Mr Dušan Korolija,
potpukovnik, dipl. inž.
Vojnotehnički institut VJ,
Beograd

ODREĐIVANJE OPTIMALNE POUZDANOSTI ELEKTRONSKOG UREĐAJA SA STANOVIŠTA KOREKTIVNOG ODRŽAVANJA

UDC: 621.38-7.004.15:65.01

Rezime:

Metoda određivanja optimalne pouzdanosti elektronskog uređaja, sa aspekta korektivnog održavanja, zasniva se na generisanju varijanti pouzdanosti i, za svaku od njih, proračunu kriterijuma korektivnog održavanja i troškova razvoja i proizvodnje pouzdanosti. U optimizaciji ograničenje predstavlja vreme zastoja zbog korektivnog održavanja. Dat je primer optimizacije pouzdanosti za jedan hipotetički uređaj.

Ključne reči: varijante pouzdanosti, zastoj zbog korektivnog održavanja, troškovi korektivnog održavanja, optimizacija, optimalna varijanta pouzdanosti.

DETERMINING THE OPTIMAL RELIABILITY OF AN ELECTRONIC DEVICE FROM A CORRECTIVE MAINTENANCE ASPECT

Summary:

The paper presents a method for determining the optimal reliability of an electronic device from a corrective maintenance aspect. The basis of this method is the generation of reliability variants and, for each of them, the calculation of corrective maintenance criteria, and costs of reliability development and production. A corrective maintenance delay is the constraint in optimization. An example of reliability optimisation of a hypothetical electronic device is presented.

Key words: variants of reliability, corrective maintenance delay, costs of corrective maintenance, optimization, optimal variant of reliability.

Uvod

Pouzdanost tehničkog uređaja predstavlja važan faktor njegove efektivnosti i troškova u životnom veku. Nepouzdanost uređaja povlači za sobom troškove, izgubljeno vreme, nepovoljne psihološke efekte, a u određenim slučajevima ozbiljne pretnje po ličnu i nacionalnu bezbednost [1]. Sa druge strane, moguće je projektovati i razviti uređaj veoma visoke pouzdanosti, koja će eliminisati sve spomenute negativne posledice nepouzdanosti.

Međutim, postizanje ovakve pouzdanosti može biti jako skupo, jer zahteva veće troškove istraživanja i razvoja, pouzdanije delove, bolju proizvodnju, efikasniju kontrolu, itd. Zbog toga je u toku razvoja uređaja potrebno odrediti optimalnu pouzdanost, koja će obezbediti zadovoljavajuću efektivnost uređaja uz istovremene minimalne troškove životnog veka uređaja.

Kod tehničkih uređaja otkazi se eliminišu na dva načina. Prvi način se reali-

zuje kroz određenu pouzdanost postignutu u toku projektovanja, razvoja i proizvodnje, čime se obezbeđuje da uređaji rade bez otkaza određeni period vremena. Drugi način eliminacije otkaza je komplementaran u odnosu na prvi i realizuje se izvođenjem preventivnog i korektivnog održavanja u toku eksploatacije uređaja. Preventivnim održavanjem se sprečava pojava otkaza usled istrošenosti i starenja sastavnih delova uređaja, a korektivnim se uređaj dovodi u ispravno stanje nakon otkaza. Zbog komplementarnosti drugog načina eliminacije otkaza u odnosu na prvi način, održavanje uređaja predstavlja bitno stanovište za određivanje optimalne pouzdanosti tehničkog uređaja. Razvojem tehnologije elektronskih komponenti i sklopova, velikim delom su eliminisani njihovi otkazi zbog starenja i trošenja, pa preventivno održavanje kod savremenih elektronskih uređaja (EU) nema onaj značaj kao što ga ima kod mašinskih uređaja. Zbog toga je kod EU bitnija optimizacija pouzdanosti sa stanovišta korektivnog održavanja.

Stručnjaci koji u toku razvoja EU treba da odrede optimalnu pouzdanost često nemaju adekvatnu metodologiju i programsku podršku za rešavanje ovog problema. Nekim standardima zahtevana pouzdanost razvijanog EU određuje se samo na osnovu pretpostavljenog broja sastavnih delova, iako zavisi od mnoštva parametara.

U radu je razvijena metodologija za određivanje optimalne pouzdanosti EU sa stanovišta korektivnog održavanja, pri čemu se koriste rezultati ranijih radova vezanih za korektivno održavanje modularno građenih EU u sistemu održavanja sa više nivoa: matematičkog modela korektivnog održavanja [2,3], postupka optimizacije rezervnih delova za korektivno

održavanje [3,4] i optimizacije izvođenja korektivnog održavanja [5,6,7].

Varijante pouzdanosti elektronskog uređaja

U EU se, u toku razvoja, ugrađuju komponente sa potrebnim nivoom pouzdanosti. Za meru pouzdanosti uzeto je srednje vreme između otkaza (MTBF – Mean Time Between Failure). Postoji nekoliko osnovnih metoda kojima se postiže potreban nivo MTBF.

Primena kvalitetnijih komponenti

Veći proizvođači elektronskih komponenti proizvode istu komponentu sa različitim nivoima pouzdanosti. Priručnik za prognozu pouzdanosti elektronskih komponenti MIL-HDB-217 klasifikuje integrisana kola (IC), poluprovodničke elemente, otpornike i kondenzatore u četiri klase prema nivou pouzdanosti, što prikazuje tabela 1. U tabeli su date oznake kvaliteta komponenti za pripadnu klasu pouzdanosti. Za svaku klasu komponenti u priručniku se posebno definiše faktor kvaliteta (π_Q), na osnovu kojeg se može odrediti intenzitet otkaza određene komponente. Pouzdanost EU sa kompo-

Tabela 1

Klase pouzdanosti elektronskih komponenti

Klasa Deo	A	B	C	D
Integrisana kola	Klasa S	Klasa B B1 i B2	Klasa C	Komercijalni
Poluprovodnički elementi	JANTXV	JANTX	JAN	Komercijalni
Otpornici	S	R	MiP	Neustanovljena
Kondenzatori	TiS	RiP	LiM	Neustanovljena

Sl. 1 – Zavisnost intenziteta otkaza FET tranzistora od opterećenja po snazi: P_r – disipirana snaga na komponenti, P_n – nominalna snaga za komponentu

nentama klase A mnogostruko je veća od pouzdanosti klasa B i C, a pogotovo od klase D u kojoj su komponente sa najmanjom pouzdanošću. Na primer, faktor kvaliteta digitalnog integrisanog kola po klasama ima vrednost: $\pi_Q(A) = 0,5$, $\pi_Q(B) = 3$, $\pi_Q(C) = 13$, $\pi_Q(D) = 35$ [8].

Rasterećenje komponenti

Intenzitet otkaza elektronske komponente λ zavisi od raznih opterećenja:

$$\lambda_i = f(P, V, T, C_i), \quad (1)$$

gde je:

P – snaga,

V – upotrebljeni napon,

T – temperatura,

C_i – druga opterećenja (mehanička, hemijska, itd.)

Na slici 1 prikazana je zavisnost osnovnog intenziteta otkaza FET tranzistora od opterećenja po snazi, za različite vrednosti radne temperature tranzistora [8].

Ako se komponenta optereti manje od nominalnog opterećenja, postići će se dodatno smanjenje njenog intenziteta otkaza, odnosno povećanje njene pouzdanosti.

Redundansa

Pouzdanost sastavnog dela EU (komponenta, modul, blok) može se povećati ako mu se doda rezerva od jedan ili više takvih delova. Ako otkaze deo „u radu“ on se isključuje i njegovu ulogu preuzima jedan od rezervnih delova. Sa stanovišta pouzdanosti ovi delovi predstavljaju paralelnu konfiguraciju. Očito

je da u ovom slučaju ne dolazi do otkaza EU pri otkazu dela koji ima rezervu. Ova metoda za povećanje pouzdanosti dela naziva se redundansa i njenom primenom može se postići željena visoka pouzdanost. U osnovi, postoje dva tipa redundanse: aktivna i pasivna. Kod aktivne redundanse redundantni deo radi istovremeno kad i osnovni deo i obavlja istu funkciju, a kod pasivne redundantni deo se aktivira tek kada otkaze osnovni deo. Na slici 2 prikazan je intenzitet otkaza konfiguracije od dva dela, u slučaju kada je redundantni deo aktivan i pasivan, pod uslovom da se osnovni deo ne opravljia nakon otkaza.

Sl. 2 – Intenzitet otkaza paralelne konfiguracije od dva dela

Primena elektronskih komponenti i sklopova novijih tehnologija

Novi tehnološki postupci, materijali i koncepti rešenja elektronskih komponenti i sklopova dovode do povećanja njihove pouzdanosti. To je posebno izraženo kod integralnih kola (IC), kod kojih dolazi do dramatičnog povećanja pouzdanosti po jedinici njihove složenosti. Tako savremena VLSI IC imaju više hiljada i desetina hiljada veću složenost od stan-

dardnih SSI i MSI IC uz uporedivu pouzdanost. To znači da konstruktor EU pred sobom ima mnoštvo mogućih *varijanti pouzdanosti*, kako po *nivou* pouzdanosti, tako i po *načinu* na koji se određena pouzdanost može postići. Varijanta sa minimalnom pouzdanošću dobija se primenom komercijalnih komponenti, starije tehnologije, bez rasterećenja komponenti i bez primene redundanse. Za varijantu maksimalne pouzdanosti trebalo bi upotrebiti komponente najnovije tehnologije, klase A i sa primenom redundanse. Između ove dve krajnje varijante pouzdanosti nalaze se ostale varijante pouzdanosti, kojih teoretski ima veliki broj. Za analizu i izbor najbolje varijante, sa aspekta korektivnog održavanja, broj varijanti pouzdanosti najčešće se svodi na manji broj. Varijante će eliminisati ograničenja, kao što su: minimalni nivo pouzdanosti koji se zahteva sa nekog drugog aspekta (na primer bezbednosti), nemogućnost proizvođača da prihvati novu tehnologiju, dimenzije uređaja (nemogućnost primene redundanse), itd.

Analiza zavisnosti korektivnog održavanja od pouzdanosti

Da bi se razvila metodologija određivanja optimalne pouzdanosti EU sa stanovišta korektivnog održavanja, neophodno je ustanoviti način na koji korektivno održavanje uređaja zavisi od njegove pouzdanosti. Na slici 3 prikazan je odnos korektivnog održavanja i pouzdanosti, s obzirom na eliminaciju otkaza na EU.

Ugradnjom pouzdanosti u EU u određenom stepenu sprečava se da dođe do otkaza na njemu, a korektivnim održavanjem se, u toku eksploatacije uređaja, otklanjaju oni otkazi koji nisu eliminisani

ugradnjom pouzdanosti. Postoji velika zavisnost korektivnog održavanja od nivoa pouzdanosti EU i od načina na koji je ta pouzdanost postignuta. Ova zavisnost je identifikovana preko analize zavisnosti kriterijuma korektivnog održavanja od pouzdanosti uređaja. Kao relevantni kriterijumi za ocenu korektivnog održavanja EU izabrani su [2]:

Sl. 3 – Odnos pouzdanosti i korektivnog održavanja elektronskog uređaja

- srednje vreme zastoja EU zbog korektivnog održavanja,
- ukupni troškovi korektivnog održavanja EU u životnom veku.

Srednje vreme zastoja EU zbog korektivnog održavanja predstavlja usrednjeno vreme srednjih vremena zastoja uređaja zbog korektivnog održavanja na svim nivoima održavanja, i dato je izrazom:

$$MDT_c = \sum_{n=1}^N q_n MDT_{cn} \quad (2)$$

gde je:

- q_n – verovatnoća korektivnog održavanja na n -tom nivou održavanja,
- MDT_{cn} – srednje vreme zastoja uređaja zbog korektivnog održavanja na n -tom nivou održavanja,
- N – broj nivoa održavanja.

Verovatnoća q_n zavisi od pouzdanosti delova koji se menjaju na n -tom nivou održavanja i ukupne pouzdanosti svih delova koji se menjaju na uređaju:

$$q_n = \frac{\sum_{j=1}^{K_n} \sum_{i=1}^{M_{jn}} \Lambda_{ji}}{\sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^{K_n} \sum_{i=1}^M \Lambda_{ji}}, \quad (3)$$

gde je:

K_n – ukupan broj vrsta sastavnih delova EU, koji se na njemu menjaju na n -tom nivou održavanja,

M_{jn} – broj delova j -tog tipa koji se na EU menjaju na n -tom nivou održavanja,

Λ_{ji} – ukupan intenzitet otkaza j -tog dela.

Na osnovu izraza (3) vidi se da će povećanjem pouzdanosti delova koji se održavaju na određenom nivou doći do smanjenja verovatnoće korektivnog održavanja na tom nivou, odnosno do manjeg uticaja vremena zastoja na tom nivou na ukupno vreme zastoja uređaja.

Srednje vreme zastoja EU zbog korektivnog održavanja na n -tom nivou održavanja dato je izrazom:

$$MDT_{cn} = T_{akon} + T_{zrdn} + \sum T_{klo}, \quad (4)$$

gde je:

T_{akon} – aktivno vreme korektivnog održavanja uređaja,

T_{zrdn} – vreme zastoja uređaja zbog nedostatka rezervnih delova,

T_{klo} – logistička vremena pri korektivnom održavanju (prijavljivanja za održavanje, transporta, čekanja na održavanje, čekanja na predaju).

U izrazu (4) od pouzdanosti su zavisna vremena aktivnog korektivnog održavanja (T_{akon}) i zastoja uređaja zbog nedostatka rezervnih delova (T_{zrdn}), dok to ne važi za logistička vremena.

Aktivno vreme korektivnog održavanja EU zavisi od pouzdanosti sastavnih delova preko verovatnoća opravke uređaja zamenom tih delova i vremena tih opravki. Dato je sledećim izrazom:

$$T_{akon} = \sum_{j=1}^{K_n} \sum_{i=1}^{M_{jn}} q_{jin} t_{aoji}, \quad (5)$$

gde je:

t_{aoji} – aktivno vreme opravke uređaja zamenom j -tog dela,

q_{jin} – verovatnoća opravke uređaja na n -tom nivou zamenom j -tog sastavnog dela.

Vreme t_{aoji} ne zavisi od nivoa pouzdanosti dela, ali zavisi od načina postizanja određene pouzdanosti. Tako, na primer, ovo vreme će se razlikovati za različite primenjene tehnologije komponenti, za primenu redundanse, itd.

Verovatnoća q_{jin} data je izrazom:

$$q_{jin} = \frac{\Lambda_{ji}}{\sum_{j=1}^{K_n} \sum_{i=1}^{M_{jn}} \Lambda_{ji}}, \quad (6)$$

te je jasno da će deo sa većom pouzda- nošću imati manju ovu verovatnoću, odnosno da će biti manji doprinos njegovog vremena opravke ukupnom vremenu opravke uređaja, na određenom nivou održavanja.

Vreme zastoja EU zbog nedostatka rezervnih delova na n -tom nivou održavanja zavisi od mnoštva parametara sistema snabdevanja, sistema održavanja i samog uređaja, među kojima je i pouzdanost njegovih sastavnih delova. U opštem slučaju, ovo vreme je dato izrazom:

$$T_{zrdn} = \sum_{j=1}^{K_n} q_{jn} \sum_{s=1}^{D_n} t_{js} R_{js}, \quad (7)$$

gde je:

t_{js} – srednje vreme obnavljanja j -tog sastavnog dela u s -tom kompletu rezervnih delova,

R_{js} – verovatnoća obnavljanja j -tog sastavnog dela u s -tom kompletu rezervnih delova,

D_n – broj nivoa snabdevanja rezervnim delovima n -tog nivoa održavanja,

q_{jn} – verovatnoća opravke uređaja na n -tom nivou zamenom j -tog sastavnog dela.

Verovatnoća q_{jn} data je izrazom:

$$q_{jn} = \frac{\sum_{i=1}^{M_{jn}} \Lambda_{ji}}{\sum_{j=1}^{K_n} \sum_{i=1}^{M_{jn}} \Lambda_{ji}}, \quad (8)$$

što znači da će deo sa manjom pouzda- nošću više doprinositi vremenu zastoja EU zbog nedostatka rezervnih delova na određenom nivou održavanja.

Verovatnoća obnavljanja sastavnog dela R_{js} je funkcija verovatnoća otkaza kompleta rezervnih delova, koje su zavisne od pouzdanosti delova uređaja koji se obnavljaju u tim kompletima. U opštem slučaju verovatnoća otkaza kompleta rezervnih delova data je izrazom:

$$P_j = \frac{A_j^{Y_j}}{Y_j! \sum_{z=0}^{Y_j} \frac{A_j^z}{z!}}, \quad (9)$$

$$A_j = t_j \Lambda_{juk}, \quad (10)$$

gde je:

Y_j – broj j -tih rezervnih delova u kompletu,

t_j – srednje vreme obnavljanja utrošenog dela iz kompleta,

Λ_{juk} – ukupni intenzitet otkaza svih j -tih

Sl. 4 – Zavisnost vremena zastoja EU, zbog nedostatka rezervnog dela, od pouzdanosti tog dela

sastavnih delova EU koji se obnavljaju u kompletu.

Ako pouzdanost sastavnih delova EU pada doći će do rasta verovatnoće P_j , odnosno do povećanja vremena zastoja uređaja. Na slici 4 prikazana je zavisnost vremena zastoja uređaja zbog nedostatka određenog dela od njegove pouzdanosti, za različite količine rezervnih delova u kompletu.

Drugi kriterijum – ukupni troškovi korektivnog održavanja u životnom veku EU sistematizovani su na sledeći način [2,9]:

- troškovi ulaganja u korektivno održavanje na početku eksploatacije (troškovi: obuke kadra, opreme, dokumentacije i softvera, početnih zaliha rezervnih delova);
- troškovi korektivnog održavanja u toku eksploatacije (troškovi: radne snage, utrošenih rezervnih delova, transporta uređaja i njegovih sastavnih delova). Svi

ovi troškovi korektivnog održavanja zavise, više ili manje, od pouzdanosti uređaja.

Troškovi početnih zaliha rezervnih delova na početku eksploatacije uređaja mnogo zavise od pouzdanosti uređaja, odnosno njegovih sastavnih delova, i dati su izrazom:

$$C_{zrd} = \sum_{n=1}^N X_n \sum_{j=1}^{K_n + K_{ns}} C_{rdj} Y_{jn}, \quad (11)$$

gde je:

- X_n – ukupan broj mesta (radionica) za održavanje na n -tom nivou održavanja,
- K_n – ukupan broj vrsta sastavnih delova EU koji se na njemu menjaju na n -tom nivou održavanja,
- K_{ns} – ukupan broj vrsta delova koji pripadaju popravljivim sastavnim delovima uređaja, koji se menjaju na n -tom nivou održavanja,
- C_{rdj} – cena j -tog rezervnog dela,
- Y_{jn} – broj j -tih rezervnih delova u kompletu na n -tom nivou održavanja.

Ovi troškovi zavise od pouzdanosti, preko broja rezervnih delova u kompletu i cene rezervnog dela. Na slici 4 vidi se da je za određenu pouzdanost elektronskog dela, da bi se dobilo potrebno vreme zastoja zbog nedostatka tog dela, potreban određeni broj delova u kompletu rezervnih delova. Za manju pouzdanost dela potreban je veći broj delova u kompletu. Ovaj broj zavisi i od načina na koji je postignuta pouzdanost. Ako je, na primer, primenjena redundansa ovaj broj će morati da bude veći. Cena rezervnih delova zavisi od nivoa njihove pouzdanosti i načina na koji je postignuta.

Ostali troškovi ulaganja u korektivno održavanje EU na početku eksploatacije (troškovi: obuke kadra, opreme, dokumentacije i softvera) relativno manje zavise od pouzdanosti uređaja. Ako je niža pouzdanost uređaja broj otkaza biće veći, što zahteva veći broj izvršilaca održavanja, veći broj kompleta opreme i veći broj kompleta dokumentacije. Ovi troškovi zavise i od načina na koji je postignuta pouzdanost.

Svi troškovi korektivnog održavanja EU u toku eksploatacije direktna su posledica nepouzdanosti uređaja, pa su veoma zavisni od pouzdanosti uređaja i njegovih sastavnih delova. Pošto nastaju u toku eksploatacije mnogo zavise od koeficijenta eksploatacije i trajanja eksploatacije EU.

Troškovi radne snage za korektivno održavanje EU dati su izrazom:

$$C_{rs} = \sum_{n=1}^N \left(z_n \sum_{j=1}^{K_n} \sum_{i=1}^{M_{jn}} \Lambda_{ji} t_{aoji} + \sum_{j=1}^{K_{ns}} \sum_{i=1}^{M_{jns}} \Lambda_{jis} t_{aojis} z_{njis} \right) X_n c_{rsn} T_{ek}, \quad (12)$$

gde je:

z_n – broj uređaja koji se popravljaju u

radionici na n-tom nivou održavanja, Λ_{jis} – ukupan intenzitet otkaza ji-tog dela sastavnog dela uređaja, koji se dobija pomoću izraza koji je analogan izrazu za Λ_{ji} ,

t_{aojis} – aktivno vreme opravke sastavnog dela uređaja zamenom ji-tog dela,

z_{njis} – broj popravljivih sastavnih delova uređaja koji se na n-tom nivou održavanja popravljaju zamenom ji-tog dela,

M_{jns} – broj delova j-te vrste koji se na sastavnim delovima uređaja menjaju na n-tom nivou održavanja,

c_n – cena radnog sata na n-tom nivou,

T_{ek} – trajanje eksploatacije uređaja.

U izrazu (12) vidi se direktna zavisnost ovih troškova od pouzdanosti sastavnih delova EU. Oni zavise i od načina na koji je postignuta pouzdanost, preko broja delova određene vrste (M_{jn} i M_{jns}) i preko aktivnih vremena opravke (t_{aoji} i t_{aojis}). Na primer, ako je primenjena redundansa broj istih delova uređaja (M_{jn}) je veći, te će i ovi troškovi biti veći.

Troškovi utrošenih rezervnih delova dati su izrazom

$$C_{urd} = \sum_{n=1}^N X_n z_n T_{ek} \left(\sum_{j=1}^{K_n} C_{rdj} \sum_{i=1}^{M_{jn}} \Lambda_{ji} + \sum_{j=1}^{K_{ns}} C_{rdj} \sum_{i=1}^{M_{jns}} \Lambda_{ji} \right). \quad (13)$$

I ovi troškovi su direktno proporcionalni intenzitetu otkaza sastavnih delova uređaja. Oni zavise od cene rezervnih delova, koja je obrnuto proporcionalna intenzitetu otkaza, i od načina na koji je postignuta pouzdanost, i to preko broja delova određene vrste (M_{jn} i M_{jns}).

Troškovi transporta uređaja na održavanje dobijaju se pomoću izraza:

$$C_{tru} = \sum_{n=1}^N z_n X_n c_{trn} T_{ek} \sum_{j=1}^{K_n} \sum_{i=1}^{M_{jn}} \Lambda_{ji}, \quad (14)$$

Sl. 5 – Zavisnost troškova transporta dela od njegove pouzdanosti

gde je:

c_{trn} – cena transporta uređaja na n-ti nivo održavanja.

Kao i troškovi radne snage i utrošenih rezervnih delova i ovi troškovi su direktno proporcionalni intenzitetu otkaza sastavnih delova uređaja.

Pored transporta EU pri njegovom korektivnom održavanju transportuju se i njegovi opravljivi sastavni delovi. Troškovi transporta jednog opravljivog dela su funkcija verovatnoća otkaza kompleta rezervnih delova, u kojima se može nalaziti taj deo, i broja zahteva za tim delom za vreme trajanja eksploatacije uređaja T_{ek} :

$$C_{trd} = f(P_{jn}, Z_{jn}). \quad (15)$$

Broj zahteva za jednim rezervnim delom za opravku uređaja na n-tom nivou je:

$$Z_{jn} = T_{ek} \sum_{i=1}^{M_{jn}} \Lambda_{ji}, \quad (16)$$

a taj broj za opravku opravljivog sastavnog dela je:

$$Z_{jn} = T_{ek} \sum_{i=1}^{M_{jns}} \Lambda_{jis}, \quad (17)$$

Iz ovih izraza se vidi da i ovi troškovi mnogo zavise od pouzdanosti sastavnih delova EU. Na slici 5 prikazana je zavisnost transporta jednog sastavnog dela EU od intenziteta otkaza tog dela, za vreme eksploatacije od 10 godina i različite količine rezervnih delova u kompletu na I nivou održavanja.

Postupak određivanja optimalne pouzdanosti

Postupak određivanja optimalne varijante pouzdanosti zavisi od sistema u kojem će raditi uređaj. U nekim sistemima na prvom mestu je zahtevana operativna gotovost uređaja, dok su troškovi veka uređaja u drugom planu. Takvi su

i vojni sistemi pa je u nastavku dat postupak optimizacije pouzdanosti za takve sisteme. U postupku se koristi jednokriterijumska optimizacija, sa vremenom zastoja EU kao ograničenjem i ukupnim troškovima korektivnog održavanja i troškova pouzdanosti kao funkcijom optimalnosti. Optimalna varijanta pouzdanosti je ona pri kojoj se dozvoljeni zastoj uređaja zbog korektivnog održavanja postiže uz minimalne troškove za:

- razvoj i proizvodnju pouzdanosti,
- za korektivno održavanje u toku eksploatacije EU.

Na slici 6 prikazane su faze ovog postupka.

Generisanje varijanti pouzdanosti

Najpogodniji, a za složenije EU i jedino praktično moguć način za generisanje varijanti i proračun njihove pouzdanosti jeste korišćenje programskih paketa za automatizovanu prognozu i proračun pouzdanosti. Jedan od najjačih i najpo-

znatijih je softverski paket PREDICTOR [10], koji vrši proračun pouzdanosti na osnovu postupka i podataka iz priručnika MIL-HDB-217. Korisnik ovog paketa može po volji zadavati:

- kvalitet komponenti,
- opterećenje komponenti,
- temperaturne uslove,
- redundansu,
- tehnološke generacije komponenti.

Na taj način korisnik može generisati željene varijante pouzdanosti.

Definisanje korektivnog održavanja

Korektivno održavanje EU neće biti isto za svaku varijantu pouzdanosti. Najveće razlike ispoljiće se u tehnologiji održavanja i nivoima održavanja. Na primer, tehnologija opravke sastavnog dela sa redundansom razlikovaće se od tehnologije opravke tog dela bez redundanse, a primena komponenti novije tehnologije izazvaće potrebu opravke delova na višem nivou održavanja. Stoga je potrebno

za svaku varijantu odrediti potrebne korektivne tehnološke programe održavanja i nivoe na kojima će se oni izvoditi [5,7].

Proračun pouzdanosti

Za svaku varijantu pouzdanosti potrebno je proračunati pouzdanost EU i svakog njegovog sastavnog dela, koji će se koristiti kao ulazni parametri modela korektivnog održavanja, za proračun kriterijuma korektivnog održavanja. Za zadanu varijantu pouzdanosti, pomoću PREDICTORA automatski se dobija pouzdanost komponenti, modula, blokova i celog uređaja. Ukoliko je sa nekog drugog aspekta (bezbednost, troškovi ne korištenja, psihološki efekti, itd.) određen minimalni nivo pouzdanosti EU, potrebno je iz daljnjeg razmatranja izbaciti sve one varijante pouzdanosti koje imaju manju pouzdanost od ovog nivoa.

Proračun troškova razvoja i proizvodnje pouzdanosti

Na osnovu potrebnog vremena, materijala, opreme i energije za razvoj i proizvodnju određene varijante pouzdanosti dobijaju se troškovi razvoja (TRP) i proizvodnje (TPP) pouzdanosti te varijante.

Određivanje kriterijuma korektivnog održavanja

Određivanje kriterijuma korektivnog održavanja za svaku varijantu pouzdanosti sastoji se od tri koraka, koji su prikazani na slici 7.

1) Proračun skupa optimalnih varijanti početnih zaliha rezervnih delova
Početne zalihe rezervnih delova za jednu varijantu pouzdanosti uređaja mogu se formirati na mnogo načina. Od svih tih varijanti početnih zaliha rezervnih delova, za analizu i izbor najbolje, značajne su one koje su optimalne sa aspekta snabdevenosti rezervnim delovima. Skup ovih varijanti može se dobiti metodom približnog dinamičkog programiranja [3,4].

2) Proračun kriterijuma korektivnog održavanja

Pomoću matematičkog modela korektivnog održavanja [2,3] vrši se proračun kriterijuma korektivnog održavanja – vremena zastoja zbog korektivnog održavanja i troškova korektivnog održavanja u životnom veku EU, za svaku varijantu početnih zaliha rezervnih delova.

3) Izbor optimalne varijante početnih zaliha rezervnih delova

Na osnovu rezultata proračuna kriteri-

juma korektivnog održavanja i dozvoljenog zastoja EU zbog KO (MDT_{cdoz}) vrši se izbor optimalne varijante početnih zalih rezervnih delova [3,4]. Izborom ove varijante određeni su i kriterijumi korektivnog održavanja određene varijante pouzdanosti:

$UTRKO_{opt}$ – ukupni troškovi korektivnog održavanja EU u životnom veku,

MDT_{copt} – vreme zastoja EU zbog korektivnog održavanja.

Izbor optimalne varijante pouzdanosti

Pre ovog izbora, kao što je prikazano na slici 6, sumirani su troškovi razvoja i proizvodnje pouzdanosti i troškova korektivnog održavanja u životnom veku EU, za svaku varijantu pouzdanosti:

$$UTR = TRP + TPP + UTRKO_{opt}. \quad (18)$$

Ako je $MDT_{copt} \cong MDT_{czad}$ za sve varijante pouzdanosti, jasno je da je najbolja varijanta sa najmanjim ukupnim troškovima UTR. U slučaju da je kod neke varijante $MDT_{copt} \cong MDT_{cdoz}$ izbor se komplikuje, jer se sada i UTR i $MDT_{copt} < MDT_{cdoz}$ razlikuju po varijantama pouzdanosti. Ali, ako se ima u vidu da je vreme MDT_{cdoz} tako izabrano da zadovoljava korisnika (ne ugrožava misiju EU), troškovi UTR će pri upoređivanju varijanti biti na prvom mestu. To znači da i u ovom slučaju najbolja varijanta ima minimalne troškove UTR. Jedino u slučaju da je kod dve varijante (A i B) UTR_{optA} neznatno veće od UTR_{optB} , a MDT_{coptA} znatno manje od MDT_{coptB} , za optimalnu varijantu izabraće se varijanta A.

Primer određivanja optimalne pouzdanosti

Pomoću računarskog programa, realizovanog na osnovu matematičkog modela korektivnog održavanja [2,3] i datog postupka određivanja optimalne pouzdanosti EU, izvršeno je određivanje optimalnog nivoa pouzdanosti jednog hipotetičkog modularno građenog EU. Na slici 8 prikazana je blok-šema konstrukcije ovog uređaja.

Sl. 8 – Blok šema konstrukcije EU na kome se izvodi određivanje optimalne pouzdanosti

Uređaj se sastoji od tri bloka, a svaki blok od određenog broja modula, i održava se u sistemu održavanja sa četiri nivoa. Na I nivou održavanja ne vrši se korektivno održavanje. Na II nivou uređaj se opravljiva zamenom blokova. Blokovi se opravljaju na III nivou zamenom modula. Moduli se opravljaju na IV nivou zamenom komponenti.

U ovom primeru izabrana je najbolja od tri varijante pouzdanosti, koje se razlikuju po kvalitetu upotrebljenih komponenti. U tabeli 2 prikazan je odnos intenziteta otkaza i cene celog uređaja za ove tri varijante.

U primeru dozvoljeno vreme zastoja zbog korektivnog održavanja iznosi 12 h. Optimizacijom su dobijene vrednosti kri-

Tabela 2

Varijante pouzdanosti EU

Varijante	Intenzitet otkaza uređaja ($10^{-6}/h$)	Cena svih komponenti uređaja (dinara)
1	$\lambda_1 = 1150$	$C_1 = 28\ 200$
2	$0,1 \lambda_1$	$5 C_1$
3	$4 \lambda_1$	$0,2 C_1$

terijuma korektivnog održavanja, koje su prikazane u tabeli 3.

Troškovi razvoja pouzdanosti isti su za sve tri varijante pouzdanosti. Isti je slučaj i sa troškovima proizvodnje uređaja, osim cene komponenti. Stoga je za diskriminaciju varijanti pouzdanosti dovoljno posmatrati ukupne troškove – $UTR_{opt} = UTRKO_{opt} + C$ (C – cena svih komponenti uređaja), koji su prikazani u tabeli 3.

Tabela 3

Rezultati optimizacije

Varijanta	$MDT_{copt}(h)$	$UTRKO_{opt}$ (x 10^8 dinara)	UTR_{opt} (x 10^8 dinara)
1	11,4	0,12	0,40
2	10,6	0,06	1,47
3	6,3	0,37	0,42

Na osnovu dobijenih rezultata vidi se da je varijanta 2, kod koje su korišćene najkvalitetnije komponente, u životnom veku najskuplja, te se može odmah isključiti kao neoptimalna. Varijanta 1 ima nešto niže troškove od varijante 3, ali ako se uzme u obzir da je vreme MDT_{copt3} mnogo manje od MDT_{copt1} moglo bi se smatrati da je optimalna varijanta pouzdanosti varijanta 3.

Zaključak

Ako se u toku razvoja EU ne sprovodi optimizacija pouzdanosti, to, sa aspekta korektivnog održavanja, može imati veoma negativan uticaj na ekonomsku efektivnost uređaja. Stoga je potrebno da stručnjaci, koji razvijaju uređaj, imaju na raspolaganju odgovarajuću metodologiju i programsku podršku za ovu optimizaciju. Pokazano je da donošenje optimalne odluke o nivou i načinu postizanja pouzdanosti zavisi od mnoštva parametara (sistema održavanja, uređaja, eksploatacije, itd.), pa je praktično nemoguće propisati donošenje ove odluke odgovarajućim standardom.

U toku razvoja EU potrebno je doneti i optimalne odluke vezane za samo korektivno održavanje (pogodnost korektivnog održavanja, tehnologija korektivnog održavanja, nadležnosti nivoa korektivnog održavanja). Kako ove odluke zavise od nivoa i načina postizanja pouzdanosti EU, potrebno je istovremeno izvoditi i optimizaciju pouzdanosti i optimizaciju korektivnog održavanja. Jedino na taj način moguće je dobiti optimalnu konstrukciju EU i optimalno definisano korektivno održavanje, koji će obezbediti dozvoljeno vreme zastoja zbog opravke EU, uz minimalne troškove za razvoj, proizvodnju i održavanje.

Data metodologija može se primeniti i pri kupovini EU na tržištu, u slučaju da se nude uređaji različite pouzdanosti. Postupak određivanja optimalne varijante pouzdanosti može se u potpunosti primeniti i pri razvoju mašinskih uređaja, s tim da se kod ovih uređaja matematički model korektivnog održavanja EU može primeniti samo u onom delu gde je intenzitet otkaza konstantan. Kod ovih ure-

đaja veoma je bitno i preventivno održavanje, te bi pri optimizaciji pouzdanosti ovih uređaja trebalo uključiti i ovo održavanje.

Literatura:

- [1] Vujanović, N.: Teorija pouzdanosti tehničkih sistema, Beograd, Vojnoizdavački i novinski centar, 1987.
- [2] Korolija, D.: Model korektivnog održavanja elektronskih uređaja u sistemu održavanja sa više nivoa, Vojnotehnički glasnik 6/97, str. 649–661, 1997.
- [3] Korolija, D.: Model snabdevanja modularno građenih elektronskih uređaja rezervnim delovima, Magistarski rad, Zagreb, ETF, 1988.
- [4] Korolija, D.: Optimizacija rezervnih delova za održavanje modularno građenih elektronskih sredstava, Vojnotehnički glasnik 5/96, str. 517–524, 1996.
- [5] Korolija, D.: Optimizacija korektivnog održavanja elektronskog uređaja nabavljenog na tržištu, Vojnotehnički glasnik 3/98, str. 281–294, 1998.
- [6] Korolija, D.: Donošenje odluke opravi–odbaci kod modularno građenih elektronskih uređaja, Vojnotehnički glasnik 5/98, str. 513–526, 1998.
- [7] Korolija, D.: Optimizacija korektivnog održavanja pri projektovanju i razvoju savremenog elektronskog uređaja, Naučno-tehnički pregled 5/98, str. XXX–XXX, 1998.
- [8] MIL-HDB-217D: Reliability Prediction of Electronic Equipment (Notice-1), Albuquerque, Menagement Sciences Inc., 1984.
- [9] Barković, M.: Prilog optimizaciji višenivoiskog sistema održavanja elektronskih sredstava, doktorska disertacija, Zagreb, CVTŠ KoV JNA, 1989.
- [10] Wargo, J. Jr., „Predictor User's Manual Supplement“, Albuquerque, Menagement Sciences Inc., 1983.