

ODRŽAVANJA HIDRAULIČNIH CILINDARA NA TEMELJU DOSTIGNUTE RAZINE EKSPLOATACIJSKE POUZDANOSTI

MAINTENANCE OF HYDRAULIC CYLINDERS BASED ON THE ACHIEVED LEVEL OF EXPLOITATION RELIABILITY

Jakov Batelić¹, Dario Matika², Karlo Griparić³

¹HEP – Proizvodnja, sektor za termoelektrane, pogon TE Plomin, Plomin luka 50, 52234 Plomin

²Hrvatsko vojno učilište „Dr. Franjo Tuđman“, Ilica 256b, 10000 Zagreb

³Karlo Griparić, Sveučilište Jurja Dobrile u Puli, Odjel za tehničke studije, Zagrebačka 30, 52100 Pula

SAŽETAK

U članku se analizira eksploatacijska pouzdanost hidrauličnih cilindara. Do otkaza hidrauličnih cilindara dolazi zbog propuštanja ulja kao posljedice trošenja materijala uz prisutnost tlaka ulja od 90 bara. Prikupljeni su empirijski podaci (statistički uzorak) s ciljem određivanja funkcije gustoće otkaza $f(t)$, funkcije intenziteta otkaza $\lambda(t)$ i očekivanog vremena bezotkaznog rada MTTF. Numerički model izrađen je u programskom alatu Minitab 16. Za prihvaćanje ili odbacivanje hipoteze korišten je Anderson-Darling test.

Ključne riječi: održavanje, pouzdanost, distribucija vjerojatnosti, intenzitet otkaza

ABSTRACT

The article analyzes the exploitation reliability of hydraulic cylinders. Hydraulic cylinders fail due to oil leakage as a result of material wear and tear with 90 bar oil pressure. Empirical data (statistical sample) were collected to determine the failure density function $f(t)$, the hazard function $\lambda(t)$ and the expected value of mean time to failure MTTF. The numerical model was created in the Minitab 16 software tool. The Anderson-Darling test was used to accept or reject the hypothesis.

Keywords: maintenance, reliability, probability distribution, failure rate

1. UVOD

1. INTRODUCTION

Ukupni troškovi održavanja nekog složenog tehničkog sustava mogu se znatno smanjiti ako se odgovarajuća pozornost pravodobno posveti analizi pouzdanosti sustava u tijeku eksploatacije (eksploatacijska pouzdanost) [1]. Općenito, poznavanje funkcije eksploatacijske pouzdanosti [2] omogućuje određivanje podataka bitnih za donošenje odluka o: planiranim budućim zahvatima održavanja, zamjeni ili rekonstrukciji pojedinih sklopova (slabih mjesta), asortimanu i količinama doknadnih dijelova, obliku zahtjeva za ponudu pri nabavi nove opreme, rangiranju pojedinih dijelova i sklopova u odnosu na intenzitet kvarova i očekivanih vremena rada do zastoja, kao i dr. Ono što prethodi izradi kvalitetne statističke analize iz prikupljenih empirijskih podataka su kvantiteta i kvaliteta uzorka [3].

Cilj provedenih istraživanja, čiji se rezultati prezentiraju o ovom članku, bio je usmjeren na dalji razvoj modela preventivnog održavanja po stanju koji se odnosi na kontrolu razine pouzdanosti, kako bi se odgovornoj osobi za održavanje pružio dodatni „alat“ i kako bi ista mogla donijeti vjerodostojnu odluku o zaustavljanju sustava i njegovom održavanju. Takva odluka proizvodi materijalne gubitke i mora biti dobro promišljena i provjerena.

Predmet istraživanja bio je podsustav hidraulike koji sastoji se od tlačne pumpe, ventila, uljovoda, četiri identična cilindra i upravljačkog sustava (distribuirani upravljački sustavi, presostati, termometri i dr.).

Svrha podsustava hidraulike je osigurati tlačenje dviju ploča između kojih su smještene kugle mlina. Podsustav hidraulike radi na način da crpka podigne radni tlak ulja uslijed kojeg cilindri zauzimaju radni položaj. Za vrijeme rada sustava mlina cilindri su non-stop upregnuti radnim tlakom (inače rasterećeni). Tipičan kvar koji se pojavljuje na komponenti hidrauličnog cilindra je propuštanje hidrauličnog ulja na istom. Primjenom modela održavanja po stanju s kontrolom parametara moguće je identificirati propuštanje na temelju učestalijeg uključanja hidraulične tlačne pumpe i istovremenog gubitka ulja u rezervoaru. S obzirom da je u takvim situacijama propagacija nastalog oštećenja u cilindru relativno brza, nositelju održavanja ne preostaje drugo nego zaustaviti sustav i provesti korektivno održavanje što za posljedicu ima i nastanak indirektnih troškova elektrane uslijed nastanka neraspodivnosti elektrane. Upravo radi toga opravdano je na podsustavu hidraulike primijeniti preventivno održavanje s kontrolom razine pouzdanosti.

2. MATEMATIČKI MODEL ANALIZE POUZDANOSTI I ISTRAŽIVAČKA HIPOTEZA

2. MATHEMATICAL MODEL OF RELIABILITY ANALYSIS AND RESEARCH HYPOTHESIS

Općenito se može reći kako je istraživanje pouzdanosti nekog tehničkog sustava izuzetno korisno jer su posljedice neistraživanja pouzdanosti uvijek povezane s materijalnim gubicima. Naime, cijena nepouzdanosti najčešće se manifestira kroz otkaz rada sustava ili uređaja, odnosno kroz izgubljeno vrijeme uslijed nekorištenja sustava uslijed otkaza njegova rada. Što je duži period otkaza rada on predstavlja značajniju stavku u ukupnim troškovima eksploatacije sustava, ali jednako tako potrebno je uzeti u obzir i ostale troškove povezane s vraćanjem sustava u ponovni rad.

Jednako tako *nepouzdanost* može izazvati i psihološke efekte posebno u odnosu na povjerenje potrošača odnosno kupca proizvoda sustava ili uređaja, a najgore je kada takav sustav dobije etiketu „često se kviri“.

Matematički model analize određen je sljedećim funkcijama: $R(t)$ - funkcija pouzdanosti, $\lambda(t)$ - funkcija intenziteta otkaza. Obe funkcije jedinstvene su za svaki sustav ili uređaj, tj. svakoj funkciji pouzdanosti $R_i(t)$ odgovara određena funkcija intenziteta otkaza $\lambda_i(t)$. Kako pouzdanost definira vjerojatnost da će sustav raditi bez otkaza odnosno kao vjerojatnost da će sustav obaviti svoju namijenjenu funkciju u određenom vremenu t onda, analogno prije napisanome, funkcija $F(t)=1 - R(t)$ označava funkciju nepouzdanosti sustava [4]. Važno je naglasiti kako funkcija intenziteta otkaza $\lambda(t)$ pokazuje promjenu intenziteta otkaza u tijeku životnog ciklusa sustava. Jednako tako važna je činjenica da dva sustava ili uređaja mogu imati istu pouzdanost u određenom trenutku $R_1(t)=R_2(t)$, ali im se funkcije intenziteta otkaza mogu razlikovati do tog trenutka vremena $\lambda_1(t) \neq \lambda_2(t)$.

Pouzdanost nekog sustava ili uređaja određuje se na temelju poznavanja funkcije gustoće vjerojatnosti otkaza $f(t)$ prema relaciji (1). Dok očekivano vrijeme bezotkaznog rada MTTF (Main Time to Failure) prema relaciji (2).

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt \quad (1)$$

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (2)$$

Procijenjenu vrijednost očekivanog vremena bezotkaznog rada \widehat{MTTF} (Point estimate to the mean time of failure) određuje se prema relaciji (3):

$$\widehat{MTTF} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n TTF_i \quad (3)$$

gdje su: TTF_i – opaženo vrijeme do otkaza i – tog elementa, n – broj elemenata.

U cilju određivanja teoretske funkcije distribucije vjerojatnosti koja opisuje empirijske podatke o kvarovima postavljena je istraživačka hipoteza gdje:

H_0^0 – statistički uzorak ravna se po dvoparametarskoj Weibullovoj distribuciji pri razini signifikantnosti 0,05;

H_0^1 – statistički uzorak ne ravna po dvoparametarskoj Weibullovoj distribuciji pri razini signifikantnosti 0,05.

Tablica 1. Dvoparametarska Weibullova distribucija

Table 1. Two - parameter Weibull distribution

Funkcija gustoće otkaza $f(t)$	Funkcija intenziteta otkaza $\lambda(t)$	Očekivano vrijeme bezotkaznog rada MTTF
Weibullova distribucija $f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta}$	$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}$	$MTTF = \gamma + \eta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$

Za prihvaćanje ili odbacivanje hipoteze H_0 korišten Anderson-Darling statistički test [5], a u tu svrhu upotrijebljen je programski alat Minitab 16 [6].

Istraživanje i obrada podataka provedeni su kroz dvije faze:

- prva faza (prikupljanje empirijskih podataka) – prikupljeni su podaci koji specificiraju vrijeme t_i nastanka događaja kvar hidrauličnog cilindra tijekom njegove eksploatacije zbog kojeg je došlo do otkaza sustava.
- druga je faza (statistička obrada podataka) – određena je funkcija gustoće vjerojatnosti otkaza $f(t)$ na temelju prikupljenih empirijskih podataka pri razini signifikantnosti od $\alpha = 0,05$.

Anderson-Darling statistički test (AD) provjerava koliko se dobro prikupljeni empirijski podaci ravnaju s odabranom teoretskom distribucijom vjerojatnosti, dok je Anderson-Darling statistika (AD*) mjera udaljenosti prikupljenih podataka od procijenjenih na grafu distribucije.

Što je vrijednost odnosa AD/AD* manja, to prikupljeni podaci preciznije ravnaju s testiranom distribucijom. Za uzorke $5 < n < 30$ odabire se metoda procjene najveće vjerodostojnosti.

3. REZULTATI ISTRAŽIVANJA 3. RESEARCH RESULTS

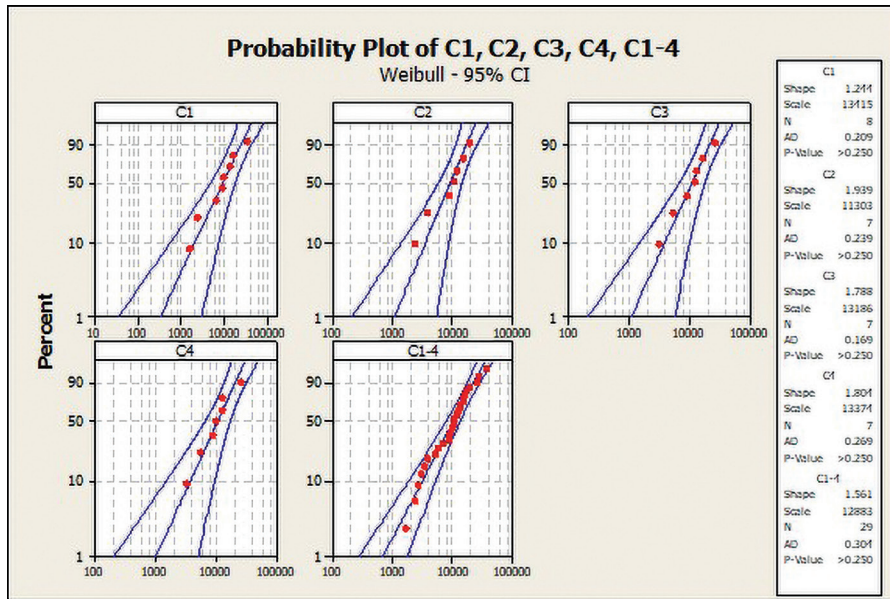
Provedbom prve faze istraživanja prikupljeni su empirijski podaci vremena rada između kvara na komponenti hidrauličnog cilindra podsustava hidraulike mlina za ugljen (tablica 2).

Provedbom AD statističkog testa nad prikupljenim empirijskim podacima za pojedini hidraulični cilindar, dobiveni rezultati potvrđuju hipotezu (slika 1). Do istog rezultata dolazi se ukoliko se statistički test provede na kumulativnom uzorku prikupljenih događaja kvara pojedinog hidrauličnog cilindra, a u svrhu provedbe testa s većim brojem uzorka (C1-4).

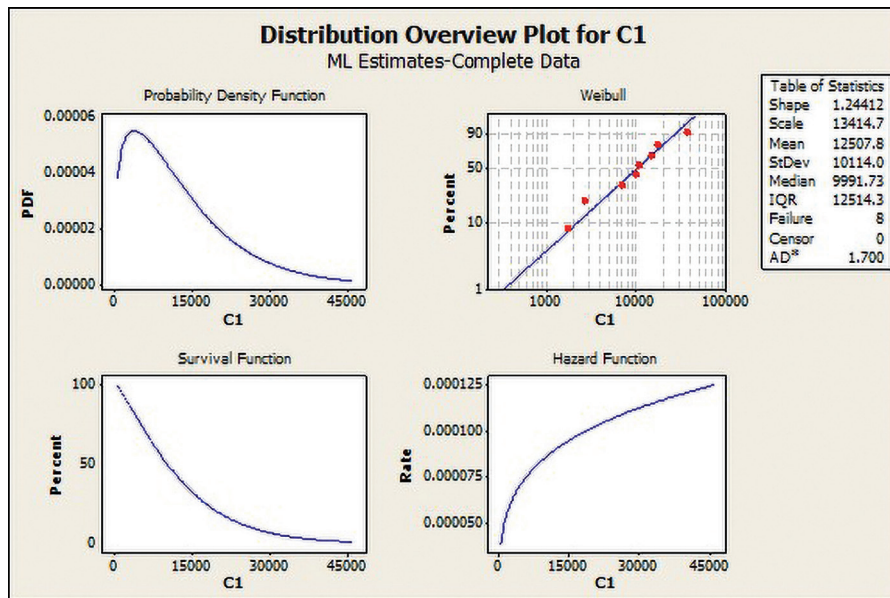
Tablica 2. Empirijski podaci vremena rada do otkaza [Izvor: Autori]

Table 2. Empirical data of mean time to failure [Source: Authors]

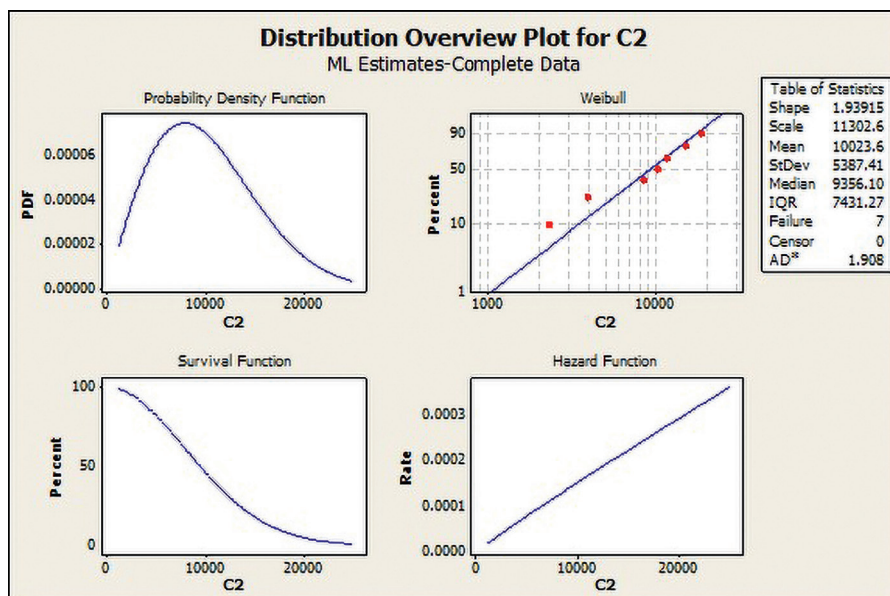
REDNI BROJ KVARA	VRIJEME RADA DO KVARA [SATI]			
	CILINDAR BR. 1	CILINDAR BR. 2	CILINDAR BR. 3	CILINDAR BR. 4
1	10635	8497	5237	3452
2	2578	11704	25548	10279
3	36293	3894	3006	26819
4	17074	18564	11416	5874
5	1659	15086	8758	9467
6	14791	10168	12479	13392
7	9780	2306	15360	13498
8	6992	*	*	*
MTTF	12475,25	10031,28	11686,28	11825,85



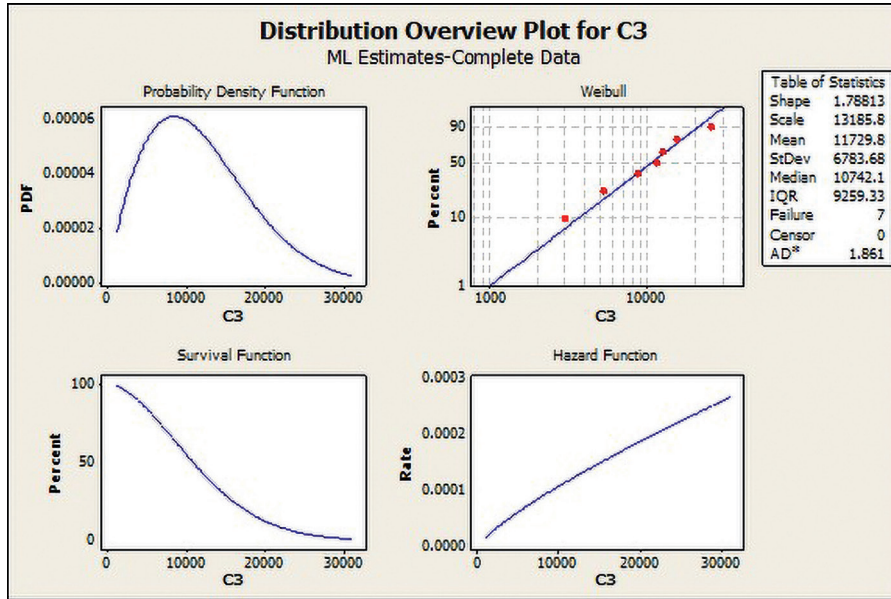
Slika 1 Testiranje hipoteze
Figure 1 Hypothesis Testing



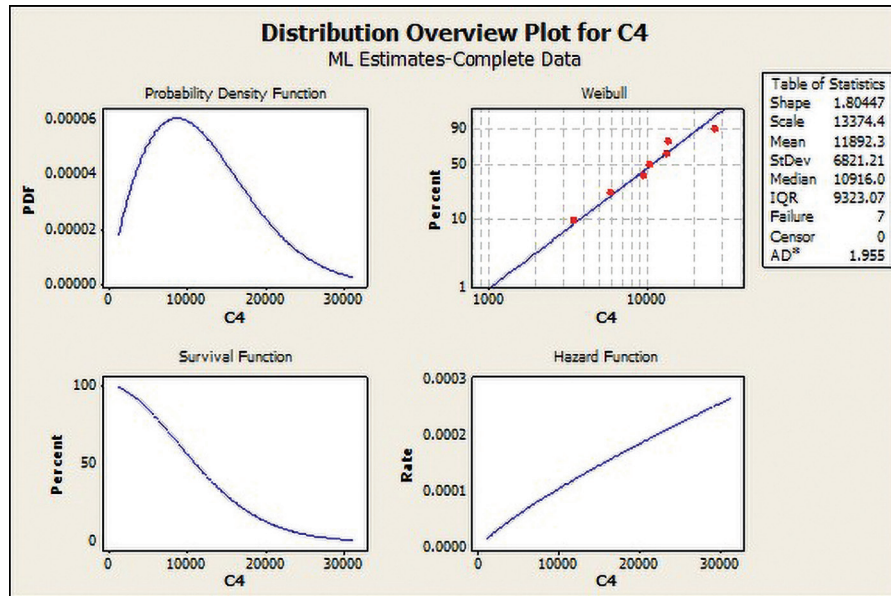
Slika 2 Hidraulični cilindar C1
Figure 2 Hydraulic cylinder C1



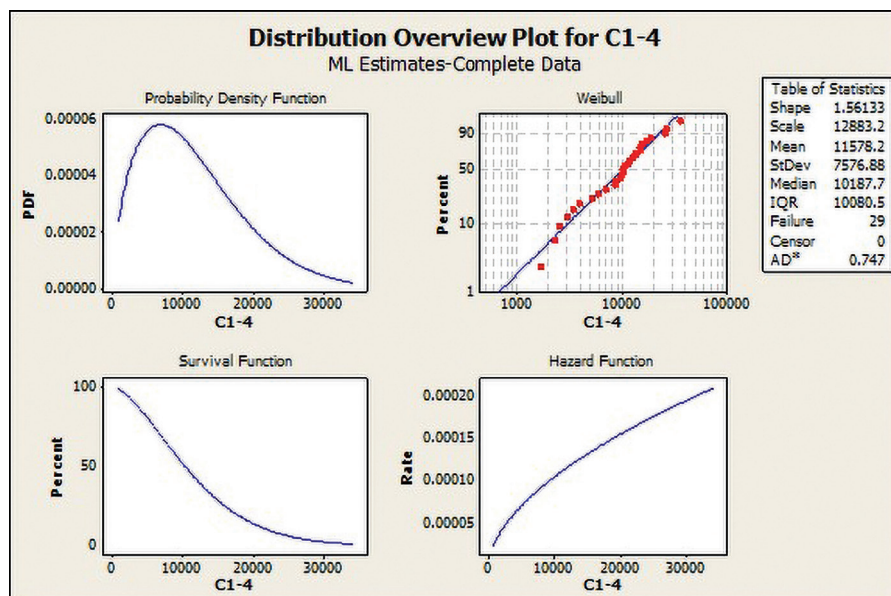
Slika 3 Hidraulični cilindar C2
Figure 3 Hydraulic cylinder C2



Slika 4 Hidraulični cilindar C3
Figure 4 Hydraulic cylinder C3



Slika 5 Hidraulični cilindar C4
Figure 5 Hydraulic cylinder C4



Slika 6 Kumulativni rezultati
testiranja hidrauličnih cilindara
C1-4
Figure 6 Cumulative test results
for hydraulic cylinders C1-4

Potvrđivanjem hipoteze, prikaz dijagrama karakterističnih funkcija sa određenim parametrima (Shape i Scale) kojima se aproksimiraju događaji kvara za pojedini hidraulični cilindar (slike 2-5), odnosno kumulativno temeljem većeg broja uzorka (slika 6).

Rezultati testiranja u svim slučajevima pokazali su da se radi o dvoparametarskoj Weibullovoj distribuciji čime se prihvaća hipoteza H_0^0 . Na temelju podataka (slika 6) i relacija (tablica 2) funkcija $f(t)$ opisana je:

$$f(t) = \frac{1,56133\beta}{12883,2} \left(\frac{t}{12883,2}\right)^{0,56133} \cdot e^{-\left(\frac{t}{12883,2}\right)^{1,56133}} \quad (4)$$

Očekivano vrijeme bezotkaznog rada MTTF je sljedeće:

$$MTTF = \gamma + \eta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) = 11.577,269 \text{ sati} \quad (5)$$

$$\lambda(MTTF) = \frac{1,56133}{12883,2} \left(\frac{11.578,2}{12883,2}\right)^{0,56133} = 1,1414 \cdot 10^{-4} \frac{\text{otkaz}}{\text{sat}} \cong 1 \frac{\text{otkaz}}{\text{godina rada}} \quad (6)$$

Funkcija nepouzdanost [10] za MTTF=11.578,2 sati vrijednost funkcije nepouzdanosti iznosi:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{12883,2}\right)^{1,56133}} = 1 - e^{-\left(\frac{11578,2}{12883,2}\right)^{1,56133}} = 1 - e^{-0,846} = 0,57 = 57\% \quad (7)$$

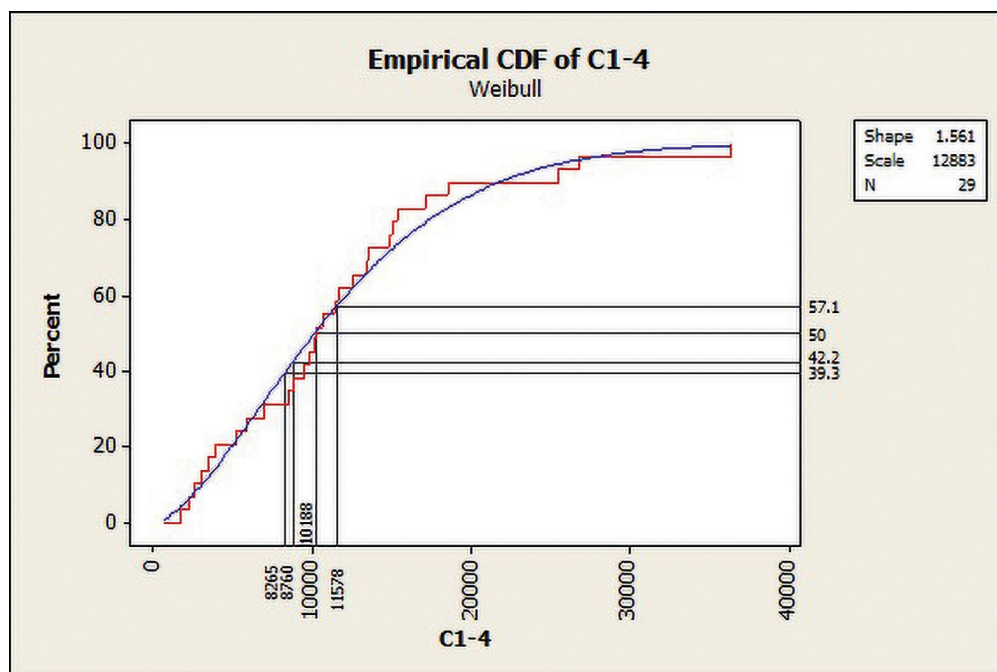
U Tablici 3. sintetizirani su rezultati MTTF za pojedini cilindar od C1 do C4 i kumulativno C1-4 dobiveni na temelju numeričkog modela (slika 2 do 6) i odgovaraju podatku (5).

Tablica 3. MTTF

Table 3. MTTF

MTTF [sati]				
1	C2	C3	C4	C1-4
12.507,8	10.023,6	11.729,8	11.892,3	11.578,2

Weibullova dvoparametarska distribucija karakteristična za složene mehaničke sustave kao što je hidraulični cilindar jer opisuje nelinearne funkciju intenziteta otkaza $\lambda(t)$ koje mogu biti opadajuće, konstantne ili rastuće. U konkretnom slučaju funkcija inteziteta otkaza (Hazard Function) ima rastući karakter, a intenzitet otkaza $\lambda(MTTF)$ za očekivano vrijeme bezotkaznog rada MTTF=11.578,2 iznosi prema (6):



Slika 7 Funkcija nepouzdanosti ili kumulativna funkcija distribucije vjerojatnosti

Figure 7 Cumulative distribution function

Za MTTF=11.578 sati nepouzdanost $F=57,1\%$, dok je za MTTF=8.265 sati ona jednaka 39,3%. Vrijednost od 8.265 sati određena je na temelju kumulativnog rizika (Cumulative Hazard or Cumulative Risk) $\Lambda(T)$ koji je određen na temelju relacije (8):

$$\Lambda(T) = \int_0^T \lambda(t) dt = \int_0^T \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} dt = \left(\frac{T}{\eta}\right)^{\beta} \quad (8)$$

Za vrijednost kumulativnog rizika $\Lambda(T)=0,5$ vrijeme T iznosi:

$$0,5 = \left(\frac{T}{12.883,2}\right)^{1,56133} \rightarrow T = 8.264,63 \text{ sata} \quad (9)$$

Kumulativni rizik $\Lambda(t)$ karakterističan je za funkcije gustoće otkaza $f(t)$ pri kojima intenzitet otkaza λ nije konstantan u vremenu eksploatacije t tj. $\lambda(t) \neq \text{const}$. U slučaju visokog stupnja sigurnosti rada elektrane, nepouzdanost treba biti manja od 30%, tj. vrijednost funkcije nepouzdanosti iznosi $F(T) = 0,3$. Na temelju relacije (7) i (8) određena je vrijednost kumulativnog rizika $\Lambda(T)$ koji iznosi (10):

$$F(T) = 1 - e^{-\Lambda(T)} = 0,3 \rightarrow \Lambda(T) = -\ln(0,7) = 0,3566 \quad (10)$$

odnosno vrijeme T iznosi:

$$0,3566 = \left(\frac{T}{12.883,2}\right)^{1,56133} \rightarrow T = 6.656,8 \text{ sati} \quad (11)$$

Visoka razina sigurnosti zahtjeva vrijednost funkcije nepouzdanosti od 30% i kumulativnog rizika od 0,3566. U tom slučaju potrebno vrijeme preventivnog održavanja (zamjene) hidaruličnog cilindra iznosi $T = 6.656,8$ sati rada.

4. ZAKLJUČAK

4. CONCLUSION

Ekonomičnost je jedno od temeljnih načela poslovanja. Biti ekonomičan podrazumijeva ostvariti učinak uz što manje troškove po jedinici proizvoda što se postiže racionalnim gospodarenjem, tehnološkim usavršavanjem, unapređenjem organizacije rada, uštedama i, što je posebno važno sa stanovišta ovog članka, *preventivnim održavanjem*. Održavanje je optimalno samo onda ako primijenjena strategija održavanja omogućava zadržavanje visoke razine eksploatacijske pouzdanosti sustava i sigurnosti pogona. Neprekidni rad, jer električnu energiju nije moguće skladištiti u izvornom obliku dok ista se tretira kao tržišna roba, zahtjeva pomno istraživanje eksploatacijske pouzdanosti od podsustava do pojedine komponente.

U ovom članku prezentirani su rezultati istraživanja na hidrauličnim cilindrima kao dijelovima podsustava hidraulike sustava mlina na ugljen br. 1 pri termoenergetskom bloku nazivne snage 217 MW. Koristeći numerički model u programskom paketu Minitab 16 s visokom razinom signifikantnosti određena je dvoparametarska Weibullova distribucija i prihvaćena je hipoteza H_0^0 . Jednako tako određeno očekivano vrijeme bezotkaznog rada MTTF i potrebno vrijeme preventivnog održavanja (zamjene) cilindra T u odnosu na zahtijevanu sigurnost, pri čemu je poznata vrijednost funkcije nepouzdanosti $F(t)$ i kumulativnog rizika $\Lambda(t)$.

Primijenjeni model je izvrsna podloga odgovornoj osobi za donošenje bitnih odluka vezanih za određivanje optimalne strategije održavanja i može se koristiti u analizi drugih tehnoloških sustava, uređaja ili komponenti zastupljenih u sličnim industrijama (npr. kemijska industrija, rafinerije i sl.) kako bi se preventivnim održavanjem spriječio zastoj i gubici uslijed neraspoloživosti sustava.

5. REFERENCE**5. REFERENCES**

- [1.] Batelić J.,; Prilog povećanju pouzdanosti sustava mlinova TE Plomin 2 / doktorska disertacija. Rijeka: Tehnički fakultet, 2019, 177 str.
- [2.] Matika D., Batelić J.; Određivanje eksploatacijske pouzdanosti termoelektrane Plomin 2 u svrhu vrednovanja kritične nacionalne infrastrukture; III. međunarodna znanstveno-stručna konferencija: "Nove sigurnosne ugroze i kritična nacionalna infrastruktura", pp. 218-227.UDK 351.751:504, Zagreb 2013.
- [3.] Batelić J., Matika D., Fabić M.: Izrada baze podataka u svrhu provedbe statističke analize složenog tehničkog sustava, 3. međunarodna znanstveno-stručna konferencija "Održavanje" 2014, pp. 257-264, ISSN 1986-583X, Zenica 2014.
- [4.] HRN EN 61703, Matematički izrazi za pouzdanost, raspoloživost, sposobnosti održavanja i održavanje (IEC 61703:2001; EN 61703.2002), HZN Glasilo 2/2008
- [5.] Matika D., Batelić J., Nasser A.: Statistical analysis for power plant maintenance, 7. međunarodna znanstveno-stručna konferencija: Dani kriznog upravljanja, pp. 1095–1110, UDK 621.311:311, Velika Gorica 2014.
- [6.] Programski alat Minitab, <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/normality/the-anderson-darling-statistic/> preuzeto: 02.11.2019

AUTORI · AUTHORS**• Jakov Batelić**

rođen je 1982. godine u Puli. Godine 2008. završio je sveučilišni studij elektrotehnike smjer elektroenergetska postrojenja, pri Tehničkom fakultetu u Rijeci. Na istom fakultetu doktorirao je 2019. godine. Od 2008. godine zaposlen je u HEP – Proizvodnji d.o.o. gdje trenutno obnaša funkciju inženjera proizvodnje i zamjenika rukovoditelja proizvodnje. Njegovi znanstveni interesi uključuju upravljanje kvalitetom i vođenje složenih tehničkih sustava.

Korespondencija · Correspondence

jakov.batelic@hep.hr

• Dario Matika

rođen 1961. godine u Puli. Završio je mornaričku vojnu akademiju – tehnički smjer, magistrirao u područja vojne industrije i doktorirao na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informatike u Mariboru. Redoviti je profesor doktor u trajnom zvanju u znanstvenoj grani automatizacija i robotika, a na poslijediplomskom doktorskom studiju Tehničkog fakulteta u Rijeci nositelj je kolegija „Pouzdanost tehničkih sustava“. Njegov znanstveni interes uključuje automatizacija procesa i postrojenja, robotika i pouzdanost/sigurnost tehničkih sustava.

Korespondencija · Correspondence

dario.matika1@gmail.com

• Karlo Griparić

rođen je 1987. godine u Puli. Godine 2009. završio je prvostupanjski studij elektrotehnike i informacijske tehnologije na Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu, diplomirao je 2011. godine, a doktorirao na istom fakultetu 2018. godine. Od 2018. godine radi kao poslijedoktorand na Odjelu za tehničke studije, Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli. Njegovi znanstveni interesi uključuju višeagentske sustave, upravljanje inteligentnim sustavima i robotiku.

Korespondencija · Correspondence

karlo.griparic@unipu.hr