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. Objašnjen je postupak optimizacije rezervnih delova za održavanje ovakvih uređaja i dat primer optimizacije rezervnih delova za jedan hipotetički elektronski uređaj. U primeru je predložena 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 neiscrpne 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:

$$t_z = \sum_{i=1}^{BV} q_{i2} t_{zi2} \quad (1)$$

gde je:

BV — broj VMC od kojih se sastoji uređaj,

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

t_{zi2} — 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_{zi2} je:

$$t_{zi2} = t'_{i23} P_{i23} (1 - P_{i3r}) + P_{i2r} P_{i3r} + t'_{i3r} P_{i2r} P_{i3r} \quad (3)$$

gde je:

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

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

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

gde je:

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

t_{io} — 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:

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

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:

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

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:

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

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 nivo — — — — 20

U tabeli 2 prikazane su proračunate količine rezervnih VMC i NMC po nivoima snabdevanja, za različite koeficijente snabdevenosti, odnosno za različite iznose uložених 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 uložених 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 dovodi 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-nicu II nivoa održavanja

Zaključak

Radi poboljšanja pogodnosti za održavanje vojnih sistema i uređaja, sve više se primenjuje njihova modularna konstrukcija. Kod aviona, tenka, rada- ra i drugih sistema i uređaja takve konstrukcije se popravljaju zamenom 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 alternativa njihovog održavanja. Imajući u vidu značaj optimizacije zaliha rezervnih delova za oružane snage, neophodno je da stručnjaci za kreiranje održavanja uređaja i sistema raspolazu univerzalnim programskim paketima za optimizaciju zaliha rezervnih delova.

Literatura:

- [1] Kuljbak, L. I.: Osnovi rasčeta obespećenja elek- tronnoj aparaturi zapasnami elementami, Sovet- skoe radio, Moskva, 1970.
- [2] Blanchard, B.: Logistics engineering and mana- gement, Prentice Hall, New Jersey, Prentice Hall, 1986.
- [3] Korolija, D.: Model snabdevanja modularno građenih elektronskih uređaja rezervnim delo- vima, Magistarski rad, Zagreb, ETF, 1988.
- [4] Petrović, J., Barković, M.: Tehnologija odr- žavanja TMS KoV OS i sistema snabdevanja rezervnim delovima, Zagreb, VVTŠ KoV, 1985.
- [5] Korolija, D.: Snabdevanje modularno građe- nih 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 delo- vima u sistemu održavanja sa više nivoa, VTG 1/90, str. 17—22.
- [7] Korolija, D.: Vreme zastoja modularno građe- nog elektronskog sredstva zbog snabdevanja rezervnim delovima, VTG 4/90, str. 376—381.