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

ODREĐIVANJE OPTIMALNE VARIJANTE UGRAĐENOG MERNOG ELEMENTA U ELEKTRONSKOM SISTEMU

UDC: 621.317.7 : 621.38

Rezime:

U ovom radu razmatran je problem određivanja optimalne varijante ugrađenog mernog elementa (UME) u elektronskom sistemu, sa aspekta integralnog tehničkog obezbeđenja. Razvijena metodologija zasniva se na: generisanju identifikovanih relevantnih varijanti UME-a, pripremi ulaznih podataka, optimizaciji rezervnih delova za sve varijante UME-a, proračunu identifikovanih kriterijuma i izboru najbolje varijante. Kriterijumi optimizacije su operativna gotovost i deo troškova životnog ciklusa. Na jednom hipotetičkom elektronskom sistemu prikazan je postupak određivanja optimalne varijante UME-a.

Ključne reči: elektronski sistem, ugrađeni merni element, korektivno održavanje, operativna gotovost, troškovi životnog ciklusa, optimizacija, optimalna varijanta ugrađenog mernog elementa.

DETERMINING THE OPTIMAL VARIANT OF BUILT IN TEST EQUIPMENT AT ELECTRONIC SYSTEM

Summary:

Problem of determining the optimal variant of built-in test equipment (BITE) in an electronic system, from an integral logistic support aspect, is considered. The developed methodology is based on: the generation of identified relevant variants of BITE, the preparation of input parameters, the optimisation of spare parts for all BITE variants, the calculation of identified criteria and the choice of the best variant. The optimization criteria are operational availability and a part of costs in the life cycle. The procedure of determining the optimal variant of BITE is illustrated through one hypothetical electronic device.

Key words: electronic system, built-in test equipment, corrective maintenance, operational availability, life cycle costs, optimization, optimal variant of built-in test equipment.

Uvod

Pri opravci elektronskog sistema¹⁾ najveći problem je pronalaženje neispravnog sastavnog dela čiji je otkaz uzrok neispravnosti. Brzim i kontinuiranim povećanjem kompleksnosti elektronskih si-

stema ovaj problem postaje još veći. Postupak pronalaženja neispravnog dela naziva se *defektacija*. Kod savremenih elektronskih sistema primenjuje se modularna konstrukcija, pa se kod njih opravka izvodi zamenom neispravne modularne celine. Otkrivanje neispravne modularne celine lakše je nego otkrivanje neispravne komponente (otpornik, integralno kolo,

¹⁾ Termin „elektronski sistem“ podrazumeva i elektronski uređaj.

kondenzator, itd.), ali i kod modularnog sistema defektacija može biti složena i dugotrajna.

Ugradnjom automatskog ugrađenog mernog uređaja – UME (*Built-In Test Equipment – BITE*) u elektronski sistem znatno se smanjuje vreme defektacije sistema i njegovih sastavnih delova, što u velikoj meri može da poveća operativnu gotovost elektronskog sistema. UME se može ugraditi u sistem na više različitih načina – varijanti, s obzirom na funkciju, konstrukciju i dubinu defektacije. Sve ove varijante, uključujući i onu gde sistem nema UME, imaju različit doprinos operativnoj gotovosti sistema, ali i različit doprinos ukupnim troškovima životnog veka sistema. Zbog toga je u toku projektovanja i razvoja sistema neophodno doneti optimalnu odluku o ugradnji UME-a, tj. od svih mogućih varijanti UME-a izabrati optimalnu. Stručnjaci koji u toku razvoja sistema rešavaju integralno tehničko obezbeđenje – ITOb najčešće nemaju adekvatnu metodologiju i programsku podršku za rešavanje ovog problema.

U ovom radu prikazana je originalna metoda izbora optimalne varijante UME-a. Na početku su dati osnovni pojmovi o UME-u i njegovom mestu i funkciji u elektronskom sistemu, na osnovu čega su identifikovane moguće varijante UME-a. Zatim je izvršena analiza uticaja ugradnje na identifikovane kriterijume za izbor optimalne varijante UME-a. Ovaj problem spada, najvećim delom, u domen optimizacije korektivnog održavanja elektronskog sistema, pa je sam postupak izbora optimalne varijante UME-a u osnovi sličan postupcima optimalnog definisanja: pouzdanosti sistema [1], nivoa opravke sistema i njegovih delova [2] i opravci ili odbacivanju delova sistema [3]. Na kraju rada je za jedan hipotetički

elektronski sistem, kao primer, izvršen postupak donošenja optimalne odluke o ugradnji UME-a.

Ugrađeni merni element u elektronskom sistemu

Bez obzira na nivo pouzdanosti elektronskih sistema na njima se u toku eksploatacije dešavaju otkazi. Razvojem tehnologija elektronskih komponenti velikim delom su eliminisani otkazi zbog postepene degradacije komponentata i njihove fizičke istrošenosti. Na savremenim sistemima se, u većini slučajeva, dešavaju samo potpuni otkazi, koji obično nastaju iznenada, tj. slučajno, pa se nazivaju i slučajni otkazi. Sve akcije ili postupci koji doprinose da se sistem i njegovi popravljivi sastavni delovi vrate u ispravno stanje, nakon otkaza, nazivaju se korektivno održavanje. Važne faze korektivnog održavanja su uočavanje otkaza sistema i opravka sistema i njegovih sastavnih delova.

Otkaz na elektronskom sistemu može nastati dok je sistem u radu ili dok je isključen. Ako za vreme rada sistema nastane otkaz, korisnik u nekim slučajevima može uočiti da je došlo do otkaza i preduzeti potrebne akcije – da sam opravi sistem ili da ga prijavi službi za korektivno održavanje. Zbog sve veće kompleksnosti savremenih elektronskih sistema korisnik teško uočava otkaz koji se desio na sistemu u radu. Isto tako, korisnik sistema teško može uočiti otkaz koji se desio dok je sistem bio isključen pri njegovom uključanju. Ovaj problem efikasno se rešava ugradnjom UME-a, koji obavlja kontrolu osnovnih parametara koji su bitni za realizaciju funkcije sistema (npr. nivo izlaznog signala, odnos signal–šum, greška u prenosu, itd.). Ako

Sl. 1 – Principijelna šema rada UME u elektronskom telekomunikacionom sistemu

parametar izađe van dozvoljenih granica, korisnik sistema dobija alarm (svetlosni i/ili zvučni), kako bi odmah mogao pokrenuti postupak opravke sistema.

Sadržaj opravke sistema i njegovih sastavnih delova je:

- defektacija,
- rasklapanje,
- zamena neispravnog sastavnog dela,
- sklapanje,
- podešavanje,
- kontrola parametara.

Na početku opravke potrebno je pronaći neispravan sastavni deo sistema koji je izazvao otkaz. Primenom razvijenih metoda defektacije znatno se skraćuje vreme otkrivanja neispravnog dela [4]. Metode defektacije definišu puteve za

određivanje optimalnog programa traženja neispravnog sastavnog dela sistema. Kriterijum optimizacije je najčešće radno vreme, koje mora biti što kraće. Problem optimizacije defektacije može se svesti na određivanje skupa ispitivanja (merenja, proveru, testova) koje treba izvršiti na sistemu, te njihovog redosleda, koji će uz minimum utroška resursa dovesti do neispravnog sastavnog dela. Još veće smanjenje potrebnih resursa korektivnog održavanja (vreme defektacije i znanje ljudstva koje izvodi opravku) postiže se ugradnjom UME-a. Na signal alarma o otkazu kod ovakvog sistema se automatski ili intervencijom poslužioca pokreće postupak automatske defektacije sistema.

Na slici 1 prikazan je primer UME-a u jednom elektronskom, telekomunika-

Sl. 2 – Varijante ugradnje UME-a

cionom sistemu [4]. U momentu uključivanja UME izvrši početno testiranje bitnih parametara (npr. P_1 – napajanje, uključi test-signal na ulaz bloka B3 i proveriti parametar P_5 – izlazni nivo). Ako je početni test u redu, o tome se preko displeja obaveštava poslužilac. Ako test nije u redu, daje se signal alarma i poruka o posledici otkaza (npr. „napajanje nije u redu“ ili „nema izlaznog nivoa“). U toku normalnog rada sistema prate se bitni parametri. Test-signal je isključen. Ako dođe do otkaza sistema alarm o tome upozorava poslužioca, koji preko tastature pokreće poseban program UME-a za defektaciju sistema. UME kontroliše redom parametre P_2 , P_1 , P_4 i utvrđuje koji je sastavni deo неисправan i preko displeja saopštava poslužiocu. Kod ovog sistema moguće je spolja dovesti zahtev za određivanje statusa. Na takav zahtev, UME preko pretvarača i linije veze daje status sistema koji kontroliše hijerarhijski višem sistemu. Istim putem šalje i signal alarma u slučaju neispravnosti.

Pri ugradnji UME-a u elektronski sistem projektant sistema ima na raspolaganju više varijanti ove ugradnje. Varijante ugradnje UME-a formiraju se u odnosu na:

- prisustvo UME-a u elektronskom sistemu,

- funkciju UME-a (indikacija neispravnosti, lokalizacija neispravnosti),
- dubinu lokalizacije neispravnosti (do kog nivoa modularne konstrukcije sistema se utvrđuje otkaz).

Pored varijante u kojoj nije primećen UME i varijante u kojoj UME obavlja samo indikaciju neispravnosti, moguće je formirati određen broj varijanti ugradnje UME-a s obzirom na dubinu lokalizacije neispravnosti. Minimalni broj ovih varijanti jednak je broju nivoa modularne konstrukcije.

Kao primer na slici 2 prikazane su dve varijante ugradnje UME-a (A i B) jednog elektronskog sistema.

Kod varijante UME-A UME obavlja indikaciju neispravnosti, a kod varijante UME-B defektaciju do nivoa viših modularnih celina (VMC). Kod sledeće varijante VMC bi mogle imati ugrađen UME koji vrši defektaciju do nivoa nižih modularnih celina, itd.

Analiza uticaja ugradnje UME-a na operativnu gotovost i troškove životnog veka sistema

Ugradnja UME-a u elektronski sistem predstavlja jednu od metoda povećanja pogodnosti korektivnog održavanja sistema. Sama ugradnja izvodi se u toku projektovanja, razvoja i proizvodnje sistema, pri čemu se angažuju određena

novčana sredstva (troškovi projektovanja, razvoja i proizvodnje UME-a). Efekti ove ugradnje vidljivi su tokom eksploatacije sistema, kroz operativnu gotovost i troškove korektivnog održavanja sistema. U skladu sa tim za relevantne kriterijume izbora optimalne varijante UME-a uzeti su:

– operativna gotovost sistema, koja uzima u obzir samo korektivno održavanje (bez preventivnog održavanja),

– deo troškova životnog veka sistema (troškovi projektovanja, razvoja i proizvodnje UME-a i troškovi korektivnog održavanja sistema).

OPERATIVNA GOTOVOST SISTEMA

Operativna gotovost, koja uzima u obzir samo korektivno održavanje, prikazana je izrazom:

$$A_o = \frac{MTBF_{ef}}{MTBF_{ef} + MDT_c} \quad (1)$$

gde je:

$MTBF_{ef}$ – efektivno srednje vreme između otkaza sistema,

MDT_c – srednje vreme zastoja sistema zbog korektivnog održavanja, koje je dato izrazom:

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

gde je:

q_n – verovatnoća korektivnog održavanja sistema na n-tom nivou održavanja,

N – broj nivoa održavanja,

MDT_{cn} – srednje vreme zastoja sistema zbog korektivnog održavanja na n-tom nivou održavanja, koje je dato izrazom:

$$MDT_{cn} = \bar{T}_{ozn} + \bar{T}_{zrdn} + \bar{T}_{opn} \quad (3)$$

gde je:

$\bar{T}_{ozn}$ – srednje vreme organizacionih zastoja sistema (transport na održavanje i sa održavanja, čekanje na opravku i predaju),

$\bar{T}_{zrdn}$ – srednje vreme zastoja sistema zbog nedostatka rezervnih delova,

$\bar{T}_{opn}$ – srednje vreme opravke sistema, koje je u ovoj analizi pogodno prikazati izrazom:

$$\bar{T}_{opn} = \bar{T}_{don} + \bar{T}_{oon} \quad (4)$$

gde je:

$\bar{T}_{don}$ – srednje vreme defektacije sistema,

$\bar{T}_{oon}$ – srednje vreme otklanjanja otkaza sistema.

U nastavku je izvršena analiza uticaja ugradnje UME-a na elemente koji određuju operativnu gotovost (izrazi (1), (2), (3) i (4)) i, na kraju, analiza ovog uticaja na samu operativnu gotovost.

Efektivno srednje vreme između otkaza sistema – $MTBF_{ef}$

Ugradnjom UME-a u elektronski sistem povećava se broj sastavnih delova sistema, što ima za posledicu smanjenje pouzdanosti sistema, odnosno smanjenje efektivnog srednjeg vremena između otkaza. Povećanjem dubine defektacije UME-a ovo smanjenje će biti još veće. Međutim ako se ima u vidu da fizički UME predstavlja procentualno mali deo sistema, jasno je da je promena efektivnog srednjeg vremena između otkaza sistema, uvođenjem UME-a, relativno mala.

Srednje vreme opravke sistema – $\bar{T}_{opn}$

Ugradnjom UME-a bitno se smanjuje vreme defektacije otkaza elektronskog sistema. Bez ugrađenog UME-a ovo

Vremena opravke sistema zamenom VMC

Otkazala VMC	Varijanta UME-A			Varijanta UME-B		
	Vreme defektacije sistema (h)	Vreme otklanjanja otkaza sistema (h)	Vreme opravke sistema (h)	Vreme defektacije sistema (h)	Vreme otklanjanja otkaza sistema (h)	Vreme opravke sistema (h)
VMC-1	1,8	0,1	1,9	0,005	0,1	0,105
VMC-2	1,2	0,1	1,3	0,005	0,1	0,105
VMC-3	1,8	0,1	1,9	0,005	0,1	0,105

vreme iznosi od nekoliko desetina minuta do nekoliko desetina sati. Sa UME ovo vreme ima minimalni iznos (do jednog minuta). Kako ono predstavlja veći deo srednjeg vremena aktivne opravke sistema kada nije ugrađen UME (u proseku 60% [5]), jasno je da srednje vreme aktivne opravke sistema veoma zavisi od varijanti samotestiranja.

Primer: Za elektronski sistem, prikazan na slici 3 u tabeli 1, prikazana su vremena opravke sistema zamenom viših modularnih celina – VMC na n-tom nivou, kada UME sistema obavlja samo indikaciju otkaza (varijanta UME-A) i kada UME izvodi defektaciju do nivoa VMC (varijanta UME-B). Za varijantu UME-A srednje vreme defektacije sistema (otkrivanje neispravne VMC) iznosi $\bar{T}_{don} = 1,62$ h. Vreme otklanjanja otkaza (zamena neispravne VMC) jeste $\bar{T}_{oon} = 0,1$ h, pa je srednje vreme opravke sistema $\bar{T}_{opn} = 1,63$ h. Uvođenjem UME-a koji obavlja defektaciju do nivoa VMC (varijanta UME-B) vreme defektacije se smanjilo na $\bar{T}_{don} = 0,005$ h, vreme otklanjanja otkaza je kao i u varijanti UME-A, pa je srednje vreme opravke sistema $\bar{T}_{opn} = 0,105$ h – 15 puta manje nego pri varijanti UME-A.

Srednje vreme organizacionih zastoja pri korektivnom održavanju – $\bar{T}_{ozn}$ ne zavisi od varijanti UME-a.

Srednje vreme zastoja sistema zbog nedostatka rezervnih delova – $\bar{T}_{zrdn}$

Za ista uložena sredstva u zalihe rezervnih delova, sa jedne strane, srednje vreme zastoja sistema, zbog nedostatka rezervnih delova, povećaće se uvođenjem UME-a. Razlog tome je povećanje asortimana sastavnih/rezervnih delova. Kako je ovo povećanje asortimana, u većini slučajeva, relativno malo u odnosu na ukupni asortiman sastavnih/rezervnih delova, to će i povećanje srednjeg vremena zastoja sistema zbog nedostatka rezervnih delova biti malo. Sa druge strane, ako se u opravljive modularne celine ugradi UME (veća dubina defektacije) vreme njihove defektacije, odnosno opravke, biće osetno manje, te će se i celine, nakon opravke, brže vraćati u komplete

Sl. 3 – Modularno građen elektronski sistem

rezervnih delova ili na sistem. To će imati za posledicu smanjivanje srednjeg vremena zastoja sistema zbog nedostatka rezervnih delova.

Srednje vreme zastoja sistema zbog korektivnog održavanja – MDT_c

Srednje vreme organizacionih zastoja pri korektivnom održavanju sistema – $\bar{T}_{ozn}$ mnogo zavisi od nivoa na kojem se opravljja sistem. Ako se sistem opravljja na mestu njegove eksploatacije (I nivo) ovo vreme je minimalno (nekoliko minuta), a ako se sistem opravljja na višim nivoima ono može biti veoma dugo (od desetak sati do nekoliko dana). Srednje vreme zastoja sistema zbog nedostatka rezervnih delova $\bar{T}_{zrdn}$ zavisi od uložених novčanih sredstava u zalihe rezervnih delova. Ako su ova sredstva takva da se obezbede sastavni delovi sistema na mestu (nivou) gde se sistem opravljja, to vreme će biti minimalno (nekoliko minuta). Sa druge strane, za mala uložena sredstva to vreme će biti dugo (od desetak sati do nekoliko dana). Ako se zna da je za opravku sistema bez UME-a potrebno vreme od nekoliko sati, a za opravku sistema sa UME-om vreme od desetak minuta do jednog sata, može se zaključiti da će se uticaj ugradnje UME-a na sred-

nje vreme zastoja sistema zbog korektivnog održavanja – MDT_c ispoljiti samo u slučaju da se sistem opravljja najvećim delom na mestu upotrebe (u izrazu (2) $q_1 \approx 1$) i da je korisnik dovoljno snabdeven potrebnim rezervnim delovima. U suprotnom, ovo vreme će se praktično vrlo malo promeniti ako se u sistem ugradi UME.

Operativna gotovost

Iz izraza (1) vidi se da operativnu gotovost određuju efektivno srednje vreme između otkaza sistema – MTBF_{ef} i srednje vreme zastoja sistema zbog korektivnog održavanja – MDT_c. Kako ugradnja UME-a vrlo malo utiče na MTBF_{ef}, ova ugradnja će uticati na povećanje operativne gotovosti na isti način kao što utiče i na smanjenje vremena MDT_c.

U tabeli 2 prikazan je relativan uticaj ugradnje UME-a u elektronski sistem na operativnu gotovost i njene elemente.

TROŠKOVI ŽIVOTNOG VEKA SISTEMA

Deo troškova životnog veka sistema, koji zavise od ugradnje UME-a, prikazan

Tabela 2

Uticaj ugradnje UME-a na operativnu gotovost i elemente koji je određuju

Kriterijum	UME (dubina lokalizacije do jednog nivoa)	UME (dubina lokalizacije do više nivoa)
Srednje vreme između otkaza	* (–)	* (–)
Srednje vreme opravke sistema	* (–) ÷ *** (–)	* (–) ÷ *** (–)
Srednje vreme organizacionih zastoja pri korektivnom održavanju	●	●
Srednje vreme zastoja sistema zbog nedostatka rezervnih delova	* (+)	* (–) ÷ * (+)
Srednje vreme zastoja sistema zbog korektivnog održavanja	● ÷ *** (–)	● ÷ *** (–)
Operativna gotovost	* (+) ÷ *** (+)	* (+) ÷ *** (+)

● – nema uticaja
 * – mali uticaj

** – srednji uticaj
 *** – veliki uticaj

(+) – raste
 (–) – opada

Sl. 4 – Deo troškova životnog veka sistema koji zavise od ugradnje UME-a

je na slici 4. U nastavku je utvrđen uticaj ugradnje UME-a na ove troškove.

Troškovi istraživanja, razvoja i proizvodnje pouzdanosti

Ugradnjom UME-a u elektronski sistem pojavljuje se dodatni broj sastavnih delova za koje je potrebno obezbediti određenu pouzdanost. Zbog toga će troškovi istraživanja, razvoja i proizvodnje pouzdanosti sistema sa UME-om biti veći od ovih troškova kod sistema bez UME-a. Povećanjem dubine defektacije UME-a ovi troškovi biće još veći. Zbog značaja funkcije UME-a u elektronskom sistemu (indikacija otkaza, defektacija otkaza), njegova pouzdanost treba da bude visoka, što se postiže primenom metoda povećanja pouzdanosti (primena kvalitetnijih komponenti, rasterećenje komponenti,

ti, redundansa, itd.), što dodatno povećava troškove istraživanja, razvoja i proizvodnje pouzdanosti.

Troškovi istraživanja, razvoja i proizvodnje pogodnosti korektivnog održavanja

Ugradnja UME-a u elektronski sistem predstavlja metodu povećanja pogodnosti korektivnog održavanja koja, u odnosu na ostale metode povećanja pogodnosti korektivnog održavanja, zahteva najviše vremena i materijala u toku istraživanja, razvoja i proizvodnje pogodnosti korektivnog održavanja. To znači da ugradnja UME-a ima veliki uticaj na ove troškove.

Troškovi zaliha rezervnih delova, troškovi utrošenih rezervnih delova, troškovi transporta rezervnih delova

Uvođenjem UME-a u sistem povećaće se broj sastavnih delova, a time i potreban asortiman rezervnih delova, što će imati za posledicu povećanje troškova potrebnih zaliha rezervnih delova, utrošenih rezervnih delova i transporta rezervnih delova. Kako UME predstavlja manji deo sistema i kako je njegova pouzdanost visoka, to povećanje će biti relativno malo.

Troškovi razvoja i izrade tehnologije korektivnog održavanja

Prilikom opravke elektronskog sistema i njegovih sastavnih delova najveći problem je pronalaženje neispravnog sastavnog dela čiji je otkaz uzrok neispravnosti, pa je kod sistema bez UME-a veći deo razvoja i izrade tehnologije korektivnog održavanja posvećen baš postupku defektacije. Ugradnjom UME-a u elektronski sistem i njegove sastavne delove rešava se defektacija elektronskog sistema i njegovih sastavnih delova, tako da to nije potrebno sprovoditi u toku razvoja i izrade tehnologije korektivnog održavanja sistema. Zbog toga će troškovi razvoja i izrade tehnologije korektivnog održavanja ugradnjom UME-a biti bitno umanjeni.

Troškovi za specijalnu opremu za korektivno održavanje

Ako elektronski sistem i njegovi sastavni delovi nemaju ugrađen UME, potrebno je izraditi specijalnu opremu za defektaciju, da bi se mogao pronaći sastavni deo koji je izazvao otkaz. Ugradnjom UME-a nije potrebna ova oprema, jer funkciju defektacije obavlja UME. Zbog toga će ugradnja UME-a znatno uticati na smanjenje ovih troškova.

Troškovi obuke kadra

Defektacija neispravnosti elektronskog sistema i njegovih sastavnih delova predstavlja najsloženiju aktivnost pri

opravci sistema. Zbog toga se, pri obuci kadra za korektivno održavanje sistema bez UME-a, veliki deo vremena utroši na savladavanje postupka defektacije. Ugradnjom UME-a aktivnost defektacije neispravnosti veoma se pojednostavljuje, pa se pri obuci kadra za korektivno održavanje za sam postupak defektacije utroši vrlo malo vremena. To ima za posledicu smanjenje troškova obuke kadra. Povećanjem dubine samotestiranja pojednostavljuje se defektacija i na manjim celinama, pa troškovi obuke kadra i dalje opadaju.

Troškovi dokumentacije i softvera

Zbog pojednostavljenja aktivnosti defektacije ugradnjom UME-a, dokumentacija i dodatni softver za korektivno održavanje su, u tom slučaju, manjeg obima, odnosno troškovi za njih su manji.

Troškovi radne snage

Ugradnjom UME-a u elektronski sistem smanjiće se srednje vreme opravke sistema, zbog čega će se smanjiti troškovi radne snage. Ovi troškovi će dodatno opasti i zbog toga što opravku sistema sa UME-om može da izvodi i kadar manje stručnosti, pa je cena radnog sata niža. Povećanjem dubine samotestiranja ovi troškovi će se zbog istih razloga još smanjiti.

Troškovi transporta sistema

Ako se opravka sistema u slučaju otkaza UME-a obavlja na mestu eksploatacije sistema, ovi troškovi se ne menjaju ugradnjom UME-a, a ako se sistem transportuje na viši nivo održavanja u slučaju otkaza UME-a ovi troškovi će malo porasti ugradnjom UME-a.

Troškovi transporta sastavnih delova

Zbog povećanja broja sastavnih delova ugradnjom UME-a doći će do malog povećanja troškova transporta sastavnih delova.

Uticaj ugradnje UME-a na deo troškova životnog veka sistema (u odnosu na sistem bez ugrađenog UME-a)

Troškovi	UME (dubina lokalizacije do jednog nivoa)	UME (dubina lokalizacije do više nivoa)
Istraživanja, razvoja i proizvodnje pouzdanosti	* (+)	* (+)
Istraživanja, razvoja i proizvodnje pogodnosti korektivnog održavanja	*** (+)	*** (+)
Zaliha rezervnih delova	* (+)	* (+)
Utrošenih delova	* (+)	* (+)
Transporta rezervnih delova	* (+)	* (+)
Razvoja i izrade tehnologije korektivnog održavanja	** (-)	*** (-)
Opreme	** (-)	*** (-)
Obuke kadra	** (-)	*** (-)
Dokumentacije i softvera	** (-)	*** (-)
Radne snage	** (-)	*** (-)
Transporta sistema	● ÷ * (+)	● ÷ * (+)
Transporta sastavnih delova	* (+)	* (+)

● - nema uticaja
* - mali uticaj

** - srednji uticaj
*** - veliki uticaj

(+) - raste
(-) - opada

U tabeli 3 prikazan je relativan uticaj ugradnje UME-a u elektronski sistem na troškove životnog veka sistema.

Postupak izbora optimalne varijante ugradnje UME-a u elektronski sistem

Osnova postupka izbora optimalne varijante ugradnje UME-a jeste generisanje svih relevantnih varijanti ugradnje UME-a, određivanje vrednosti kriterijuma za ocenu ovih varijanti i, na osnovu dobijenih rezultata, određivanje optimalne varijante. Na slici 5 prikazan je algoritam ovog izbora.

Generisanjem varijanti UME-a treba odrediti sve logične načine otkrivanja otkaza i defektacije pomoću UME-a kod sistema i njegovih sastavnih delova. Pri ovom postupku neke varijante će biti eliminisane. Na primer, ako za određeni sastavni deo sistema koji se ugrađuje u

sistem već postoji razrađena tehnologija opravke, oprema, dokumentacija i obučeni kadar za održavanje, eliminisaće se

Sl. 5 – Algoritam izbora optimalne varijante UME-a

varijanta UME-a u kojoj se u taj deo ugrađuje UME. Ako se ne eliminiše, u generisanim varijantama je, obavezno, i varijanta sistema bez ugrađenog UME-a.

Za određivanje optimalnih zaliha rezervnih delova varijanti UME-a i proračun kriterijuma za izbor optimalne varijante UME-a potrebno je obezbediti ulazne podatke. Ovi podaci sistematizuju se u sledeće celine:

- podaci vezani za eksploataciju sistema (koeficijent eksploatacije, životni vek, uslovi rada sistema, broj sistema u eksploataciji);

- podaci vezani za ugradnju UME-a (vremena opravke sistema zamenom njegovih sastavnih delova, vremena opravke delova sistema zamenom njihovih sastavnih delova, troškovi istraživanja i razvoja varijanti UME-a, troškovi proizvodnje varijanti UME-a);

- podaci vezani za pouzdanost sistema (intenziteti otkaza sastavnih delova);

- podaci vezani za tehnologiju opravke sistema (cena razvoja i izrade tehnologije korektivnih programa, trajanje obuke za korektivne programe, dnevni troškovi po slušaocu za korektivne programe, cena specijalne opreme za izvođenje korektivnih programa, cena izrade dokumentacije za opravku sistema, cena distribucije dokumentacije za korektivne programe);

- podaci vezani za sistem održavanja (broj radionica na nivoima održavanja, broj sistema oslonjenih na radionice održavanja, vreme transporta sistema do nivoa održavanja, vreme čekanja sistema na opravku na nivoima održavanja, vreme čekanja sistema na predaju nakon opravke na nivoima održavanja, vreme transporta sistema od nivoa održavanja do mesta upotrebe, vreme redovnog tran-

sporta sastavnog dela sistema do nivoa održavanja, vreme vanrednog transporta sastavnog dela sistema do nivoa održavanja, vreme čekanja sastavnog dela u radionici na redovnu opravku, vreme čekanja sastavnog dela u radionici na vanrednu opravku, vreme čekanja sastavnog dela u radionici na predaju nakon redovne opravke, vreme čekanja sastavnog dela u radionici na predaju nakon vanredne opravke, broj slušalaca za obuku sa nivoa održavanja, cena transporta sistema do nivoa održavanja, cena redovnog transporta sastavnog dela sistema do nivoa održavanja, cena vanrednog transporta sastavnog dela sistema do nivoa održavanja, cena radnog sata na nivoima održavanja);

- podaci vezani za sistem snabdevanja (vreme redovnog transporta rezervnog dela od kompleta na $x + 1$ do kompleta na x -om nivou, vreme vanrednog transporta rezervnog dela od kompleta na $x + 1$ do kompleta na x -om nivou, cena redovnog transporta rezervnog dela od kompleta na $x + 1$ do kompleta na x -om nivou, cena vanrednog transporta rezervnog dela od kompleta na $x + 1$ do kompleta na x -om nivou).

Zalihe rezervnih delova, za jednu varijantu UME-a, mogu se formirati na više načina. Od svih tih varijanti zaliha rezervnih delova, za naredni proračun kriterijuma za izbor optimalne varijante UME-a, značajne su one koje su optimalne sa aspekta snabdevenosti rezervnim delovima. Jedan od mogućih načina dobijanja ovih varijanti jeste metod približnog dinamičkog programiranja [6, 7]. Kao izlaz optimizacije zaliha rezervnih delova javljaju se vrednosti kriterijuma ove optimizacije: srednje vreme zastoja sistema zbog nedostatka rezervnih delova i cena zaliha rezervnih delova, za svaku

optimalnu varijantu zaliha rezervnih delova svake varijante UME-a, koji se koriste kao ulazni podaci proračuna kriterijuma.

Na slici 6 prikazan je postupak proračuna kriterijuma izbora optimalne varijante UME-a. Model za proračun ovih kriterijuma čini skup matematičkih izraza i logike izbora ulaznih podataka, koji na osnovu ulaznih podataka izračunava vrednosti kriterijuma [8, 9]. Ovim proračunom dobijaju se vektori operativne gotovosti sistema – $A_o(v, n)$ i dela troškova životnog veka sistema (korektivnog održavanja i ugradnje UME-a) – $C'_{zv}(v, n)$, gde je: v – redni broj varijante UME-a i n – redni broj optimalne varijante rezervnih delova.

Sl. 6 – Proračun kriterijuma izbora optimalne varijante UME-a

Na osnovu dobijenih vrednosti kriterijuma izbora optimalne varijante UME-a, potrebno je izabrati optimalnu varijantu UME-a. Postupak izbora ove varijante zavisi od cilja optimizacije, koji određuje namena elektronskog sistema. U nastavku će se prikazati postupak ovog izbora za sisteme čija namena je vezana za bezbednost i sigurnost, i kod kojih je na prvom mestu efektivnost, a tek zatim troškovi (npr. vojni sistemi). Kod ovih sistema cilj optimizacije UME-a jeste da se postigne potrebna operativna gotovost uz što manje troškove. Izbor optimalne varijante izvodi se u dve faze.

U prvoj fazi se za svaku varijantu UME-a traži optimalna varijanta zaliha rezervnih delova sa aspekta optimizacije ugradnje UME-a, odnosno ona varijanta zaliha rezervnih delova pri kojoj je:

$$A_o(n) \geq A_{opo} \text{ i } C'_{zv}(n)_{\min} \quad (5)$$

gde je: A_{opo} – potrebna operativna gotovost, $A_o(n)$ – operativna gotovost sistema pri n -toj optimalnoj varijanti zaliha rezervnih delova, $C'_{zv}(n)$ – deo troškova životnog veka sistema pri n -toj optimalnoj varijanti zaliha rezervnih delova. Na slici 7 prikazan je postupak izbora optimalne varijante zaliha rezervnih delova jedne varijante UME-a. Na ovoj slici prikazana je opšta zavisnost troškova – $C'_{zv}(v)$ i operativne gotovosti – $A_o(v)$ elektronskog sistema od varijanti zaliha rezervnih delova za jednu njegovu varijantu UME-a (n – redni broj varijante zaliha rezervnih delova). Na osnovu rezultata istraživanja [8] funkcija troškova može imati oblik X ili Y , zavisno od nivoa uticaja zaliha rezervnih delova na troškove transporta rezervnih delova. U slučaju da funkcija $C'_{zv}(v)$ ima oblik X , optimalna varijanta rezervnih delova n_{opt} određena je iznosom A_{opo} . Ako funkcija $C'_{zv}(v)$ ima oblik Y i ako je rešenje prvog uslova u njenom opadajućem delu, onda je n_{opt} određeno minimumom funkcije $C'_{zv}(n)$.

U drugoj fazi se na osnovu dobijenih vrednosti kriterijuma, pri optimalnoj varijanti zaliha rezervnih delova, svake varijante UME-a: $A_o(v, n_{opt})$ i $C'_{zv}(v, n_{opt})$, određuje optimalna varijanta UME-a. Kako svi elementi vektora $A_o(v, n_{opt})$ zadovoljavaju uslov (5) ovaj problem se, u principu, svodi na pronalaženje minimalnog elementa vektora $C'_{zv}(v, n_{opt})$. Varijanta UME-a sa minimalnim C'_{zv}

Sl. 7 – Određivanje optimalne varijante zaliha rezervnih delova jedne varijante UME-a i vrednosti kriterijuma izbora optimalne varijante UME-a pri toj varijanti

(v, n_{opt}) biće optimalna varijanta. Jedino u slučaju da postoje varijante sa približno istim troškovima $C'_{zv}(v, n_{opt})$, kao i varijanta sa minimalnim troškovima, za optimalnu varijantu, od ovih varijanti može se odrediti varijanta sa maksimalnim $A_o(v, n_{opt})$.

Primer izbora optimalne varijante UME-a

Pomoću računarskog programa, realizovanog na osnovu matematičkog modela korektivnog održavanja [8, 9] i datog postupka određivanja optimalne varijante UME-a, izvršen je izbor ove varijante kod hipotetičkog elektronskog sistema, čija konstrukcija je prikazana na slici 3. Uzeto je da sistem ima dve logične varijante UME-a, koje su prikazane na slici 2.

UME-A – UME vrši samo indikaciju neispravnosti,

UME-B – UME vrši defektaciju do nivoa VMC.

Tehnologija korektivnog održavanja ovog sistema rešena je preko tri korektivna tehnološka programa [8]:

KO-4 – Opravka sistema zamenom VMC bez podešavanja,

KO-6 – Opravka VMC zamenom NMC bez podešavanja,

KO-8 – Opravka NMC zamenom elementa bez podešavanja.

Analiza uticaja ugradnje UME-a na operativnu gotovost pokazala je da ugradnja UME-a ima uticaj samo u slučaju da se sistem opravljna na mestu upotrebe ili blizu tog mesta. Da bi se to uočilo i u ovom primeru, uzete su dve varijante nivoa opravke (NO) elektronskog sistema, koje su prikazane u tabeli 4.

Kod varijante NO-A sistem se opravljna na II nivou održavanja, a kod varijante NO-B opravku izvodi korisnik na mestu korišćenja sistema. Kako korisnik sistema nema opremu i znanje za opravku sistema bez UME-a, to će se pri izboru varijanti

Tabela 4

Varijante nivoa opravke elektronskog sistema

Nivo održavanja	KO-4	KO-6	KO-8
Varijanta NO-A			
I			
II	*		
III		*	
IV			*
Varijanta NO-B			
I	*		
II			
III		*	
IV			*

UME-a razmatrati samo kombinacije varijanti:

- I UME-A – NO-A
- II UME-B – NO-A
- III UME-B – NO-B

Ovaj sistem korišćen je kao primer u [2] i [8], gde su dati svi ulazni podaci. U nastavku su dati samo ulazni podaci koji nisu postojali u ovim redovima i oni koji se razlikuju po iznosu.

1. Eksploatacija sistema:

- koeficijent eksploatacije sistema 0,6
- životni vek sistema 7 god.
- broj sistema u eksploataciji 100
- broj sistema koji se oslanjaju na radionicu II nivoa održavanja 20

2. Ugradnja UME-a:

- troškovi istraživanja i razvoja UME-a (UME-A) 30 000 nj²⁾
- troškovi proizvodnje UME-a (UME-A, po sistemu) 400 nj
- troškovi istraživanja i razvoja UME-a (UME-B) 500 000 nj

2) nj – novčana jedinica.

- troškovi proizvodnje UME-a (UME-B, po sistemu) 5 500 nj

3. Tehnologija opravke:

- razvoj i izrada tehnologije za KO-4 10 000 nj
- razvoj i izrada tehnologije za KO-6 80 000 nj
- razvoj i izrada tehnologije za KO-8 450 000 nj
- cena specijalne opreme za izvođenje KO-6 80 000 nj
- cena specijalne opreme za izvođenje TPO-8 900 000 nj

4. Sistem održavanja:

- vreme čekanja sistema u radionici II nivoa na opravku 0,1 h
- vreme čekanja sistema u radionici II nivoa na predaju nakon opravke 0,1 h
- vreme redovnog transporta neispravne VMC od mesta upotrebe sistema do radionice na III nivou održavanja (NO-B) 31 h
- vreme vanrednog transporta neispravne VMC od mesta upotrebe sistema do radionice na III nivou održavanja (NO-B) 6 h
- vreme redovnog transporta neispravne VMC od radionice II nivoa održavanja do radionice na III nivou održavanja (NO-A) 30,0 h
- vreme vanrednog transporta neispravne VMC od radionice II nivoa održavanja do radionice na III nivou održavanja (NO-A) 5,0 h
- vreme čekanja VMC u radionici III nivoa na redovnu opravku 2,5 h
- vreme čekanja VMC u radionici III nivoa na vanrednu opravku 0,1 h
- vreme čekanja VMC u radionici III nivoa na predaju nakon redovne opravke 1,0 h
- vreme čekanja VMC u radionici III nivoa na predaju nakon vanredne opravke 0,0 h

– vreme redovnog transporta neispravne NMC od radionice na III nivou održavanja do radionice na IV nivou održavanja 70,0 h

– vreme vanrednog transporta neispravne NMC od radionice na III nivou održavanja do radionice na IV nivou održavanja 15,0 h

– vreme čekanja NMC u radionici IV nivoa na redovnu opravku 10,0 h

– vreme čekanja NMC u radionici IV nivoa na vanrednu opravku 0,1 h

– vreme čekanja NMC u radionici IV nivoa na predaju nakon redovne opravke 3,0 h

– vreme čekanja NMC u radionici IV nivoa na predaju nakon vanredne opravke 0,0 h

– cena transporta sistema od mesta upotrebe do radionice II nivoa održavanja (NO-A) 100,0 nj

– cena redovnog transporta neispravne VMC od mesta upotrebe sistema do radionice na III nivou održavanja (NO-B) 5,0 nj

– cena vanrednog transporta neispravne VMC od mesta upotrebe sistema do radionice na III nivou održavanja (NO-B) 50,0 nj

– cena redovnog transporta neispravne VMC od radionice II nivoa održavanja do radionice na III nivou održavanja (NO-A) 4,0 nj

– cena vanrednog transporta neispravne VMC od radionice II nivoa održavanja do radionice na III nivou održavanja (NO-A) 45,0 nj

– cena redovnog transporta neispravne NMC od radionice na III nivou održavanja do radionice na IV nivou održavanja 6,0 nj

– cena vanrednog transporta neispravne NMC od radionice na III nivou

održavanja do radionice na IV nivou održavanja 70,0 nj

5. Sistem snabdevanja rezervnim delovima:

– vreme vanrednog transporta VMC od grupnog kompleta-2 (GK-2) do individualnog kompleta (IK) sistema (NO-B) 0,5 h

– vreme redovnog transporta VMC od GK-3 do GK-2 30 h

– vreme vanrednog transporta VMC od GK-3 do GK-2 5,0 h

– vreme redovnog transporta NMC od GK-4 do GK-3 70,0 h

– vreme vanrednog transporta NMC od GK-4 do GK-3 15 h

– cena redovnog transporta VMC od GK-3 do GK-2 4,0 nj

– cena vanrednog transporta VMC od GK-3 do GK-2 45,0 nj

– cena redovnog transporta NMC od GK-4 do GK-3 6,0 nj

– cena vanrednog transporta NMC od GK-4 do GK-3 70,0 nj

Na slikama 8, 9 i 10 prikazani su rezultati proračuna kriterijuma za izbor optimalne varijante UME-a za kombinacije varijanti UME-a i nivoa opravke – I, II i III, pri koeficijentu eksploatacije sistema 0,6. Na ovim slikama vidi se grafička zavisnost kriterijuma operativne gotovosti – A_0 i dela troškova životnog veka sistema – C'_{zv} od optimalnih varijanti zaliha rezervnih delova (na apscisi je prikazan redni broj ovih varijanti). Isprekidanim linijama prikazan je postupak prve faze izbora optimalne varijante UME-a. Brojevi pored ovih linija određuju redosled ovog postupka. Izbor je urađen za potrebnu operativnu gotovost – $A_{opo} = 0,99$. U tabeli 5 prikazani su rezultati ovog izbora, kao i rezultati za $A_{opo} = 0,97$ i $A_{opo} = 0,995$.

Sl. 8 – Zavisnost kriterijuma izbora optimalne varijante UME-a od optimalnih varijanti zaliha rezervnih delova, za kombinaciju varijanti I

Sl. 9 – Zavisnost kriterijuma izbora optimalne varijante UME-a od optimalnih varijanti zaliha rezervnih delova, za kombinaciju varijanti II

Sl. 10 – Zavisnost kriterijuma izbora optimalne varijante UME-a od optimalnih varijanti zaliha rezervnih delova, za kombinaciju varijanti III

Kao što se vidi na slikama 8 i 9 potrebna operativna gotovost $A_{opo} = 0,995$ ne može se postići kombinacijom varijanti I i II. Analizom dobijenih rezultata u tabeli 5 dobija se da je optimalna kombinacija varijanti III za sve tri vrednosti A_{opo} .

Promenom koeficijenta eksploatacije sa 0,6 na 0,2 dobijeni su drugačiji

rezultati prve faze izbora optimalne varijante UME-a, koji su prikazani u tabeli 6.

Kao i za $K_e = 0,6$, kombinacijom varijanti I i II ne može se postići potrebna operativna gotovost $A_{opo} = 0,995$, pa je za tu operativnu gotovost optimalno rešenje, kao jedino moguće, kombinacija varijanti III. Za $A_{opo} = 0,97$ i $A_{opo} = 0,99$ optimalna je kombinacija varijanti I.

Tabela 5

Rezultati prve faze izbora optimalne varijante UME-a, za koeficijent eksploatacije $K_e = 0,6$

Komb. varijanti	$A_{opo} = 0,97$		$A_{opo} = 0,99$		$A_{opo} = 0,995$	
	A_o	$C'_{zv} (nj)$	A_o	$C'_{zv} (nj)$	A_o	$C'_{zv} (nj)$
I	0,989	$4,32 \cdot 10^7$	0,990	$4,34 \cdot 10^7$	–	–
II	0,991	$4,53 \cdot 10^7$	0,991	$4,53 \cdot 10^7$	–	–
III	0,998	$3,71 \cdot 10^7$	0,998	$3,71 \cdot 10^7$	0,998	$3,71 \cdot 10^7$

Rezultati prve faze izbora optimalne varijante UME-a, za koeficijent eksploatacije $K_e = 0,2$

Komb. varijanti	$A_{opo} = 0,97$		$A_{opo} = 0,99$		$A_{opo} = 0,995$	
	A_o	$C'_{zv} (nj)$	A_o	$C'_{zv} (nj)$	A_o	$C'_{zv} (nj)$
I	0,983	$1,64 \cdot 10^7$	0,990	$1,71 \cdot 10^7$	–	–
II	0,985	$2,08 \cdot 10^7$	0,990	$2,12 \cdot 10^7$	–	–
III	0,992	$1,81 \cdot 10^7$	0,992	$1,81 \cdot 10^7$	0,995	$1,83 \cdot 10^7$

Zaključak

Optimalno doneta odluka o ugradnji UME-a u elektronski sistem je veoma važna aktivnost, od koje u znatnoj meri zavisi ekonomska efektivnost sistema u toku njegovog celokupnog životnog veka. Kod savremenih elektronskih sistema tehnička rešenja, tehnologija izrade, pouzdanost i cena komponenti veoma se brzo menjaju, zbog čega se kod razvijanog sistema ne može primeniti rešenje UME-a od ranije razvijenog sličnog sistema, tj. pri razvoju svakog elektronskog sistema neophodno je sprovesti ovu aktivnost.

Ova odluka zavisi od mnoštva parametara koji su vezani za razvijani sistem, uslove eksploatacije sistema, održavanje sistema i njegovo snabdevanje rezervnim delovima, pa je za njeno donošenje neophodna metodologija i programska podrška. Prikazana metodologija izbora optimalne varijante UME-a predstavlja dobru osnovu za izradu programskog paketa, koji bi se koristio u toku razvoja sistema radi njegove optimalne konstrukcije. Pored ove odluke postoji još niz odluka koje treba doneti u ovoj fazi, a vezane su za integralno tehničko obez-

beđenje (pouzdanost, modularnost, nivo opravke, itd.). Kako su sve ove odluke međusobno zavisne neophodno je da se optimizacija svih ovih odluka izvodi istovremeno i integralno. U primeru ovog rada to je delimično i primenjeno, jer se u njemu istovremeno donose odluke o UME-u, nivou opravke i zalihama rezervnih delova.

Literatura:

- [1] Korolija, D.: Određivanje optimalne pouzdanosti elektronskog uređaja sa stanovišta korektivnog održavanja, Vojnotehnički glasnik 2/99, str. 18–31, 1998.
- [2] Korolija, D.: Optimizacija korektivnog održavanja elektronskog uređaja nabavljenog na tržištu, Vojnotehnički glasnik 3/98, str. 281–294, 1998.
- [3] Korolija, D.: Donošenje odluke opravi-odbaci kod modularno građenih elektronskih uređaja, Vojnotehnički glasnik 5/98, str. 513–526, 1998.
- [4] Barković, M.: Tehnologija održavanja telekomunikacijskih uređaja – lekcije, VVŠ KoV JNA, Zagreb, 1988.
- [5] Blanchard B., Lowery, E.: Maintainability – Principles and Practices, Mc Graw-Hill, New York, 1969.
- [6] Model snabdevanja modularno građenih elektronskih uređaja rezervnim delovima, Magistarski rad, Zagreb, ETF, 1988.
- [7] Korolija, D.: Optimizacija rezervnih delova za održavanje modularno građenih elektronskih sredstava, Vojnotehnički glasnik 5/96, str. 517–524, 1996.
- [8] Korolija, D.: Model korektivnog održavanja elektronskih uređaja u sistemu održavanja sa više nivoa, Vojnotehnički glasnik 6/97, str. 649–661, 1997.
- [9] Korolija, D.: Optimizacija korektivnog održavanja pri projektovanju i razvoju savremenog elektronskog uređaja, Naučno-tehnički pregled 5/98, str. 94–101, 1998.