

ODREĐIVANJE OPTIMALNE PERIODIČNOSTI PREVENTIVNOG ODRŽAVANJA MOTORA V46-6

Biočanin LJ. Stojko, Pavlović R. Milan,
Tehnički remontni zavod „Čačak“, Čačak

UDC: 621.43.018

OBLAST: Mašinstvo

Sažetak:

Obezbeđivanju zahtevanog nivoa gotovosti složenih tehničkih sistema koji se koriste u organizacijama specijalne namene znatno doprinosi primena modela preventivnog održavanja. Osnovni zahtev kod primene ovog modela održavanja je određivanje optimalne periodičnosti koja treba da zadovolji određene, međusobno suprotstavljene kriterijume. U radu je prikazana metodologija određivanja periodičnosti preventivnog održavanja motora V46-6 na bazi prikupljanja i statističke obrade podataka o njihovim otkazima. Ovakav problem moguće je rešiti ako su određeni svi važni zahtevi i ograničenja. Osnovu izložene metodologije čine parametri pouzdanosti analiziranog motora, dobijeni na osnovu praćenja ponašanja motora, sa aspekta pojave otkaza u realnim uslovima eksploatacije, kao i troškovi njegovog održavanja.

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

Uvod

Primenom modela preventivnog održavanja, optimizacija sistema održavanja svodi se na traženje odgovora na pitanje da li je korisno primeniti preventivno održavanje kao model održavanja, i ako jeste, odrediti posle koliko vremena rada treba primeniti postupke preventivnog održavanja.

Za dati motor i date uslove korišćenja i održavanja koji omogućavaju da preferencije budu unapred poznate, samo jedno rešenje strategije održavanja je optimalno. U ovom slučaju postižu se najpovoljnije vrednosti pouzdanosti, gotovosti, troškova korišćenja i održavanja i smanjuju ukupni troškovi životnog ciklusa. Zadatak optimizacije sistema održavanja motora je iznalaženje tog optimuma.

Određivanje zakona raspodele vremena rada do otkaza motora V46–6

Pronalaženje adekvatnog matematičkog modela kojim se može predstaviti zakonitost ponašanja motora, sa aspekta pojave neispravnosti, jedan je od osnovnih elemenata za optimizaciju njegovog održavanja. S obzirom na to da od pravilnosti određivanja modela raspodele pouzdanosti zavise svi dalji zaključci i odluke vezane za preduzimanje odgovarajućih mera s ciljem održavanja zahtevanog nivoa pouzdanosti motora, ovoj fazi analize treba posvetiti posebnu pažnju. Na konkretnom primeru izabranog borbenog sredstva prikazana je metodologija određivanja najprihvatljivijeg modela održavanja njegovog motora.

Objekt istraživanja je dvanaestocilindrični četvorotaktni dizel motor snage 735 kW oznake V46–6.

Postupak za određivanje zakona raspodele vremena rada do otkaza, na osnovu empirijskih podataka, sprovodi se u tri koraka. U prvom koraku, procenjuju se pokazatelji pouzdanosti, odnosno određuju karakteristike statističkog skupa, i procenjuju vrednosti potpunih karakteristika slučajne promenljive. U drugom koraku, na osnovu vrednosti dobijenih u prvom koraku, određuju se teorijski model raspodele koji bi mogao da se koristi za aproksimaciju empirijske raspodele. Potvrda saglasnosti usvojenog teorijskog modela raspodele sa empirijskom raspodelom je u trećem koraku [1].

Procena pokazatelja pouzdanosti

Podaci o vremenu rada motora V46–6 do otkaza iskazani u motočakovima (mč), do kojih se došlo praćenjem u eksploataciji, poređani u neopadajući niz, prikazani su u tabeli 1.

Vremena rada do otkaza motora V46–6 preuzeta su iz tehničkih knjižica za motore tehničkih sredstava dostavljenih na remont u TRZ „Čačak“ i iz tehničkih knjižica sredstava na upotrebi u jedinicama Vojske Srbije. Podaci su registrovani samo za motore koji su imali otkaz. Prikazana su 92 vremena rada do otkaza motora V46–6, što je više nego dovoljan statistički skup u odnosu na optimalni plan skraćenih ispitivanja za ocenu pouzdanosti (sa usvojenim koeficijentom varijacije od 0,5, apriornom relativnom greškom ocene pokazatelja pouzdanosti rada od 0,05 i početnim brojem potrebnih podataka od 40) [1].

Na osnovu podataka iz tabele 1 određuje se zakon raspodele pouzdanosti.

Tabela 1

Podaci o vremenu rada do otkaza motora V46–6

| Redni broj otkaza | Vreme rada do otkaza [mč] | Redni broj otkaza | Vreme rada do otkaza [mč] | Redni broj otkaza | Vreme rada do otkaza [mč] | Redni broj otkaza | Vreme rada do otkaza [mč] |
|-------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|
| 1 | 51 | 24 | 275 | 47 | 386 | 70 | 548 |
| 2 | 77 | 25 | 276 | 48 | 389 | 71 | 548 |
| 3 | 98 | 26 | 276 | 49 | 394 | 72 | 556 |
| 4 | 105 | 27 | 277 | 50 | 396 | 73 | 562 |
| 5 | 111 | 28 | 278 | 51 | 399 | 74 | 579 |
| 6 | 147 | 29 | 284 | 52 | 400 | 75 | 590 |
| 7 | 152 | 30 | 284 | 53 | 403 | 76 | 593 |
| 8 | 187 | 31 | 300 | 54 | 408 | 77 | 604 |
| 9 | 197 | 32 | 301 | 55 | 413 | 78 | 618 |
| 10 | 199 | 33 | 316 | 56 | 415 | 79 | 619 |
| 11 | 201 | 34 | 318 | 57 | 428 | 80 | 628 |
| 12 | 201 | 35 | 329 | 58 | 435 | 81 | 634 |
| 13 | 203 | 36 | 330 | 59 | 475 | 82 | 639 |
| 14 | 204 | 37 | 333 | 60 | 475 | 83 | 662 |
| 15 | 206 | 38 | 338 | 61 | 475 | 84 | 699 |
| 16 | 233 | 39 | 339 | 62 | 475 | 85 | 702 |
| 17 | 238 | 40 | 342 | 63 | 476 | 86 | 735 |
| 18 | 240 | 41 | 345 | 64 | 478 | 87 | 754 |
| 19 | 240 | 42 | 348 | 65 | 481 | 88 | 762 |
| 20 | 243 | 43 | 355 | 66 | 488 | 89 | 763 |
| 21 | 246 | 44 | 362 | 67 | 512 | 90 | 847 |
| 22 | 251 | 45 | 368 | 68 | 532 | 91 | 905 |
| 23 | 272 | 46 | 379 | 69 | 544 | 92 | 948 |

Iz tabele 1 vidi se da je:

- ukupan broj podataka (veličina uzorka): $n=92$,
- minimalno vreme rada do otkaza: $t_{\min}= 51$ mč,
- maksimalno vreme rada do otkaza: $t_{\max}= 948$ mč.

Iz podataka datih u tabeli 1 izračunavaju se statističke mere:

- srednja vrednost vremena rada do otkaza: $t_{sr}= 406,8152$ mč,
- standardna devijacija vremena rada do otkaza: $SD= 193,3807$ mč,
- medijana vremena rada do otkaza: $mediana= 382,5$ mč,
- rang (raspon) vremena rada do otkaza: $rang= 897$ mč.

Na osnovu izračunatih statističkih mera, izračunava se vrednost koeficijenta varijacije:

$$v = SD/t_{sr} = 0,475 .$$

Kako je izračunata vrednost koeficijenta varijacije manja od usvojene ($v=0,5$), može se pristupiti obradi podataka s ciljem određivanja zakona raspodele vremena rada do otkaza motora V46–6.

Broj intervala za vremena rada do otkaza određuje se prema formuli [2]:

$$z=1+3,3 \cdot \log_{10}(n) \text{ i iznosi } z = 7,48.$$

Usvaja se broj intervala: $z = 7$.
 Rezultati grupisanja broja otkaza, po intervalima vremena rada do otkaza, prikazani su u tabeli 2.

Tabela 2

Rezultati grupisanja otkaza po intervalima vremena rada do otkaza

| Redni broj intervala | i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------------------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Donja granica intervala [mč] | i_d | 51,0 | 179,1 | 307,3 | 435,4 | 563,6 | 691,7 | 819,9 |
| Gornja granica intervala [mč] | i_g | 179,1 | 307,3 | 435,4 | 563,6 | 691,7 | 819,9 | 948,0 |
| Srednja vrednost intervala [mč] | sv_{interv} | 115,1 | 243,2 | 371,4 | 499,5 | 627,6 | 755,8 | 883,9 |
| Broj otkaza u intervalu | n_i | 7 | 25 | 26 | 15 | 10 | 6 | 3 |

Procenjene vrednosti pokazatelja pouzdanosti date su u tabeli 3.

Tabela 3

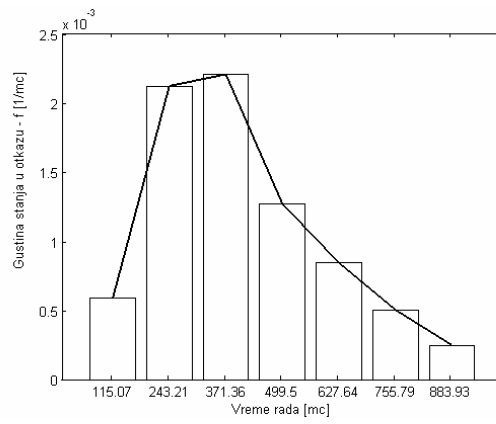
Procenjene vrednosti pokazatelja pouzdanosti

| i | n_i | sv_{interv} | cn_s | $f [m\check{c}^{-1}]$ | F | R | $h [m\check{c}^{-1}]$ |
|---|-------|---------------|--------|-----------------------|--------|--------|-----------------------|
| 1 | 7 | 115,1 | 3,5 | 5,9377E-04 | 0,0380 | 0,9620 | 6,1725E-04 |
| 2 | 25 | 243,2 | 19,5 | 2,1206E-03 | 0,2120 | 0,7880 | 2,6910E-03 |
| 3 | 26 | 371,4 | 45,0 | 2,2054E-03 | 0,4891 | 0,5109 | 4,3170E-03 |
| 4 | 15 | 499,5 | 65,5 | 1,2724E-03 | 0,7120 | 0,2880 | 4,4172E-03 |
| 5 | 10 | 627,6 | 78,0 | 8,4824E-04 | 0,8478 | 0,1522 | 5,5741E-03 |
| 6 | 6 | 755,8 | 86,0 | 5,0894E-04 | 0,9348 | 0,0652 | 7,8038E-03 |
| 7 | 3 | 883,9 | 90,5 | 2,5447E-04 | 0,9837 | 0,0163 | 1,5608E-02 |

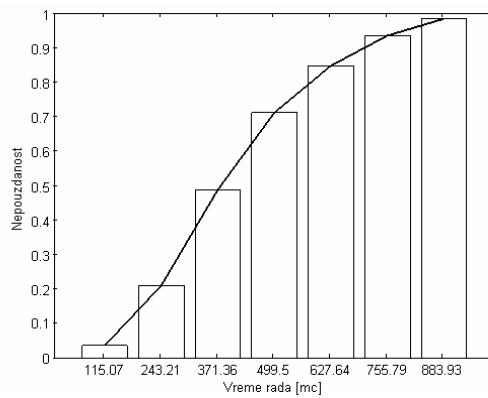
Oznake korišćene u tabeli 3 imaju sledeće značenje:

- i – redni broj intervala,
- n_i – broj otkaza u intervalu,
- sv_{interv} – srednja vrednost intervala (mč),
- cn_s – procenjena vrednost broja otkaza na sredini intervala (računa se kao aritmetička sredina brojeva otkaza na početku i na kraju intervala),
- $f [m\check{c}^{-1}] = n_i / (n \cdot \Delta t)$ – funkcija učestalosti (gustine) stanja u otkazu, $n = 92$ – veličina uzorka, $\Delta t = rang/z$,
- $F = cn_s/n$ – funkcija kumulativne raspodele verovatnoće (funkcija nepouzdanosti),
- $R = (n - cn_s)/n = 1 - F$ – funkcija pouzdanosti,
- $h [m\check{c}^{-1}] = f/R$ – funkcija intenziteta otkaza.

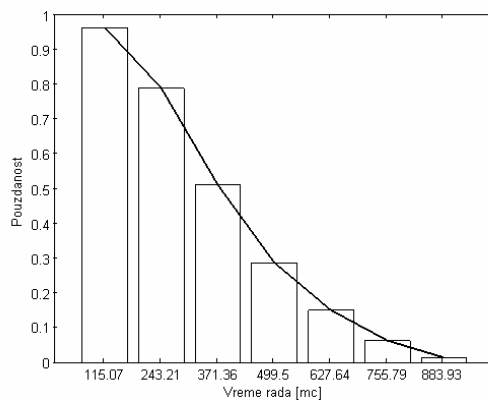
Na slikama od 1 do 4 dati su grafički prikazi procenjenih pokazatelja pouzdanosti.



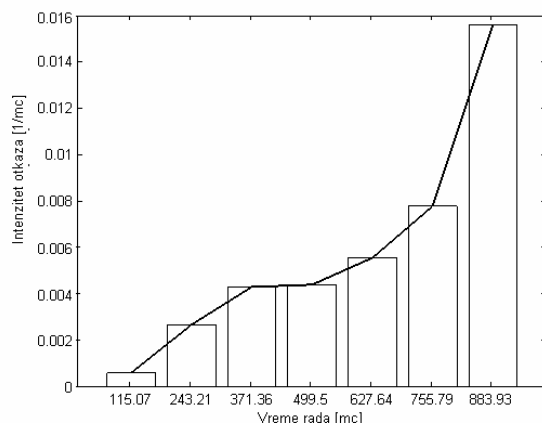
Slika 1 – Grafički prikaz procenjene vrednosti gustine stanja u otkazu



Slika 2 – Grafički prikaz procenjene vrednosti funkcije nepouzdanosti



Slika 3 – Grafički prikaz procenjene vrednosti funkcije pouzdanosti



Slika 4 – Grafički prikaz procenjene vrednosti funkcije intenziteta otkaza

Određivanje modela raspodele i parametara sa ocenom saglasnosti

S ciljem određivanja teorijskog modela raspodele koji bi mogao da se koristi za aproksimaciju empirijske raspodele vrši se aproksimacija empirijske raspodele sa teorijskom Vejbulovom (Weibull), eksponencijalnom, Rejljevom (Rayleigh) i normalnom raspodelom. Ocena saglasnosti empirijske i teorijskih raspodela vrši se testom Kolmogorov–Smirnova, Pirsonovim testom i testom Romanovskog.

Za statističku obradu podataka korišćen je *Statistics Toolbox for use with MATLAB* [3], a u tekstu se daju samo rezultati obrade.

Aproksimacija empirijske raspodele teorijskom Vejbulovom raspodelom

Iz podataka datih u tabeli 1 izračunavaju se parametri razmere i oblika Vejbulove raspodele:

– $\eta_w = 459,8652$ – parametar razmere i

– $\beta_w = 2,2461$ – parametar oblika.

Sa poznatim vrednostima parametara razmere i oblika izračunavaju se vrednosti aproksimativne teorijske Vejbulove raspodele:

$$F_{tw} = [0,0435 \quad 0,2127 \quad 0,4614 \quad 0,7000 \quad 0,8661 \quad 0,9528 \quad 0,9870].$$

S ciljem testiranja hipoteze o aproksimaciji empirijske raspodele teorijskom Vejbulovom raspodelom oformljena je tabela 4. Testiranje hipoteze se vrši testovima Kolmogorov–Smirnova, Pirsona (χ^2 – „hi-kvadrat“) i Romanovskog.

Tabela 4

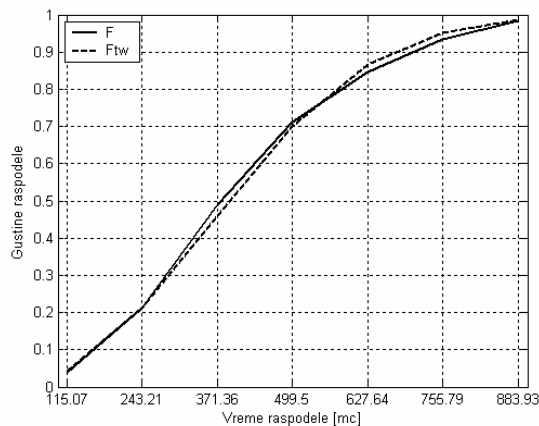
Izračunate vrednosti veličina za testiranje Vejbulove raspodele

| i | sv _{interv} | F | F _{tw} | ΔF _{tw} | χ ² |
|------------------------------|----------------------|--------|-----------------|------------------|----------------|
| 1 | 115,1 | 0,0380 | 0,0436 | 0,0055 | 0,0007 |
| 2 | 243,2 | 0,2120 | 0,2127 | 0,0007 | 0,0000 |
| 3 | 371,4 | 0,4891 | 0,4614 | 0,0278 | 0,0017 |
| 4 | 499,5 | 0,7120 | 0,7000 | 0,0119 | 0,0002 |
| 5 | 627,6 | 0,8478 | 0,8661 | 0,0183 | 0,0004 |
| 6 | 755,8 | 0,9348 | 0,9528 | 0,0180 | 0,0003 |
| 7 | 883,9 | 0,9837 | 0,9870 | 0,0032 | 0,0000 |
| Max(ΔF_{tw}): | | | | | 0,0278 |
| Suma(χ²): | | | | | 0,0033 |
| Step. slobode- k: | | | | | 4 |
| Krit. Roman.- Ro: | | | | | 1,4130 |

Oznake korišćene u tabeli 4 imaju sledeće značenje:

- i – redni broj intervala,
- sv_{interv} – srednja vrednost intervala (mč),
- F – funkcija kumulativne raspodele verovatnoće (funkcija nepouzdanosti),
- F_{tw} – aproksimativna Vejbulova (teorijska) funkcija kumulativne raspodele verovatnoće,
- ΔF_{tw} = |F - F_{tw}| – apsolutna vrednost razlike empirijske i teorijske kumulativne raspodele,
- χ² = $\frac{|F - F_{tw}|^2}{F_{tw}}$ – hi-kvadrat vrednost za jedan interval i,
- k = z-r-1 – broj stepeni slobode; z – broj intervala; r – broj parametara teorijske raspodele,
- Ro = $\frac{|Suma(\chi^2) - k|}{\sqrt{2k}}$ – uporedna vrednost za test Romanovskog.

Na slici 5 dat je grafički prikaz odstupanja Vejbulove aproksimativne raspodele od empirijske raspodele.



Slika 5 – Grafički prikaz odstupanja Vejbulove aproksimativne raspodele od empirijske raspodele

Test Kolmogorov–Smirnova. Za usvojeni nivo rizika $\alpha = 0,2$ i veličinu uzorka $N = n = 92$ tablična vrednost za $d_\alpha = D_{\text{doz}} = \frac{1,07}{\sqrt{N}} = 0,1116$.

Prema tabeli 5 najveća razlika između teorijske raspodele (F_{tw}) i procenjenih vrednosti (F) iznosi $\text{Max}(\Delta F_{\text{tw}}) = D_n = 0,0278$.

Kako je $D_n < D_{\text{doz}}$, aproksimativna teorijska Vejbulova raspodela zadovoljava test Kolmogorov–Smirnova.

Test Pirsona. Za usvojeni nivo značajnosti $\alpha = 0,05$ i broj stepeni slobode $k = 4$, tablična vrednost za $\text{Suma}(\chi^2)$ je 9,488. Prema tabeli 4 izračunata vrednost za $\text{Suma}(\chi^2)$ je 0,0033.

Kako je izračunata vrednost za $\text{Suma}(\chi^2) = 0,0033$ manja od tablične vrednosti za $\text{Suma}(\chi^2) = 9,488$, aproksimativna teorijska Vejbulova raspodela zadovoljava test Pirsona.

Test Romanovskog. Kako je izračunata vrednost za test Romanovskog $R_0 = 1,4130$ manja od 3, aproksimativna teorijska Vejbulova raspodela zadovoljava test Romanovskog.

Aproksimacija empirijske raspodele teorijskom eksponencijalnom raspodelom

Iz podataka datih u tabeli 1 izračunava se parametar eksponencijalne raspodele: $\lambda_e = 0,0025$.

Sa poznatom vrednošću parametra λ_e izračunavaju se vrednosti aproksimativne teorijske eksponencijalne raspodele:

$$F_{\text{te}} = [0,2464 \ 0,4500 \ 0,5986 \ 0,7071 \ 0,7862 \ 0,8440 \ 0,8861].$$

S ciljem testiranja hipoteze o aproksimaciji empirijske raspodele teorijskom eksponencijalnom raspodelom oformljena je tabela 5. Testiranje hipoteze vrši se testovima Kolmogorov–Smirnova, Pirsona (χ^2 – „hi-kvadrat“) i Romanovskog.

Tabela 5

Izračunate vrednosti veličina za testiranje eksponencijalne raspodele

| i | SV _{interv} | F | F _{te} | ΔF_{te} | χ^2 |
|---|----------------------|--------|-----------------|-----------------|---------------|
| 1 | 115,1 | 0,0380 | 0,2464 | 0,2083 | 0,1762 |
| 2 | 243,2 | 0,2120 | 0,4500 | 0,2381 | 0,1259 |
| 3 | 371,4 | 0,4891 | 0,5986 | 0,1095 | 0,0200 |
| 4 | 499,5 | 0,7120 | 0,7071 | 0,0049 | 0,0000 |
| 5 | 627,6 | 0,8478 | 0,7862 | 0,0616 | 0,0048 |
| 6 | 755,8 | 0,9348 | 0,8440 | 0,0908 | 0,0098 |
| 7 | 883,9 | 0,9837 | 0,8861 | 0,0976 | 0,0107 |
| Max(ΔF_{te}): | | | | | 0,2381 |
| Suma (χ^2): | | | | | 0,3475 |
| Step. slobode – k: | | | | | 5 |
| Krit. Roman. – Ro: | | | | | 1,4713 |

Oznake korišćene u tabeli 5 imaju sledeće značenje:

– F_{te} – aproksimativna eksponencijalna (teorijska) funkcija kumulativne raspodele verovatnoće,

– $\Delta F_{te} = |F - F_{te}|$ – apsolutna vrednost razlike empirijske i teorijske kumulativne raspodele,

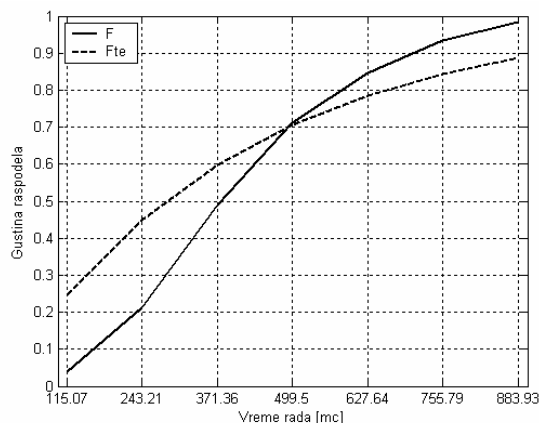
– $\chi^2 = \frac{|F - F_{te}|^2}{F_{te}}$ – hi-kvadrat vrednost za jedan interval i,

– k = z-r-1 – broj stepeni slobode; z – broj intervala; r – broj parametara teorijske raspodele,

– Ro = $\frac{|Suma(\chi^2) - k|}{\sqrt{2k}}$ – uporedna vrednost za test Romanovskog,

– ostale oznake imaju isto značenje kao u tabeli 4.

Na slici 6 dat je grafički prikaz odstupanja eksponencijalne aproksimativne raspodele od empirijske raspodele.



Slika 6 – Grafički prikaz odstupanja eksponencijalne aproksimativne raspodele od empirijske raspodele

Test Kolmogorov–Smirnova. Za usvojeni nivo rizika $\alpha = 0,2$ i veličinu uzorka $N = n = 92$ tablična vrednost za $d_\alpha = D_{doz} = \frac{1,07}{\sqrt{N}} = 0,1116$.

Prema tabeli 6 najveća razlika između teorijske raspodele (F_{te}) i procenjenih vrednosti (F) iznosi $\text{Max}(\Delta F_{te}) = D_n = 0,2381$.

Kako je $D_n > D_{doz}$, aproksimativna teorijska eksponencijalna raspodela NE ZADOVOLJAVA test Kolmogorov–Smirnova, odnosno empirijska raspodela se prema ovom testu ne može aproksimirati sa eksponencijalnom raspodelom.

Test Pirsona. Za usvojeni nivo značajnosti $\alpha = 0,05$ i broj stepeni slobode $k = 5$, tablična vrednost za $\text{Suma}(\chi^2)$ je 11,070. Prema tabeli 5 izračunata vrednost za $\text{Suma}(\chi^2)$ je 0,3475. Kako je izračunata vrednost za $\text{Suma}(\chi^2) = 0,3475$ manja od tablične vrednosti za $\text{Suma}(\chi^2) = 11,070$, aproksimativna eksponencijalna teorijska raspodela zadovoljava test Pirsona.

Test Romanovskog. Kako je izračunata vrednost za test Romanovskog $R_0 = 1,4713$ manja od 3, aproksimativna teorijska eksponencijalna raspodela zadovoljava test Romanovskog.

Aproksimacija empirijske raspodele teorijskom Rejljevom raspodelom

Iz podataka datih u tabeli 1 izračunava se parametar Rejljeve raspodele: $\sigma_r = 318,1888$.

Sa poznatom vrednošću parametra σ_r izračunavaju se vrednosti aproksimativne teorijske Rejljeve raspodele:

$$F_{tr} = [0,0633 \ 0,2533 \ 0,4939 \ 0,7083 \ 0,8571 \ 0,9405 \ 0,9789].$$

S ciljem testiranja hipoteze o aproksimaciji empirijske raspodele Rejljevom raspodelom oformljena je tabela 6. Testiranje hipoteze vrši se testovima Kolmogorov–Smirnova, Pirsona (χ^2 – „hi-kvadrat“) i Romanovskog.

Tabela 6

Izračunate vrednosti veličina za testiranje Rejljeve raspodele

| i | SV _{interv} | F | F _{tr} | ΔF_{tr} | χ^2 |
|---|----------------------|--------|-----------------|--|---------------|
| 1 | 115,1 | 0,0380 | 0,0633 | 0,0253 | 0,0101 |
| 2 | 243,2 | 0,2120 | 0,2533 | 0,0414 | 0,0068 |
| 3 | 371,4 | 0,4891 | 0,4939 | 0,0048 | 0,0000 |
| 4 | 499,5 | 0,7120 | 0,7083 | 0,0036 | 0,0000 |
| 5 | 627,6 | 0,8478 | 0,8571 | 0,0092 | 0,0001 |
| 6 | 755,8 | 0,9348 | 0,9405 | 0,0057 | 0,0000 |
| 7 | 883,9 | 0,9837 | 0,9789 | 0,0048 | 0,0000 |
| | | | | Max (ΔF_{tr}): | 0,0414 |
| | | | | Suma (χ^2): | 0,0171 |
| | | | | Step. slobode-k: | 5 |
| | | | | Krit. Roman.-Ro: | 1,5757 |

Oznake korišćene u tabeli 6 imaju sledeće značenje:

– F_{tr} – aproksimativna Rejljeva (teorijska) funkcija kumulativne raspodele verovatnoće,

– $\Delta F_{tr} = |F - F_{tr}|$ – apsolutna vrednost razlike empirijske i teorijske kumulativne raspodele,

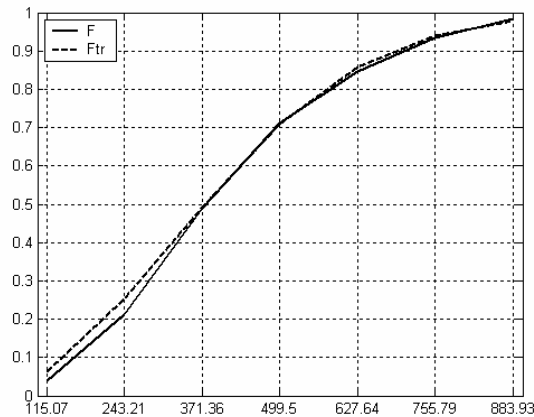
– $\chi^2 = \frac{|F - F_{tr}|^2}{F_{tr}}$ – hi-kvadrat vrednost za jedan interval i,

– k = z-r-1 – broj stepeni slobode; z – broj intervala; r – broj parametara teorijske raspodele,

– Ro = $\frac{|Suma(\chi^2) - k|}{\sqrt{2k}}$ – uporedna vrednost za test Romanovskog,

– ostale oznake imaju isto značenje kao u tabeli 4.

Na slici 7 je dat grafički prikaz odstupanja Rejljeve aproksimativne raspodele od empirijske raspodele.



Slika 7 – Grafički prikaz odstupanja Rejljeve aproksimativne raspodele od empirijske raspodele

Test Kolmogorov–Smirnova. Za usvojeni nivo rizika $\alpha = 0,2$ i veličinu uzorka $N = n = 92$ tablična vrednost za $d_\alpha = D_{\text{doz}} = \frac{1,07}{\sqrt{N}} = 0,1116$. Prema ta-

beli 6 najveća razlika između teorijske raspodele (F_{tr}) i procenjenih vrednosti (F) iznosi $\text{Max}(\Delta F_{tr}) = D_n = 0,0414$. Kako je $D_n < D_{\text{doz}}$, aproksimativna teorijska Rejljeva raspodela zadovoljava test Kolmogorov–Smirnova.

Test Pirsona. Za usvojeni nivo značajnosti $\alpha = 0,05$ i broj stepeni slobode $k = 5$, tablična vrednost za Suma (χ^2) je 11,070. Prema tabeli 6 izračunata vrednost za Suma (χ^2) je 0,0171. Kako je izračunata vrednost za Suma (χ^2) = 0,0171 manja od tablične vrednosti za Suma (χ^2) = 11,070, aproksimativna teorijska Rejljeva raspodela zadovoljava test Pirsona.

Test Romanovskog. Kako je izračunata vrednost za test Romanovskog $R_0 = 1,5757$ manja od 3, aproksimativna teorijska Rejljeva raspodela zadovoljava test Romanovskog.

Aproksimacija empirijske raspodele teorijskom normalnom raspodelom

Iz podataka datih u tabeli 1 izračunavaju se parametri matematičkog očekivanja (μ_n) i standardnog odstupanja (σ_n) normalne raspodele: $\mu_n = 406,8152$; $\sigma_n = 193,3807$.

Sa poznatim vrednostima parametara matematičkog očekivanja (μ_n) i standardnog odstupanja (σ_n) izračunavaju se vrednosti aproksimativne teorijske normalne raspodele:

$$F_{in} = [0,0657 \ 0,1988 \ 0,4273 \ 0,6841 \ 0,8733 \ 0,9644 \ 0,9932].$$

S ciljem testiranja hipoteze o aproksimaciji empirijske raspodele teorijskom normalnom raspodelom oformljena je tabela 7. Testiranje hipoteze vrši se testovima Kolmogorov–Smirnova, Pirsona (χ^2 – „hi-kvadrat“) i Romanovskog.

Tabela 7

Izračunate vrednosti veličina za testiranje normalne raspodele

| i | SV _{interv} | F | F _{tn} | ΔF_{tn} | χ^2 |
|---|----------------------|--------|-----------------|---|---------------|
| 1 | 115,1 | 0,0380 | 0,0657 | 0,0277 | 0,0116 |
| 2 | 243,2 | 0,2120 | 0,1988 | 0,0132 | 0,0009 |
| 3 | 371,4 | 0,4891 | 0,4273 | 0,0619 | 0,0090 |
| 4 | 499,5 | 0,7120 | 0,6841 | 0,0278 | 0,0011 |
| 5 | 627,6 | 0,8478 | 0,8733 | 0,0254 | 0,0007 |
| 6 | 755,8 | 0,9348 | 0,9644 | 0,0297 | 0,0009 |
| 7 | 883,9 | 0,9837 | 0,9932 | 0,0095 | 0,0001 |
| | | | | Max(ΔF_{tn}): | 0,0619 |
| | | | | Suma(χ^2): | 0,0243 |
| | | | | Step. slobode-k: | 4 |
| | | | | Krit. Roman.-Ro: | 1,4056 |

Oznake korišćene u tabeli 7 imaju sledeće značenje:

– F_{tn} – aproksimativna normalna (teorijska) funkcija kumulativne raspodele verovatnoće,

– $\Delta F_{tn} = |F - F_{tn}|$ – apsolutna vrednost razlike empirijske i teorijske kumulativne raspodele,

– $\chi^2 = \frac{|F - F_{tn}|^2}{F_{tn}}$ – hi-kvadrat vrednost za jedan interval i,

– k = z-r-1 – broj stepeni slobode; z – broj intervala; r – broj parametara teorijske raspodele,

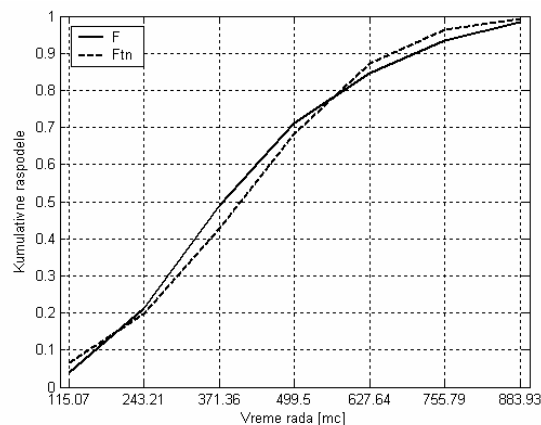
– Ro = $\frac{|Suma(\chi^2) - k|}{\sqrt{2k}}$ – uporedna vrednost za test Romanovskog,

– i – redni broj intervala,

– sv_{interv} – srednja vrednost intervala (mč),

– F – funkcija kumulativne raspodele verovatnoće (funkcija nepouzdanosti),

Na slici 8 dat je grafički prikaz odstupanja normalne aproksimativne raspodele od empirijske raspodele.



Slika 8 – Grafički prikaz odstupanja normalne aproksimativne raspodele od empirijske raspodele

Test Kolmogorov–Smirnova. Za usvojeni nivo rizika $\alpha = 0,2$ i veličinu uzorka $N = n = 92$ tablična vrednost za $d_\alpha = D_{doz} = \frac{1,07}{\sqrt{N}} = 0,1116$.

Prema tabeli 7 najveća razlika između teorijske raspodele (F_{tn}) i procenjenih vrednosti (F) iznosi $\text{Max}(\Delta F_{tn}) = D_n = 0,0619$. Kako je $D_n < D_{doz}$, aproksimativna teorijska normalna raspodela zadovoljava test Kolmogorov–Smirnova, odnosno empirijska raspodela se prema ovom testu se može aproksimirati sa normalnom raspodelom.

Test Pirsona. Za usvojeni nivo značajnosti $\alpha = 0,05$ i broj stepeni slobode $k = 4$, tablična vrednost za

Suma (χ^2) je 9,488. Prema tabeli 7 izračunata vrednost za Suma (χ^2) je 0,0243. Kako je izračunata vrednost za Suma (χ^2) = 0,0243 manja od tablične vrednosti za Suma (χ^2) = 9,488, aproksimativna teorijska normalna raspodela zadovoljava test Pirsona.

Test Romanovskog. Kako je izračunata vrednost za test Romanovskog $R_0 = 1,4056$ manja od 3, aproksimativna teorijska normalna raspodela zadovoljava test Romanovskog.

Komentari dobijenih rezultata i izbor modela pouzdanosti

Pri neparametarskom testiranju hipotetičkih modela raspodele dobijaju se kvantitativni pokazatelji odstupanja teorijskih modela od empirijske raspodele. Prema literaturi [1], izračunata odstupanja mogu se iskori-

stiti ne samo za potvrdu da li teorijski model zadovoljava određeni test za usvojeni nivo značajnosti, već i da se usvoji onaj teorijski model kod koga su sva ili većina odstupanja najmanja. U tabeli 8 dat je uporedni prikaz karakterističnih veličina za testove Kolmogorov–Smirnova, Pirsona i Romanovskog za sva četiri korišćena teorijska aproksimativna modela pouzdanosti motora V46–6.

Tabela 8

Uporedni prikaz kvantitativnih pokazatelja odstupanja teorijskih modela raspodela od empirijske raspodele motora V46–6

| Raspodela \ Test | Test Kolmogorov–Smirnova: D_n | Test Pirsona: χ^2 | Test Romanovskog: R_0 |
|------------------|---------------------------------|------------------------|-------------------------|
| Vejbulova | 0,0278 | 0,0033 | 1,4130 |
| eksponencijalna | 0,2381 | 0,3475 | 1,4713 |
| Rejljeva | 0,0414 | 0,0171 | 1,5757 |
| normalna | 0,0619 | 0,0243 | 1,4056 |

Pri testiranju eksponencijalne raspodele testom Kolmogorov–Smirnova zaključeno je da ova raspodela ne zadovoljava navedeni test, pa će se shodno tome isključiti kao kandidat za aproksimativni model.

Iz tabele 8 se vidi da su odstupanja D_n prema testu Kolmogorov–Smirnova i vrednost veličine χ^2 za test Pirsona ubedljivo najmanji za Vejbulovu raspodelu. Uporedna vrednost za test Romanovskog R_0 neznatno je niža za normalnu raspodelu u odnosu na Vejbulovu.

Kako su kvantitativni pokazatelji odstupanja D_n i χ^2 za dva od ukupno tri primenjena testa ubedljivo najmanji za Vejbulovu raspodelu, za aproksimativni model pouzdanosti motora V46–6 usvojena je Vejbulova dvoparameterska raspodela sa parametrom razmere $\eta_w = 459,8652$ i parametrom oblika $\beta_w = 2,2461$, pa je izraz za funkciju pouzdanosti motora V46–6:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta_w}\right)^{\beta_w}} = e^{-\left(\frac{t}{459,8652}\right)^{2,2461}}$$

Pri izračunavanju funkcije pouzdanosti prema navedenom izrazu, promenljiva t se izražava u motočasovima rada.

Određivanje periodičnosti održavanja motora V46–6 prema kriterijumu maksimalne gotovosti

Za vozila specijalne namene najprikladnija je primena kriterijuma optimizacije po modelu maksimalne gotovosti [4].

Za primenu modela održavanja na bazi gotovosti potrebno je poznavanje zakona raspodele pouzdanosti i vremena u radu i otkazu.

Vrednost eksploatacione gotovosti može se odrediti korišćenjem izraza [5]:

$$G(t) = \frac{t_r + t_{cr}}{t_r + t_{cr} + t_p + \frac{F(t)}{R(t)} \cdot t_k}$$

gde su:

- t_r – vreme u radu,
- t_{cr} – vreme čekanja na rad u ispravnom stanju,
- t_p – vreme preventivnog održavanja,
- t_k – vreme korektivnog održavanja,
- $R(t)$ – funkcija pouzdanosti,
- $F(t)$ – funkcija nepouzdanosti.

Variranjem periodičnosti vremena između preventivnih održavanja dobija se funkcionalna zavisnost gotovosti od periodičnosti održavanja, na osnovu koje se može odrediti periodičnost održavanja koja daje maksimalnu gotovost. Rezultati određivanja gotovosti, za različite periodičnosti održavanja, date su u tabeli 9.

Tabela 9

Rezultati određivanja gotovosti za različite periodičnosti održavanja motora V46–6

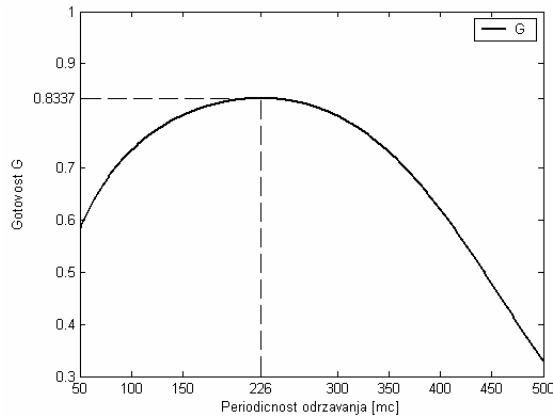
| | | | | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Periodičnost održavanja [mč] | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 |
| Vreme rada t_r [mč] | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 |
| Vreme preventivnog održavanja t_p [mč] | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 |
| Funkcija nepouzdanosti $F(t)$ | 0,0068 | 0,0320 | 0,0776 | 0,1428 | 0,2246 | 0,3183 | 0,4182 | 0,5186 | 0,6142 | 0,7008 |
| Funkcija pouzdanosti $R(t)$ | 0,9932 | 0,9680 | 0,9224 | 0,8572 | 0,7754 | 0,6817 | 0,5818 | 0,4814 | 0,3858 | 0,2992 |

| | | | | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|-----------|
| Broj korektivnih održavanja između dva preventivna n_k | 0,0069 | 0,0330 | 0,0841 | 0,1666 | 0,2897 | 0,4668 | 0,7188 | 1,0773 | 1,5921 | 2,3426 |
| Vreme korektivnog održavanja t_k [mč] | 6,184 | 29,715 | 75,697 | 149,949 | 260,693 | 420,160 | 646,914 | 969,552 | 1.432,867 | 2.108,383 |
| Vreme čekanja na rad u ispravnom stanju t_{cr} [mč] | 200 | 400 | 600 | 800 | 1.000 | 1.200 | 1.400 | 1.600 | 1.800 | 2.000 |
| Gotovost $G(t)$ | 0,5813 | 0,7342 | 0,8010 | 0,8299 | 0,8303 | 0,7995 | 0,7307 | 0,6203 | 0,4776 | 0,3281 |

Iz tabele 9 se vidi da je maksimalna gotovost za t_r u intervalu od 200 do 300 mč.

Diskretizacijom intervala periodičnosti održavanja (vremena rada t_r) od 50 do 500 mč sa korakom 1, izračunava se maksimalna vrednost gotovosti i periodičnost održavanja za maksimalnu gotovost.

Na slici 9 je dat grafički prikaz zavisnosti gotovosti od periodičnosti preventivnog održavanja motora V46–6.



Slika 9 – Grafički prikaz zavisnosti gotovosti od periodičnosti preventivnog održavanja motora V-46–6

Kao rezultat diskretizacije i na osnovu slike 9 može se zaključiti da se maksimalna gotovost motora ($G_{max}=0,8337$) dobija za periodičnost održavanja $t_r = 226$ mč, jer za tu periodičnost održavanja funkcija $G(t_r)$ dostiže svoj maksimum, pa se može smatrati da je to optimalna periodičnost održavanja motora za kriterijum maksimalne gotovosti.

Određivanje periodičnosti održavanja motora V46–6 prema kriterijumu minimalnih troškova

Optimizacija sistema održavanja može se vršiti i na osnovu modela koji kao kriterijum optimizacije koristi minimalne troškove održavanja. Za primenu ovog modela potrebno je poznavati osnovne pokazatelje pouzdanosti sistema održavanja. Ovim modelom se određuje optimalni interval periodičnosti sprovođenja postupaka preventivnog održavanja motora V46–6 koji daje najmanje troškove uz obezbeđenje zahtevane pouzdanosti i gotovosti motora.

Strategija preventivnog održavanja i preventivnih zamena se primenjuje kada je intenzitet otkaza rastuća funkcija u vremenu i kada su troškovi korektivnog održavanja veći od troškova preventivnog održavanja. Tada je moguće odrediti optimalnu periodičnost preventivnog održavanja.

Troškovi održavanja mogu se izraziti u obliku [5]:

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

gde su:

- C(t) – ukupni specifični troškovi održavanja,
- C_k – troškovi korektivnog održavanja,
- C_p – troškovi preventivnog održavanja,
- R(t) – funkcija pouzdanosti,
- T – vreme rada motora V46–6 do otkaza.

Primenom navedenog izraza za troškove održavanja, za različite periode preventivnog održavanja motora V46–6, dobijene su vrednosti troškova održavanja, koje su prikazane u tabeli 10.

Tabela 10

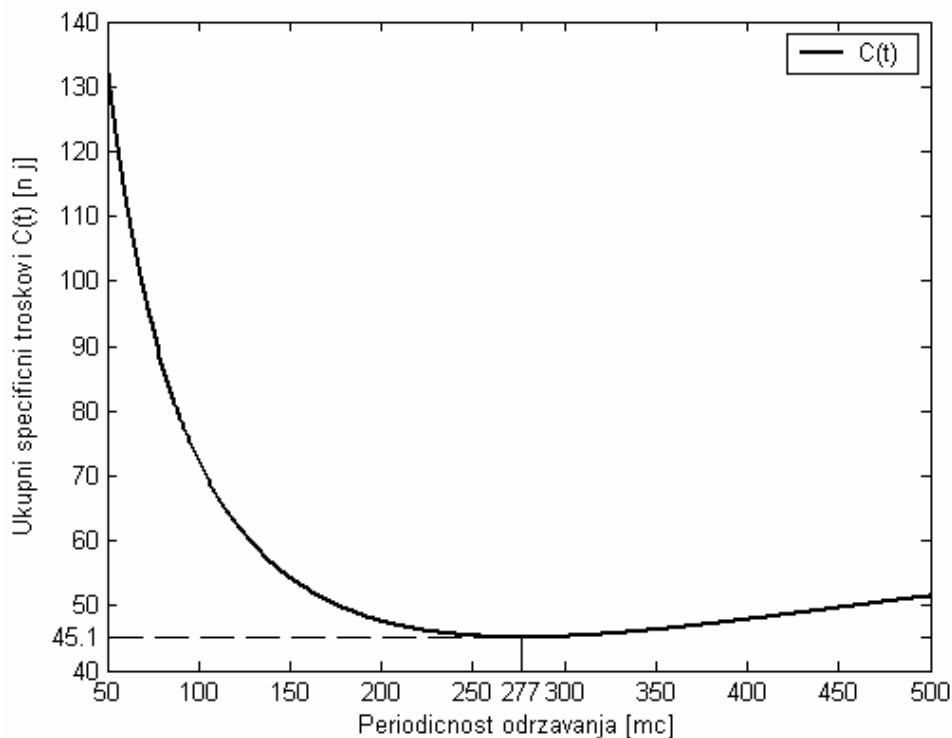
Rezultati određivanja troškova održavanja za različite periodičnosti održavanja motora V46–6

| Periodičnost održavanja [mč] | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 |
|--|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Troškovi korektivnog održavanja C _k [n.] | 24.000 | 24.000 | 24.000 | 24.000 | 24.000 | 24.000 | 24.000 | 24.000 | 24.000 | 24.000 |
| Troškovi preventivnog održavanja C _p [n.] | 6.600 | 6.600 | 6.600 | 6.600 | 6.600 | 6.600 | 6.600 | 6.600 | 6.600 | 6.600 |
| Funkcija pouzdanosti R(t) | 0,9932 | 0,9680 | 0,9224 | 0,8572 | 0,7754 | 0,6817 | 0,5818 | 0,4814 | 0,3858 | 0,2992 |
| $\int_0^T R(t) dt$ | 49,89 | 99,01 | 146,36 | 190,92 | 231,80 | 268,26 | 299,87 | 326,44 | 348,09 | 365,17 |
| Ukupni specifični troškovi C(t) [n.] | 134,658 | 72,278 | 54,319 | 47,585 | 45,333 | 45,246 | 46,276 | 47,861 | 49,664 | 51,468 |

Napomena: oznaka „n j“ u tabeli 10 ima značenje „novčana jedinica“. Iz tabele 10 vidi se da se minimalni troškovi održavanja postižu za periodičnost održavanja od 250 do 350 mč.

Diskretizacijom intervala periodičnosti održavanja od 50 do 500 sa korakom 1, izračunavaju se minimalni ukupni specifični troškovi i periodičnost održavanja za minimalne ukupne specifične troškove.

Na slici 10 je dat grafički prikaz zavisnosti ukupnih specifičnih troškova od periodičnosti preventivnog održavanja motora V46–6.



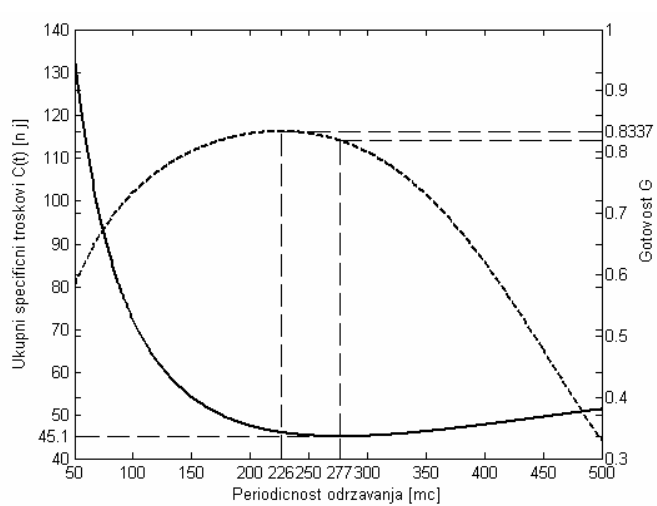
Slika 10 – Grafički prikaz zavisnosti ukupnih specifičnih troškova od periodičnosti preventivnog održavanja motora V46–6

Kao rezultat diskretizacije i na osnovu slike 10 može se zaključiti da se najmanji troškovi ($C_{\min} = 45,0999$ [n j]) dobijaju za periodičnost održavanja od $t_r = 277$ mč, jer za tu periodičnost održavanja funkcija $C(t_r)$ dostiže svoj minimum, pa se može smatrati da je to optimalna periodičnost održavanja motora za kriterijum minimalnih troškova.

Kompromisno rešenje sistema održavanja između maksimalne gotovosti i minimalnih troškova održavanja

Ne postoji matematički model koji povezuje kriterijum gotovosti i kriterijum troškova održavanja pomoću kojeg bi se odredilo kompromisno rešenje. Kompromisno rešenje se usvaja na osnovu datih kriterijuma i ograničenja o kojima se mora voditi računa prilikom usvajanja optimalnog rešenja.

Na slici 11 dat je grafički prikaz iznalaženja kompromisnog rešenja između maksimalne gotovosti i minimalnih troškova.



Slika 11 – Grafički prikaz iznalaženja kompromisnog rešenja između maksimalne gotovosti i minimalnih troškova

Sa slike 11 se vidi da se optimalni interval periodičnosti održavanja motora V46–6 sa aspekta maksimalne gotovosti i minimalnih troškova održavanja nalazi između 226 i 277 mč rada.

Određivanje optimalnog perioda preventivnog održavanja motora V46–6 primenom višekriterijumske optimizacije

Kako se optimalna periodičnost sprovođenja postupka preventivnog održavanja određena prema kriterijumu maksimalne gotovosti i prema kriterijumu minimalnih troškova održavanja razlikuju, neophodno je primeniti višekriterijumsku analizu i odrediti vrednost tražene optimalne peri-

odličnosti sprovođenja postupaka preventivnog održavanja, uzimajući u obzir i jedan i drugi kriterijum optimalnosti. Za rešavanje ovog zadatka primeniće se metoda težinskih koeficijenata [6].

Priroda kriterijuma optimalnosti može da bude benefitna i troškovna.

Skup alternativa i predstavlja se skupom indeksa alternativa. Problem se predstavlja matricom: $L = [l_{ik}]$. Sa l_{ik} je označena vrednost kriterijuma optimalnosti k za alternativu i :

- $l_{i1} = G_i$ – vrednost kriterijuma optimalnosti gotovosti za alternativu i ,
- $l_{i2} = C(t_i)$ – vrednost kriterijuma optimalnosti troškova za alternativu i .

Kao i ranije, razmatraćemo period vremena rada t_r od 50 do 500 [mč] u kojem oba kriterijuma dostižu lokalne ekstreme.

Za određivanje optimalnog perioda preventivnog održavanja, s obzirom na kriterijum maksimalne gotovosti (G) i minimalnih troškova održavanja ($C(t)$), interval od 50 do 500 [mč] diskretizovaćemo sa korakom 1.

U opštem slučaju, kriterijumi optimalnosti su različite prirode, imaju različite vrednosti i različite jedinice mere. To znači da vrednosti kriterijuma optimalnosti, za jednu alternativu i nisu uporedivi. Iz tog razloga potrebno je sprovesti proceduru normalizacije kojom se sve vrednosti l_{ik} preslikavaju u interval $[0, 1]$.

Pri korišćenju vektorske normalizacije problem odlučivanja može se predstaviti matricom: $L = [l_{ikn}]$, gde je l_{ikn} – normalizovana vrednost kriterijuma optimalnosti k za alternativu i .

$$l_{i1n} = \frac{l_{i1}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{451} (l_{i1})^2}} - \text{normalizovana vrednost kriterijuma optimalnosti}$$

gotovosti za alternativu i (normalizacija je izvršena korišćenjem izraza za vektorsku normalizaciju i uz primenu benefitnog kriterijuma optimalnosti),

$$l_{i2n} = \frac{\frac{1}{l_{i2}}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{451} \left(\frac{1}{l_{i2}}\right)^2}} - \text{normalizovana vrednost kriterijuma optimalnosti}$$

troškova za alternativu i (normalizacija je izvršena korišćenjem izraza za vektorsku normalizaciju i uz primenu troškovnog kriterijuma optimalnosti).

Radi izbora najbolje, svakoj razmatranoj alternativu pridružuje se određena vrednost:

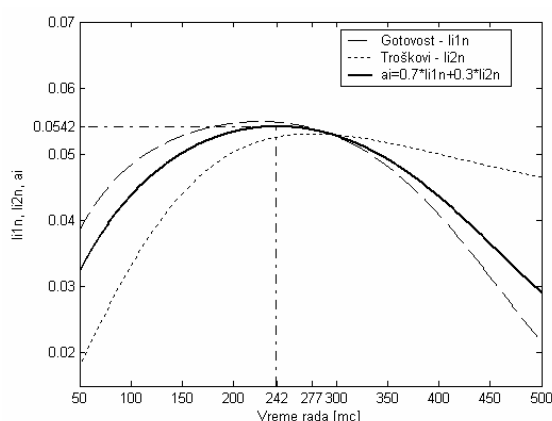
$$a_i = \frac{\sum_{k=1}^2 w_k \cdot l_{ikn}}{\sum_{k=1}^2 w_k}, \text{ gde su } w_k - \text{težinski koeficijenti [6, 7, 8].}$$

S obzirom na namenu motora V46–6, može se smatrati da je kriterijum optimalnosti gotovosti važniji od kriterijuma optimalnosti troškova i shodno tome usvojiti $w_1 = 0,7$ i $w_2 = 0,3$.

Najbolja alternativa i je ona za koju a_i ima najveću vrednost.

Na slici 12 je dat grafički prikaz iznalaženja najbolje alternative.

Kao rezultat diskretizacije i na osnovu slike 12 zaključuje se da se maksimalna vrednost $a_{imax} = 0,0542$ dobija za vreme preventivnog održavanja (vreme u radu) $t_r = 242$ mč.



Slika 12 – Grafički prikaz iznalaženja najbolje alternative

Optimalni period preventivnog održavanja motora V46–6, s obzirom na kriterijum maksimalne gotovosti (kao važniji, sa težinskim koeficijentom 0,7) i kriterijum minimalnih troškova održavanja (kao manje važan, sa težinskim koeficijentom 0,3) je 242 mč.

Zaključak

Optimalna periodičnost sprovođenja postupaka preventivnog održavanja, određena prema kriterijumu maksimalne gotovosti i prema kriterijumu minimalnih troškova održavanja se razlikuju. Zato je neophodno primeniti metode višekriterijumske analize i odrediti vrednost tražene optimalne periodičnosti sprovođenja postupaka preventivnog održavanja, uzimajući u obzir oba kriterijuma optimizacije.

Vrednost optimalne periodičnosti sprovođenja postupaka preventivnog održavanja motora određena prema kriterijumu maksimalne gotovosti vozila je 226 mč, a prema kriterijumu minimalnih troškova održavanja 277 mč. Primenom višekriterijumske analize dobijena je vrednost tražene optimalne periodičnosti sprovođenja postupaka preventivnog održavanja, uzimajući u obzir i jedan i drugi kriterijum optimizacije, i iznosi 242 mč rada.

Prikazana metodologija višekriterijumskog odlučivanja može se primeniti za dobijanje pouzdane vrednosti periodičnosti sprovođenja postupaka preventivnog održavanja motora borbenog sredstva, ali i za druge njegove delove. Pri tome, potrebno je raspolagati podacima, do kojih se dolazi praćenjem motora tokom njegove eksploatacije, na osnovu kojih se mogu odrediti pokazatelji njegove pouzdanosti i karakteristike sistema njegovog održavanja.

Literatura

- [1] Ćatić, D., *Razvoj i primena metoda teorije pouzdanosti*, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2005.
- [2] Ivanović, G., Stanivuković, D., *Pouzdanost – analiza i projektovanje*, Tehnička uprava SSNO, 1988.
- [3] „Statistics Toolbox For Use With MATLAB“, The MathWorks, 1993–2002.
- [4] Minić, S., Arsenić, Ž., *Modeli održavanja tehničkih sistema*, Vojnoizdavački zavod, Beograd, 1998.
- [5] Krstić, B., *Eksploatacija motornih vozila i motora*, Mašinski fakultet, Kragujevac, 1997.
- [6] Opcirović, S., *Višekriterijumska optimizacija*, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Naučna knjiga, Beograd, 1986.
- [7] Perić, R. S., *Monitoring stanja kroz testove analize ulja*, *Vojnotehnički glasnik*, vol. 58, broj 4, pp. 102-133, ISSN 0042-8469, UDC 623+355/359, Beograd 2010.
- [8] Guberinić, R., Milojević, I., *Određivanje funkcije pouzdanosti motornih vozila kao složenog tehničkog sistema*, *Vojnotehnički glasnik (Military Technical Courier)*, vol. 57, broj 2, pp. 31-45, ISSN 0042-8469, UDC 623+355/359, Beograd 2009.

DETERMINING THE OPTIMAL PERIODICITY OF THE V46-6 ENGINE PREVENTIVE MAINTENANCE

FIELD: Mechanical engineering

Summary:

The application of preventive maintenance contributes significantly to providing the required level of readiness of complex technical systems used in organizations of special purpose. The basic requirement in applying this model of maintenance is to determine the optimal periodicity that should satisfy some mutually conflicting criteria. This paper presents a methodology for determining the periodicity of the preventive maintenance of V46-6 engines on the basis of collecting and processing statistical data about their malfunctions. This problem can be solved if all important requests and limitations are determined. The basis of the presented methodology is the reliability parameters of the analyzed engine, obtained by observing the engine behavior, from the aspect of occurrence of failure in real service conditions, and also its maintenance costs.

Introduction

By applying a preventive maintenance model, the optimization of the maintenance system is reduced to finding the answer to the question whether it is useful to apply preventive maintenance as a maintenance model and, if it is, to determine after how long operation time the procedures of preventive maintenance should be applied.

For a given engine and given service conditions and maintenance that allow preferences to be known in advance, only one solution of maintenance strategy is optimal. In that case, the most favorable values of reliability, readiness, costs of service and maintenance are achieved and the total costs of life cycle are reduced. The task of the engine maintenance system optimization is to find that optimum.

Determining the law of distribution of operation time until the V46-6 engine failure

The procedure for determining the law of distribution of operation time until failure, on the basis of empirical data, is executed in three steps. The first step is to estimate the indicators of reliability, i.e. to determine the characteristics of the statistic set and to evaluate the complete characteristics of the random variable. The second step, on the basis of the values obtained in the first step, is to determine a theoretical model of distribution which could be used to approximate the empiric distribution. The third step is to confirm the accordance of the adopted theoretical model of distribution with the empiric distribution.

Determining the periodicity of the V46-6 engine maintenance according to the criterion of maximum readiness

For special purpose vehicles, the most suitable is to apply the optimization criterion according to the model of maximum readiness.

To apply the maintenance model based on readiness, it is necessary to know the law of distribution of reliability, as well as of operation and failure time.

By varying the periodicity of time intervals between preventive maintenances, a functional dependence of the readiness on the maintenance periodicity can be obtained and, on this basis, the maintenance periodicity that gives the maximum readiness could be determined.

Determining the periodicity of the V46-6 engine maintenance according to the criterion of minimum costs

The maintenance system optimization can be done also on the basis of a model using minimum maintenance costs as an optimization criterion.

To apply this model, it is necessary to know the basic indicators of the maintenance system reliability. This model determines the optimal periodicity interval for executing the procedures of the V46-6 engine preventive maintenance, which gives its minimum costs, along with the requested engine reliability and readiness.

The strategy of preventive maintenance and preventive replacements is used when the failure intensity represents an increasing function of time and when the corrective maintenance costs are higher than the preventive maintenance costs. Then it is possible to determine the optimal periodicity of preventive maintenance.

Compromise solution of the maintenance system between the maximum readiness and the minimum maintenance costs

There is no mathematical model which connects the readiness criterion and the maintenance costs criterion and which could be used to find the compromise solution. The compromise solution is adopted on the basis of given criterions and limitations that must be taken in account when adopting the optimal solution.

Determining the optimal period of the V46-6 engine preventive maintenance using multicriteria optimization

Since the optimal periodicity of the preventive maintenance procedures based on the maximum readiness criterion differs from the one based on the criterion of minimal maintenance costs, it is necessary to apply the multicriteria analysis and to calculate the value of the requested optimal periodicity of preventive maintenance procedures, taking in account both optimization criterions.

Conclusion

The value of optimal periodicity of engine preventive maintenance procedures is 226 mh, calculated using the criterion of the vehicle maximum readiness, and 277 mh calculated using the criterion of minimal maintenance costs. By applying the multicriteria analysis, the value of the requested optimal periodicity of preventive maintenance procedures is calculated, taking in account both optimization criterions, to 242 mh of operation.

The presented methodology of the multicriteria decision could be used to get a reliable value of preventive maintenance procedures periodicity for the combat vehicle engine, but also for its other parts. For this purpose, it is necessary to have available data, obtained by analyzing the engine during its service, which could be used to determine the indicators of its reliability, as well the characteristics of its maintenance system.

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

Datum prijema članka: 12. 10. 2010.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa: 17. 12. 2010.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje: 19. 12. 2010.