano regenerisati.

Pod regeneracijom oštećenih zupčanika podrazumeva se takav redosled tehnoloških operacija koji ima za cilj povratak njihovih izgubljenih radnih karakteristika. Regeneracijom se moraju obezbediti nazivne mere i zahte-

vani kvalitet obrade površina, kao i pravilan geometrijski oblik i očuvanje (ili čak poboljšanje) osnovnih mehaničkih karakteristika materijala regenerisanog zupčanika. Da bi se to uspešno ostvarilo, neophodno je dobro poznavanje: uzroka koji izazivaju oštećenja, karakteristika nastalih oštećenja i njihovih dimenzija, metoda za utvrđivanje oštećenja, opreme za regeneraciju, osnovnih tehnoloških i fizičko-mehaničkih karakteristika metalnih slojeva koji se nanose na oštećene površine i drugih parametara.

Osnovni vidovi razaranja i oštećenja venaca zupčanika, u zavisnosti od uslova u kojima rade zupčanici, njihovih konstruktivnih i tehnoloških parametara, mogu biti:

- lom zubaca,
- krunjenje radnih površina zubaca,
- abrazivno habanje,
- zadiranje ili zajedanje,
- plastično deformisanje površinskih slojeva materijala,
- oštećenja čela zubaca.

Uzroci oštećenja zupčanika vezani su, s jedne strane, za netačnost podataka o opterećenjima, koja deluju na prenosnik i, s druge strane, za odstupanje stvarne čvrstoće zubaca od proračunske, pod uticajem konstruktivnih, tehnoloških i eksploatacionih faktora, nedovoljno uzetih u obzir pri projektovanju. Dejstvo različitih uzroka pokazuje se u pojavi dopunskih sila; koncentraciji napona, nepovoljnom rasporedu zaostalih (unutrašnjih) napona, smanjenju mehaničkih karakteristika materijala i slabljenju opasnog preseka zupca.

Najčešće korišćeni metodi defekcije zupčanika su:

- vizuelni metod (za uočavanje loma zubaca, krunjenja, zadora metala, plastičnog deformisanja, smicanja,

stvaranja jamica, naprslina na zupcima, glavčini i telu zupčanika),

— komparativni metod (upoređenjem sa etalon-zupčanicima radi određivanja veličine habanja, krunjenja, nagnječenja),

— tehnička merenja (merenjem mere preko zubaca i tetivne debljine zupca određuje se veličina habanja; merenjem prečnika otvora i širine žlebova određuje se istrošenost naležućih površina),

— laboratorijska ispitivanja (najčešće se meri tvrdoća radnih površina zubaca i određuje položaj i veličina naprslina — defektoskopskim ispitivanjima).

Regeneracija zupčanika može se odnositi na: regeneraciju glavčine, regeneraciju venca i tela, i regeneraciju zubaca zupčanika (slika 1).

Za većinu zupčanika, a posebno za zupčanike koji prenose veliku snagu, modula $m = 2,5$ do 6 mm, primenjuje se površinsko ojačanje zubaca, koje može biti termičko (indukciono kaljenje), termo-hemijsko (cementacija sa kaljenjem i nitriranje) i mehaničko (profilisanim valjanjem). Normalizacija, žarenje i poboljšanje koriste se za prethodnu termičku obradu zupčanika, koji će se podvrgnuti površinskom ojačanju. Ove operacije izvode se radi poboljšanja mehaničkih karakteristika materijala zubaca i smanjenja velikih unutrašnjih napona.

Parametri tačnosti regenerisanih zupčanika

Primer uzorka, kod koga gotovo uvek dolazi do krunjenja i habanja radnih površina zubaca, jeste zupčanik I brzine i hoda unazad menjača teškog guseničnog vozila. Pri radu ovog zupčanika polovina dužine zubaca učestvuje u prenosu snage u I brzini, a druga polovina prenosi snagu prilikom hoda unazad.

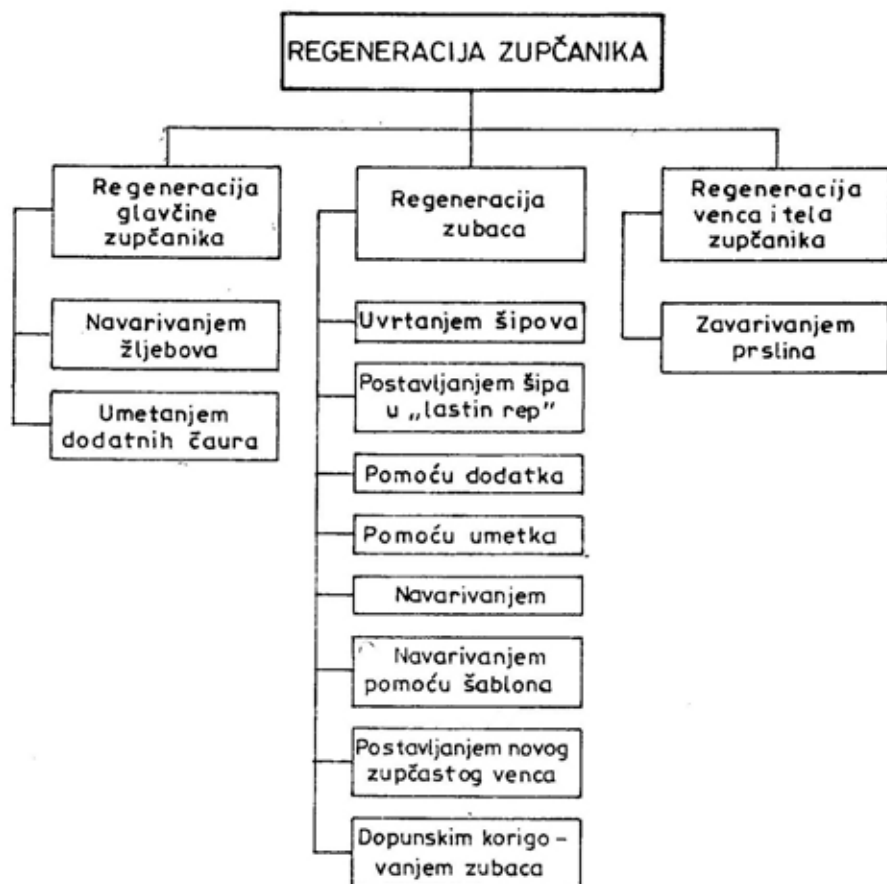
Ovaj zupčanik ima sledeće karakteristike:

— materijal izrade	Č.5421
— modul	$m=9$
— broj zubaca	$z=12$
— ugao osnovnog profila	$\alpha_0=20^\circ$
— ugao nagiba zupca	$\beta=0^\circ$
— podeoni prečnik	$d_0=108\text{ mm}$
— faktor korekcije	$x_m=+2,7\text{ mm}$
— podnožni prečnik	$d_f=96_{-1,5}\text{ mm}$
— korak na podeonom krugu	$t_0=28,27\text{ mm}$

Pri defektaciji zupčanika otkriveno je habanje zubaca od oko 0,3 mm

po debljini zupca na podeonom krugu na strani I brzine i oko 0,25 mm na strani hoda unazad. Pored toga, postoji veliko krunjenje cementiranih radnih površina zubaca u zoni oko i ispod kinematskog kruga. Analizom karaktera oštećenja utvrđeno je da su u ovom slučaju primarna prirodna oštećenja (nastala usled trenja i habanja površina izloženih velikim kontaktnim opterećenjima) u sprezi sa tehnološkim i poremećajnim oštećenjima.

S obzirom na visoke zahteve u eksploataciji, ocenjeno je da je najpouzdaniji metod regeneracije zupčanika ručno elektrolučno navarivanje. U okviru eksperimenta vršena su različita navarivanja na dva uzorka, i to:



Sl. 1 — Sematski prikaz metoda regeneracije zupčanika

— na prvom uzorku zupci su navarivani elektrodom CASTOLIN 2 po cejoj visini zupca;

— na drugom uzorku navarivanje je vršeno tako što su glava i noga zupca (2 do 3 mm po visini zupca) navarivani elektrodom CASTOLIN 680S, a između ta dva navara — elektrodom CASTOLIN 2.

Postupak regeneracije oba uzorka je gotovo istovetan, a sastoji se od: odmašćivanja, defektacije, brušenja radi skidanja oštećenog cementiranog sloja (4,0 NČ — norma časa), pranja (0,2 NČ), navarivanja (3,0 NČ), bravarskih radova — dovođenje zubaca na približan oblik ručnom električnom brusilicom (2,0 NČ) i završnog brušenja zubaca — obimno, čeonu i bočnih površina (10,0 NČ).

Kontrolom i ispitivanjem na evolventometru tipa KLINGELNBERG dobijene su vrednosti karakterističnih parametara, koje su prikazane u tabeli 1. Pored toga, date su i zahtevane vrednosti tih parametara radi lakše komparacije rezultata.

Metodom fero-fluks utvrđeno je da je kvalitet navarenog sloja dobar, to jest nema šupljina, naprslina i drugih neispravnosti.

Tvrdoća po preseku zubaca merena je na uređaju za merenje mikrotvrdoće LEITZ WETZLAR metodom Vickers (HV2) sa silom opterećenja od 19,61 N. Šematski prikaz raspodele tvrdoće kod zubaca zupčanika navarenih elektrodom CASTOLIN 2 dat je na slici 2. Na apscisi je prikazana udaljenost od površine zupca (mm), a na or-

Tabela 1

Parametri kvaliteta regenerisanih zupčanika brzine i hoda unazad

Redni broj	Kontrolisani i ispitivani parametri	Zahtevane vrednosti	Vrednosti dobijene na prvom uzorku	Vrednosti dobijene na drugom uzorku
1.	Temeni prečnik	$d_k = 127,8_{-0,5}$ mm	$d_k = 127,4$ mm	$d_k = 127,5$ mm
2.	Mera preko dva zupca	$W_2 = 43,2132$ mm $A_{w2} = -308$ μ m, $A_{w2} = -88$ μ m JUS M.C1.034	$W_2 = 42,92$ mm	$W_2 = 42,92$ mm
3.	Širina zupčastog venca	$b = 100_{-0,25}$ mm	$b = 99,9$ mm	$b = 99,9$ mm
4.	Tolerancija profila zubaca	$T_{\alpha} = 18$ μ m JUS M.C1.035	$T_{\alpha} = 16$ μ m	$T_{\alpha} = 15$ μ m
5.	Tolerancija bočne linije zubaca	$T_{\beta} = 18$ μ m JUS M.C1.033	$T_{\beta} = 13$ μ m	$T_{\beta} = 14$ μ m
6.	Radijalno bacanje zubaca	$T_r = 78$ μ m JUS M.C1.035	$T_r = 20$ μ m	$T_r = 18$ μ m
7.	Kvalitet obrade regenerisanih površina	N7	N7 $R_a = 1,60$ μ m JUS M.A1.020	N7 $R_a = 1,60$ μ m JUS M.A1.020
8.	Površinska tvrdoća	HRC ≥ 56	HRC = 55,9	HRC = 56,2 (na sredini zupca)

dinasti tvrdoća po Vickersu (HV2). Na prikazanom detalju dat je pravac merjenja tvrdoće.

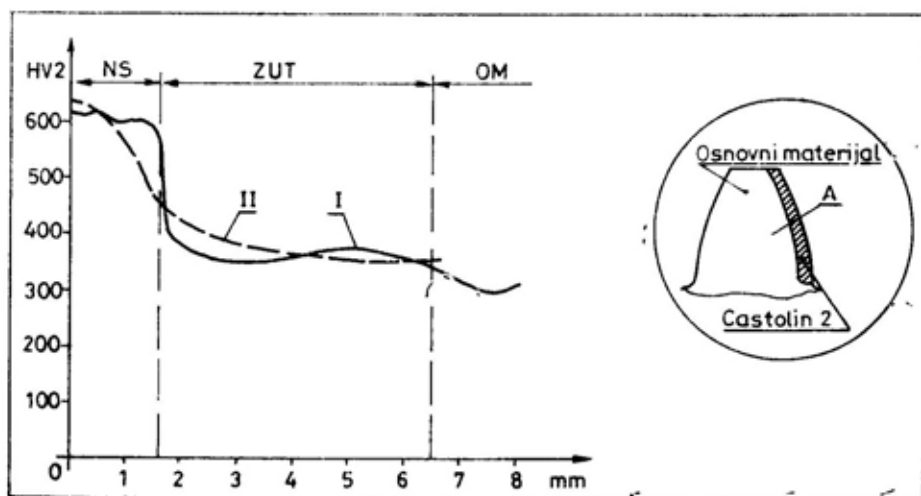
visoke tvrdoće CASTOLIN 2 u kombinaciji sa elektrodom srednje tvrdoće, ali izuzetno visoke otpornosti na krti

Tabela 2

Raspored tvrdoće po preseku zupca u pravcu A

Udaljenost od površine (mm)	Zona navara						Linija spoja	Zona pod uticajem toplote (ZUT)			
	0,2	0,4	0,9	1,1	1,4	1,5		1,6	1,7	1,8	2,0
Tvrdoća HV2	611	626	590	612	598	584	478	400	395	380	375
Odgovara HRC	54,9	55,7	53,7	54,9	54,1	53,3	46,7	40,5	40,1	38,9	38,5

Udaljenost od površine (mm)	Zona pod uticajem toplote (ZUT)						Osnovni materijal			
	2,5	2,8	3,3	4,3	4,8	5,3	6,5	7,0	7,8	8,0
Tvrdoća HV2	363	354	352	357	381	372	347	317	295	319
Odgovara HRC	37,5	36,7	36,5	36,9	39,0	38,3	36,0	32,6	29,5	32,9



Sl. 2 — Rasporeda tvrdoće po preseku zupca od čelika za cementaciju Č.5421 navarenog elektrodom CASTOLIN 2 (I) i novog zupca posle cementacije i termičke obrade (II)

NS — navareni sloj, ZUT — zona pod uticajem toplote, OM — osnovni materijal

Na slikama 3 i 4 prikazani su rezultati merjenja tvrdoće po preseku zubaca zupčanika navarenog elektrodom

lom, CASTOLIN 680S. Cilj p'imenjenog postupka jeste da se u zoni kontakta zubaca obezbedi visoka otpor-

nost na habanje, a da se zona mogućeg loma zupca navari materijalom visoke otpornosti na krti lom.

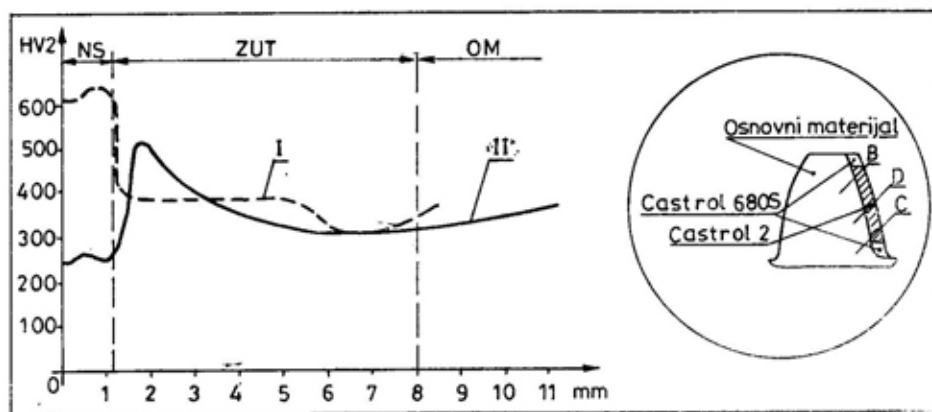
Metalografskim ispitivanjima određivana je mikrostruktura, priroda i oblik navarenog sloja. Uzorci su pri-

Tabela 3

Raspored tvrdoće po preseku zupca u pravcu B

Udaljenost od površine (mm)	Zona navara CASTOLIN 680S				Linija spoja	Zona pod uticajem toplote (ZUT)						
	0,2	0,5	1,0	1,4		1,6	1,7	1,9	2,1	2,4	2,7	3,2
Tvrdoća HV2	237	262	247	336	516	519	502	475	447	424	408	
Odgovara HRC	19,8	24,3	21,6	34,9	49,3	49,5	48,3	46,4	44,3	42,4	41,1	

Udaljenost od površine (mm)	Zona pod uticajem toplote (ZUT)					Osnovni materijal	
	3,7	4,7	5,7	6,2	7,2	10,2	11,2
Tvrdoća HV2	383	361	330	334	302	359	375
Odgovara HRC	39,1	37,3	34,2	34,6	30,5	37,1	38,5



Sl. 3 — Rasporeda tvrdoće po preseku zupca od čelika za cementaciju Č.5421 navarenog elektrodama srednje (CASTOLIN 680S-I) i visoke (CASTOLIN 2-II) tvrdoće

Rasporeda tvrdoće u slojevima navarenim na čelik za cementaciju i u zoni pod uticajem toplote u saglasnosti je sa raspodelom tvrdoće po preseku cementiranih slojeva na novoizrađenim zupcima.

premljeni i obrušeni, a zatim nagriženi 4% -tnim rastvorom HNO₃ i carskom vodom (3HCl + 1HNO₃). Zatim su posmatrani na mikroskopu METALLOPLAN — LEITZ WETZLAR sa uveća-

njima od 50, 100 i 200 puta. Metalografskim ispitivanjem nisu otkrivene greške tipa naprslina, pora, uključaka, neprovara i zarezova od pregrevanja. Iz-

strukturu sa ledeburitnim eutektikom između dendrita (slika 5). Na osnovu udela karbidne faze zaključuje se da se radi o dodatnom materijalu koji

Tabela 4

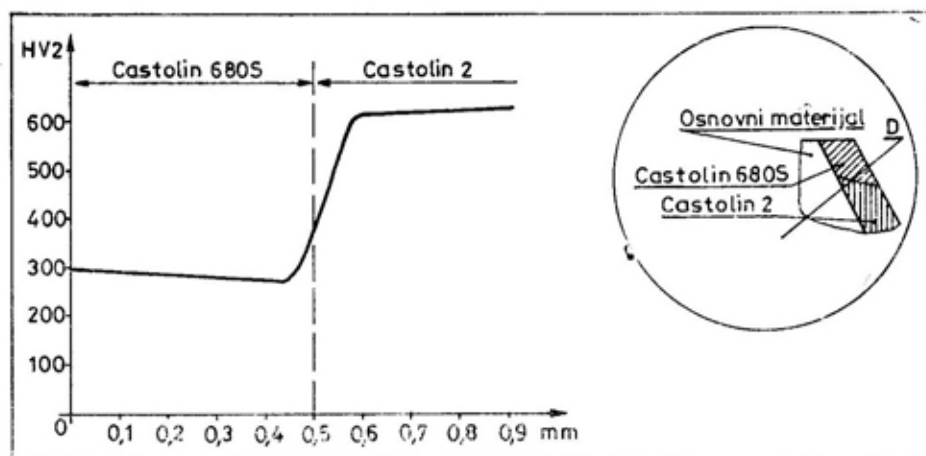
Raspored tvrdoće po preseku zupca u pravcu C

Udaljenost od površine (mm)	Zona navara CASTOLIN 2					Linija spoja	Zona pod uticajem toplote (ZUT)				
	0,2	0,5	1,0	1,1	1,15		1,2	1,3	1,4	1,5	1,8
Tvrdoća HV2	610	632	633	619	536	447	404	399	387	385	387
Odgovara HRC	54,8	56,1	56,1	55,3	50,6	44,3	40,8	40,4	39,5	39,3	39,5
	Zona pod uticajem toplote (ZUT)						Osnovni materijal				
Udaljenost od površine (mm)	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	8,5			
Tvrdoća HV2	383	388	384	387	323	309	343	369			
Odgovara HRC	39,1	39,6	42,2	39,5	33,4	31,5	35,6	38,0			

gled mikrostrukture navarenih slojeva prikazan je na slikama 5 i 6.

Slojevi navareni elektrodom CASTOLIN 2 imaju usmerenu dendritnu

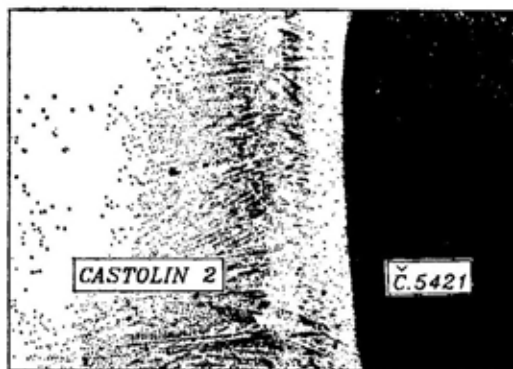
poseduje više legirajućih elemenata i karbidne faze od osnovnog materijala, a time i veću otpornost na habanje. Visokolegirani navari, sa dodatnim ma-



Sl. 4 — Rasporeda tvrdoće u zoni spoja slojeva navarenih elektrodama CASTOLIN 680S i CASTOLIN 2

terijalom CASTOLIN 680S, imaju pretežno austenitnu strukturu sa nižom otpornošću na habanje, ali sa visokom otpornošću na krti lom.

Radi dokazivanja ekonomske efektivnosti postupka regeneracije, u tabeli 6 prikazane su cene regeneracije i cene nove izrade. Za upoređenje je uzeta regeneracija prvim — skupljim metodom. Kao srednja vrednost norma-časa (NČ) uzeta je cena od 10 DEM, i cena materijala (čelik i elektrode) koja je važila na domaćem tržištu u leto 1995. godine (preračunato u DEM).



Sl. 5 — Mikrostruktura sloja navarenog elektrodom CASTOLIN 2 na bok zupca od čelika za cementaciju Č.5421 (nagrizanje 4% HNO₃, povećanje 50 x)

Tabela 5

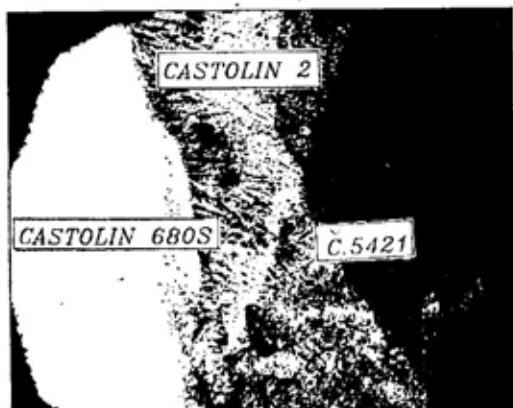
Raspored tvrdoće po preseku zupca u pravcu D

Udaljenost od površine (mm)	Zona zavara CASTOLIN 680S		Linija spoja	Zona navara CASTOLIN 2		
	0,2	0,4		0,6	0,7	0,9
Tvrdoća HV2	284	274	377	614	621	630
Odgovara HRC	27,8	26,2	38,7	55,0	55,5	56,0

Tabela 6

Pokazatelji ekonomske efektivnosti regeneracije

Vreme regeneracije	19,2 NČ (192 DEM)
Materijal potreban za regeneraciju	CASTOLIN 2, ϕ 3,2 mm, 300 g (70 DEM)
Ukupna cena regeneracije	262 DEM
Postupak nove izrade	strugarski radovi (6,5 NČ), glodački radovi (12,0 NČ), rendisanje (8,0 NČ), termička obrada (3,0 NČ) i brušenje (14,0 NČ)
Vreme nove izrade	43,5 NČ (435 DEM)
Materijal potreban za novu izradu	Č.5421, ϕ 130 x 110 mm, 12 kg (35 DEM)
Ukupna cena nove izrade	470 DEM
Ušteda	44,2 %



Sl. 6 — Mikrostruktura u zoni spoja slojeva navarenih elektrodam CASTOLIN 680S i CASTOLIN 2 na zupcu od čelika za cementaciju (nagrizanje $HCl:HNO_3=3:1$, povećanje 100 x)

Ušteda u procentima izračunata je po obrascu:

$$U = \frac{C_{ni} - C_r}{C_{ni}} 100 (\%)$$

gde je:

C_{ni} (DEM) — cena nove izrade,

C_r (DEM) — cena regeneracije.

U analizi ekonomičnosti nisu uzimani u obzir režijski troškovi, jer imaju približno isti procentualni udeo u troškovima nove izrade i regeneracije.

Zaključak

Analizom rezultata dobijenih ispitivanjem navedenih primera regenerisanih zupčanika moguće je izvesti određene zaključke.

Pošto su regenerisani zupčanici potpuno simetrični moguće ih je montirati na vratilo zaokrenute za 180° . Time se postiže da neregenerisane površine zubaca budu radne, dok bi regenerisane bile neradne. Na taj način bi se gonjeni zupčanici I brzine i hoda

unazad sprežali sa cementiranim površinama zubaca regenerisanog zupčanika.

Geometrijske karakteristike, zahtevane tolerancije i odstupanja, kao i kvalitet obrade površina regenerisanih zupčanika potpuno odgovaraju propisanim i standardizovanim vrednostima.

Zahtevane mehaničke karakteristike (pre svega površinska tvrdoća) lako se postižu primenom odgovarajućih materijala za navarivanje.

Poboljšanje svih mehaničkih karakteristika regenerisanih zupčanika moguće je ostvariti pažljivom i dobro organizovanom pripremom za navarivanje, izborom adekvatnih dodatnih materijala i režima navarivanja, striktnim pridržavanjem propisanih režima rada, kao i tačno definisanim i pažljivo izvedenim postupkom ojačanja radnih površina zubaca.

Imajući u vidu hemijski sastav osnovnih i dodatnih materijala može se zaključiti da bokovi navarenih zubaca, pod uslovom da se obezbedi kvalitetno navarivanje i mašinska obrada, poseduju tvrdoću i otpornost na habanje, gotovo istu kao i novoizrađeni zupci.

S obzirom na to da se navarivalo elektrodam koje se odlikuju malim unošenjem toplote u zonu pod uticajem toplote metalografski je potvrđeno da je oblik navarene strukture povoljan. Takođe, nije uočeno prisustvo makroskopskih grešaka tipa naprslina, pora, uključaka i neprovara.

Ekonomska efektivnost regeneracije svih zupčanika je očigledna i iznosi oko 50% za navedene primere cilindričnih evolventnih zupčanika sa pravim zupcima, koji su prilično jednostavne konstrukcije. Što su zupčanici veći i složenijeg oblika, i ušteda izvođenja regeneracije u odnosu na novu izradu je veća.

Za regeneraciju se koristi standardna oprema koju poseduju gotovo sva metaloprađivačka preduzeća (aparati

za ručno elektrolučno zavarivanje, glodalice i brusilice za izradu zupčanika, univerzalne glodalice, rendisaljke, brusilice i strugovi, kao i ručni bravarski uređaji). Investicioni troškovi su minimalni.

Prednost regeneracije je i u skraćivanju vremena zastoja sklopa kojem oštećeni zupčanik pripada, zbog kraće mašinske obrade i izbegavanja teškoća nabavke visokokvalitetnih čelika za cementaciju.

Literatura:

- [1] Marković, S., Josifović, D.: Uštede u materijalu i troškovima obrade pohabanih zupčanika metodom regeneracije, Tribologija u industriji, XVII/4, Kragujevac, 1995.
- [2] Marković, S.: Karakteristike parametara tačnosti regenerisanih zupčanika, magistarski rad, Mašinski fakultet Kragujevac, 1996.
- [3] Marković, S.: Regeneracija zupčastih i ožljebljenih sprega, Vojnotehnički glasnik, Beograd, 2/1994.

Dr Svetomir Minić,
potpukovnik, dipl. inž.
Odeljenje za naučno-
istraživačku delatnost
GŠ VJ, Beograd

SIGURNOST FUNKCIONISANJA — STANDARDI IEC TC 56

— prikaz knjige —

U izdanju Društva Srbije za kvalitet i standardizaciju, Centra za kvalitet — CENK Instituta »VINČA« (preko VINKOMB — EUROSISTEMS) i »Kluba NT«, Beograd, objavljena je knjiga SIGURNOST FUNKCIONISANJA — STANDARDI IEC TC 56, autora dr Svetozara Jovičića, dipl. inž., naučnog savetnika TOC-a VJ i prof. dr Jovana B. Todorovića, dipl. inž., redovnog profesora i šefa Katedre za motorna vozila na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu, istaknutih i uglednih naučnika u oblasti pouzdanosti i efektivnosti tehničkih sistema, kod nas i u svetskoj nauci.

Knjiga prikazuje ulogu i mesto serije standarda IEC 300, odnosno IEC TC 56, u procesu realizacije performansi »sigurnosti funkcionisanja« (»Dependability«), odnosno performansi ukupnog »kvaliteta u upotrebi« (»Quality of service«). Potreba za ovim razjašnjenjima proizašla je iz novog sistema vrednovanja i karakterizacije kvaliteta tehničkih sistema i proizvoda, koji je prekinuo dosadašnju praksu da se o kvalitetu govori prvenstveno sa stanovišta proizvođača, odnosno proizvodno-tehnoloških procesa koji se odvijaju pre početka korišćenja proizvoda već, pre svega, na osnovu svojstava koja se iskazuju u upotrebi proizvoda, tj. u procesu njegovog korišćenja. Ovim pitanjima neposredno se bavi Tehnički komi-

tet TC 56 Međunarodnog elektrotehničkog komiteta IEC, čiji je osnovni zadatak publikovanje standarda koji će omogućiti što lakše obezbeđenje visokih vrednosti svih potrebnih svojstava proizvoda, kao i promovisanje savremenih prilaza kvalitetu i odgovarajućih tehničkih disciplina u svim granama inženjerstva i u svim oblastima tehničkih nauka.

Tehnički komitet IEC TC 56 »Sigurnost funkcionisanja« čije su publikacije i bile osnov za sadržaj ove knjige, koji je osnovan 1964, do sada je publikovao ili je u pripremi više od 60 međunarodnih publikacija — standarda, koje se na razne načine bave problemima ostvarenja postavljenih zahteva za ove performanse. Osnovni zadatak ove knjige je informativna prezentacija namene, ciljeva, zadataka, metoda i postupaka datih u pomenutim publikacijama — standardima, radi pomoći stručnjacima iz ovih disciplina prilikom rešavanja zadataka. Standardi IEC TC 56 neposredno se bave programima, planovima i tehnikama za realizaciju zahteva za pomenute performanse, na osnovu relevantnih inženjerskih disciplina i novih prilaza integralnog kvaliteta.

Standardi serije IEC 300 i standardi serije ISO 9000 komplementarni su, pa zajedno omogućavaju proizvođaču da na tržište iznese proizvode koji su

ne samo provereni i atestirani u pogledu kvaliteta ostvarenog u procesu proizvodnje (AQS), već i one u koje je ugrađen i kvalitet koji će se iskazati u procesu korišćenja. To proističe i iz strateških opredeljenja Komiteta IEC TC 56, na čijim osnovama su izgrađeni ciljevi i programi rada, a određeni su i svi elementi i zadaci programa za obezbeđenje performansi »sigurnost funkcionisanja«. Iz toga slede i veze sa drugim standardima. U prilogu objavljene knjige prezentiran je pregled izdatih publikacija, kao i publikacija koje su u pripremi.

U procesu implementacije koncepta »kvaliteta u upotrebi« i njegove neodvojive komponente »sigurnosti funkcionisanja«, dominantan značaj imaju sledeće četiri grupe pitanja:

— organizacija preduzeća i njihovih struktura, odgovornosti i nadležnosti poslovnih i drugih organa, uključujući propise za izvođenje svih proizvodnih i drugih postupaka koji utiču na kvalitet proizvoda, (definiše se standardima ISO 9000);

— nivo znanja i obučenosti, posebno u području inženjerskih disciplina, (definiše se standardima IEC 300, IEC 706, IEC 605 i dr.);

— troškovi, odnosno elementi ekonomskog karaktera, u celom ciklusu proizvoda, tj. »ukupni troškovi veka« (»Life cycle cost« — LCC), (metodološki određeni standardima IEC 300-3-3);

— sinergetsko razmatranje svih performansi proizvoda i celog sistema, po pravilu na osnovu odgovarajućih »zvaničnih revizija projekta« (metodološki određeno standardima IEC 1160).

Knjiga je namenjena svim stručnjacima koji se bave složenom problematikom kvaliteta proizvoda, a posebno implementacijom novih pogleda na »kvalitet u upotrebi«, kao osnovom za ovladavanje tržištem, odnosno za obezbeđenje profita. Pri tome se ima u vidu da se aktuelni »talas brige o kvali-

tetu ne može zaustaviti samo na »međnadžmentu« već mora zahvatati sve inženjerske strukture koje se bave svojstvima i performansama kvaliteta, a posebno performansama »kvaliteta u upotrebi«. Sasvim je sigurno da danas, više nego ranije, prosperitet svake zemlje zavisi od načina na koji se obrazuju i usavršavaju njeni stručnjaci. Međunarodni standardi su plod aktivnosti impozantnog broja eksperata iz raznih oblasti. Svedoci smo da se mašinstvo i elektrotehnika, hardver i softver, računarstvo i telekomunikacije sve više prožimaju, nudeći neslućene mogućnosti u oblastima prenosa, procesiranja i obrade informacija, kompjuterizacije projektovanja, razvoja i proizvodnje, automatizacije proizvodnih procesa, robotizacije, fleksibilne proizvodnje, velikih digitalizovanih telekomunikaciono-računarsko-informacionih sistema i mreža, itd. Postoji velika potreba da se ova nova znanja i naučno-tehnološki prodori što pre prenesu u oblasti materijalne proizvodnje, tj. na inženjerske strukture, što se najbolje može učiniti korišćenjem novih međunarodnih standarda.

Knjiga SIGURNOST FUNKCIONISANJA — STANDARDI IEC TC 56 sadrži poglavlja:

— Tehničko-tehnološki prodori i posledice,

— Nova karakterizacija kvaliteta,

— Standardi IEC TC 56: »Sigurnost funkcionisanja«,

— Standardi serije IEC 300 i njihova povezanost sa drugim standardima,

— Dokumenti IEC-300-3-n: Uputstva za primenu (Application guides),

— Dokumenti IEC-N: Pomoćni standardi (TOOLS),

— Dokumenti IEC 706: Uputstvo za pogodnost održavanja,

— Još nekoliko važnih standarda,

— Koordinacija standarda ISO TC 176 I IEC TC 56.

U prvom poglavlju knjige istaknuti su aspekti i posledice velikih naučnih i tehnoloških prodora, čiji smo svedoci i učesnici više od pet decenija. Tehnički sistemi postali su složeni po svojoj strukturi, tehnologiji gradnje, operativnim mogućnostima, načinu upotrebe i metodama održavanja. Postignuti rezultati doveli su do daljeg razvoja mnogih segmenata materijalne proizvodnje i geoekonomije u celini, izazivajući velika prestrukturiranja, relokacije, vertikalne integracije i dezintegracije mnogih firmi u svetu. Upravo ta složenost i masovnost tehničkih sistema nametnula je potrebu za novim prilazima obezbeđenja kvaliteta, definisanja zahteva, projektovanja, razvoja, proizvodnje i načina održavanja, ne samo zbog tehničko-tehnoloških razloga, nego i zbog velikih posledica koje mogu da nastanu na ekonomskom planu zbog njihove neraspoloživosti. Danas se pojam kvaliteta više ne zadržava na tehnološko-proizvodnim aspektima i funkcionalno-operativnim karakteristikama već obuhvata aspekte pouzdanosti, pogodnosti održavanja i logistike i njihov uticaj na cenu »vlasništva«, uključujući pitanja ekologije, ergonomije, bezbednosti, sigurnosti, kao i razne implikacije zakonske prirode koje mogu da nastanu tokom upotrebe proizvoda.

Važno je da se istakne da se u našoj zemlji mora prihvatiti činjenica da se u celom svetu ukupni reprodukcioni sistem ubrzano kreće u pravcu implementacije koncepta integralnog kvaliteta, a time i koncepta »kvaliteta u upotrebi«, obuhvatajući time i njegovu bitnu i neodvojivu komponentu »sigurnost funkcionisanja«. Zato je neophodno da i naši inženjeri raspolažu pravim informacijama o aktuelnim zbivanjima na području međunarodne standardizacije, posebno sa stanovišta iskazivanja kvaliteta, definisanja zahteva korisnika i metodologije obezbeđenja kvaliteta u svim fazama životnog ciklusa — od

projektovanja i razvoja, do proizvodnje, eksploatacije i održavanja. Zato standardi IEC TC 56 treba i kod nas da predstavljaju svojevrstni most između nauke i industrije, inženjerstva i materijalne proizvodnje. Samo zajednički napori naše nauke, industrije i države mogu u ovom pogledu dati upotrebne i očekivane rezultate.

U drugom poglavlju prezentirana je nova karakterizacija kvaliteta. Složenost procesa korišćenja i upotrebni performansi, zajedno sa kompleksom problema vezanih za održavanje i logističku podršku, uključujući i ukupne troškove veka (a ne samo troškove nabavke, kako je to ranije bila praksa), prosto nameću potrebu za generalnijom karakterizacijom svojstava i kvaliteta tehničkih sistema, proizvoda i usluga. Kvalitet se u ovim prilazima mora posmatrati, prvenstveno, sa aspekta korisnika, ali ne zanemarujući interese i stanovišta proizvođača. Novi prilazi su rezultat saznanja o dubokoj međuzavisnosti pojedinih svojstava, performansi i komponenti kvaliteta, kao i o složenim mehanizmima njihovog uticaja na ukupne troškove veka proizvoda.

Do sada je izrađen značajan broj međunarodnih standarda, koji se bave problemima kvaliteta, i to ne samo sa stanovišta organizacije, nadležnosti i odgovornosti, procedura i postupaka već i u odnosu na realizaciju svih važnih komponenti kvaliteta i odgovarajućih osnovnih performansi. Standardi koje pripremaju tehnički komiteti ISO TC 176 i IEC TC 56 u ovom okviru imaju posebni značaj.

Nova karakterizacija kvaliteta prekinula je dosadašnju praksu da se o kvalitetu govori prvenstveno sa stanovišta proizvođača, odnosno na kraju tehnološko-proizvodnih procesa, koji se odvijaju pre nego što proizvod počne da se koristi. Stvarni »kvalitet« iskazuje se u upotrebi proizvoda. Ovakav prilaz se odrazio u međunarodnom standardu IEV 50 (191), koji je objavljen

1990. i u kome su date i nove definicije osnovnih pojmova iz ove oblasti, od kojih je najvažniji, verovatno, pojam »kvalitet u upotrebi« (Quality of service). Novi prilaz omogućava da se ukupna svojstva tehničkog sistema iskažu na način koji više odgovara korisniku. U ovom slučaju svojstva, odnosno osobine sistema, definišu se kao performanse za određene funkcije. Ovaj novi, tzv. sinergetski prilaz razmatranju sistema zasniva se na kompleksnom i zajedničkom razmatranju svih problema na nivou sistema u celini, obuhvatajući sve osobine, svojstva i performanse sistema i njihove međusobne uticaje.

Performansa »sigurnost funkcionisanja«, kojom se bavi TC 56, odnosno činioci koji na nju utiču: pouzdanost, pogodnost održavanja i logistika, ima poseban značaj, jer određuje stepen raspoloživosti i predstavlja dominantan faktor u troškovima veka proizvoda. Tehnički sistem koji ne zadovoljava jednu od ove tri karakteristike neće biti raspoloživ. Otuda su razumljivi sve veći zahtevi i potrebe da se upravo ove inženjerske discipline izučavaju i usavršavaju ovladavanjem skupom teorijskih, empirijskih i heurističkih postupaka i metoda, ostvarujući most između nauke i materijalne proizvodnje.

Ostala poglavlja knjige posvećena su standardima IEC TC 56. Ako se i kod nas prihvati činjenica da je performansa »sigurnost funkcionisanja« danas neodvojivi deo kvaliteta u upotrebi (Quality of service), naše buduće aktivnosti ne mogu više izostavljati o-

vaj veliki opus standarda. Čitaocima ove korisne knjige ostaje da bolje upoznaju pojedine standarde, a ovde navodimo samo nekoliko koji sve više privlače pažnju, a samo su jedan deo publikacija Tehničkog komiteta IEC TC 56 »sigurnost funkcionisanja«:

— Elementi i zadaci programa za obezbeđenje SF, 300-2;

— Tehnike za analizu SF, 300-3-1;

— Prikupljanje podataka u toku korišćenja proizvoda, 300-3-2;

— Ukupni troškovi veka, 300-3-3;

— Pouzdanost ljudskog faktora, 300-3-8;

— Analiza rizika tehnoloških sistema, 300-3-9;

— Integralna logistička podrška, 300-3-12;

— Ispitivanje pouzdanosti uređaja, opus IEC 605;

— Pogodnost održavanja i logistička podrška, IEC 706;

— Zvanični pregledi-revizije projekta, IEC 1060;

— Tehnike analiza (FTA, FMTA, Markova), itd.

Ukoliko knjiga SIGURNOST FUNKCIONISANJA — STANDARDI IEC TC 56 pomogne našim stručnjacima da se brže i lakše snađu u svim složenim situacijama koje se pojavljuju u toku rešavanja njihovih aktuelnih stručnih zadataka, i to korišćenjem iskustva velikog broja međunarodnih eksperata, ona će ispuniti svoj zadatak.



prikazi iz inostranih časopisa

SAMOHODNA HAUBICA 152 mm 2S3 AKACIJA*

Januara 1963. godine uvedena je u naoružanje SAD samohodna haubica 155 mm M109, koja je kasnije sačinjavala okosnicu artiljerije u vodećim zapadnim zemljama. Ovaj događaj podstakao je razvoj savremene ruske (tada još sovjetske) samohodne artiljerije.

Savremena borbena dejstva karakterišu se potencijalnim korišćenjem oružja za masovno uništenje, visokom pokretljivošću trupa, velikom vatrenom moći i boljom zaštitom ljudstva i ratnog materijala. Zbog toga se javila potreba za naoružanjem motorizovane pešadije i tenkovskih jedinica snažnim i veoma pokretljivim oruđima artiljerije. Taj problem mogao se rešiti stvaranjem nove vrste artiljerijskog oružja — samohodne artiljerije.

Samohodna artiljerija, ako se uporedi sa vučnom, ima niz značajnih prednosti, a među njima su:

— zaštita od oružja za masovno uništenje i oklopna zaštita od protiv-

ničke vatre koje, u kombinaciji sa visokim manevarskim sposobnostima, obezbeđuju velike mogućnosti opstanka vozila na bojištu,

— veliki stepen taktičke i operative pokretljivosti, dovoljna količina goriva za prevaljivanje velikih rastojanja i dobra prohodnost van puteva, koje obezbeđuju neprekidnu podršku tenkova i jedinica motorizovane pešadije u svim fazama borbenih dejstava,

— kraće vreme potrebno za posedanje vatrenog položaja, što znatno povećava vatrene mogućnosti samohodne artiljerije u uslovima savremenog izvođenja borbenih dejstava sa kratkim udarima,

— dovoljno veliki borbeni komplet municije, što može doprineti relativnoj nezavisnosti samohodne artiljerije.

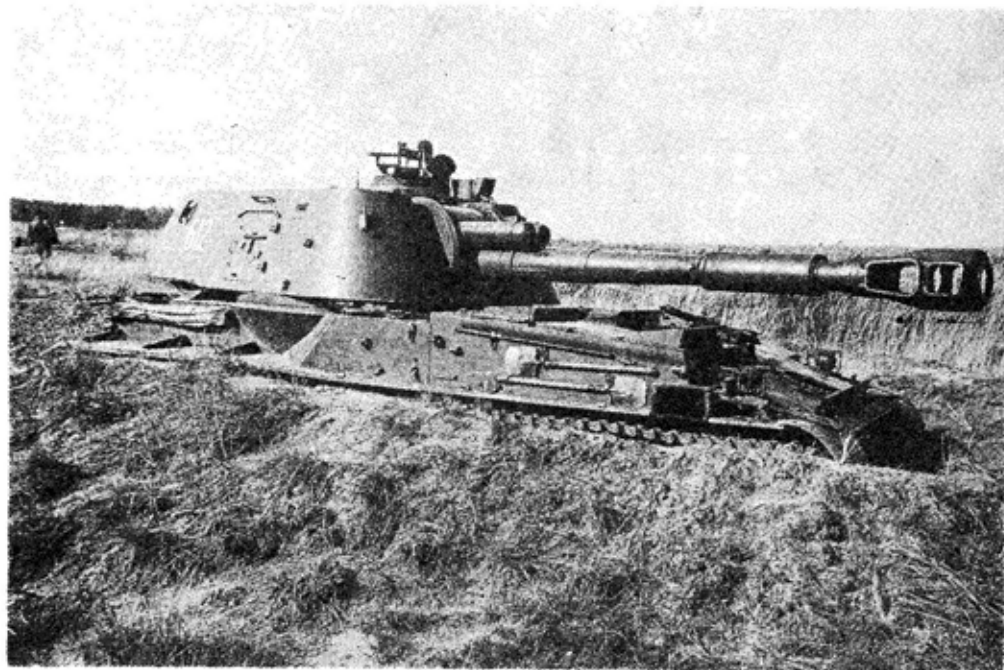
Razvoj ruske samohodne haubice 2S3 AKACIJA

Jula 1967. godine odlučeno je da se pristupi razvoju samohodne haubice kojoj je dat naziv 2S3 AKACIJA, a bila je namenjena da zameni haubicu-top 152 mm ML-20, top-haubicu D-20 i haubicu D-1.

* Prema podacima iz časopisa MILITARY PARADE, mart-april 1996.

Radu na razvoju samohodne haubice 2S3 AKACIJA prethodila je opsežna uporedna analitička obrada artiljerijskih oruđa razvijenih u toku rata (SU-100, SU-152) i u generacijama posleratnih artiljerijskih sistema. Kao rezultat ovih analitičkih radova razrađen je koncept razvoja savremene sa-

Međutim, osnovna šasija je modifikovana radi poboljšavanja performansi vozila. U nju je ugrađen višegorivni dizel-motor, snage 382 kW, umesto 240 kW. Zbog toga su delovi motora i sklopovi transmisije takođe modernizovani. Ugradnjom snažnijeg motora povećana je specifična snaga na 13,9



Samohodna haubica 152 mm 2S3 AKACIJA

mohodne artiljerije. Razmatrani su različiti pristupi izgledu samohodnih oruđa, sa obrtnom ili nepokretnom kupolom, kao i osnovna šasija vozila.

Šasija samohodne haubice 2S3 zasniiva se na šasiji bacača vođenih projektila zemlja-vazduh KRUG u koju su ugrađena najnovija dostignuća tehnike: kompozicija sa smeštajem motorskog odeljenja u prednjem delu vozila a dvostepeni bočni prenosnik i mehanizam za upravljanje izrađeni su kao jedan uređaj.

kW/t, čime su obezbeđene bolje performanse vozila. Takođe su modernizovane gusenice i sistem oslanjanja, povećan je kapacitet amortizera, a i karakteristike opterećenja torzionih štapova. Vozilo koristi gusenice sa gumenim umecima.

Samohodna haubica AKACIJA naoružana je haubicom 2A33 koja ima potiskivač projektila i barutnih punjenja u cev i zglobovu kašiku za prihvatanje praznih čaura. Pri osnovnom režimu gađanja haubica se puni municijom

sa zemlje. Proces punjenja vozila projektilima i barutnim punjenjima je mehanizovan, a obavlja se pomoću konvejera kroz otpor za punjenje u zadnjem delu vozila. Delovi metka se ručno postavljaju na konvejer koji ih donosi na specijalnu kašiku u borbenom odeljenju vozila. Sa ove kašike projektili i barutna punjenja se prenose na kašiku mehanizma haubice za potiskivanje u cev oruđa i potiskuju se u cev. Konvejer olakšava rad posluge haubice, dok mehanizovani proces potiskivanja elemenata metka u cev olakšava rad punioca i obezbeđuje stabilnu brzinu potiskivanja projektila i barutnih punjenja pri svakom položaju cevi i povećava brzinu gađanja haubice.

U kupoli i u njenom zadnjem delu postavljene su mehanizovane police za projekte. U police može da se smesti 46 metaka.

Konstruktori su uspešno rešili problem stabilnosti haubice pri ispaljivanju bez korišćenja trzajnih ašova, kako je to urađeno kod američke samohodne haubice M109. To je omogućilo posadi da skрати vreme prevođenja haubice u borbeni položaj i izvršavanja vatrenog zadatka u toku razvijanja u pokretu i kada se gađa sa velikim uglovima po pravcu.

Za pričvršćenje oruđa, kada je vozilo u pokretu, predviđen je specijalni držač na prednjem delu krova tela vozila. Ovaj uređaj omogućuje da vozač pričvrsti ili oslobodi cev bez izlaženja iz vozila.

Samohodna haubica ima dozersku opremu koja omogućuje iskopavanje zaklona za kratko vreme (20 do 40 minuta, zavisno od vrste tla), čime se povećava verovatnoća opstanka u borbi, posebno u uslovima upotrebe nuklearnog oružja.

Posada i unutrašnja oprema zaštićeni su od posledica primene nuklearnog oružja oklopom tela vozila, njegovim hermetizovanjem i održavanjem natpritisaka u borbenom odeljenju vaz-

duhom koji se prečišćava kroz filtersko-ventilacione uređaje. Pored svoje osnovne funkcije, ovi uređaji uspešno rešavaju problem smanjivanja gasova u borbenom odeljenju za vreme gađanja.

Za zagrevanje borbenog odeljenja u zimskim uslovima, samohodna haubica ima grejač OV-65G koji radi nezavisno od motora vozila pa se može koristiti za zagrevanje u pokretu i na zastancima.

Turela komandira haubice nalazi se na levoj strani krova kupole vozila. Komandir ima na raspolaganju mitraljez 7,62 mm PKT i osmatrački uređaj TKN-3A koji omogućuje komandiru da koristi mitraljez iz unutrašnjosti vozila. Obrtanje komandirove turele omogućuje kružno gađanje mitraljezom.

Na krovu kupole postoji uređaj koji omogućuje orijentaciju i fiksiranje oruđa na vatrenom položaju danju i noću, pri čemu članovi posade ostaju na svojim mestima. Samohodna haubica 2S-3 AKACIJA uvedena je u naoružanje decembra 1971. godine.

Obnovljena samohodna haubica AKACIJA proizvodi se više od dve decenije, i u tome periodu dva puta je modernizovana. Na primer, police za smeštaj municije modernizovane su za verziju 2S3M, čime je poboljšana pouzdanost i borbeni komplet municije za 150%. Novi nišan 1P-5, kao i 1V116, ugrađeni su u verziju 2S3M. Nišan 1V116 ima opremu za prijem komandi iz komandnog vozila baterije i mogućnost da podatke o podešenosti nišana 1P-5 prenosi natrag.

Razvoj samohodne haubice AKACIJA predstavlja i kraj monopolskog položaja američke haubice M109.

Kako familija američkih samohodnih haubica 155 mm M109 predstavlja okosnicu artiljerije u KoV SAD i mnogih drugih zemalja, preduzeti su koraci u toku sedamdesetih i osamdesetih

godina za njenu modernizaciju. Zamenom postojeće cevi dužine 23 kalibra novom cevi dužine 39 kalibara povećan je domet haubice M109A1 i M109A2/A3, kada gađa razorno-parčadnim projektilima M107, sa 14,6 na 18,1 km. O-

radi dovođenja karakteristika na savremeni nivo.

Od modernizacije haubice AKACIJA zavisice njene konstrukcione karakteristike i borbena efikasnost, koja nije inferiorna u odnosu na američke

Usporedne karakteristike samohodnih haubica

	2S3M1A AKACIJA	M109	M109A1
Kalibar (mm)	152	155	155
Borbena masa (t)	27,5	23,8	24,5
Borbeni komplet municije (metaka)	46	28	28
Masa razorno-parčadnog projektila (kg)	43,56	41,8	41,8
Maksimalni domet (m)	17300	14600	18100
Opseg pokretanja po visini (stepeni)	-4/+60	-5/+75	-5/+75
Opseg pokretanja po pravcu (stepeni)	360	360	360
Posada (članova)	4	6	6
Maksimalna brzina gađanja (metaka/min)	4	4	4
Maksimalna brzina na putu (km/h)	60	50	50
Maksimalna snaga motora (kW)	382,7	298	298
Nominalni pritisak na tlo (bara)	0,60	0,79	0,81
Autonomija vožnje putem (km)	500	350	350

čekuje se da ove haubice budu u naoružanju do 2005. (2010) godine.

Samohodna haubica 152 mm AKACIJA proizvedena je u velikom broju i nalazi se u naoružanju Rusije i drugih zemalja. Ima mogućnost modernizacije

M109A1, M109A2/A3 i M109G, a prevazilazi ih u dometu, borbenom kompletu, neprekidnosti vatre, izdržljivosti, specifičnoj snazi i nekim drugim parametrima.

P. M.

OKLOPNO VOZILO PEŠADIJE ACHZARIT*

Borbe ruskih trupa u Čečeniji pokazale su da su Rusima bila potrebna borbena vozila pešadije sa jačim oklopom nego što imaju vozila BMP. I u nekim drugim oružanim snagama pokazalo se da su borbena vozila pešadije postala ranjivija, pa je pristupljeno postavljanju dodatnog oklopa različitih vrsta radi poboljšanja balističke zaštite postojećih vozila.

Bez svake sumnje, oklopna zaštita borbenih vozila pešadije uveliko je ispod nivoa oklopne zaštite savremenih tenkova, uprkos činjenici da se očekuje da zajednički djeluju u neposrednoj blizini. Zbog toga je potrebno da se ojača oklop borbenih vozila pešadije, kako radi smanjivanja razlika koje postoje između tih vozila, tako i zbog povećanja njihove verovatnoće opstanka na bojištu. Bobena vozila pešadije treba da imaju jači oklop od tenkova, jer se od pešadije očekuje da zauzmu ciljeve kretanjem prema njima, dok tenkovi na ciljeve djeluju vatrom sa daljine.

Nedavno je i u KoV SAD shvaćena potreba da se borbena vozila pešadije još više ojačaju oklopom, pa je planiran razvoj budućeg borbenog vozila pešadije FIFV (Future Infantry Fighting Vehicle) na istoj šasiji kao što će je imati buduću borbeni tenkovi. Međutim, razvoj FIFV prekinut je kada je došlo do kolapsa programa modernizacije oklopnih sistema (ASM) 1991. godine. I da je bio razvijen, FIFV ne bi bio prvo teško oklopljeno vozilo pešadije koje je izrađeno, jer je primat u toj oblasti pripao izraelskoj vojnoj industriji.

Činjenica je da je projekat razvoja teško oklopljenog vozila pešadije iniciran još 1982. godine, mnogo pre nego

što se pomišljalo o programu modernizacije ASM, a prvi prototip bio je izrađen još 1987. godine.

Proizvodnja definitivne verzije vozila, koje je nazvano ACHZARIT, počela je 1988. Iz ekonomskih razloga za osnovu tog vozila uzeta je šasija ruskih tenkova T-54 i T-55 koje su izraelske oružane snage zarobile i koji se, u izvesnom broju, nalaze u naoružanju KoV Izraela. Međutim, šasija je uveliko modifikovana, jer su se Izraelci pokazali kao veoma vešti u rekonstruisanju oklopnih vozila, mada je, u ovom slučaju, proces napredovao.

Vozilo je zadržalo svoje originalne čelične gusenice i široke oslone točkove tenkova T-44/55, ali su ugrađene torziona opruge koje dozvoljavaju veći vertikalni hod točkova, a prvi i zadnji točak imaju i hidrauličke amortizere koji, kao kod tenka MERKAVA, omogućavaju kretanje velikom brzinom preko ispresecanog zemljišta.

Zadržani su, takođe, zadnji pogonski točkovi i bočni prenosnici, kao i smeštaj motora u zadnjem delu vozila. Međutim, originalni ruski dizelmotor i njime povezana transmisija zamenjeni su novim pogonskim uređajem koji je, uglavnom, isti kao kod samohodnog oruđa 155 mm M109 koje se nalazi u naoružanju Izraela i nekih drugih zemalja.

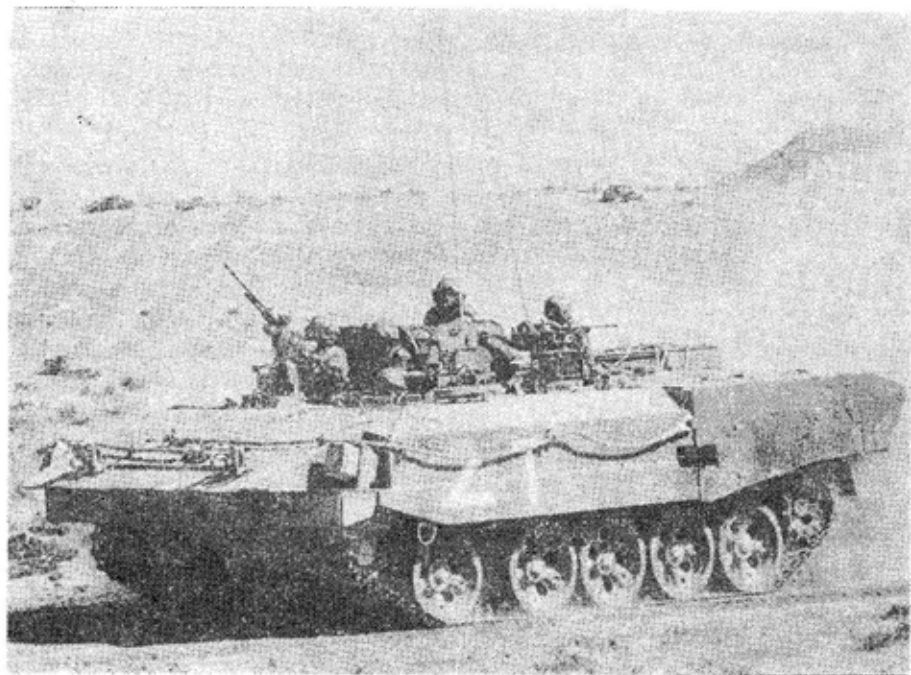
To je osmocilindrični dvotaktni dizelmotor 8V-71 TTA hlađen vodom, snage 485 kW. Motor je ugrađen poprečno i spojen je sa hidromehaničkom transmisijom HTG-411-4, tako da je upravljanje vozilom mnogo lakše nego što je to slučaj sa tenkovima od kojih je ono izvedeno. Napajanje motora vazduhom u različitim ambijentalnim uslovima može da se obavlja iz borbenog ili motornog odeljenja, preko pretprečištača sa ventilatorom za izbacivanje prašine i jednog papirnog prečištača.

Iako je pogonska grupa ugrađena u zadnji deo vozila, ona je dovoljno

* Prema podacima iz časopisa INTERNATIONAL DEFENSE REVIEW, 9/1995.

kompaktna i omogućava prolaz do borbenog odeljenja koje se nalazi u desnoj zadnjoj strani vozila. Ovaj prolaz zatvara se vratima za utovar koja imaju hidraulički pogon. Donji deo ovih vrata predstavlja ulazno-izlaznu rampu, dok se gornji deo, koji se preklapa napred, podiže naviše radi povećanja visine prostora za posadu. Uprkos

nju ima preko 44 t, dok je borbeno masa tenkova T-54 i T-55 36 t, a masa bez kupole oko 30 t. Druga indikacija o masi oklopa vozila ACHZARIT proističe iz podatka o njegovoj širini koja je 3,64 m, dok je širina tenkova T-54 i T-55 3,27 m. Zahvaljujući oklopu, borbeno vozilo pešadije ACHZARIT obezbeđuje visoki stepen balističke zaštite,



Oklopno vozilo pešadije ACHZARIT

tome što je motor postavljen u zadnji deo vozila, i izlaz za posadu nalazi se u zadnjem delu, što je veoma važno za borbeno vozilo pešadije. Dok smeštaj motora u zadnjem delu vozila otežava ulaz-izlaz u vozilo, takav položaj olakšava povezivanje motora sa originalnim bočnim prenosnicima. Štaviše, takav položaj uravnotežava veliku masu oklopa u prednjem delu vozila.

Mada podaci o masi oklopa i njegovoj vrsti za sada nisu poznati, pretpostavlja se da vozilo u borbenom sta-

a verovatnoća njegovog opstanka na bojištu povećana je relativno niskom siluetom, jer je visina do vrha tela vozila samo 2,00 m. Teški oklop je koncentrisan oko odeljenja za posadu, a izvestan deo oklopa ugrađen je na zadnji deo tela vozila sa obe strane u obliku perforiranih čeličnih ploča velike tvrdoće.

Borbeno odeljenje (odeljenje za posadu) može da primi 10 vojnika, uključujući i vozača čije je mesto u levom prednjem delu odeljenja. Do vo-

zača sa desne strane smešten je komandir vozila, a sa njegove desne strane nišandžija. Ostalih sedam članova posade nalazi se iza njih, i to trojica na klupi sa leve strane odeljenja, trojica na pojedinačnim sklapajućim sedištima sa desne strane i jedan u sredini zadnjeg dela odeljenja. Radi obezbeđenja više prostora, gornji deo bočnih strana tela vozila je odsečen, čime je znatno povećana širina odeljenja za posadu. Na svakom sedištu nalazi se savitljivo crevo individualnog NBH zaštitnog sistema kroz koje se u zaštitne maske članova posade dovodi prečišćeni vazduh.

Svako od tri prednja mesta članova posade ima otvor, a poklopac se može podići radi neposrednog osmatranja, uz zaštitu sa gornje strane. Iza prednja tri otvora postoje još dva otvora — jedan iznad sredine odeljenja za posadu, a drugi sa njegove leve strane. Vozač ima četiri nepokretna periskopa sa jednostrukim uvećanjem i još šest na krovu odeljenja za posadu — dva sa leve i četiri sa desne strane.

Mitraljezom 7,62 mm M240, koji je ugrađen na gornjoj ploči vozila, nišandžija rukuje iz vozila, tako da se ne izlaže opasnosti. Kada se gađa iz vozila, nišani se pomoću periskopskog nišana, koji obezbeđuje dnevno nišanje sa jednostrukim uvećanjem sa uglom vidnog polja od 25°, a postoji i kolenasti nišan sa osmostrukim uvećanjem i uglom vidnog polja od 8°. Takođe, postoji i noćni kanal sa pojačivačem slike druge generacije, koji omogućava posmatranje sa jednostrukim uvećanjem i uglom vidnog polja od 22°, ili sa sedmostrukim uvećanjem i uglom vidnog polja od 7°. Borbeni komplet mitraljeske municije čini 230 metaka, a smešteni su u spoljašnjim ili unutrašnjim municijskim kutijama.

Kada se municija nalazi u spoljašnjoj municijskoj kutiji (magacinu), tada postoji svetlosni pokazatelj koji svojim bleskovima upozorava nišandžiju kada sa rednikom u spoljašnjoj municijskoj kutiji treba spojiti sledeći rednik.

Pored toga, postoje još tri mitraljeza 7,62 mm na jednostavnim spoljašnjim postoljima. Oni se nalaze iznad otvora komandira vozila i na sledeća dva otvora u krovu vozila, tako da posada borbenog vozila pešadije ACHZARIT može da otvara jaku vartu.

U potpunoj suprotnosti sa savremenim borbenim vozilima pešadije, ACHZARIT nema kupolu sa topom, a razlog tome nalazi se u primarnoj nameni svakog oklopnog vozila pešadije — da što bezbednije doveze pešadiju tamo gde je potrebna — radi obavljanja zadataka koje samo ona može da obavi i to peške. Bilo kakvo odstupanje od ove osnovne namene smanjilo bi bezbednost ljudstva i njihov opstanak na bojištu bio bi doveden u pitanje. Oklopna vozila pešadije mogu da budu naoružana i automatskim topovima, ali na račun oklopne zaštite. Ostale zadatke mnogo bolje će obaviti tenkovi.

Oklopna vozila pešadije svakako treba da budu naoružana, uglavnom, za samoodbranu od tenkova na malim rastojanjima, u fazama kada izvršavaju svoju osnovnu namenu i dovoze pešadiju radi dejstvovanja na bojištu, a ne radi suprotstavljanja tenkovima. Izgleda da je takva koncepcija usvojena pri razvoju oklopnog vozila pešadije ACHZARIT, što predstavlja radikalno i preporučljivo odstupanje od ranijih tendencija u razvoju borbenih vozila pešadije.

P. M.

OKLOPNO VOZILO TVT SA PODIŽUĆOM PLATFORMOM*

Novi sistem protivoklopnog vođenog projektila PARS 3LR (Long Range — dugog dometa), poznat i kao AC3G ili LR TRIGAT, nalazi se u fazi razvoja u okvirima francusko-nemačko-britanskog programa. Sa dometom od 5000 m, ovaj novi sistem treba da zameni postojeće protivoklopne vođene sisteme dugog dometa kao što su HOT i SWINGFIRE. Nova generacija projektila sa IC samonavedenjem i sposobnošću »lansiraj pa zaboravi« prvi put je lansirana marta 1995. godine. Planirana su dalja ispitivanja sa nepokretnih lansera pre nego što se pristupi lansiranju sa oklopnog vozila, planiranog za početak 1996. godine. Kao deo ovog trilateralnog programa finansirana je izrada namenskog vozila-demonstratora, čija je oznaka TVT (trilateralno ispitno vozilo), a proizvedeno je krajem 1994. godine. Sada se vozilo nalazi u fazi ugradnje optroničkog sistema PARS-3 i podižuće platforme za ugradnju lansera.

Nemačka je 1980. godine planirala dugoročni program za opremanje KoV, posebno oklopnih jedinica, protivoklopnim vozilom, poznatim pod oznakom PzJg-KW (Panzer-jäger-Kampfwagen). Vozilo je imalo platformu koja je podizala lansere uvis, čime je omogućeno da vođeni projektili budu češće i potpunije iskorišćeni, uz istovremeno smanjivanje primetljivosti i ranjivosti sopstvenog vozila.

Preliminarna ispitivanja, uz pomoć modifikovanog prototipa jarbola za izviđački radar za male visine, obavljena su 1983. godine. Ona su potvrdila teoretske proračune taktičkih preimущества postojanja podižuće platforme za senzore i oružja. U okviru studijskih

radova o koncepciji buduće familije borbenih vozila KW-90, svi poznati nemački proizvođači tenkova dali su svoje predloge za PzJg-KW, koji je uskoro postao poznat kao razarač tenkova PANTHER. Kao rezultat odluke da se obustave radovi na razvoju borbenog vozila, naoružanog topom MK-KW, pored primarne namene vozila PANTHER za protivoklopnu borbu, dodata mu je uloga u borbi protiv helikoptera.

Predlog firme WEGMANN da se kao osnovno vozilo za novi sistem koristi tenk LEOPARD 1 kao najrentabilniji koncept, prihvaćen je, pa je dobijena osnova za sistem PANTHER. U toku 1988. godine obavljena je ponovna revizija koncepta, pa je finalna verzija dobila platformu bez posluge sa 8 vođenih protivoklopnih projektila HOT i 4 vođena projektila zemlja—vazduh STINGER. Doneta je odluka da se izrade četiri prototipa i da oni, posle zamene lansera, budu adaptirani kao platforma za PARS 3LR.

Po prestanku hladnog rata 1989—1990. godine ministarstvo odbrane Nemačke je odlučilo da dalje neće biti potrebno razvijati i nabavljati novi lovac tenkova, jer je iščezla opasnost od masovnog napada oklopnih vozila Varšavskog pakta, pa dalji razvoj PzJg KW PANTHER nije nastavljen.

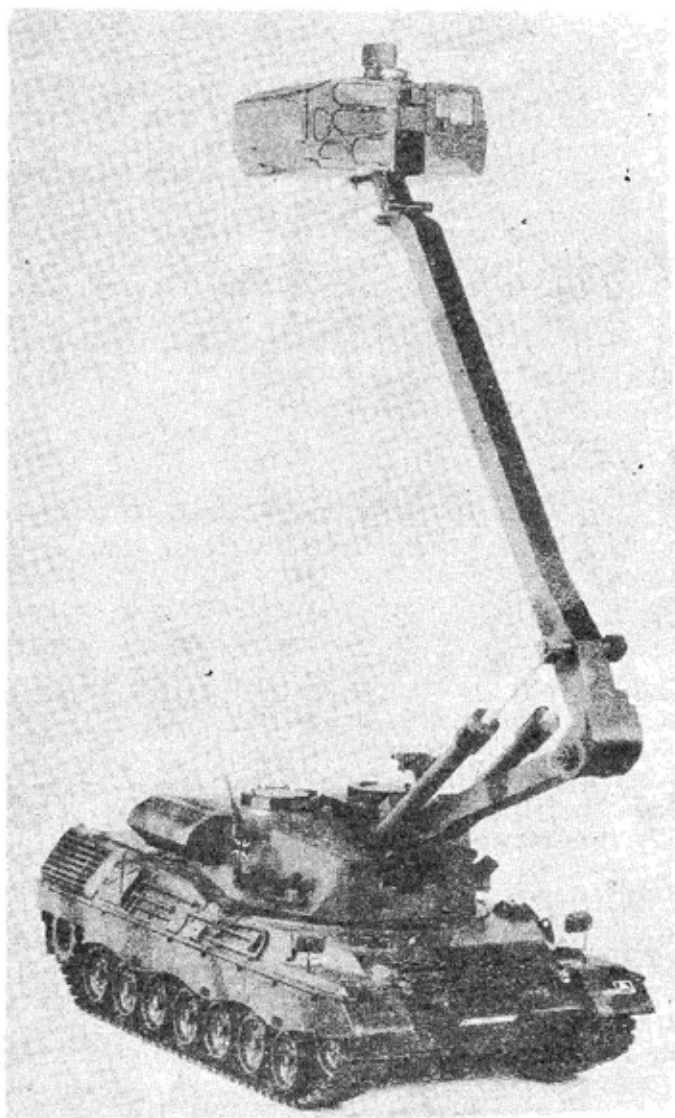
Ova je odluka, sa aspekta bezbednosti i odbrambene politike, bila razumljiva, ali, s druge strane, novi tehnički principi, primenjeni na ovom projektu, mogli su da budu korisni za poboljšanje taktike upotrebe. Pored toga, princip podižuće platforme mogao bi da bude isto tako primenjiv i kod drugih vojnih misija, na primer, kao platforma za senzore i radare, za osmatranje sa isturene osmatračnice, itd. Projekti ove vrste postali su veoma retki u industriji naoružanja.

Ipak, trilateralni projekat, TRIGAT/PARS 3, uz učestvovanje Francuske, Nemačke i V. Britanije, preživeo je

* Prema podacima iz časopisa INTERNATIONAL DEFENSE REVIEW, 8/1995.

bez obzira na sve tehničke, ekonomske i političke poteškoće. Prvo ispitno gađanje PARS 3 LR u poljskim uslovima protiv toplotnog cilja obavljeno je mar-

dižuće platforme bez posluge. Tada bi dobio značaj i TVT (vozilo demonstrator). Demonstrator bi zadržao sve pozitivne karakteristike ranijeg projekta



Oklopno vozilo TVT sa podignutom platformom

ta 1995. Sledeći korak biće dokazivanje da ovaj sistem može da bude integrisan u kopneni nosač oružja, tako da se vođeni projektili mogu upotrebiti sa po-

PANTHER, ali bi bio integralni deo programa TRIGAT u kome nosi naziv »kopneni ispitni nosač« (Ground Test Carrier) i više nema veze sa programom KAMPFWAGEN 90.

Uticaoj tenka LEOPARD 1 na TVT

Kao i raniji koncept firme WEGMANN, demonstrator TVT je zasnovan na tenku LEOPARD 1. Posle uklanjanja kupole, borbena odeljenje je rekonstruisano, kako bi se, pored ostalog, ugradili uređaji za hidrauličko podizanje jarbola i platforme, i za napajanje električnom energijom. Ova lansirna platforma, koja se niveliše električnim putem i može se okretati po pravcu, može se podići na visinu od oko 12 m za manje od 30 s. Njome se upravlja iz zaštićenog borbenog odeljenja sa tri člana posade. Ceo gornji deo, uključujući i jربول, može se okretati na šasiji. Međutim, smatra se da bi ovaj manevar bio potreban samo u izuzetnim slučajevima, na primer, pri vađenju motora ili radi smanjivanja visine vozila kada je u pokretu. Tada bi se ta operacija obavljala ručno. Radi uštede novčanih sredstava odustalo se od razvoja automatskog punjača za punjenje iz unutrašnjosti vozila.

Sa ukupnom masom od 41,5 t, demonstrator TVT ima istu pokretljivost kao i tenk LEOPARD 1. Vozilu nije potrebna nikakva druga potpora kada je jربول podignut, zahvaljujući maloj masi platforme i korišćenju stabilizacije primarnog nišana. Na platformi je ugrađen optronički senzor za cilj i osmatranje OSIRIS, sa dnevnim i noćnim kanalima. OSIRIS se, trenutno, nalazi u fazi ispitivanja i ugrađen je u prototip helikoptera TIGER. Jedna od njegovih funkcija jeste da omogućiti odabranom vođenom projektilu da »uhvati cilj« (pređe na automatsko praćenje cilja) još pre lansiranja, posle čega vođeni projektil nema potrebu održavanja veze sa matičnim vozilom. Zbog ekonomskih razloga pripadajuća displejska oprema, koja je ugrađena u borbena odeljenja vozila, odabrana je među onom opremom koja se koristi u nemačkom protivoklopnom helikopteru PAH-2 (Bo105).

Kao rezultat razvoja demonstratora TVT, koncept vozila—nosača oružja na gusenicama sa podizućom platformom, prvi put predviđen za PzJg-KW/PANTHER, biće realizovan. Izrada demonstratora TVT obezbediće nemačkoj vojnoj industriji iskustvo u problemima integracije i međusobne povezanosti vođenog projektila i lansera. Sa vojne tačke gledišta, ovakav koncept vozila je perspektivan, pa je i njegovo prihvatanje neizbežno. Slična će se vozila pojaviti na međunarodnom tržištu ili će ih u narednom periodu druge oružane snage uvesti u svoje naoružanje. Na primer, program engleskog izviđačkog vozila TRACER nudi prostor za adaptiranje vozila sa podizućom platformom PARS 3 LR.

P. M.

BUDUĆNOST EVROPSKIH VOZILA ZA LOGISTIČKU PODRŠKU*

Oslonac transportnog sistema gotovo svih oružanih snaga u svetu čine teški kamioni nosivosti 4 do 5 t i više. Svaka zemlja u odbrambene svrhe nabavlja ove teške kamione za logističke zadatke koji su obuhvaćeni vojničkim operacijama. Međutim, zbog izdvajanja znatnih novčanih sredstava za njihovu nabavku, kamioni su obično na dnu prioritete liste.

U poslednje vreme dramatično je opala proizvodnja vojnih kamiona, mada se u mnogim situacijama pokazalo da se snabdevanje za vojne i humanitarne svrhe najvećim delom zasniva upravo na njihovom korišćenju.

* Prema podacima iz časopisa INTERNATIONAL DEFENSE REVIEW, 8/1985.

Sa izvesnom sigurnošću može se prognozirati da će se ovo nepovoljno stanje za proizvođače kamiona nastaviti i u skoroj budućnosti. Mnogi evropski proizvođači kamiona odlučili su da svoje aktivnosti usmere na proizvodnju komercijalnih vozila ove vrste, a da vojne potrebe zadovolje civilnim modelima. Vojni programi će se prilagođavati civilnim propisima, kao što su nivoi ispuštanja izduvnih gasova, opterećenje po osovini i zahtev za mogućnost upravljanja prikolicom. Praktični efekti ovakvog stanja su manja potrošnja goriva, čistije sagorevanje i motori koje će kontrolisati elektronika.

Ipak, neki programi proizvodnje vojnih kamiona već su uspostavljeni.

Austrija

Uprkos smanjenim nabavkama Austrija je u toku proteklih godina imala uspeha u prodaji kamiona, kao što je razvijena verzija kamiona firme STEYR 12 M 18 koji je postao osnovno vozilo familije srednjih taktičkih vozila FMTV (Family of Medium Tactical Vehicles) američke KoV. Ista firma zaključila je obiman ugovor sa Kanadom za vozila 6 x 6 nosivosti 10 t PERCHERON i ima sklopljen savez sa grčkom firmom ELBO za licencnu proizvodnju kamiona firme STEYR u Grčkoj za nacionalne vojne potrebe, kao i za izvoz u pojedine zemlje, kao što je Kipar. Kamion STEYR 24 M proizvodi se po licenci i u Kini.

U asortiman teških kamiona spadaju modeli 26 M 39 (12 t), 26 M 42 (14 t). I kamioni 14 M 14 i 14 M 18 STEYR imali su dobru produkciju. Prvo je razvijen 14 M 14 sa većinom komercijalnih delova, pa je kao jeftin kamion 4 x 2 prodat Nigeriji. Evolucijom 14 M 14 postao je osnovni i ekonomičan kamion 4 x 4 sa nosivošću od 8 t, a koristi ga snage Kanade u Evropi.

Republika Češka

Najpoznatiji od svih čeških kamiona je T815, firme TATRA (slika 1). U početku je izrađivan u varijantama 8 x 8 i 6 x 6, da bi 1992. godine bila uvedena i varijanta 4 x 4, sa mogućnošću prevoženja tereta od 5,6 t do preko 12 t svim vrstama puteva. Serija T815 nije najjeftinija u svojoj klasi, jer ima mnoga savremena rešenja za kretanje van puteva, specijalno oslanjanje i kompleksnu transmisiju i šasiju bez okvira. Tem-



Sl. 1 — Češki kamion za logističku podršku TATRA 815

po proizvodnje je nešto ispod maksimuma, ali se to može izmeniti posle najnovijih inovacija kao što je verzija 8 x 8 nosivosti 10,5 t sa šasijom velikog klirensa i centralnom regulacijom pritiska u gumama. Ova verzija (T815-VVN 28 400 8 x 8.1 R G3 LIWA) ima ugrađen američki menjač.

Indija nastavlja da po licenci proizvodi kamione T815 u varijantama 8 x 8 i 6 x 6.

Francuska

Najveći francuski proizvođač kamiona je firma RENAULT VEHICULES INDUSTRIELS koja nastavlja proizvodnju kamiona TRM 10000 6 x 6

nosivosti 10 t (slika 2) za francuske oružane snage. Bilo je procenjeno da će biti potrebno 5000 ovih kamiona, međutim, proizvodnja je opala i dostigla 3000 primeraka. U varijante spadaju nosač mosta i artiljerijski tegljač, jedan model koji ima pojačani motor



Sl. 2 — Francuski kamion za logističku podršku TRM 10000 6x6 (RENAULT)

(235,5 umesto 202,4 kW), što omogućuje da ima ravnu platformu (bez stranica), nosivosti 13 t, i utovarno-istovarnu opremu.

Ista firma učestvuje i u isporuci 3500 kamiona G 290.26 VTL (6 x 6) za logističke zadatke na velike daljine. Opremljen je utovarno-istovarnom opremom, sposobnom da manipuliše teretom do 18 t. Ovaj kamion se za logističke zadatke dopunjava kamionom poboljšane konstrukcije G 340 sa mnogo jačim motorom, tako da mu je nosivost do 26 t.

Još jedna familija kamiona iste francuske firme zasnovana je neposredno na komercijalnim projektima. To je serija kamiona TRM 160-230 4x4. Snažniji modeli u okviru ove familije imaju nosivost 7 do 8 t. Kopnena vojska Francuske već je naručila jednu partiju, a prihvaćena je i narudžbina iz Španije.

Koliko smanjivanje vojnih budžeta može da utiče na nabavku kamiona pokazuje primer modernizacije kamiona GBC 8 KT, firme BERLIET, nosivosti 4 t. U KoV Francuske nalazi se veliki broj ovih veterana, pa je preduzet program rekonstrukcije za produktivnost resursa. Tu spada savremeni dizel-motor snage 128 kW sa novom transmisijom, novim osovina, servo-upravljačem, potpuno novom električnom instalacijom, dok su kabina i poklopac motora preuzeti sa kamiona GBC 180. Kao rezultat dobijen je praktično novi kamion, TRM GBC Type II (slika 3) nosivosti od 4 t.

Ne treba zaboraviti da je Francuska zadržala jedini namenski koncern proizvođača vojnih kamiona — AC-



Sl. 3 — Francuski kamion za logističku podršku TRM GBC Type II

MAT. Robustni modeli ovog proizvođača uveliko se koriste, ali im je maksimalna nosivost van puteva 5,5 t. Za po-



Sl. 4 — Francuski kamion za logističku podršku MTV 8x8 VLM WPK, firme ACMAT

većanje nosivosti firma je uvela svoju familiju MTV, a najveći od ovih kamiona je ALM WPK 8.70 CTL 8 x 8 (slika 4) sa taktičkom nosivošću od oko 6 t. Verzija 4.40 CTL 4 x 4 može da prevozi teret od 4 t, dok najnovija verzija 6.55 CTL 6 x 6 ima nosivost od 5,7 t. Verzija 8 x 8 namenjena je za specijalne terete, a može poslužiti i kao sklonište.

Nemačka

Nemačka nastavlja da prisustvuje na evropskoj sceni vojnih kamiona. Koncern MAN određen je da nastavi svoju dominaciju na tržištu teških kamiona za taktičku namenu, proširujući uspeh dobro poznate familije velike pokretljivosti koja se nalazi u nemačkim oružanim snagama i mnogim drugim zemljama širom sveta sa formula- ma točkova 4 x 4, 6 x 6 i 8 x 8.

MAN očekuje da se taj trend nastavi serijom SX90 koja se radi zahvaljujući akumuliranom iskustvu stečenom u razvoju ranijih modela, a sledeći opšte karakteristike visokog stepena pokretljivosti. Ovi kamioni imaju dobre opšte performanse i performanse kretanja van puteva, zahvaljujući netorzionoj šasiji, poboljšanom oslanjanju, modularnoj kabini i snažnom motoru snage od 272 do 736 kW sa nosivošću od 7 do 28 t, dok se sistem za centralnu regulaciju pritiska vazduha u pneumaticima ugrađuje po narudžbini. Kako se očekuje, cena kamiona serije SX90 biće visoka, pa je firma MAN predstavila svoju seriju LX90. U osnovi slični sa modelima serije SX90, modeli serije LX90 zasnovani su na jednostavnijem niskotorzionom okviru i oslanjanju sa lisnatim gibnjevima. Radi maksimalne uštede, familija kamiona FX90 rađena je na šasiji komercijalne serije F90. Kamioni serije FX90 mogu biti sa ili bez pogona na sve točkove, a mogu se oblikovati tako da zadovolja-

vaju svaku narudžbinu. Najnoviji kamion firme MAN je L 2000 FAE 4 x 4 sa različitim motorima, transmisijama, razmakom između osovina i sa nosivošću od 6 do 10,5 t.

MERCEDES BENZ AG proširio je nosivost svojih kamiona velike pokretljivosti UNIMOG rekonstrukcijom (modernizovanjem) šest modela 4 x 4 i uvođenjem novog modela 6 x 6. Kamion UNIMOG sa najvećom nosivošću U 215 L 4 x 4 može da ponese 5 t, dok novi model 6 x 6 U 2450 L može da ponese 7 t. Svi rekonstruisani modeli zadržali su svoju izdržljivost i performanse kretanja van puteva svojih prethodnika, pa se očekuje da će i u nastupajućim godinama biti nastavljena proizvodnja ovih kamiona po licenci u mnogim zemljama.

MERCEDES-BENZ, takođe, proizvodi modele 4 x 4 1114A i 1117A (4,5 t), 1222A (5,5 t), 1628A (7 t) 6 x 6 2028A (10 t) koji zadovoljavaju svaku potrebu u prevoženju tereta. Na vrhu mercedesovih kamiona nalazi se 2628A sa nosivošću od 12 t, a postoje i dva modela 6 x 6 i jedan 8 x 8 transporter tenkova, koji mogu da budu rekonstruisani za logističke potrebe. Svi imaju istovetnu kabinu, snažne dizel-motore i mnoge zajedničke sklopove.

Firma IWECO MAGIRUS nastavlja da proizvodi robustne i višenamenske kamione sa različitim razmacima između osovina i potencijalnom nosivošću od 4 do 12 t, kao i uobičajene varijante transporter tenkova, koji se koriste širom sveta i vrlo su traženi.

Italija

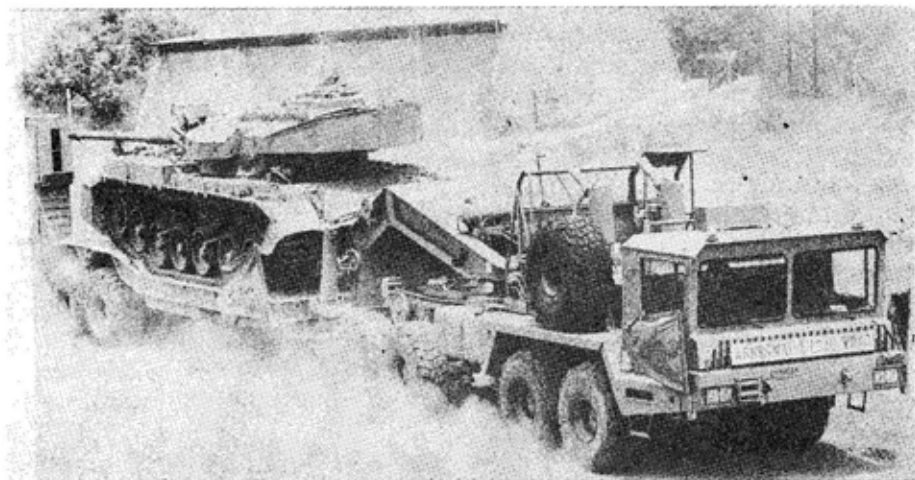
Proizvodnja kamiona firme FIAT prešla je na firmu IWECO, ali će mnogi kamioni zadržati fijatove konstruktivne karakteristike. Kamion IWECO 90-17 WM od 4 t prodat je u mnogim

zemljama, dok je veći kamion 230-35 WM 6 x 6 od 10 t prodat nekim zemljama kao artiljerijski tegljač. Firma ASTRA takođe je deo organizacije IWEKO, pa nekoliko interesantnih razvojnih programa nosi njeno ime, kao što je tip 88.42 koji može da ponese do 15 t preko svakog zemljišta, a modeli 6 x 6 i 4 x 4 su spremni za proizvodnju. Konstruisan je i HD6 84.45 kao poten-

je da se izrađuje kao teško vozilo za izvlačenje i oklopna radionica, a mogu se očekivati i varijante za prevoz tereta.

Svedska

Na švedskom tržištu kamiona dominiraju dve firme, VOLVO i SCANIA i obe proizvode velike kamione za logis-



Sl. 5 — CAVALLO, južnoafrička verzija španskog kamiona ALJABA kao transporter tenkova

cijalni kamion-platforma bez stranica sa opremom za utovar-istovar, nosivosti 15 t, za potrebe KoV Italije.

Spanija

Značajno mesto u španskoj industriji vojnih kamiona zauzima šasija teškog kamiona 8 x 8 ALJABA (slika 5). Prvobitno konstruisan kao tegljač transportera tenkova i kao kamion, ALJABA ima i mnoge primene u transportovanju na duge relacije. Izrađen je u manjem broju za potrebe španske mornaričke pešadije, ali se izrađuje i u Južnoj Africi, u verziji transportera tenkova pod nazivom CAVALLO. Planirano

tičku podršku, koji, konstruisani za teške terenske uslove u Švedskoj, mogu da zadovolje ove uslove bilo gde. Od kamiona firme VOLVO poznati su F10, F12 i F16 sa formulom točkova 6 x 6 ili 4 x 4. Nosivost kamiona N10 je 17 t i više. Mnogo modela kamiona SCANIA, kao što je P113 HK, imaju ukupnu masu od oko 46 t. Jedna verzija kamiona 8 x 6 P113 HK opremljena je i utovarno-istovarnom opremom.

Rusija

Na budućem tržištu kamiona za logističku podršku svakako će učestvovati Rusija i druge zemlje u okviru Za-

jednice Nezavisnih Država. Sa nekada velikim domaćim tržištem, koje je sada dovedeno do tačke gašenja, kamioni iz ovih zemalja sada se pojavljuju na Zapadu kao alternativa za prevoz teških tereta na velike daljine. Zbog svoje ekonomičnosti modeli ZIL i GAZ nisu bili zanimljivi za Zapad. Kamioni kao što su KamAZ 6 x 4 ili 6 x 6, sa motorima CUMMINS, KHD ili drugim zapadnim modelima sa manjom potrošnjom goriva i većim očuvanjem životne sredine imaju prihvatljive cene. Takođe, ulažu se naponi za prodaju teških teretnjaka familije KrAZ-260 6 x 6. Nedavne izložbe pokazuju da na završnoj obradi i nivou tehničkih finesa treba još da se radi kako bi ruski kamioni postali konkurentni zapadnim. Sada su oni robustni i relativno jeftini, što može privući pažnju zainteresovanih nabavljača.

Velika Britanija

Britanska firma LEYLAND TRUCKS završila je dva uspešna programa 1994. godine. Poslednji od 5350 kamiona T244, nosivosti 4 t, i poslednji od ugovorenih 1522 kamiona srednje pokretljivosti DROPS (Demountable Rack Offloading and Palletization System) predati su KoV Velike Britanije. Firma FODEN proizvela je još 400 poboljšanih kamiona srednje pokretljivosti, uglavnom za podršku baterija AS90. Vozila DROPS obe firme mogu da prevoze teret do 15 t (kao i platformu na koju je teret postavljen), a vozač upravlja i utovarno-istovarnom opremom.

Firma LEYLAND TRUCKS nada se da će prodati više svojih kamiona DROPS 8 x 6, kao i T24 kada verzija nosivosti 5 t bude predstavljena 1996. godine.

Sadašnja serija kamiona MT firme BEDFORD ima modele 4 x 4 i 6 x 6 sa

nosivošću od 6 do 21 t, sa dizel-motorom PHASER ili PEREGRINE, snage koja odgovara nosivosti kamiona. Ova serija kamiona postaće privlačna kada se bude donela odluka da se u KoV Velike Britanije zamene kamioni nosivosti 8 t (TM 4-4) i 16 t (TM 6-6).

Kopnena vojska Velike Britanije nedavno je nabavila i neke druge savremene kamione, kao što je serija UNIPOWER M 8 x 8. Dve verzije ove serije koriste se za prevoz mosne opreme koju preko vodene prepreke lansira nosač lansirnog mosta CHIEFTAIN.

Jedna verzija transportera za logističku podršku iz serije UNIPOWER M može da prevozi teret do 15 t, praktično preko svakog zemljišta. Ima dizel-motor snage 316 kW, automatsku transmisiju i zahvaljujući svojim karakteristikama ima veliki prodajni i razvojni potencijal.

P. M.

OSMATRAČKI HELIKOPTER Ka-31*

Helikopteri se danas koriste u najrazličitije svrhe. U početnoj fazi bili su namenjeni prvenstveno za transportne zadatke, ali se spektar zadataka vrlo brzo širio, tako da se danas koriste u protivpodmorničkoj borbi za označavanje ciljeva, izviđanje, i različite borbene zadatke, itd. U protivpodmorničkoj borbi prva uloga helikoptera bila je označavanje ciljeva.

Uloga radara značajno se povećala zbog toga što je sistem PVO primoravao letelice da lete vrlo nisko i da,

* Prema podacima iz časopisa MILITARY PARADE, mart-april 1996.

koristeći konfiguraciju terena, izbegavaju detekciju zemaljskih radara. Međutim, situacija se radikalno menja ako su radari montirani na letelice. Niskoletajući ciljevi vrlo lako se detektuju pomoću osmatračkih letelica koje lete na visini od nekoliko kilometara.

Takve letelice danas su dobro poznate. BOEING, AWAKS, GRUMMAN, HAWKEYE i ruska A-50. One zahteva-

kon definisanja taktičko-tehničkih zahteva 1985. godine. Krajem 1987. napravljen je prvi prototip radarskog sistema E-801 koji je ugrađen na helikopter. Već marta 1988. prva verzija uvedena je u operativnu upotrebu. Model helikoptera sa rotirajućom antenom testiran je u aerodinamičkom tunelu, a režimi leta simulirani su na računarima. Izvedeni su brojni proraču-



Osmatrački helikopter Ka-31

ju aerodrome sa kvalitetnim poletno-sletnim stazama, a iz sigurnosnih razloga moraju se bazirati daleko od granica. Naravno, ako je odbrana narušena, ovi aerodromi će biti prvi napadnuti.

Ideja o razvoju osmatračkog helikoptera koji će poletati sa brodova pojavila se sredinom sedamdesetih godina. Međutim, razvoj je započeo tek na-

ni radi određivanja vrednosti varijabli koje su potrebne za rad autopilota.

Podtrupna antena nije manja od sistema za upravljanje helikopterom po pravcu, a posledica toga je negativan uticaj na upravljanje helikopterom. Ipak, konstruktori pilotskog navigacionog sistema rešili su ovaj problem. Vibracije helikoptera, prouzrokovane radom autopilota, ne prelaze dva

stepena, čak i pri letu po olujnom vremenu. Radi njegove stabilizacije navigacioni sistem pilota omogućava automatsko održavanje visine, brzine i kursa leta, automatski dolet do zadane tačke, let na zadanoj ruti i davanje koordinata helikoptera bez spoljašnjih izvora informacija.

Posebna pažnja posvećena je automatskom radu helikopterskog sistema E-801. Kada operator uključi radarski osmatrački sistem E-801, izvlači se antena i određuje ručni režim rada, dok se sve ostale operacije odvijaju automatski.

Radar detektuje ciljeve, određuje njihove koordinate, identitet (pripadnost), brzinu i pravac kretanja i auto-

Tabela 1

Osnovne karakteristike helikoptera Ka-31

Broj članova posade	2
Poletna masa (kg)	12500
Brzina leta (km/h):	
— maksimalna	220
— krstareća	100 do 120
Vreme krstarenja (h)	2,5
Zona osmatranja (stepeni)	360
Gabariti sa sklopljenim krakovima (m):	
— dužina	12,5
— širina	3,8
— visina	5,5

matski prenosi te podatke na prijemne tačke. Operator jedino nadgleda pomenute operacije radara.

Navigator može na monitoru da vidi cilj sa njegovim koordinatama, daljinom i brzinom leta.

Dvočlana posada, pilot i navigator lako mogu da upravljaju radom helikoptera u trajanju od tri časa.

Helikopter Ka-31 razvijen je na osnovu Ka-28 i Ka-29, što je omogućilo da težište bude na razvoju radarskog sistema E-801, navigacionog sistema pilota i ostalih sistema prema specifičnoj nameni helikoptera.

Ka-31 namenjen je za upotrebu sa brodova, ali je, takođe, efikasan u kopnenoj vojsci. Obično helikopteri kopnene vojske ne mogu se porediti sa helikopterima koji baziraju na brodovima, jer je i samo poletanje sa palube u poređenju sa poletanjem sa zemlje vrlo teško i zahteva visoke pilotske performanse. Na osnovu ocena pilota, Ka-31 je znatno stabilniji pri sletanju na palubu od prethodnih helikoptera. Pošto nema repnog rotora ovaj helikopter može da poleće i sleće i sa slaboređenih mesta na zemlji. Ovakav osmatrački helikopter koristan je za odbranu na moru i kopnu.

Njegove osnovne karakteristike prikazane su u tabeli 1.

M. S.

AVIJACIJSKA PROTIVPODMORNIČKA RAKETA APR-2E*

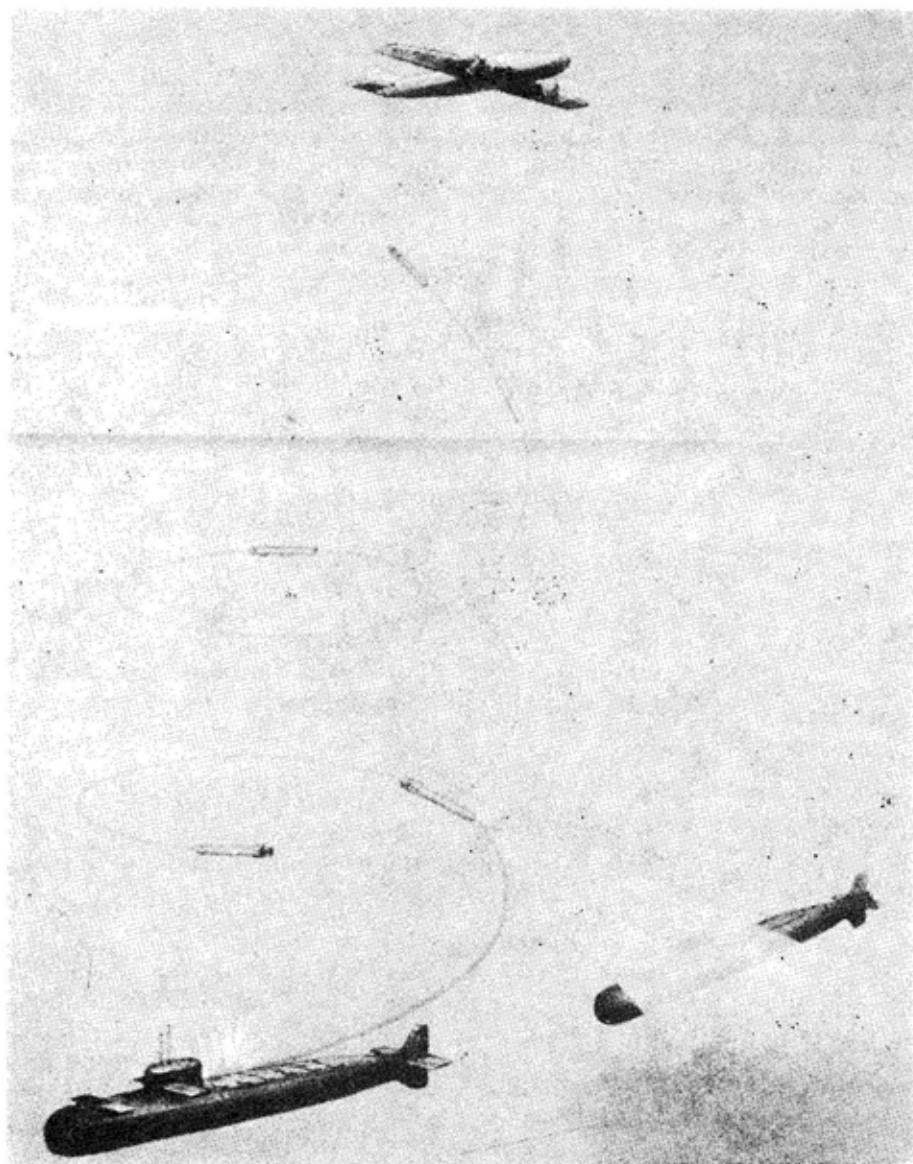
Razvoj protivpodmorničkih raketa započeo je ranih šezdesetih godina, kao posledica potrebe i odluke da se pristupi razvoju konceptualno novih sredstava za borbu protiv savremenih podmornica.

Ovaj koncept zasniva se na brzom reakciji na otkriveni cilj, brzom pretraživanju prostora i lociranju ciljeva u uslovima nepostojanja šumova, br-

* Prema podacima iz časopisa MILITARY PARADE, januar-februar 1996.

zom doletu do ciljeva i njihovom sukcesivnom uništenju, uz izbegavanje protivmera protivnika.

sonarnim sistemom koji koristi metodu fazne korelacije podataka o cilju u sprezi sa metodama filtracije i ampli-



Princip rada sistema APR-2E

Realizacija ovakvog koncepta moguća je uz upotrebu avijacijskih protivpodmorničkih raketa opremljenih

tudne selekcije. Pretraživanje prostora i lociranje cilja treba da se vrši u uslovima odsustva šumova, za vreme dok

se raketa kreće po spiralnoj putanji pod dejstvom gravitacione sile, sa raketnim motorom koji nije aktiviran, što obezbeđuje odsustvo šumova i olakšanu detekciju i lociranje cilja. Raketa treba da ima raketni pogon sa motorom na čvrsto gorivo ili vodeni turboblazni pogonski sistem.

Raketa APR-2 je upravo takvo oružje. U principu, svi mornarički avioni i helikopteri mogu biti naoružani ovim protivpodmorničkim raketama. Konstrukcija APR-2, prema sadašnjem stanju u ovoj oblasti, predstavlja oružje primereno savremenim borbenim zahtevima.

Raketa poseduje sistem za višekanalnu detekciju i određivanje pravca cilja koji je u stanju da detektuje podvodne ciljeve u aktivnom modu detekcije na daljini do 1500 m i površinske ciljeve na daljinama do 1000 m, sa tačnošću od dva stepena. Pasivni kanal sistema za detekciju ima radijus dejstva 500 m.

APR-2 pokreće pogonski sistem na čvrsto raketno gorivo, koji omogućava da ova protivpodmornička raketa radi u širokom opsegu brzina i dubina. U toku rada pogonski sistem rakete ne interferira sa sistemom za detekciju i navođenje na cilj.

Raketa APR-2E je namenjena za uništavanje podmornica koje se danas nalaze u operativnoj upotrebi, kao i onih čija se pojava tek očekuje i koje mogu da zarone na dubine do 600 m i da se kreću brzinom 80 km/h. Princip rada sistema prikazan je na slici.

Borbena upotreba rakete podrazumeva izbacivanje rakete iz protivpodmorničkog aviona ili helikoptera u toku leta ili lebdenja, a prema podacima o detektovanom cilju.

Nakon detekcije podmornice i donošenja odluke o njenom uništenju, vrši se priprema APR-2E za upotrebu, koja obuhvata montiranje nosača, u-

Masa (kg)	575
Kalibar (mm)	350
Dužina (mm)	3700
Operativna dubina (m)	do 600
Operativna brzina (m/s)	30 do 32
Sistem samonavođenja:	
— sonar	fazno-korelacioni
— radijus dejstva (m)	do 1500
— širina snopa zračenja (stepeni)	90 x 45
— odnos signal—šum	0,4 do 0,5
— tačnost detekcije (stepeni)	do 2
Pogonski sistem	motor na čvrsto raketno gorivo
Masa bojne glave (TNT ekvivalent) (kg)	100
Verovatnoća pogađanja cilja u granicama srednje kvadratne greške za ciljeve na daljini 300 do 500 m	0,7 do 0,85
Vreme izvršenja borbenog zadatka (min)	1 do 2

nos podataka o cilju i vrsti leta. Nakon toga uključuje se sistem napajanja na raketi. Kada se pojavi signal o gotovosti, raketa se ispušta. Nakon ispuštanja aktivira se padobranski kočioni sistem na unapred zadanoj visini. Padobran i zaštitna nosna kapa odbacuju se nakon dodira sa vodom. Raketa zaranja u vodu pod uglom od 17°.

Na dubini od 20 m uključuje se sigurnosni mehanizam, upaljač se armira i započinje traganje za ciljem. Raketa se kreće spiralno bez rada pogonskog sistema (pasivni mod rada). Nakon zahvata i detekcije cilja uključuje

se raketni motor i raketa počinje da se približava cilju radi njegovog uništenja. Ako cilj nije detektovan na dubini do 150 m uključuje se pogonski sistem i raketa nastavlja potragu za ciljem u aktivnom modu rada.

Ako raketa ne uspe da detektuje cilj, 15 do 20 minuta nakon prestanka rada pogonskog sistema dolazi do samouništenja.

Sistem APR-2E u svom kompletu ima i pribor za spajanje sa automatskom kontrolno-ispitnom stanicom AKIPS-1, rezervne delove, priručnike, presek rakete A2U, vežbovnu raketu PA-2 i integrisani simulator A4.

M. S.

TORPEDO DUGOG DOMETA TIPA 53-65KE*

Jedan od najpoznatijih kiseoničkih torpeda dugog dometa, u koji je ugrađeno bogato iskustvo projektanta, predstavlja torpedo tipa 53-65KE. Brojna tehnička dostignuća, ugrađena u konstrukciju ovog torpeda, obezbeđuju njegovu jednostavnost, pouzdanost i malu proizvodnu cenu. Ove karakteristike su garant njegove efikasne upotrebe protiv ratnih i drugih brodova bilo koje vrste.

Torpedo se pokreće uz pomoć gasne turbine koju pogoni mešavina isparivača i gasa dobijenog sagorevanjem kerozina u struji kiseonika. Gasni produkti sagorevanja gotovo se u potpunosti rastvaraju u vodi (98%),

tako da ne ostavljaju iza torpeda trag ili vodenu brazdu.

Torpedo je opremljen aktivnim akustičkim sistemom za samonavođenje sa vertikalnom detekcijom vodene brazde koju iza sebe ostavlja brod koji se gađa. Sve vreme dok se nalazi na putanji torpedo skenira prostor detektujući prisustvo brodske brazde. Čim sistem za samonavođenje detektuje postojanje brazde, podaci o njenom kursu se prenose u upravljački odsek. Kada torpedo dođe u zonu zahvata broda — cilja, zaranja ispod njegove kobilice po upravljačkom signalu koji dolazi od sistema za samonavođenje. Nakon toga beskontaktni upaljač aktivira eksploziv smešten u nosnom delu torpeda.

Putanja torpeda koji iza sebe ne ostavlja trag i njegovo navođenje na brodsku brazdu omogućavaju prikrivenost napada sve dok brodski sonar ne detektuje torpedo pod uglom susreta. Upravljački odsek torpeda zadaje mu kurs kretanja prema trajektoriji broda — cilja, obezbeđujući na taj način efikasnu borbenu upotrebu protiv ciljeva koji se kreću pod bilo kojim uglovima. Za uništenje označenog cilja dovoljan je jedan torpedo.

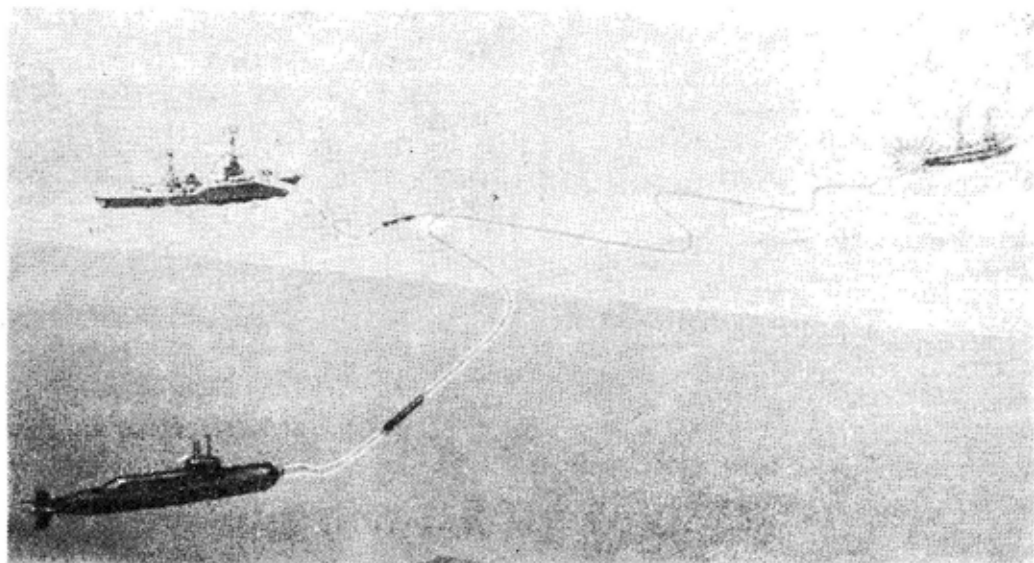
Torpedo je opremljen elektromagnetnim beskontaktnim upaljačem koji se armira nakon njegovog izlaska iz torpedne cevi. Za vreme dok se nalazi na putanji, beskontaktni upaljač je zaštićen od aktiviranja zbog eksplozija dubinskih bombi i drugih torpeda. Beskontaktni upaljač pouzdano aktivira eksplozivno punjenje kada se torpedo nađe ispod kobilice broda. Upaljač se ne može aktivirati magnetnim ili električnim poljem nastalim emitovanjem sa trupa broda. Način aktiviranja upaljača i velika snaga eksploziva (više od 300 kg) rezultiraju velikim destruktivnim efektom.

Torpedo je namenjen za uništavanje brodova koji se kreću brzinom oko

* Prema podacima iz časopisa MILITARY PARADE, januar—februar 1996.

35 čvorova (nautičkih milja/čas). Može se lansirati u bilo kojim klimatskim uslovima sa podmornica, na dubinama do 100 m, brodova ili torpednih čamaca opremljenih torpednim cevima kalibra 534 mm (21 inč). Podmornice sa torpedima u otvorenim torpednim cevima mogu da se kreću do dubine od 200 m. Kada se lansiraju sa brodova,

parametre putanje, sistema za samonavođenje i beskontaktnog upaljača. Osim toga, putanja lansiranog torpeda može se pratiti sa helikoptera, broda ili uz pomoć podmorničkih periskopa. Radi toga vežbovni torpedo, svakih 20 do 30 sekundi, iz vode izbacuje svetlosne signale crvene boje na visinu od 20 m.



Dejstvo torpeda tipa 53-65KE

dubina vode mora da bude najmanje 20 m, dok je dubina na kojoj se kreće torpedo od 4 do 14 m.

Torpedo tipa 53-65KE ima relativno nisku cenu proizvodnje i upotrebe, veliku brzinu, veliki domet i visoku ekološku bezbednost u poređenju sa torpedima koja se pokreću pogonskim jedinicama na pogonsko gorivo OTTO-2.

Za obuku posada u lansiranju koristi se vežbovna verzija torpeda 53-65KE, koji se ne razlikuje od bojnog, osim po dometu (13 km) i nedostatku eksplozivnog punjenja. Za ocenu rezultata gađanja vežbovni torpedo je opremljen uređajima koji registruju

Da bi se omogućilo praćenje lansiranog vežbovnog torpeda, koji se nakon dostizanja zadane daljine kreće vertikalno prema površini, bojna glava i odsek sistema za samovođenje su obojeni u jarko crvenu boju. Torpedo zadržava svoju poziciju emitujući svetlosne signale uz pomoć posebnog uređaja za svetlosno traženje torpeda, kao i akustične signale uz pomoć odašiljača koji se nalazi u nosnom delu torpeda. Sonar na podmornici može detektovati ove signale na daljini od nekoliko kilometara.

Bojeva glava vežbovnog torpeda ima posebne hvataljke za podizanje iz vode. Vežbovni torpedo može se lan-

sirati do 15 puta uz potrebno održavanje.

Za upoznavanje posade sa složnošću konstrukcije torpeda i uvežbavanje timskog rada na pripremi za u-

Osnovne karakteristike torpeda 53-65KE

Kalibar (mm)	533,4
Ukupna dužina (mm)	7945
Masa (kg)	2070
Masa eksplozivnog punjenja (kg)	300
Sistem samonavođenja	akustički
Vrsta beskontaktnog upaljača	elektromagnetni

potrebu postoje kabinetski preseći i vežbovne makete.

Torpeda se isporučuju u specijalnim metalnim kontejnerima. Postoje posebni kontejneri za pogonski deo torpeda i bojnu glavu, koji omogućavaju zaštitu i bezbedno prevoženje avionima, drumskim vozilima, željeznicom ili brodovima. Kontejneri omogućavaju jednostavno rukovanje u lukama ili skladištima i produženo čuvanje na neuređenim mestima.

Torpedo se lansira i sa podmornica klase 877EK, uz pouzdano funkcionisanje svih elemenata i čitavog sistema. Torpedo 53-65KE je moderno podmorničko oružje koje je u stanju da uništava ciljeve sa visokom vjerovatnoćom i efikasnošću.

M. S.

NOVINSKO-IZDAVAČKA USTANOVA »VOJSKA«
REDAKCIJA IZDAVAČKE DELATNOSTI »VOJNA KNJIGA«

ZA VAŠU BIBLIOTEKU

1. Aleksandar Radić
BORBENI AVIONI
Format 14×20. Strana 96.
Povez proširan. Latinica.
Cena 40 dinara.
2. Radomir Vujković i
Aleksandar Radić
BORBENI HELIKOPTERI
Format 14×20. Strana 106
Povez proširan. Latinica.
Cena 40 dinara.
3. Predrag Pejčić
VOJNI HELIKOPTERI
Format 17×24. Strana 466.
Tvrđ povez. Latinica.
Cena 80 dinara.
4. Stanislav Arsić
SAVREMENO NAORUŽANJE KoV
Format 17×24. Strana 272.
Povez tvrd. Latinica.
Cena 100 dinara.
5. Boško Antić
SAVREMENI RATNI BRODOVI
Format 17×24. Strana 432.
Povez tvrd. Ćirilica.
Cena 250 dinara.
6. Aleksander Razingar
**ELEKTRONSKO IZVIĐANJE
I MASKIRANJE**
Format 13×21. Strana 419.
Tvrđ povez. Latinica.
Cena 30 dinara.
7. Dušan Banjac
ELEKTRONSKA BORBA U PVO
Format 14×20. Strana 292.
Povez tvrd. Latinica.
Cena 30 dinara.
8. Milan M. Šunjevarić
RADIO-GONIOMETRIJA
Format 17×25. Strana 608.
Povez platno. Latinica.
Cena 40 dinara.
9. Nikola Vujanović
**TEORIJA POUZDANOSTI
TEHNIČKIH SISTEMA**
Format 17×24. Strana 592.
Tvrđ povez. Latinica.
Cena 50 dinara.
10. Zlatko Rendulić
**RATOVODSTVO I
NAUČNO-TEHNIČKI POGRES**
Format 17×24. Strana 298.
Tvrđ povez. Latinica.
Cena 30 dinara.

NARUDŽBENICA

NIU »Vojska«, Birčaninova 5, 11000 Beograd

Telefon: (011) 645-020, telefax: (011) 644-042

Žiro-račun: 40823-849-0-2393

Naručujem(o) knjige broj/primeraka

Naručene knjige plaćam(o):

a) odjednom — plaćanje unapred.

b) u mesečnih rata (najviše tri rate) po dinara
(najmanji iznos rate je 50,00 dinara).

Prilikom kupovine na rate priložiti narudžbenicu i dokaz o uplati prve rate. Isporu-
ka knjiga je nakon uplate svih rata.

Reklamacije za neuručene knjige primamo u roku od 30 dana.

U slučaju spora nadležan je Drugi opštinski sud u Beogradu.

Kupac

Matični broj

Ulica i broj Telefon

Mesto i broj pošte

Dana

Potpis naručioca

.....
Ovim se potvrđuje da je naručilac knjiga zaposlen u

.....

M.P.

Overava:

NIU »VOJSKA«, 11002 Beograd, Birčaninova 5
Telefoni: 645-020 i 656-122, lokal: 22-584
Telefax: 644-042, žiro-račun: 40823-849-0-2393

NARUDŽBENICA

Pretplaćujem(o) se na časopise za 1996. godinu, i to:

primeraka

1. VOJNOTEHNIČKI GLASNIK (stručni i naučni časopis VJ) izlazi dvomesečno. Godišnja pretplata 50,00 dinara, polugodišnja pretplata 25,00 dinara;
2. NOVI GLASNIK (vojnostručni intervidovski časopis VJ), izlazi dvomesečno, u koloru, sa posebnim dodatkom uz svaki broj. Godišnja pretplata 100,00 dinara, polugodišnja pretplata 60,00 dinara.
3. VOJNO DELO (opštevojni teorijski časopis) izlazi dvomesečno. Godišnja pretplata 60,00 dinara, polugodišnja pretplata 30,00 dinara.

Broj primeraka časopisa koji se naručuje upisati u narudžbenu i poslati na adresu: NIU »VOJSKA«, Birčaninova 5, 11002 Beograd.

Za pretplate fizičkih lica ne dostavljamo fakture. Poručioци uplaćuju iznos pretplate na žiro-račun NIU »VOJSKA«: 40823-849-0-2393 (sa naznakom za koji časopis) i šalju primerak uplatnice uz narudžbenu.

U slučaju spora nadležan je Drugi opštinski sud u Beogradu.

Casopise slati na adresu:

Kupac
(prezime i ime, naziv ustanove i broj telefona)

Mesto ul. br.

Dana: 199..... god.

M.P.

.....
Potpis naručioца

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 obraza (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, prof

KORICE

Miojko Milinković

KOREKTOR

Bojana Uzelac

Cena: 10,00 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.
