Mr Zoran Popović,
potpukovnik, dipl. inž.
Vojnotehnička akademija VJ,
Beograd

Dr Slobodan Milidrag,
profesor, dipl. inž.
Fakultet tehničkih nauka,
Novi Sad

Dr Dragan Lazarević,
pukovnik, dipl. inž.
Uprava za snabdevanje SMO,
Beograd

IZBOR OPTIMALNE PERIODIČNOSTI PREVENTIVNE AKTIVNOSTI ODRŽAVANJA MOTORNIH VOZILA TOKOM SKLADIŠTENJA

UDC: 681.322.06:629.119.001.573

Rezime:

Motorna vozila se tokom radnog veka često moraju skladištiti. U periodu skladištenja izložena su nizu štetnih uticaja koji dovode do otkaza. Održavanje ovih sredstava time se nameće kao neophodno, iako ona ne obavljaju radne zadatke. Ovaj rad prikazuje jedan od matematičkih modela namenjenih optimizaciji sistema održavanja uskladištenog vozila, kao i način primene elektronskog računara u rešavanju tog problema.

Ključne reči: motorno vozilo, održavanje, skladištenje.

CHOICE OF OPTIMAL PERIODICITY IN PREVENTIVE MAINTENANCE OF VEHICLES DURING STORAGE

Summary:

Vehicles have to be often stored during their service life. While stored, they are exposed to a lot of harmful influences leading to their failure. Although they are not used for performing actual work tasks, their maintenance is necessary. In this paper one of mathematical models for the stored vehicles maintenance system optimization is presented as well as a method of computer application in solving the problem.

Key words: vehicle, maintenance, storage

Uvod

Skladištenje tehničkih sredstava jedna je od faza njihovog životnog ciklusa, a javlja se u složenim sistemima pred koje se postavlja zahtev da što efikasnije funkcionišu u slučaju ukazane potrebe. Do tog trenutka, najčešće, nema potrebe za radom pojedinih tehničkih sredstava, pa je njihovo skladištenje i čekanje poziva na upotrebu neminovnost. Skladištenje tehničkih sredstava javlja se u mnogim područjima kao što su: vojni sistemi, poljoprivredna mehanizacija, građevinarstvo i veliki proizvodni sistemi.

Ipak, od ovih uskladištenih delova sistema očekuje se, najčešće, vrlo visok nivo tehničke ispravnosti, tj. što veći procenat delova (podсистема) koji će stupiti u rad pri pozivu na upotrebu. Od broja podсистема koji su stupili u rad, tj. odazvali se pozivu na upotrebu, umnogome zavisi da li će opisani sistem izvršiti planirani zadatak ili ne.

Tehničko sredstvo je u toku dugotrajnog skladištenja izloženo, suprotno nekim očekivanjima, nizu štetnih uticaja. Motorna vozila, poljoprivredne mašine i građevinska mehanizacija, kao izrazito kompleksna tehnička sredstva, podložni su dejstvu najrazličitijih uti-

caja, koji im umanjuju tehničke karakteristike i izazivaju njihovu neraspoloživost, a najdestruktivnije pojave su:

- narušavanje zaptivanja sklopova, uslovljeno starenjem materijala od kojeg su izrađeni zaptivači;

- žapeknuća koja sprečavaju relativnu pomerljivost pojedinih delova, a izazvana su korozijom metala i pojavom smole u pogonskim materijama usled njihovog raspadanja;

- otkazi elektroinstalacije izazvani korozijom na pojedinim kontaktima i starenjem izolacije;

- koroziona oštećenja zupčanika, ležajeva, osovina i vratila za prenos snage;

- zamor materijala elemenata koji su, i pored odsustva radnih opterećenja, izloženi naprezanju (opruge uređaja za razvođenje radne materije, opruge u pumpi visokog pritiska, opruge spojnice, gibnjevi i slično).

Ove pojave vremenom izazivaju pad tehničkih karakteristika. Pad karakteristika ispod određene granične vrednosti prevodi tehničko sredstvo u stanje U OTKAZU, što znači da nije raspoloživo za upotrebu.

Radi izbegavanja pomenutih pojava razvijeni su posebni sistemi održavanja uskladištenih sredstava. Njihov osnovni zadatak jeste da u što većoj meri eliminišu uticaje još pre perioda skladištenja, kao i da sprovedu određene radnje tokom perioda skladištenja, radi ublažavanja posledica tih štetnih uticaja, čime bi se ostvarila što veća raspoloživost pomenutih sredstava.

Sistemi održavanja motornih vozila

Sistem održavanja određenog tehničkog sistema može da se realizuje na više načina, u konceptijskom, tehnološkom i organizacionom pogledu. Razlike naročito dolaze do izražaja u

konceptiji sistema održavanja. Sa tog aspekta dve su osnovne mogućnosti: korektivno i preventivno održavanje. Kada je reč o održavanju motornih vozila, preventivno održavanje nameće se kao imperativ zbog sledećih činjenica:

- povećava se bezbednost vozača, rukovaoca, putnika i transportovanog tereta;

- izbegavaju se teži sekundarni otkazi;

- izbegavaju se skupe i otežane intervencije na terenu (na mestu nastanka otkaza);

- moguće je planirati angažovanje remontnih kapaciteta, nabavku rezervnih delova i slično.

Efekti ove konceptijske varijante umanjuju se činjenicom da se sistem ne koristi do potpunog otkaza, pa se jedan deo resursa ne iskorišćava (slika 1). Od izabrane periodičnosti, uglavnom, zavisi kolika će se korist dobiti preduhitranjem korektivne aktivnosti, i koliki će biti gubici nastali nekorisćenjem »rezerve upotrebljivosti«. Kriterijum za određivanje periodičnosti su, u ovom slučaju, ukupni troškovi održavanja, koji predstavljaju zbir troškova preventivnih aktivnosti i onih

Sl. 1 — Rezerva upotrebljivosti

korektivnih aktivnosti koje nisu preduhitrene (slika 2). Optimalan period za izvođenje preventivne aktivnosti očit će biti onaj čiji će ukupni troškovi

biti minimalni. Oblik krivih, prikazanih na slici 2, uslovljen je funkcijom pouzdanosti dela-sklopa čiji se period održavanja određuje.

Sl. 2 — Troškovi održavanja

Očito je da se navedeni model optimizacije zasniva na otkazu samo jednog dela. Drugim rečima, primenom ovog modela dobija se optimalan period preventivne aktivnosti koji se od-

nosi isključivo na taj deo. Međutim, bilo bi iluzorno, imajući u vidu složenost vozila kao sistema, očekivati da samo jedan deo može otkazati. Poznajući funkciju raspodele $f(x)$ za pojedine delove i primenjujući prikazani metod za svaki deo može se odrediti optimalna periodičnost preventivne intervencije sa stanovišta troškova (slika 3 pod a). Ako bi se aktivnosti održavanja izvodile strogo po »lokalnim« periodičnostima nastali bi prilično veliki troškovi zbog čestog boravka vozila u radionici, kao i zbog ponavljanja pojedinih operacija, zajedničkih za više »lokalnih« intervencija. Na taj način smanjila bi se gotovost, a sistem održavanja bi se višestruko zakomplikovao. Da bi se to izbeglo, pristupa se grupisanju pojedinih operacija (slika 3 pod b).

Sl. 3 — Objedinjavanje pojedinih operacija u tehničke preglede
 $t_1, t_2, \dots, t_i$ — periodičnost izvođenja pojedinih operacija
 $t_{123}, \dots, t_i$ — periodičnost izvođenja objedinjenih i -operacija
 t_{NTP}, t_{VTP} — periodičnost nižeg i višeg pregleda

Pri tome se polazi od sledećih postavki:

$$C_{123\dots n} < C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_i + \dots + C_n \text{ i} \\ t_{123\dots n} < t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_i + \dots + t_n$$

gde su C_i i t_i cena i vreme izvođenja i -te operacije, a $C_{123\dots n}$ i $t_{123\dots n}$ cena i vreme oportunističke (objedinjene) aktivnosti za svih n elemenata. Na taj način dolazi se do sadržaja niza pregleda koji definišu politiku održavanja. Neki od njih obuhvataju aktivnosti čija je periodičnost manja (»niži« tehnički pregledi — NTP), a neki obuhvataju, osim pomenutih, i aktivnosti čija je periodičnost veća (»viši« tehnički pregledi — VTP). Može se uočiti da su »niži« tehnički pregledi sadržani u »višim«.

Sistemi održavanja uskladištenih motornih vozila

Kada se radi o uskladištenim motornim vozilima koja se koriste samo u slučaju potrebe, prednosti preventivnih konceptijskih rešenja su neosporne. Razlike u odnosu na sredstva koja se redovno koriste su:

— trenutak nastanka otkaza ne može se primetiti bez izvođenja preventivnog pregleda koji će ga otkriti;

— troškovi održavanja nisu jedini kriterijum pri određivanju optimalnog perioda preventivne aktivnosti;

— za sredstva u skladištu preventivna i korektivna aktivnost jednako koštaju (izvode se istim sredstvima, u istim uslovima, i sl.).

Ove razlike uslovljavaju i razliku u načinu određivanja sadržaja preventivnih aktivnosti i njihove periodičnosti.

Kod nekih uskladištenih sredstava (poljoprivredne mehanizacije i građevinskih mašina) troškovi održavanja mogu ostati osnovni kriterijum pri odlučivanju, dok kod vojnih sistema troškovi nisu najvažniji kriterijum. U ovom slučaju to je raspoloživost uskla-

dištenog kontingenta sredstava. Pri tom do izražaja dolaze pomenute činjenice da poziv na upotrebu nije ranije najavljen (nastupa iznenada), kao i to da se trenutak nastanka otkaza ne može primetiti bez izvođenja preventivnog pregleda koji će ga otkriti i eliminisati. Odsustvo takve aktivnosti rezultovalo bi jako dugim periodom otkaznog stanja, što bi raspoloživost uskladištenog kontingenta vozila spustilo na nizak nivo (praktično jako mali broj sredstava bi se mogao upotrebiti). Učestaliji preventivni pregledi obezbeđuju kraće trajanje ovog prikrivenog otkaza, a time i povećanu raspoloživost uskladištenog voznog parka, što, naravno, više košta. Očigledno je da su funkcije raspoloživosti $A=A(p)$ i cene $C=C(p)$ (p — periodičnost) monotono opadajuće, pa se periodičnost ne može izabrati na osnovu minimalnih troškova ili maksimalne pouzdanosti.

Odluka se može doneti na više načina:

1. Ukoliko se zada minimalna raspoloživost, postupak određivanja perioda aktivnosti obavlja se kao na slici 4 pod a. Povlačenjem paralele iz tačke $A=A_{\min}$ do krive $A=\psi(p)$ dobija se najveća periodičnost koja će obezbediti uslov $A \geq A_{\min}$ (svaki veći period dao bi jeftiniji sistem održavanja, ali bi rezultovao nižom raspoloživošću od dozvoljene). Ovoj periodičnosti odgovara cena $C=C_{A \min}$.

2. Ukoliko se zada maksimalna cena, postupak određivanja perioda aktivnosti obavlja se kao na slici 4 pod b. Povlačenjem paralele iz tačke $C=C_{\max}$ do krive $C=\varphi(p)$ dobija se najmanja periodičnost koja će obezbediti uslov $C \leq C_{\max}$ (svaki manji period dao bi skuplji sistem održavanja, što ne bi bilo u skladu sa postavljenim zahtevom). Ovoj periodičnosti odgovara cena $A=A_{C \max}$.

3. Na osnovu maksimalne ekonomičnosti. Naime, formira se funkcija $\eta(t) = \frac{\psi(t)}{\varphi(t)}$, koja pokazuje, za svaku pe-

riodičnost preventivne aktivnosti, koliko se procenata raspoloživosti postiže ulaganjem jedne novčane jedinice. Njen maksimum ukazuje na optimalan period preventivne aktivnosti. Ipak,

Sl. 4 — Određivanje optimalnog perioda održavanja

valja naglasiti da je ova metoda nepraktična. S obzirom na tok funkcija $C=\varphi(p)$ i $A=\psi(p)$ može se desiti da funkcija $\eta(p)$ nema izražen maksimum, što otežava donošenje odluke. Osim toga, moglo bi se desiti da eventualni maksimum ove funkcije pada u područje vrlo visokih periodičnosti, čime bi kriterijum postao neupotrebljiv.

4. Na osnovu eksploatacionih troškova. Pretpostavlja se da je za izvršenje zadatka potreban vozni park od N vozila, tj. bez obzira na periodičnost preventivne aktivnosti mora se obezbediti N raspoloživih vozila u momentu poziva na upotrebu. To podrazumeva postojanje određenog broja rezervnih vozila, tj. potrebno je imati ukupno S vozila, gde je $S = \frac{N}{A}$. Drugim rečima, mora se nabaviti R rezervnih vozila gde je:

$$R = S - N = \frac{N}{A} - N = \frac{N - NA}{A}$$

Cena ove rezerve za vozni park od N vozila je:

$$C_{RN} = \frac{N - NA}{A} \cdot \frac{C_v}{T_{amort}} = \frac{N}{A} \cdot \frac{C_v}{T_{amort}} - N \cdot \frac{C_v}{T_{amort}}$$

gde je:

C_v — cena jednog vozila,
 T_{amort} — »životni« (eksploatacioni) vek vozila (rezervnog) izražen u godinama.

To znači da za svako vozilo iz voznog parka treba obezbediti sredstva u visini od C_R novčanih jedinica za nabavku potrebne rezerve:

$$C_R(t) = \left(\frac{1}{A_t} - 1 \right) \cdot \frac{C_v}{T_{amort}}$$

Funkcija $C_R(t)$ je rastuća, jer za veće vrednosti t opada A (slika 5), čime raste član $\frac{1}{A}$. Ukupni troškovi ovako koncipiranog sistema održavanja su:

$$C(t) = C_R(t) + \varphi(t)$$

Sl. 5 — Primena metode rezerve u određivanju periodičnosti

Očigledno je da svi navedeni kriterijumi zahtevaju poznavanje funkcija $C=\varphi(p)$ i $A=\psi(p)$.

Određivanje toka ovih funkcija izuzetno je složeno. Na njega utiče čitav niz faktora, kao što su troškovi preventivne aktivnosti, troškovi korektivne

aktivnosti, funkcija raspodele pojedinih otkaza u vremenu, itd. Korišćenje analitičkih metoda uslovalo bi i značajna uprošćenja, koja bi olakšala matematički opis problema, ali bi neminovno rezultirala i određenom greškom izlaznog rezultata. Zbog toga se ovde pristupilo određivanju navedenih krivih primenom metoda simulacije (metoda Monte Karlo). Ova metoda se sve češće koristi za rešavanje složenih zadataka koji spadaju u »matematički teško ukrotivu kategoriju«. To su, najčešće, problemi pri čijem rešavanju treba uzeti u obzir mnogo faktora. Korišćenjem ove metode simulacije, uz pomoć elektronskog računara, dobija se veliki broj realizacija istraživanog procesa, a zatim se te realizacije podvrgavaju statističkoj obradi.

Određivanje funkcija raspoloživosti i cene metodom simulacije

Uz pretpostavku da je navedena simulaciona metoda opštepoznata, ovde će biti prikazan samo način njene primene na probleme održavanja.

Pretpostavka je da se optimizacija sistema održavanja vrši samo na osnovu jednog otkaza, čiji je zakon raspodele poznat (npr. Vejbulova raspodela sa poznatim parametrima β i η). Takođe, pretpostavlja se da je posmatrani sklop obnovljen posle svakog periodičnog pregleda, bez obzira na to da li je konstatovan otkaz ili ispravno stanje. Proces i algoritam određivanja funkcija raspoloživosti (A) i cene (C) prikazani su na slici 6. U računar se unose potrebni početni podaci (cene preventivnih i korektivnih aktivnosti, početni period preventivne aktivnosti, period rekonzervacije i slično), kao i parametri raspodele otkaza u vremenu. Računar generiše pseudoslučajni broj u_i i na osnovu njega pronalazi vreme do otkaza t_i . Vreme sistema U OT-

KAZU t_{uoi} je period između tako određene tačke i trenutka izvođenja periodične aktivnosti. Ukoliko je t_i veće od

Sl. 6 — Proces i algoritam određivanja $A_{(p)}$ i $C_{(p)}$

Sl. 7 — Proces i algoritam određivanja $A(p)$ i $C(p)$

analizirane periodičnosti l_o , to znači da je preventivna aktivnost preduhitrila otkaz, pa je $t_{uoi}=0$. Pseudoslučajni broj generiše se kod svake periodične aktivnosti ($t=l_o, 2l_o, 3l_o, \dots$). Računar sabira vreme U OTKAZU, broji otkaze i nakon i — ponavljanja ovog postupka izračunava A i C za pomenutu periodičnost $p=l_o$. Variranjem vrednosti p ($p=l_o+\Delta l$) dobijaju se kompletne krive $A=A(t)$ i $C=C(t)$.

Ukoliko se sistem obnavlja samo nakon pregleda koji je otkrio otkaz, određivanje vrednosti C i A teče po nešto izmenjenoj šemi (slika 7). Računar, takođe, generiše pseudoslučajni broj u_i i na osnovu njega pronalazi vreme do otkaza t_i . Vreme sistema U OTKAZU t_{uoi} je period između tako određene tačke i trenutka izvođenja prve naredne periodične aktivnosti koja će uočiti otkaz. Ako ta tačka pada iza tačke M (trenutak rekonzervacije), to znači da je otkaz preduhitren, pa je $t_{uoi}=0$. Pseudoslučajni broj u_i generiše se samo u trenutku preventivnih aktivnosti koje su otkrile otkaz i nakon intervencije obnovile sistem. Dalji proces određivanja kompletnih krivih $A=A(t)$ i $C=C(t)$ (ponavljanje postupka i puta i variranje periodičnosti p) identičan je prethodnom slučaju.

Metoda simulacije može se koristiti i pri određivanju $A(p)$ i $C(p)$ pri postojanju više otkaza koji simultano utiču na stanje vozila. Za svaki otkaz računar ponavlja jedan od opisanih postupaka i memoriše periode na vremenskoj osi (u obliku parova x_i i y_i) u toku kojih je postojao neki otkaz. Periodi u kojima je vozilo bilo U OTKAZU dobijaju se kao unija skupova (x_i i y_i) — slika 8.

Pri tome je:

$$C = \left(\frac{M}{l_o} - 1 \right) C_p + C_{lk} N_1 + \dots + C_{kk} N_k + C_{konz}$$

$$A = \frac{M - t_{uoi}(\text{voz})}{M} = 1 - \frac{t_{uoi}(\text{voz})}{M}$$

gde su:

C_p i C_{ik} — cene preventivne i i-te korektivne aktivnosti.

Radi provere navedenih postavki formiran je precizan matematički aparat za optimizaciju konceptijske komponente sistema održavanja razmatranih sredstava. Aparat je podržan i softverskim paketom RASPOLOZ koji, osim optimalnog rasporeda aktivnosti održavanja i njihove optimalne periodičnosti, ukazuje i na kritične otkaze koji su najviše uticali na pad raspoloživosti i porast troškova održavanja.

Sl. 8 — Vreme vozila u otkazu

Za potrebe tog aparata definiše se načelan sistem održavanja. Na usklađenom vozilu obavljaće se dve vrste pregleda: niži tehnički pregledi (NTP) bez startovanja motora i viši tehnički pregledi (VTP) sa startovanjem motora. Uočeni otkazi otklanjaće se odmah. Spisak operacija NTP i VTP posebno će se definisati, a njihove cene i trajanje uneće se u računar. Takođe, poznata su vremena i cena otklanjanja pojedinih otkaza.

Sistem će biti tako koncipiran da vremenski period između dva pregleda ima dužinu p — meseci. Nakon k — izvršenih NTP obavlja se jedan VTP. Nakon M — meseci obavlja se rekonzervacija i ponavljanje procesa.

Na vozilu se mogu dogoditi 33 vrste otkaza koji su nezavisni jedan od drugog. Svi otkazi podležu Vejbulovoj raspodeli, s tim što su parametri ras-

podele za pojedine otkaze različiti. Pored ovih podataka, u računar se unose i sledeći podaci:

— da li se otkaz može otkriti pri NTP ili samo pri VTP;

— da li svaki pregled obnavlja sistem, ili samo onaj koji je otkrio otkaz i rezultirao opravkom;

— da li navedeni otkaz utiče na raspoloživost vozila;

— cena otklanjanja otkaza;

— vreme otklanjanja otkaza;

— potrebni rezervni delovi za otklanjanje otkaza.

Ovi elementi imaju ulogu polaznih podataka i moraju biti određeni eksperimentalnim putem u realnim uslovima.

Primenom opisane metode računar obavlja traženi broj simulacija, izračunava cene i raspoloživosti, varirajući pri tom veličine p , k i M . Za veliki broj kombinacija (p , k , M) računar daje tabelarni prikaz troškova održavanja (C) i ostvarene raspoloživosti (A). Ovi podaci mogu se prikazati dijagramski i primenjuju se na način prikazan na slikama 4 pod a, 4 pod b i 5.

Za izabranu varijantu (p^+ , k^+ , M^+) računar daje specifikaciju i količinu rezervnih delova po jednom vozilu, prosečno vreme trajanja i broj pojedinih otkaza. Ovi podaci mogu se koristiti za finu regulaciju sistema održavanja.

Kako navedeni model izračunava raspoloživost i troškove za čitav niz kombinacija (p , k , M), kao rezultat se dobija familija krivih tipa $A = \psi(p, k, M)$ i $C = \varphi(p, k, M)$. Iz njih je moguće konstruisati i krive međuzavisnosti pojedinih veličina, i na osnovu njih rasuđivati o značaju pojedinih uticajnih faktora. Nekoliko takvih krivih prikazano je na slici 9: slike pod a) ukazuju na pad cene i raspoloživosti povećanjem perioda rekonzervacije, slike pod b) prikazuju pad cene i raspoloživosti povećanjem broja NTP između dva VTP, a slika pod c) pokazuje vezu između raspoloživosti i cene.

a)

b)

c)

Sl. 9 — Funkcije međuzavisnosti pojedinih karakteristika sistema održavanja

Zaključak

Iz navedenih razmatranja može se zaključiti da je održavanje motornih vozila u periodu skladištenja neophodno, a da je varijanta preventivnog održavanja višestruko povoljnija od isključivo korektivne varijante. Pri tome je neophodno pravilno odrediti periodičnost i sadržaj pojedinih preven-

tivnih zahvata, u čemu veliku pomoć pruža metoda simulacije i prikazani simulacioni model. Krive prikazane na slici 9 upozoravaju da pri formiranju sistema održavanja treba biti prilično obazriv, jer pogrešno odabiranje uticajnih faktora može dovesti do višestruko nepovoljnih izlaznih karakteristika tog sistema.

Literatura:

- [1] Todorović, J., Zalenović, D.: Efektivnost sistema u mašinstvu. Naučna knjiga, Beograd, 1981.
- [2] Todorović, J.: Osnovi teorije održavanja, Mašinski fakultet Beograd, 1984.
- [3] Jorgenson, McCall, Radner: Optimal replacement policy, Nort Holand New York, 1974.
- [4] Todorović, J., Kodžopeljić, J.: Kvalitet sistema održavanja TMS i njegov uticaj na b/g, VTG 2/85.
- [5] Stanković, R.: Simulacioni metod za izbor periodičnosti održavanja m/v, VTG 6/86.
- [6] Popović, Z.: Optimizacija sistema održavanja m/v za vreme dugotrajnog skladištenja, Magistrski rad, Beograd, 1988.