Dr Miladin Nikolić,
pukovnik, dipl. inž.
Mr Zoran Branković,
major, dipl. inž.

Model za utvrđivanje potrebne strukture radne snage i asortimana rezervnih delova za remont složenih tehničkih sredstava

Uvod

Sva složena tehnička sredstva projektuju se tako da se mogu koristiti u određenim uslovima eksploatacije. Da bi jedno složeno tehničko sredstvo ispravno funkcionisalo u što dužem vremenskom periodu, neophodno je da se na odgovarajući način održava. Zbog relativno česte pojave otkaza može biti onemogućen ispravan rad, ali se neispravnosti prikladnim postupcima održavanja mogu otkloniti. Zato održavanje predstavlja neophodnu i veoma značajnu fazu u životnom ciklusu tehničkog sredstva i mora se potpuno sagledati još u procesu njegovog projektiranja.

Eksploatacija tehničkih sredstava zahteva određena novčana ulaganja u obezbeđenju kadrovskih i materijalnih resursa za opsluživanje i održavanje, rezervne delove, skladišta, tehničku i drugu dokumentaciju, itd. Pri tome, neka složena tehnička sredstva zahtevaju velike troškove pogonske energije, neka nameću posebne troškove u obuci rukovaoca i osoblja za održavanje, a kod nekih veliki troškovi potiču od skladištenja i držanja velikih količina rezervnih delova na skladištima. Određena istraživanja pokazuju da se efikasnijim sistemom održavanja i snabdevanja rezervnim delovima mogu ostvariti značajni ekonomski efekti i uštede. Iz ovih razloga u radu je prikazan postupak za

utvrđivanje potrebne strukture radne snage i asortimana rezervnih delova za remont jednog složenog tehničkog sredstva kao korektivni postupak u procesu održavanja.

Remont složenih tehničkih sredstava kao sistem masovnog opsluživanja

Proces remonta složenih tehničkih sredstava, odnosno proces rada pojedinih tehnoloških celina u okviru radionice za remont, odlikuje se posebnim karakteristikama za svaku grupu, pa i vrstu složenih tehničkih sredstava, što se definiše odgovarajućom organizacijom i tehnologijom rada. Međutim, kao zajednička osnova za navedene procese rada javlja se postojanje: zahteva za remontom (ulaznog toka zahteva), određenih tehničko-tehnoloških celina za remont (kanala za opsluživanje), organizaciono-tehnoloških postupaka pri remontu (discipline opsluživanja) i opsluženih i neopsluženih zahteva za remontom (izlaznog toka zahteva).

Sve to nameće očigledan zaključak da proces remonta složenih tehničkih sredstava spada u kategoriju procesa masovnog opsluživanja. Za detaljnije sagledavanje procesa remonta složenih tehničkih sredstava, kao sistema masovnog opsluživanja, potrebno je sagledati

osnovne karakteristike tog sistema. U stvari, sistem remonta složenih tehničkih sredstava predstavlja otvoreni sistem u koji zahtevi za remontom pristižu grupno ili pojedinačno, sa jednim ili više kanala za opsluživanje i uzajamnom pomoći među kanalima, sa definisanim prioritetom opsluživanja, sa ili bez vremenskog ograničenja i ograničenja broja sredstava u redu čekanja. On se ponaša kao monofazni ili višefazni, što zavisi od karakteristika pojedinih zahteva i mogućnosti njihovog zadovoljenja. Zadovoljenje remontnog zahteva predstavlja zadnju u nizu aktivnosti, koje se moraju provesti, da bi se tehničko sredstvo remontovalo, odnosno osposobilo za ponovnu upotrebu.

Isto tako, obezbeđenost rezervnim delovima često odlučujuće utiče na ceo proces remonta, jer ukoliko se njime ne raspolaže u procesu remonta, dolazi do čekanja, koje ponekad može biti veoma dugo, što negativno utiče na raspoloživost složenog tehničkog sredstva. Međutim, potrošnja rezervnih delova je slučajna i predstavlja rezultat pojave otkaza, do kojeg dolazi u slučajnim trenucima vremena. To znači da bi zadovoljenje uslova da »uvek« bude »dovoljno« rezervnih delova moglo da se ostvari samo ako skladište raspolaže sa »veoma mnogo« rezervnih delova. Na taj način bi svaka nastala potreba bila zadovoljena. Međutim, ovakav pristup u dimenzioniranju skladišta rezervnih delova očigledno izaziva velike troškove i to, kako sa stanovišta osnovnih ulaganja u gradnju i popunu skladišta, tako i sa stanovišta tekućih troškova. Na osnovu navedenog može se zaključiti da formiranje zaliha rezervnih delova uslovljavaju razlozi operativne prirode, koji na različite načine utiču na njihovo stalno povećanje i ekonomski razlozi, koji zahtevaju postojanje minimalnih zaliha rezervnih delova. Problem se svodi na to kako naći optimalni odnos između ta dva oprečna zahteva i kako organizovati sistem snabdevanja rezervnim delovima koji će zadovoljiti potrebe remonta.

Izbor metode za rešavanje problema

Proces remonta složenih tehničkih sredstava može se opisati na pogodan način pomoću specijalnog matematičkog aparata za prikaz slučajnih procesa na bazi diskretnih procesa Markova. Međutim, da bi se ova metoda mogla primeniti, neophodno je da ulazni tok zahteva poseduje osobine prostog toka, tj. da bude stacioniran, ordinaran i bez posledica.

Bez posebnog obrazloženja, uvažavajući samo navedene karakteristike procesa remonta složenih tehničkih sredstava, kao sistema masovnog opsluživanja, usvaja se da ulazni tok zahteva za remontom tehničkih sredstava ne poseduje svojstva prostog toka.

S obzirom na to da se na isti problem nailazi i kod mnogih drugih realnih procesa, teorija je našla efikasno rešenje u modeliranju takvih procesa. Tome je bitno doprineo i razvoj softvera i hardvera u savremenoj informatičkoj tehnologiji. Primenom statističkog modeliranja pomoću metode Monte-Karlo i logike rada sistema masovnog opsluživanja, razvijena je teorija simulacije realnih procesa i izgrađeni su odgovarajući simulacioni jezici za provođenje određenih procesa i dobijanje željenih karakteristika rada posmatranog sistema. Imajući to u vidu, za modeliranje procesa remonta složenih tehničkih sredstava i određivanje potrebnog asortimana i količina rezervnih delova odabrana je metoda simulacije.

Optimizacija u sistemu masovnog opsluživanja

Pri planiranju remonta složenih tehničkih sredstava potrebno je tako isplanirati remont da on bude najefikasniji. Smatra se da je plan opsluživanja optimalan ako mu odgovara ekstrem kriterija efikasnosti. Tako, na primer, ako se za kriterij efikasnosti odabere

srednje vreme opsluživanja, onda se optimalni plan ostvaruje kada se minimizira ovo vreme. Međutim, ako se kao kriterij efikasnosti odabere broj opsluženih tehničkih sredstava, postavlja se zadatak određivanja maksimuma toga kriterija. Osnovne teškoće pri rešavanju zadatka optimizacije javljaju se pri izboru funkcije cilja. Ona može biti i verovatnoća opsluživanja tehničkih sredstava, a ograničenja se mogu odnositi na broj kanala opsluživanja, ili na vreme opsluživanja. Funkcionisanje sistema opsluživanja u optimalnom režimu može se izraziti preko osnovnih pokazatelja efikasnosti:

- n_k — broj kanala opsluživanja;
- $\bar{t}_{ops}$ — srednje vreme opsluživanja;
- λ — srednji broj tehničkih sredstava koji pristupaju u sistem masovnog opsluživanja u jedinici vremena.

Ako se kao kriterij efikasnosti izabere verovatnoća opsluživanja, onda je:

$$P_{ops} = f(n_k, \bar{t}_{ops}, \lambda)$$

Uzimajući u obzir uticaj svake od ovih veličina na verovatnoću opsluživanja, pojedinačno i uzajamno, potrebno je odrediti optimalni broj kanala opsluživanja, optimalno srednje vreme opsluživanja i broj tehničkih sredstava koji može biti opslužen u optimalnom režimu.

Zadatak optimizacije može se rešiti variranjem vrednosti polaznih podataka. Ako funkcija cilja zavisi od jedne promenljive, dovoljno je naći takvu vrednost promenljive za koju funkcija cilja dostiže maksimalnu ili minimalnu vrednost. Ukoliko se za kriterijsku funkciju izabere verovatnoća opsluživanja (P_{ops}), koja je u sistemima masovnog opsluživanja funkcija tri promenljive, i pri tome izabere njena maksimalna vrednost ($P_{ops} = 1$), još se ne može reći da je to njena optimalna vrednost, s obzirom na veze između ove veličine i osnovnih parametara.

Analiza funkcionisanja sistema masovnog opsluživanja u optimalnom režimu najčešće se provodi izjednačavanjem dva suprotna pokazatelja i to verovatnoće opsluživanja (P_{ops}) i koeficijenta zauzetosti kanala opsluživanja (K_z), koji predstavlja odnos srednjeg broja zauzetih kanala (n_{zk}) i ukupnog broja kanala opsluživanja (n_k). Pri tome se pretpostavlja da su druga dva parametra: srednje vreme opsluživanja i broj kanala opsluživanja konstantni. Pod tim uslovima treba odrediti optimalni broj kanala opsluživanja ($n_{k_{opt}}$).

U ovom slučaju, broj kanala opsluživanja je optimalan ukoliko verovatnoća opsluživanja i koeficijent zauzetosti kanala opsluživanja poprime iste vrednosti, tj.:

$$n_{k_{opt}} = n_k \text{ ako je } P_{ops} = K_z \text{ uz } \lambda \text{ i } \bar{t}_{ops} = \text{konst}$$

$$\text{odnosno } n_{k_{opt}} = \rho = \frac{\lambda}{\mu} = \lambda \bar{t}_{ops}, \text{ gde je } \mu$$

srednji broj opsluženih tehničkih sredstava u jedinici vremena.

Kriteriji za određivanje obima i vrste neispravnosti tehničkog sredstva, kao i potrebnog vremena za remont, određuju se na osnovu statističkih podataka iz prakse ili na osnovu projektovane pouzdanosti.

Eksperimentalni okvir za izradu simulacionog modela

Eksperimentalni okvir za izgradnju ovog modela podrazumeva definiranje osnovnih tokova neispravnih složenih tehničkih sredstava, informacija i određenih aktivnosti koje se provode pri njihovom remontu. U modelu se prati jedna grupa složenih tehničkih sredstava. Pri eksploataciji dolazi do njihovog »ispadanja« iz upotrebe po određenoj raspodeli, zbog otkaza — oštećenja, koji su posledica različitih uzroka (visokog intenziteta eksploatacije, nestručnog rukovanja, dotrajalosti, i dr.). Bez obzira

na uzrok, sva složena tehnička sredstva koja su ispala iz upotrebe dolaze u radionicu za remont gde se vrši njihov remont. U slučaju da resursi nisu raspoloživi (zauzetost, dnevni odmor ili vikend), složena tehnička sredstva odustaju od čekanja, a ukoliko oštećenje prelazi nadležnost radionice za remont, na osnovu date verovatnoće, ona se upućuju u radionicu za viši stepen remonta. Za remont složenih tehničkih sredstava angažuju se mehaničari više specijalnosti.

Remont složenih tehničkih sredstava vrši se sa ili bez zamene rezervnih delova na osnovu zadate funkcije raspodele za konkretno sredstvo.

Detaljnije praćenje drugih aktivnosti pri održavanju složenih tehničkih sredstava može se postići promenom eksperimentalnog okvira, odnosno pravljenjem drugog »sažetog« modela ili detaljiziranjem delova ovog modela.

Simulacioni model

Za proces izgradnje modela ne postoji procedura kako da se na osnovu postojeće teorije izgradi model. Do punog izražaja dolazi veština istraživača i njegovo iskustvo na sličnim problemima. Stoga je opisan model remonta složenih tehničkih sredstava na dosta jednostavan, neformalan način, koji je, u stvari, opis njegovih komponenti, opisnih varijabli i interakcija među komponentama. Time je, u stvari, izgrađen »sažeti« model, jer bi izgradnja i korišćenje »baznog« modela bilo teško izvodivo. Ovakvo shvatanje i opis modela ima veoma važnu ulogu u samom razvoju i tumačenju modela. Pretpostavke pri izradi simulacionog modela su sledeće: radionica za remont je popunjena ljudstvom odgovarajuće kvalifikacione strukture i obučenosti za rad, te raspolaze adekvatnim garniturama alata, radioničkom opremom i rezervnim delovima.

Razrađeni simulacioni model sastoji se od četiri komponente: upravnog organa, korisnika tehničkih sredstava, tehnoloških elemenata za održavanje i okruženja. Komponente modela opisane su sa 40 varijabli. Dato je 15 parametara (konstante u modelu) i 8 pravila interakcija između komponenti.

Algoritam simulacije prikazan je na slici, a realizacija modela može biti ostvarena na nekom od programskih jezika opšte namene (FORTRAN, PL/I, PASCAL, ALGOL i drugi) ili u nekom od specijalnih simulacionih jezika (GPSS, SIMSCRIPT i drugi), što zavisi od prirode modela, mogućnosti istraživača, od računara i softvera kojim se raspolaže. Za simulaciju modela rada radionice za remont tehničkih sredstava korišten je simulacioni jezik GPSS, orijentiran na simulaciju diskretnih događaja u kontinuiranom vremenu, što odgovara upravo procesu remonta složenih tehničkih sredstava kao sistema masovnog opsluživanja. Program je realiziran na računaru CYBER.

Vrednovanje simulacionog modela

Vrednovanje simulacionog modela predstavlja značajan korak u razvoju modela, kojem treba posvetiti odgovarajuću pažnju u procesu modeliranja i simulacije. Vrednovati model znači razvijati prihvatljivi nivo samopouzdanja da su zaključci koji se donose na temelju ponašanja modela ispravni i primenljivi na realni sistem. Konceptija vrednovanja simulacionog modela bazira na podeli procesa vrednovanja u dve faze: ispitivanje valjanosti modela (validation), te provere modela (verification). Pri tome treba istaći da je proces vrednovanja modela trajao tokom celog procesa modeliranja, te tako omogućio stalnu kontrolu valjanosti modela i programa, te sticanja pouzdanja u simulacioni model.

Slika: Algoritam simulacije

Proces vrednovanja stvorenog modela sadrži sledeće testove:

a) za ispitivanje valjanosti modela:

— osetljivost na promenu ulaznih varijabli (intenzitet ulaznog toka);

— osetljivost na promenu parametara modela (broj kanala opsluživanja, vreme opsluživanja);

b) za proveru modela:

— testiranje ispravnosti i tačnosti simulacijskog programa;

— korektnosti programskog generiranja raspodela slučajnih varijabli (ulazni tok i vreme opsluživanja).

Proveru rada modela olakšava činjenica da je pri koncipiranju i realizaciji simulacionog modela:

— izabran adekvatan simulacioni jezik (GPSS) koji ima dobro istestirani osnovni simulacioni algoritam, te ugrađene »alate« za otkrivanje grešaka u programu;

— program je napravljen modularno, koliko to dopušta GPSS, tj. funkcionalne celine u algoritmu su jasno razdvojene sa tačno određenim tačkama interakcije.

Statička svojstva modela, tj. logika njegovog rada, ispitivana su stalno tokom rada na modelu, kako za pojedine funkcionalne celine zasebno, tako i za celi model.

Rezultati vrednovanja pokazali su razumne iznose i predznake osetljivosti zavisnih varijabli sistema, te ispravan interni rad simulacionog modela, pa može poslužiti kao korisno sredstvo u daljim istraživanjima.

Rad sa simulacionim modelom na odabranom primeru

Interpretacija opisanog modela u GPSS-u zahteva tačno i konkretno definiranje inicijalnih stanja i nekih opisnih varijabli za svaku komponentu mo-

dela posebno. Time se kreira izvodljiv računarski model. Inicijalni scenario za komponente modela dat je prema primeru remonta složenog tehničkog sredstva iz prakse.

Pri remontu promatranog složenog tehničkog sredstva angažuju se mehanicari pet specijalnosti na osnovu datih verovatnoća. Remont se vrši sa ili bez zamene rezervnih delova. Za svaku specijalnost data je verovatnoća remonta bez zamene rezervnih delova, kao i verovatnoće zamene deset rezervnih delova koji se najčešće menjaju, što znači da se prati 50 rezervnih delova.

Potrebni podaci za rad modela su: intenzitet ulaznog toka neispravnih sredstava (λ), verovatnoća učešća svake specijalnosti pri remontu, verovatnoća zamene određenog rezervnog dela ili remonta bez zamene rezervnog dela, vreme remonta i broj kanala opsluživanja za svaku specijalnost.

Broj specijalnosti koje se angažuju pri remontu, kao i broj rezervnih delova koji se prati, može se menjati u zavisnosti od vrste složenog tehničkog sredstva.

Izlazni podaci koje model daje su: verovatnoća opsluživanja, koeficijent zauzetosti kanala opsluživanja, broj remontovanih sredstava, broj specijalnosti koje su učestvovala pri remontu, broj zamenjenih rezervnih delova po specijalnostima, odnosno broj remontovanih sredstava bez zamene rezervnih delova. Svi ovi podaci mogu se dobiti za različite vremenske periode. Eksperiment se provodi u dve faze, prema sledećem:

— određivanje potrebne strukture radne snage za dati intenzitet ulaznog toka (λ);

— određivanje potrebnog asortimana rezervnih delova za pojedine vremenske periode.

Analiza rezultata simulacije provodi se prema planu eksperimenta:

a) Određivanje potrebne strukture radne snage

Provođenjem eksperimenta na modelu, za različiti broj kanala opsluživanja za sve specijalnosti i intenzitet ulaznog toka ($\lambda=1$ otkaz/sat), dobijene su vrednosti za P_{ops} i K_z , na osnovu kojih je određen apsolutan iznos njihove razlike koji je prikazan u tabeli 1.

Na osnovu ovih vrednosti određen je optimalan broj kanala opsluživanja za svaku specijalnost traženjem minimalne razlike između K_z i P_{ops} , odnosno ($\min |K_z - P_{ops}|$), jer se zbog celobrojnosti kanala opsluživanja ne može izvršiti izjednačavanje parametara P_{ops} i K_z .

Optimalni broj kanala opsluživanja za sve specijalnosti označen je sa * u tabeli 1.

tet ulaznog toka $\lambda=1$ otkaz/sat. Podaci o broju potrebnih rezervnih delova za 30 i 365 dana prikazani su u tabelama 2 i 3.

Analizom ovih podataka moguće je odrediti optimalni asortiman rezervnih delova, s obzirom na ekonomske mogućnosti, pri čemu treba primeniti neku od metoda višekriterijske optimizacije. Dobijeni podaci, takođe, mogu poslužiti za određivanje dinamike proizvodnje i isporuke određenih količina rezervnih delova, odnosno za utvrđivanje trenutka i obima narudžbe.

Zaključak

U radu je simuliran remont složenih tehničkih sredstava radi određivanja potrebne strukture radne snage i

Tabela 1

Rezultati izbora potrebne strukture radne snage

Intenzitet λ (otkaz/h)	Broj kanala opsluživ.	Razlika $ K_z - P_{ops} $ za specijalnost				
		1	2	3	4	5
1	1	0.32	0.15 *	0.35	0.52	0.23 *
	2	0.14 *	0.57	0.24 *	0.25	0.30
	3	0.43	0.71	0.46	0.01 *	0.54
	4	0.56	0.78	0.61	0.24	0.64
	5	0.65	0.82	0.70	0.40	0.72

b) Određivanje potrebnog asortimana rezervnih delova za pojedine vremenske periode

Provođenjem eksperimenta na modelu za različite vremenske periode (dan, nedelja, mesec, kvartal, polugodište, godina, životni vek, i dr.) može se dobiti optimalan asortiman rezervnih delova, s obzirom na operativne zahteve, potrebne za remont posmatranog složenog tehničkog sredstva za intenzi-

asortimana rezervnih delova. Za rešavanje problema izabrana je metoda simulacije, a remont složenih tehničkih sredstava prikazan je kao model diskretnih događaja. Definiran je eksperimentalni okvir i dat »sažeti« model. Razrađeni model je adaptivan, što se ogleda kroz mogućnost da se veoma lako i brzo menja, proširuje i dograđuje na veći broj: tehničkih sredstava, broj specijalnosti i vrste rezervnih delova, što mu povećava mogućnost primene.

Potrebne količine rezervnih delova za 30 dana

Rezervni deo	S P E C I J A L N O S T				
	1	2	3	4	5
Deo 1	65	18	12	20	3
Deo 2	59	26	15	18	6
Deo 3	51	15	13	18	6
Deo 4	46	26	12	9	5
Deo 5	37	21	13	11	7
Deo 6	49	17	14	16	11
Deo 7	47	17	22	11	11
Deo 8	48	22	16	16	15
Deo 9	64	20	16	15	6
Deo 10	27	9	6	9	5
Bez zamene r/d	25	9	6	6	10

Tabela 3

Potrebne količine rezervnih delova za 365 dana

Rezervni deo	S P E C I J A L N O S T				
	1	2	3	4	5
Deo 1	559	221	196	184	106
Deo 2	604	229	172	182	102
Deo 3	583	238	174	169	118
Deo 4	571	214	153	163	107
Deo 5	582	227	187	165	123
Deo 6	571	235	178	192	98
Deo 7	565	239	209	148	117
Deo 8	601	242	192	175	122
Deo 9	615	237	192	182	95
Deo 10	264	113	90	108	68
Bez zamene r/d	315	117	79	95	65

Rezultati, koje daje model, numerički su izraz ponašanja realnog sistema koji se simulira.

Za simulaciju ovakvih sistema simulacioni jezik GPSS se pokazuje pogodnim, jer olakšava translaciju modela, a, pored standardnih, pruža mogućnost i nestandardnih izlaza. Provedeni postupak vrednovanja simulacionog modela uključio je osnovne metode vrednovanja koje preporučuje savremena literatura.

Moguća područja primene stvarnog modela su:

— utvrđivanje potrebne strukture radne snage za različite intenzitete otoka sredstava;

— utvrđivanje cene remonta za određeni vremenski period (radna snaga i rezervni delovi);

— utvrđivanje dinamike proizvodnje i isporuke rezervnih delova s obzirom na ekonomske mogućnosti;

— određivanje potrebnog skladišnog prostora, i drugo.

Literatura:

- [1] Vukadinović S.: »Elementi teorije masovnog opsluživanja«, dopunjeno izdanje, Saobraćajni fakultet, Beograd, 1983.
- [2] Zelgler B. P.: »Theory of modeling and simulation«, Wiley, New York, 1978.
- [3] Vukadinović S.: »Elementi teorije verovatnoće i matematičke statistike«, III izdanje, Privredni pregled, Beograd, 1983.
- [4] Todorović J.: »Osnovi teorije održavanja — održavanje motornih vozila«, Mašinski fakultet, Beograd, 1984.

- [5] Žiljak V.: »Simulacija računalom«, Školska knjiga, Zagreb, 1982.
- [6] Sargent R. G.: »Validation of simulation models«, Proc. Winter Simulation Conf., San Diego, str. 479—503, 1979.
- [7] USER's MANUAL, GPSS V. IBM, New York, 1974.