Brkić Ljubiša,
potpukovnik, dipl. inž.
VP 3001, Beograd
Docent dr Božidar V. Krstić,
dipl. inž.
Mašinski fakultet,
Kragujevac

PARAMETRI POUZDANOSTI PUMPE VISOKOG PRITISKA VOZILA SPECIJALNE NAMENE KAO OSNOVA PRI PLANIRANJU ODRŽAVANJA

UDC: 629.113-7.004.5:65.01

Rezime:

U radu je prikazana mogućnost iznalaženja optimalnog rešenja strategije održavanja pumpe visokog pritiska motornog vozila, kada se kao kriterijumske funkcije uzimaju maksimalna gotovost i minimalni troškovi održavanja. Ova dva kriterijuma dovode do različitih rešenja po pitanju strategije održavanja analiziranog sklopa motornog vozila, pa je bilo neophodno traženje kompromisnog rešenja.

Ključne reči: održavanje, pouzdanost, gotovost, troškovi održavanja, optimizacija.

PARAMETERS OF RELIABILITY OF HIGH PRESSURE PUMPS IN SPECIAL PURPOSE VEHICLES AS A BASIS FOR MAINTENANCE PLANNING

Summary:

This work presents a possibility to find the optimum solution in the maintenance of high pressure pump systems when the criteria functions are maximal availability and minimal cost maintenance. These two criterions lead to several solutions of the maintenance of high pressure pump systems therefore it was necessary to seek for a trade off solution.

Key words: maintenance, reliability, availability. maintenance costs, optimization.

Uvod

Pravilnim formiranjem modela održavanja, odnosno pravilnim povezivanjem činilaca koji utiču na sistem održavanja vozila sa odgovarajućim matematičkim relacijama, moguće je izvršiti optimizaciju, tj. izabrati najpovoljniji sistem održavanja. Sistem održavanja vozila zavisi od koncepcije, organizacije i tehnologije održavanja, što ukazuje na to da se sistem održavanja može rešiti na više načina. S obzirom na to može se postaviti pitanje: koja strategija održavanja dovodi do najpovoljnijih rezultata? Primena bilo

koje varijante strategije održavanja dovodi do određenih rezultata po pitanju karakteristika sistema održavanja (gotovost, troškovi,...).

To navodi na zaključak da je neophodno upoređivanje rezultata dobijenih primenom različitih strategija održavanja. Upoređivanje je moguće vršiti po različitim kriterijumima (prema gotovosti, prema troškovima...), što se svodi na tzv. višekriterijumski problem, koji je moguće rešiti samo ako su precizno određeni svi važni zahtevi i ograničenja, što znači da je neophodno poznavati funkciju cilja sistema održavanja koji se analizira.

Imajući u vidu navedene činjenice, u ovom radu je prikazan pokušaj razrešenja prethodno definisanog zadatka za konkretnu grupu vozila. Osnovu izložene metodologije čine parametri pouzdanosti analiziranih vozila, dobijeni na osnovu praćenja ponašanja vozila, sa aspekta pojave otkaza, u realnim uslovima eksploatacije i troškovi njihovog održavanja.

Vrste i karakteristike modela održavanja vitalnih delova motornih vozila

Ciljna funkcija sistema održavanja jeste postizanje minimalnih troškova održavanja pri optimalnom nivou raspoloživosti, odnosno gotovosti.

Sistem održavanja karakterišu brojni činioci koje je teško obuhvatiti i matematički iskazati. Optimizaciju sistema održavanja treba, pre svega, shvatiti kao traženje kompromisnog rešenja koje će biti najprihvatljivije za održavanje vozila. Analizom i optimizacijom sistema održavanja, korišćenjem odgovarajućih matematičkih modela, moguće je vozilo posmatrati kao celinu, što olakšava definisanje stepena i karaktera uticaja promenljivih parametara, kao i veza između njih. Moguće je, takođe, utvrđivanje više mogućih varijanti strategije održavanja, a samim tim i izbor najprihvatljivije varijante za date kriterijume i ograničenja.

Pri optimizaciji sistema održavanja najčešće se koriste sledeće dve mogućnosti:

- optimizacija prema gotovosti, kada najveći dozvoljeni troškovi održavanja predstavljaju ograničenje;
- optimizacija prema troškovima održavanja, kada je minimalni nivo gotovosti ograničenje.

Model održavanja mora obuhvatiti što veći broj parametara koji karakterišu

sistem održavanja, kako bi se postigli što realniji rezultati, a mora biti dovoljno jednostavan da bi se mogao primeniti.

Uglavnom, do sada razvijeni modeli održavanja imaju sledeća zajednička obeležja:

- zasnivaju se na pokazateljima pouzdanosti;
- kriterijumi za izbor najpovoljnije varijante su minimalni troškovi ili maksimalna gotovost;
- modelima održavanja se, najčešće, obuhvata koncepcija sistema održavanja.

Zavisno od obeležja modeli održavanja se razvrstavaju na: modele korektivnog, modele preventivnog i modele korektivno-preventivnog održavanja.

Modeli korektivnog održavanja daju najbolji način sprovođenja postupaka korektivnog održavanja uz što manje troškove i u što kraćem vremenu, kada dođe do otkaza.

Modeli preventivnog održavanja daju odgovor na pitanje da li je korisno primeniti preventivno održavanje i, ako jeste, odrediti posle koliko vremena treba primeniti postupke preventivnog održavanja.

Optimizacija sistema održavanja pumpe visokog pritiska

Za optimizaciju sistema održavanja neophodno je poznavanje oblika funkcije njegove pouzdanosti. Na konkretnom primeru izabranog vozila specijalne namene prikazaće se metodologija određivanja najprihvatljivijeg modela održavanja pumpe visokog pritiska.

Određivanje parametara pouzdanosti pumpe visokog pritiska

Da bi se dobili parametri pouzdanosti pumpe visokog pritiska pristupa se

Tabela 1

Vreme rada do otkaza pumpe visokog pritiska

Pređeni put (km)	Vreme rada (h)	Pređeni put (km)	Vreme rada (h)	Pređeni put (km)	Vreme rada (h)
2 398	80	9 892	330	14 521	484
3 296	110	10 234	341	15 574	519
5 761	192	10 273	342	16 384	546
5 836	195	10 715	357	17 200	573
5 908	197	10 805	360	17 255	575
6 397	213	11 126	371	17 725	591
6 998	233	11 367	379	17 856	595
7 127	238	11 636	388	18 263	609
7 195	240	11 864	395	18 693	623
7 494	250	11 973	399	19 840	661
7 538	251	11 997	400	19 947	665
7 856	262	12 351	412	22 067	736
7 963	265	12 395	413	22 167	739
7 976	266	12 705	424	22 736	758
8 472	282	13 973	466	24 317	811
8 793	293	14 167	472	25 863	862
9 020	301	14 209	474	28 396	947
9 563	319	14 286	476		
9 870	329	14 314	477		

Tabela 2

Procenjene vrednosti pokazatelja pouzdanosti pumpe visokog pritiska

i	t _i	n(t _i)	f(t _i)	R(t _i)	F(t _i)	λ(t _i)
1.	100	2	0,000	0,9636	0,0364	0,0003
2.	200	8	0,001	0,8182	0,1818	0,0015
3.	300	12	0,002	0,6000	0,4000	0,0026
4.	400	11	0,002	0,4000	0,6000	0,0033
5.	500	8	0,001	0,2546	0,7454	0,0036
6.	600	6	0,001	0,1455	0,8545	0,0042
7.	700	4	0,000	0,0728	0,9272	0,0050
8.	800	2	0,000	0,0364	0,9636	0,0050
9.	900	2	0,000	0,0181	0,9818	0,0100

obradi podataka dobijenih u eksploataciji koji su prikazani u tabeli 1. Na osnovu tih podataka određuje se teorijski aproksimativni zakon raspodele koji se reali-

zuje u tri koraka: procena pokazatelja pouzdanosti, određivanje teorijskog modela raspodele i testiranje dobijenog modela raspodele.

Procenjene vrednosti pokazatelja pouzdanosti određene su primenom poznate metodologije [1,2,4] i prikazane su u tabeli 2.

Na osnovu odstupanja vrednosti teorijske raspodele od procenjenih vrednosti na osnovu podataka iz eksploatacije došlo se do zaključka da je Vejbulova dvoparametarska raspodela sa parametrom oblika 1,8 i parametrom razmere 450 najprihvatljivija za analizirani uzorak, što je prikazano u tabeli 3.

Tabela 3

Matematičko-statistička obrada podataka o otkazima

Test Raspodela	Kolmogorov-Smirnova: D _{max}	Test Pirsona: χ ²	Test Romanovskog χ ² k /√2k
Vejbulova raspodela	0,0453	0,0277	1,724
Relejeva raspodela	0,0533	0,0154	1,867
Normalna raspodela	0,0847	0,0534	1,964

Prihvatajući ovaj zakon raspodele pouzdanosti mogu se napisati izrazi za određivanje:

– funkcije pouzdanosti R(t):

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{450}\right)^{1,8}} \quad (1)$$

– funkcije gustine raspodele otkaza f(t):

$$f(t) = \frac{1,8}{450} \cdot \left(\frac{t}{450}\right)^{0,8} \cdot e^{-\left(\frac{t}{450}\right)^{1,8}} \quad (2)$$

– funkcije nepouzdanosti F(t):

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{450}\right)^{1,8}} \quad (3)$$

– funkcije intenziteta otkaza $\lambda(t)$:

$$\lambda(t) = \frac{1,8}{450} \cdot \left(\frac{t}{450}\right)^{0,8} \quad (4)$$

Na osnovu ovih izraza može se odrediti optimalno vreme t posle kojeg treba obavljati periodično-preventivne preglede, preventivne zamene ili generalnu reviziju, kao i raspoloživost i gotovost, i optimalne zalihe rezervnih delova pumpe visokog pritiska [1].

Optimizacija sistema održavanja pumpe visokog pritiska prema gotovosti

Optimizacija sistema održavanja vozila specijalne namene najčešće se obavlja prema kriterijumu maksimalne gotovosti, dok najveći dozvoljeni troškovi održavanja predstavljaju ograničenje. Za primenu modela održavanja na osnovu gotovosti potrebno je poznavanje zakona raspodele pouzdanosti, kao i vremena u radu i u otkazu [1,2,4].

Vrednost eksploatacione gotovosti može se odrediti korišćenjem izraza [1,2]:

$$G_e(t) = \frac{t_r + t_{\check{r}}}{t_r + t_{\check{r}} + t_o} = \frac{t_r + t_{\check{r}}}{t_r + t_{\check{r}} + t_p + \frac{F(t)}{R(t)} \cdot t_k} \quad (5)$$

gde je:

- t_r – vreme u radu,
- $t_{\check{r}}$ – vreme čekanja na rad u ispravnom stanju,
- t_o – vreme u otkazu,
- t_p – vreme preventivnog održavanja,
- t_k – vreme korektivnog održavanja.

Ako se varira periodičnost preventivnog održavanja, koja je jednaka vremenu u radu $t = t_r$, dobija se funkcionalna zavisnost gotovosti od periodičnosti vremena između preventivnih održavanja, na osnovu koje se može odrediti periodičnost vremena preventivnog održavanja koja daje najveću gotovost.

Rezultati određivanja gotovosti za različite periodičnosti održavanja dati su u tabeli 4 i na slici 1.

Sl. 1 – Zavisnost gotovosti od periodičnosti održavanja pumpe visokog pritiska

Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 4 i na slici 1 može se zaključiti da se najveća gotovost pumpe visokog pritiska dobija za periodičnost održavanja od 200 časova rada za kriterijum maksimalne gotovosti.

Optimizacija sistema održavanja pumpe visokog pritiska prema kriterijumu troškova održavanja

Pri primeni modela optimizacije kod kojeg se kao kriterijum koristi minimalna vrednost troškova održavanja, određuje se periodičnost sprovođenja postupaka preventivnog održavanja koja daje najmanje troškove, uz obezbeđenje zadržane gotovosti.

Strategija preventivnog održavanja primenjuje se kada je intenzitet otkaza rastuća funkcija u vremenu, i kada su troškovi korektivnog održavanja veći od

Gotovost pumpe visokog pritiska za različite periodičnosti njenog održavanja

Periodičnost održavanja (h)	50	100	150	200	250	300	350	400
Vreme rada $t_r(h)$	50	100	150	200	250	300	350	400
Vreme prev. održ. $t_p(h)$	21	21	21	21	21	21	21	21
Funkcija nepouzdanosti $F(t)$	0,019	0,064	0,129	0,207	0,293	0,382	0,470	0,554
Funkcija pouzdanosti $1-F(t)$	0,981	0,935	0,870	0,792	0,706	0,617	0,529	0,445
Broj korektivnih održavanja	0,019	0,069	0,149	0,262	0,415	0,619	0,889	1,246
Vreme korektivnog održavanja	2,03	7,23	15,59	27,46	43,58	65,02	93,38	130,8
Vreme čekanja na rad $t_{\text{čr}}$	150	300	450	600	750	900	1050	1200
Gotovost $G(t)$	0,897	0,934	0,942	0,943	0,939	0,933	0,925	0,913

Tabela 5

Iznos ukupnih troškova održavanja pumpe visokog pritiska za različite periodičnosti njenog održavanja

Periodičnost održavanja (h)	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Troš. kor. odr. C_k	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000
Troš. prev. od. C_p	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200
Pouzdanost $R(t)$	0,981	0,936	0,871	0,793	0,707	0,618	0,529	0,445	0,368
$\int R(t)dt$	50	98,6	143,8	185,4	222,9	284,6	285,8	308,9	329,2
Ukupni troškovi $C(t)$	25,82	15,31	12,66	11,84	11,70	12,16	21,64	12,71	12,86

troškova preventivnog održavanja. Tada je moguće odrediti optimalnu periodičnost održavanja [1,2,4].

Ako se ukupni troškovi održavanja pumpe visokog pritiska izraze u obliku [4,1,2]:

$$C(t) = \frac{C_k - (C_k - C_p) \cdot R(t)}{\int_0^t R(t)dt} \tag{6}$$

gde su:

- $C(t)$ – ukupni specifični troškovi,
 - C_p – troškovi preventivnog održavanja,
 - C_k – troškovi korektivnog održavanja,
- za različite periodičnosti preventivnih održavanja pumpe visokog pritiska, što je prikazano u tabeli 5, dobiće se zavisnost

troškova od periodičnosti, što je prikazano dijagramski na slici 2.

Sl. 2 – Zavisnost ukupnih specifičnih troškova održavanja od periodičnosti održavanja za pumpu visokog pritiska

Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 5 i na slici 2 može se zaključiti da se najmanji troškovi održavanja pumpe visokog pritiska dobijaju pri periodičnosti održavanja od 250 časova rada.

Iznalaženje kompromisnog rešenja sistema održavanja pumpe visokog pritiska

Ako su za optimizaciju sistema održavanja pumpe visokog pritiska zadati minimalno dozvoljena gotovost i maksimalno dozvoljeni troškovi, onda se traži kompromisno rešenje koje će zadovoljiti traženu gotovost, a da se pri tome ne prekorače dozvoljeni troškovi.

U potrazi za takvim rešenjem na dijagramu na slici 3 prikazane su pojedinačne zavisnosti gotovosti i troškova održavanja od periodičnosti vremena sprovođenja preventivnog održavanja.

Na osnovu rezultata istraživanja optimalne periodičnosti preventivnog održavanja pumpe visokog pritiska, prikazanih na slici 3, može se zaključiti da se optimalni interval periodičnosti preventivnog održavanja pumpe visokog pritiska

analiziranog vozila, sa aspekta maksimalne gotovosti i minimalnih troškova održavanja, nalazi između 200 i 250 časova rada, a usvaja se na osnovu zadatih kriterijuma i ograničenja.

Zaključak

U radu su prikazani rezultati optimizacije sistema održavanja pumpe visokog pritiska izabranog vozila za kriterijum maksimalne gotovosti i za kriterijum minimalnih troškova održavanja.

Na osnovu rezultata istraživanja, dobijenih praćenjem 532 vozila specijalne namene u uslovima realne eksploatacije, može se zaključiti da je opravdano primeniti koncepciju preventivnog održavanja po eksploatacionom resursu sa korektivnim održavanjem samo onih delova pumpe visokog pritiska koji otkazu između dva preventivna održavanja. Time

se postiže optimalna gotovost uz najmanje troškove.

Pošto su dobijene različite vrednosti periodičnosti za maksimalnu gotovost i minimalne troškove održavanja, potrebno je usvojiti kompromisno rešenje na osnovu zadatih kriterijuma i ograničenja.

U radu su određene granične vrednosti periodičnosti za maksimalnu gotovost i minimalne troškove, koje definišu zonu u kojoj se mogu kretati prihvatljive vrednosti periodičnosti održavanja

pumpe visokog pritiska, a da pri tome ne budu prekoračene zadate vrednosti maksimalnih troškova održavanja i minimalne gotovosti, odnosno raspoloživosti.

Literatura:

- [1] Todorović, J.: Inženjerstvo održavanja tehničkih sistema, Jugoslovensko društvo za motore i vozila, Beograd, 1993.
- [2] Krstić, B.: Eksploatacija motornih vozila i motora, Mašinski fakultet, Kragujevac, 1997.
- [3] Vukadinović, S.: Elementi teorije verovatnoće i matematičke statistike, Privredni pregled, Beograd, 1973.
- [4] Vukadinović, S., Teodorović, D.: Elementi teorije pouzdanosti i teorije obnavljanja tehničkih sistema, Privredni pregled, Beograd, 1979.