

Analiza uticaja FMEA metode na smanjenje intenziteta otkaza i povećanje pouzdanosti SCP pumpi

PEKO S. LAKATUŠ, Univerzitet u Novom Sadu,

Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin

ORCID: 0009-0001-1409-0065

LJILJANA Z. RADOVANOVIĆ, Univerzitet u Novom Sadu,

Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin

ORCID: 0000-0002-5234-4820

SLAVICA S. PRVULOVIĆ, Univerzitet u Novom Sadu,

Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin

ORCID: 0000-0001-6353-7145

ELEONORA Z. DESNICA, Univerzitet u Novom Sadu,

Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin

ORCID: 0000-0002-4724-5764

Originalni naučni rad

UDC: 621.671-192

658.562:621.671

DOI: 10.5937/tehnika2604361L

U radu je analiziran uticaj primene preventivnih postupaka održavanja zasnovanih na FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) metodi na intenzitet otkaza i pouzdanost SCP pumpi (centrifugalnih pumpi sa deljenim kućištem). Istraživanje je sprovedeno u realnim industrijskim uslovima na SCP pumpi u sistemu toplovodnog grejanja. Metodološki pristup obuhvatio je prikupljanje podataka o otkazima, vremenu zastoja i vremenu popravke u periodu od šest meseci pre i šest meseci nakon implementacije preventivnog održavanja. Primena FMEA metode omogućila je identifikaciju kritičnih načina otkaza ključnih komponenti pumpe, procenu rizika primenom SOD parametara (Severity, Occurrence, Detection) i određivanje broja prioriteta rizika (RPN). Na osnovu dobijenih rezultata definisani su i sprovedeni ciljani preventivni postupci održavanja. Rezultati istraživanja ukazuju na značajno smanjenje RPN vrednosti, smanjenje broja otkaza i ukupnog vremena zastoja, kao i povećanje MTBF i smanjenje MTTR, čime je potvrđena efikasnost primene FMEA metode u unapređenju pouzdanosti SCP pumpi.

Ključne reči: FMEA metoda, SCP pumpa, preventivno održavanje, pouzdanost sistema, intenzitet otkaza

1. UVOD

Sa razvojem industrijske tehnologije, porastom složenosti i vrednosti opreme, kao i potrebom za smanjenjem zastoja, održavanje postaje jedna od ključnih funkcija savremenih industrijskih sistema [1]. Donošenje odluka u vezi sa održavanjem predstavlja složen proces koji mora biti zasnovan na modelovanju ponašanja sistema i sagledavanju svih faktora koji utiču na njegov rad i pouzdanost [2]. Održavanje obuhvata skup

aktivnosti koje se sprovode radi otklanjanja kvarova ili sprečavanja njihove pojave [3].

U radu se razmatra primena FMEA metode kao alata za identifikaciju i evaluaciju potencijalnih otkaza SCP pumpi, kroz analizu uzroka i posledica, kao i definisanje prioriteta preventivnih postupaka održavanja. Cilj istraživanja je određivanje optimalnih preventivnih aktivnosti na osnovu rezultata FMEA analize i procena njihovog uticaja na smanjenje broja otkaza u realnim industrijskim uslovima.

SCP pumpe su izložene složenim mehaničkim i hidrauličkim opterećenjima koja dovode do habanja, korozije i pregrevanja, zbog čega je neophodno plansko sprovođenje preventivnih aktivnosti kao što su inspekcije, podmazivanje i zamena istrošenih delova. Efikasnost ovih postupaka zavisi od pravilnog iden-

Adresa autora: Peko Lakatuš, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin, Đure Đakovića bb

e-mail: peko.lakatus@gmail.com

Rad primljen: 22.02.2026.

Rad prihvaćen: 18.07.2026.

tifikovanja kritičnih komponenti, načina otkaza i optimalnih intervala održavanja, pri čemu FMEA metoda obezbeđuje sistematski pristup proceni rizika i izboru odgovarajućih preventivnih mera.

2. METODOLOŠKI OKVIR ISTRAŽIVANJA

Problem istraživanja odnosi se na potrebu sistematskog identifikovanja uzroka otkaza SCP pumpi i definisanja preventivnih postupaka održavanja u cilju smanjenja broja otkaza i povećanja pouzdanosti rada u realnim uslovima eksploatacije.

Predmet istraživanja obuhvata analizu načina otkaza, njihovih uzroka i posledica, kao i uticaj primene preventivnih postupaka održavanja definisanih FMEA metodom na pouzdanost rada posmatrane SCP pumpe. Cilj rada je definisanje optimalnih preventivnih aktivnosti primenom FMEA metode i analiza broja otkaza pre i posle njihove primene.

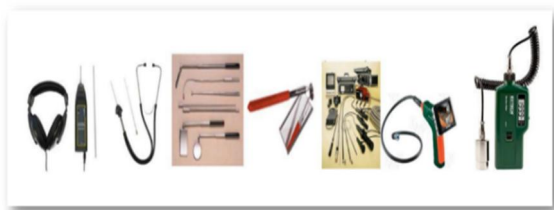
Prva faza obuhvatila je prikupljanje podataka o otkazima, vremenu zastoja i vremenu popravki u periodu od šest meseci pre uvođenja preventivnog održavanja.

Druga faza odnosila se na sprovođenje FMEA analize radi identifikacije ključnih načina otkaza i definisanja preventivnih mera.

Treća faza obuhvatila je implementaciju preventivnih postupaka održavanja.

Četvrta faza podrazumevala je prikupljanje i analizu podataka u periodu od šest meseci nakon primene definisanih mera.

Podaci o radu, otkazima i održavanju prikupljeni su iz operativnih zapisa i istorijskih baza podataka, uz kontinuirano praćenje performansi sistema pre i posle implementacije mera. Istraživanje je realizovano u preduzeću JKP „Gradska Toplana“ Zrenjanin na SCP pumpi u sistemu toplovodnog grejanja.



Slika 1 - Stetoscopi / Ogledala za posmatranje / Endoscopi / Vibracioni analizator

Instrumenti istraživanja su FMEA analiza (slika 1.), inspeksijski alati kao što su vibracioni analizator, (koristi se za detekciju i analizu vibracija u pumpi, što pomaže u identifikaciji problema sa poravnanjem, balansom i ležajevima).

Elektronski stetoscopi, (koriste se za akustičku dijagnostiku). Ogledala za posmatranje i endoscopi, (koriste se za ispitivanje skrivenih predmeta).

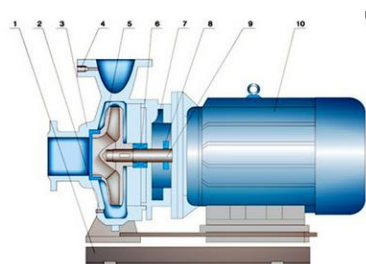
3. TEORIJSKO RAZMATRANJE

3.1. SCP pumpe

Pumpa sa deljenim kućištem je tip centrifugalne pumpe kod koje je kućište izvedeno iz dva dela spojena vijcima, pri čemu podela može biti vertikalna ili horizontalna u odnosu na osu vratila. SCP pumpe se najčešće koriste za transport čiste vode, a njihova konstrukcija omogućava lak pristup unutrašnjim komponentama uklanjanjem gornjeg dela kućišta, bez demontaže rotora [4].

Kao važna komponenta industrijskih sistema, SCP pumpe zahtevaju pravilno projektovanje i eksploataciju radi obezbeđenja optimalnih performansi [5]. Efikasnost pumpe u velikoj meri zavisi od geometrije radnog kola i uslova rada, dok nepravilna ugradnja, neodgovarajuća dimenzionisanost i neadekvatan režim eksploatacije dovode do povećane potrošnje energije i smanjenih performansi.

Struktura tipične horizontalne SCP pumpe sa jednim stepenom (slika 2.) obuhvata osnovne komponente kao što su postolje, ležajevi, kućište i poklopac pumpe, vratilo, rotor (impeler), zaptivni i vodonepropusni prsten, kao i punionica [6], [7], [8].



Slika 2 - Struktura uobičajene horizontalne centrifugalne pumpe (SCP) sa jednim stepenom: 1. Postolje 2. Vodonepropusni priključak 3. Kućište pumpe 4. Priključak za merenje pritiska 5. Rotor (impeler) 6. Ležaj 7. Nosivi okvir 8. Vodonepropusni prsten 9. Vratilo pumpe 10. Motor [8].

3.2. FMEA metoda

FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) je metoda kojom se identifikuju potencijalni načini otkaza komponenti, sistema ili procesa, sa ciljem pravovremenog otkrivanja grešaka, smanjenja rizika i sprečavanja negativnih posledica po pouzdanost i troškove sistema [9]. Hidraulični sistemi, koji se široko primenjuju u mašinskoj, energetske i vazduhoplovnoj industriji, zahtevaju visok nivo pouzdanosti, koji se postiže analizom uzroka kvarova i definisanjem odgovarajućih preventivnih mera, pri čemu je FMEA jedna od najčešće korišćenih metoda [10].

FMEA analiza obuhvata procenu tri ključna faktora: ozbiljnost posledica otkaza (Severity – S), učestalost pojave otkaza (Occurrence – O) i mogućnost

njegovog otkrivanja (Detection – D), koji se ocenjuju na skali od 1 do 10 [11], [12]. Njihov proizvod predstavlja broj prioriteta rizika RPN (Risk Priority Number) [13].

$$RPN = S \times O \times D \quad (1)$$

U ovom istraživanju SOD ocene su dali stručnjaci za održavanje SCP pumpi na osnovu iskustva i analize rada sistema, nakon čega su izračunate vrednosti RPN za identifikovane komponente.

3.3. Preventivni postupak održavanja

Planiranje održavanja zasnovano na analizi rizika omogućava smanjenje verovatnoće otkaza i unapređenje pouzdanosti sistema. Strategije preventivnog

održavanja imaju ključnu ulogu u obezbeđenju kontinuiteta rada i optimalnog iskorišćenja opreme, uz balansiranje troškova održavanja i rizika od zastoja [14–16].

Razumevanje režima otkaza i ponašanja sistema u fazi planiranja omogućava smanjenje broja kvarova, povećanje pouzdanosti i smanjenje ukupnih troškova održavanja [17], [18].

4. SPROVOĐENJE FMEA ANALIZE NA SCP PUMPI

Tabela 1 prikazuje sprovođenja aktivnosti preventivnih postupaka održavanja, mere koje treba preduzeti, i frekvenciju pregleda za svaku komponentu SCP pumpe.

Tabela 1. Plan sprovođenja aktivnosti preventivnih postupaka održavanja za svaku komponentu SCP pumpe

Komponenta	Mere koje treba preduzeti	Frekvencija pregleda	Beleške
Rotor	Redovno podmazivanje ležajeva i rotirajućih delova	Svaka 3 meseca	Koristiti preporučeno mazivo.
	Vizuelna inspekcija rotora na habanje i deformaciju	Mesečno	Prilikom inspekcije obratiti pažnju na nepravilnosti u obliku.
	Balansiranje rotora	Svakih 6 meseci	Izvršiti balansiranje prema preporukama proizvođača.
	Zamena rotora ako je potrebno	Po potrebi	Zamenu vršiti samo kvalifikovano osoblje.
Ležajevi	Redovno podmazivanje ležajeva	Svaka 3 meseca	Koristiti visokokvalitetnu mast za podmazivanje.
	Analiza vibracija	Kvartalno	Koristiti specijalizovanu opremu za analizu vibracija.
	Termalna inspekcija	Polugodišnje	Koristiti infracrveni termometar ili termalnu kameru.
	Zamena ležajeva ako je potrebno	Po potrebi	Zamenu vršiti prema preporukama proizvođača.
Zaptivke	Vizuelna inspekcija zaptivki na curenje	Mesečno	Obratiti pažnju na znakove curenja ili oštećenja.
	Zamena zaptivki	Svakih 12 meseci	Koristiti zaptivke koje preporučuje proizvođač.
	Provera pritiska i zaptivanja sistema	Mesečno	Proveriti pritisak prema specifikacijama sistema.
Električni motor	Termalna inspekcija	Svaka 3 meseca	Pratiti temperaturne anomalije.
	Provera električnih priključaka i kablova	Kvartalno	Obratiti pažnju na labave ili korodirane priključke.
	Merenje struje motora	Kvartalno	Uporediti očitane vrednosti sa nominalnim vrednostima.
	Čišćenje motora	Polugodišnje	Koristiti suvi vazduh ili specijalizovana sredstva za čišćenje.
Kablovi	Vizuelna inspekcija na habanje i oštećenja	Mesečno	Obratiti pažnju na znakove habanja ili mehaničkih oštećenja.
	Provera izolacije kablova	Polugodišnje	Koristiti instrumente za testiranje izolacije.
	Provera priključaka	Kvartalno	Obratiti pažnju na labave ili oštećene priključke.
	Zamena oštećenih kablova	Po potrebi	Koristiti kablove koji ispunjavaju specifikacije sistema.

Tim za održavanje sprovodi planirane inspekcije i zamene komponenti prema utvrđenom rasporedu. Svi rezultati inspekcija beleže se u centralnu bazu podataka radi praćenja i analize. Praćenje performansi obuhvata sledeće:

- Podaci prikupljeni tokom sprovođenja aktivnosti preventivnog održavanja analiziraju se kako bi se identifikovali trendovi i potencijalni problemi.

- FMEA analiza se redovno ažurira na osnovu novih podataka i iskustava sa terena.

5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Na osnovu analize potencijalnih otkaza izvršena je FMEA analiza za SCP pumpu i definisani su za svaku komponentu potencijalni otkazi, posledice, njihov uzrok i pregled postojećih kontrola (tabela 2).

Tabela 2. FMEA analiza za SCP pumpu

Komponenta	Potencijalni način otkaza	Posledice otkaza	Uzrok otkaza	Postojeće kontrole
Impeler / rotor	Habanje/Korozija	Smanjenje performansi	Kvalitet materijala	Vizuelna inspekcija
Ležajevi	Pregrevanje	Zaustavljanje pumpe	Nedostatak podmazivanja	Podmazivanje vibroakustička ispitivanja
Zaptivke	Curenje	Kontaminacija	Habanje	Zamena zaptivki
Električni motor	Otkaz namotaja	Dugotrajni zastoj	Preopterećenje	Preventivna kontrola
Kablovi	Kratki spoj	Požar	Mehaničko oštećenje	Inspekcija kablova

Koraci za sprovođenje preventivnih postupaka održavanja SCP pumpe korišćenjem FMEA metode uključuju identifikaciju mogućih otkaza, procenu rizika, implementaciju preventivnih postupaka održavanja i kontinuirano praćenje i poboljšavanje procesa održavanja.

5.1. Primena FMEA metode u preventivnom održavanju SCP pumpi

Radi sagledavanja značaja preventivnih postupaka održavanja SCP pumpi, u radu je primenjena FMEA metoda, koja omogućava sistematsku identifikaciju potencijalnih načina otkaza ključnih komponenti (rotor, pogonski motor, ležajevi, zaptivači i električni priključci) i procenu njihovog uticaja na pouzdanost i bezbednost rada sistema.

Analiza je sprovedena na osnovu podataka o istoriji otkaza, rezultata tehničkih inspekcija i eksploatacionih karakteristika pumpi, uz učešće stručnog tima iz oblasti održavanja i eksploatacije.

Za svaki identifikovani način otkaza izvršena je procena parametara S, O i D u skladu sa prethodno definisanom metodologijom, a dobijene RPN

vrednosti korišćene su za rangiranje kritičnih elemenata i određivanje prioriteta održavanja.

Načini otkaza sa najvišim RPN vrednostima predstavljali su osnov za definisanje preventivnih postupaka održavanja, koji obuhvataju redovne tehničke preglede i primenu dijagnostičkih metoda, kao što su vibraciona i akustična dijagnostika, kao i vizuelne kontrole pomoću ogledala i endoskopa. Efikasnost sprovedenih mera procenjena je na osnovu rezultata inspekcija i analize učestalosti otkaza, uz periodično ažuriranje FMEA analize u skladu sa novim eksploatacionim podacima.

Rezultati FMEA analize za period pre primene preventivnih postupaka održavanja prikazani su u tabeli 3, dok su rezultati nakon njihove implementacije dati u tabeli 4. Usporedna analiza ovih rezultata omogućava procenu efekata primenjenih mera na smanjenje RPN vrednosti i unapređenje pouzdanosti SCP pumpi.

Primena FMEA metode u preventivnom održavanju SCP pumpi doprinosi smanjenju neplaniranih zastoja i unapređenju pouzdanosti sistema kroz pravovremenu identifikaciju i upravljanje rizicima.

Tabela 3. FMEA analiza za jednu godinu pre primene preventivnih postupaka održavanja (6 meseci)

Komponenta	Potencijalni otkaz	Efekti otkaza	Ozbiljnost (S)	Uzroci otkaza	Verovatnoća (O)	Detektibilnost (D)	RPN (SOD)
Rotor	Habanje, deformacija	Smanjena efikasnost, vibracije	8	Erozija, preopterećenje	6	5	240
Ležajevi	Habanje, blokada	Pregrevanje, zastoja	9	Loše podmazivanje, kontaminacija	5	5	225
Zaptivke	Curenje	Gubitak tečnosti, kontaminacija	7	Oštećenje, loša instalacija	7	6	294
Električni motor	Pregrevanje, otkaz	Zastoj sistema	9	Preopterećenje, kratki spoj	4	6	216
Kablovi	Habanje, oštećenje	Kratki spoj, gubitak snage	8	Mehaničko habanje, loše održavanje	6	5	240

Tabela 4. FMEA analiza za jednu godinu posle primene preventivnih postupaka održavanja (6 meseci)

Komponenta	Potencijalni otkaz	Efekti otkaza	Ozbiljnost (S)	Uzroci otkaza	Trenutne kontrole	Verovatnoća (O)	Detektibilnost (D)	RPN (SOD)
Rotor	Habanje, deformacija	Smanjena efikasnost, vibracije	8	Erozija, preopterećenje	Redovno podmazivanje, vizuelna inspekcija	4	3	96
Ležajevi	Habanje, blokada	Pregrevanje, zastoj	9	Loše podmazivanje, kontaminacija	Analiza vibracija, termalna inspekcija	3	2	54
Zaptivke	Curenje	Gubitak tečnosti, kontaminacija	7	Oštećenje, loša instalacija	Inspekcija, zamena prema rasporedu	5	3	105
Električni motor	Pregrevanje, otkaz	Zastoj sistema	9	Preopterećenje, kratki spoj	Termalna inspekcija, zaštita motora	2	3	54
Kablovi	Habanje, oštećenje	Kratki spoj, gubitak snage	8	Mehaničko habanje, loše održavanje	Vizuelna inspekcija, zamena prema rasporedu	3	3	72

Analiza načina otkaza i efekata (FMEA) omogućava nam da kvantitativno procenimo rizike povezane sa otkazima komponenti SCP pumpi. Na osnovu ovih procena, možemo razviti i implementirati preventivne postupke održavanja koje će smanjiti verovatnoću i ozbiljnost otkaza, kao i poboljšati detektibilnost potencijalnih problema. Sprovođenje preventivnih postupaka održavanja značajno smanjuje RPN za sve identifikovane načine otkaza. To ukazuje na efikasnost postupaka preventivnog održavanja u smanjenju broja otkaza i povećanju pouzdanosti SCP pumpi. Korišćenje specijalizovanih alata kao što su vibracioni analizatori, elektronski stetoscopi, ogledala i endoscopi je ključ u identifikaciji problema u ranoj fazi, što omogućava pravovremeno održavanje i smanjenje broja

ozbiljnih otkaza. Tabela 5 prikazuje identifikovane potencijalne otkaze različitih komponenti SCP pumpi, procenu njihovih posledica, planiranje postupaka preventivnog održavanja, sprovođenje pregleda i praćenje performansi. Detaljno se analiziraju različite komponente kao što su impeler/rotor, ležajevi, zaptivke, električni motor i kablovi. Za svaku od ovih komponenti, identifikovani su mogući otkazi, procenjene posledice tih otkaza, planirani preventivni postupci održavanja i pregledi, kao i način praćenja performansi nakon sprovođenja pregleda. Ovakav sistematski pristup omogućava efikasno praćenje stanja SCP pumpi i pravovremeno preduzimanje potrebnih mera, čime se značajno povećava pouzdanost i smanjuje rizik od neočekivanih otkaza.

Tabela 5. Odnos između identifikovanih potencijalnih otkaza i planiranih preventivnih postupaka održavanja

Identifikacija Otkaza	Procena Posledica	Planiranje Mera	Sprovođenje Pregleda	Praćenje Performansi
Impeler /rotor	Smanjenje performansi	Vizuelna inspekcija	Inspekcija svakih 6 meseci	Beleženje podataka
Ležajevi	Zaustavljanje pumpe	Podmazivanje	Podmazivanje svakih 6 meseci	Analiza podataka Vibroakustične kontrole
Zaptivke	Kontaminacija	Zamena zaptivki	Inspekcija svakog meseca	Ažuriranje FMEA analize
Električni motor	Dugotrajni zastoj	Preventivna kontrola	Inspekcija svakih 3 meseca	Preduzimanje dodatnih mera
Kablovi	Požar	Inspekcija kablova	Inspekcija svakih 3 meseca	Izveštavanje o stanju

Tabela 6. prikazuje poboljšanja u pouzdanosti i održavanju sistema pre i posle implementacije određene mere tokom perioda od šest meseci. Da bi se ocenio uticaj preventivnih postupaka održavanja i primene FMEA metode na pouzdanost SCP pumpi, sprovedena je analiza performansi pre i posle implementacije preventivnih postupaka održavanja tokom perioda od šest meseci.

Parametri kao što su broj otkaza, prosečno vreme između otkaza (MTBF), prosečno vreme za popravku (MTTR) i ukupno vreme zastoja, analizirani su kako bi

se kvantifikovale promene u performansama. Prikazani su podaci pre i posle implementacije preventivnih postupaka održavanja, zajedno sa procentualnim promenama za svaki parametar. Ovi podaci pružaju jasan uvid u efikasnost preventivnih postupaka i njihov doprinos povećanju pouzdanosti i smanjenju vremena zastoja SCP pumpi. Rezultati analize ukazuju na značajna poboljšanja u svim ključnim parametrima, što potvrđuje korisnost i efikasnost preventivnih postupaka održavanja i FMEA metode u održavanju SCP pumpi.

Tabela 6. Poboljšanja u pouzdanosti i održavanju sistema pre i posle implementacije

Parametri	Pre implementacije (6 meseci)	Posle implementacije (6 meseci)	Promena (%)
Broj otkaza	5	3	- 40
MTBF (sati)	300	750	+150
MTTR (sati)	10	6	- 40
Ukupno vreme zastoja (sati)	50	18	-64

Parametri tabele:

- Broj otkaza: Ukupan broj otkaza koji su se desili u periodu od šest meseci.
- MTBF (Mean Time Between Failures): Prosečno vreme između dva uzastopna otkaza, izraženo u satima.
- MTTR (Mean Time to Repair): Prosečno vreme potrebno za popravku sistema nakon otkaza, izraženo u satima.
- Ukupno vreme zastoja: Ukupno vreme tokom kojeg je sistem bio u otkazu i nije bio funkcionalan, izraženo u satima.
- Promena (%): označava procentualnu promenu u vrednostima parametara pre i posle implementacije preventivnih postupaka održavanja.

Promena (%): za svaki parametar je izračunata koristeći sledeću formulu:

$$\text{Promena (\%)} = \frac{\text{Posle implementacije} - \text{Pre implementacije}}{\text{Pre implementacije}} \cdot 100 \quad (2)$$

Broj otkaza:

- Pre implementacije: 5
- Posle implementacije: 3
- Promena (%):

$$\text{Promena (\%)} = \frac{3 - 5}{5} \cdot 100 = -40 \%$$

MTBF:

- Pre implementacije: 300 sati
- Posle implementacije: 750 sati
- Promena (%):

$$\text{MTBF} = \frac{750 - 300}{300} \cdot 100 = 150 \%$$

MTTR:

- Pre implementacije: 10 sati
- Posle implementacije: 6 sati
- Promena (%):

$$\text{MTTR} = \frac{6 - 10}{10} \cdot 100 = -40 \%$$

Ukupno vreme zastoja:

- Pre implementacije: 50 sati
- Posle implementacije: 18 sati
- Promena (%):

$$\text{Ukupno vreme zastoja} = \frac{18 - 50}{50} \cdot 100 = -64\%$$

Tabela 6 pokazuje značajna poboljšanja nakon implementacije mera. Broj otkaza je smanjen za 40%, MTBF je povećan za 150%, MTTR je smanjen za 40%, a ukupno vreme zastoja je smanjeno za 64%. Ovi podaci ukazuju na to da su mere poboljšanja efikasno povećale pouzdanost i smanjile vreme potrebno za popravke sistema.

Izračunavanje MTBF i MTTR pre i posle implementacije:

1. MTBF (Prosečno vreme između dva uzastopna otkaza)

- MTBF se računa kao ukupno vreme rada podeljeno sa brojem otkaza.

2. MTTR (Prosečno vreme potrebno za popravku sistema nakon otkaz)

- MTTR se računa kao ukupno vreme za popravku podeljeno sa brojem otkaza.

Pre implementacije:

1. MTBF

Broj otkaza: 5

Ukupno vreme rada: $5 \cdot 300 \text{ sati} = 1500 \text{ sati}$

$$\text{MTBF} = \frac{1500 \text{ sati}}{5} = 300 \text{ sati}$$

2. MTTR

Ukupno vreme zastoja: 50 sati

Broj otkaza: 5

$$\text{MTTR} = \frac{50 \text{ sati}}{5} = 10 \text{ sati}$$

Posle implementacije

1. MTBF

Broj otkaza: 3

Ukupno vreme rada: $3 \cdot 750 \text{ sati} = 2250 \text{ sati}$

$$\text{MTBF} = \frac{2250 \text{ sati}}{3} = 750 \text{ sati}$$

2. MTTR

Ukupno vreme zastoja: 18 sati

Broj otkaza: 3

$$\text{MTTR} = \frac{18 \text{ sati}}{3} = 6 \text{ sati}$$

Broj otkaza i ukupno vreme zastoja:

Pre implementacije

1. Broj otkaza:

Znamo da je MTBF pre implementacije bio 300 sati. Ako znamo ukupno vreme rada (period od 6 meseci), možemo izračunati broj otkaza.

Ukupno vreme rada tokom 6 meseci bilo 1500 sati.

$$\text{Broj otkaza} = \frac{\text{Ukupno vreme rada}}{\text{MTBF}} \quad (3)$$

$$\text{Broj otkaza} = \frac{1500 \text{ sati}}{300 \text{ sati}} = 5$$

2. Ukupno vreme zastoja

Znamo da je MTTR pre implementacije bio 10 sati, a broj otkaza je 5.

Ukupno vreme zastoja = Broj otkaza · MTTR

$$\text{Ukupno vreme zastoja} = 5 \cdot 10 = 50 \text{ sati}$$

Posle implementacije

1. Broj otkaza

Znamo da je MTBF posle implementacije bio 750 sati. Ako znamo ukupno vreme rada (period od 6 meseci), možemo izračunati broj otkaza.

Ukupno vreme rada tokom 6 meseci bilo 1500 sati.

$$\text{Broj otkaza} = \frac{\text{Ukupno vreme rada}}{\text{MTBF}}$$

$$\text{Broj otkaza} = \frac{2250 \text{ sati}}{750 \text{ sati}} = 3$$

2. Ukupno vreme zastoja

Znamo da je MTTR posle implementacije bio 6 sati, a broj otkaza je 3.

Ukupno vreme zastoja = Broj otkaza · MTTR

$$\text{Ukupno vreme zastoja} = 3 \cdot 6 = 18 \text{ sati}$$

6. ANALIZA REZULTATA I DISKUSIJA

Preventivni postupci održavanja SCP pumpi igraju ključnu ulogu u povećanju njihove pouzdanosti i dugotrajnosti. Korišćenjem FMEA (Analiza načina otkaza i efekata) metode ovi pregledi postaju još efikasniji i ciljaniji. Takođe se primenom FMEA metode mogu uočiti unapređenja kod sledećih aktivnosti kao što su identifikacija potencijalnih načina otkaza, procena, posledica otkaza, planiranje preventivnih postupaka održavanja, kontinuirano poboljšanje procesa, smanjenje neplaniranih zastoja, značaj za bezbednost, povećanje efikasnosti rada.

FMEA metoda omogućava detaljnu identifikaciju svih mogućih načina otkaza koji se mogu desiti tokom rada SCP pumpe. To uključuje analizu komponenti kao što su impeleri/rotor, ležajevi, zaptivke, motori i električni spojevi. Ova identifikacija je osnovna za uspostavljanje preventivnih postupaka održavanja.

Jedan od ključnih aspekata FMEA metode je procena posledica svakog identifikovanog otkaza. Razumevanje kako svaki otkaz utiče na funkcionalnost

pumpe i sigurnost operatera omogućava inženjerima da uspostave prioritetne mere održavanja. Ovo osigurava da najkritičniji problemi budu rešeni na vreme, smanjujući rizik od ozbiljnih otkaza.

Na osnovu FMEA analize, planiraju se preventivni postupci održavanja koje će se sprovesti tokom periodičnih kontrola. Ove mere mogu uključivati zamenu ili inspekciju komponenti koje su identifikovane kao visoko rizične, kao i prilagodbu operativnih procedura kako bi se smanjila verovatnoća otkaza. Na primer, ako je analiza pokazala da su zaptivke sklone habanju, njihova redovna zamena može značajno smanjiti rizik od curenja.

Preventivni postupci održavanja omogućavaju prikupljanje podataka o stvarnim uslovima rada i performansama SCP pumpi. Korišćenjem FMEA metoda, ovi podaci se analiziraju kako bi se identifikovali trendovi i obrasci koji mogu ukazivati na potencijalne probleme. Ovaj pristup omogućava kontinuirano poboljšanje kvaliteta proizvoda i procesa, što rezultira povećanom pouzdanošću i efikasnošću. Preventivni postupci održavanja smanjuju verovatnoću neplaniranih zastoja koji mogu biti veoma skupi i izazvati ozbiljne operativne probleme. FMEA metoda pomaže u predviđanju i sprečavanju potencijalnih problema pre nego što se oni manifestuju u obliku otkaza. Ovo ne samo da povećava pouzdanost SCP pumpi, već i smanjuje troškove održavanja i popravki.

SCP pumpe često rade u kritičnim aplikacijama gde otkaz može dovesti do ozbiljnih posledica po bezbednost i životnu sredinu. Korišćenjem FMEA metode tokom preventivnih postupaka održavanja, mogu se identifikovati rizici koji bi mogli ugroziti sigurnost operatera i okoline. Na primer, preventivni postupci održavanja mogu uključivati inspekciju električnih spojeva kako bi se sprečili potencijalni kratki spojevi ili požari.

Ovo istraživanje je pokazalo da primena preventivnih postupaka održavanja značajno smanjuje broj otkaza SCP pumpe. Korišćenje FMEA metode omogućilo je sistematičnu identifikaciju i procenu potencijalnih načina otkaza, kao i određivanje prioriteta za preventivne mere na osnovu rezultata analize rizika.

Rezultati sprovedene analize ukazuju da primena FMEA metode omogućava pouzdanu identifikaciju najkritičnijih načina otkaza SCP pumpi, među kojima se izdvajaju neispravno poravnanje, neispravan balans, habanje ležajeva i curenje zaptivača. Na osnovu procene rizika i vrednosti RPN, ovi načini otkaza prepoznati su kao prioritetni za intervenciju, pri čemu su najveće vrednosti RPN zabeležene kod problema poravnanja i balansa pre primene preventivnog održavanja. Implementacijom ciljanih preventivnih postupaka, uključujući primenu vibracione i akustične dija-

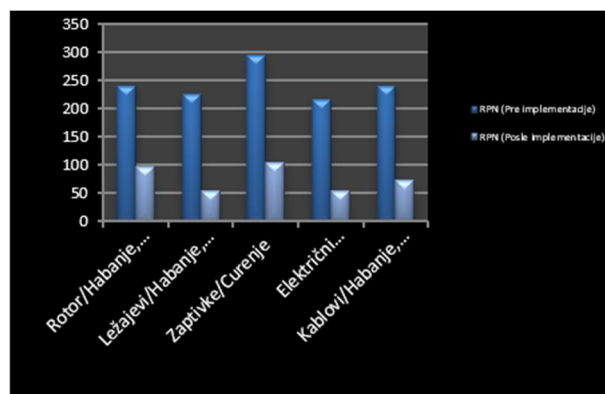
gnostike, kao i vizuelnih inspekcija, ostvareno je smanjenje RPN vrednosti i učestalosti otkaza. Kontinuirano praćenje rada i ažuriranje FMEA analize dovelo je do povećanja pouzdanosti, smanjenja zastoja i produženja radnog veka SCP pumpi.

Primena FMEA metode i specijalizovanih inspekcijских alata dokazano poboljšava pouzdanost i performanse pumpi, što može dovesti do smanjenja troškova održavanja i povećanja efikasnosti. Ovi rezultati naglašavaju važnost preventivnog održavanja kao ključnog faktora za osiguranje optimalnog rada i dugovečnosti industrijske opreme.

Dijagram prikazuje rezultate FMEA analize za jednu godinu pre i posle primene preventivnih postupaka održavanja za SCP pumpe (slika 3).

Pre primene preventivnih postupaka održavanja:

- RPN vrednosti su relativno visoke, što ukazuje na značajan rizik od otkaza različitih komponenti.
- Najveće RPN vrednosti beleže zaptivke, rotor i kablovi, što znači da su ovi delovi posebno skloni otkazima i njihov uticaj na sistem je visok.
- Posle primene preventivnih postupaka održavanja:
- RPN vrednosti su značajno smanjene za sve komponente.
- Uvođenje redovnih inspekcija, analiza vibracija, termalne inspekcije, kao i planirane zamene kritičnih delova dovelo je do smanjenja verovatnoće otkaza i poboljšanja detektibilnosti potencijalnih problema.



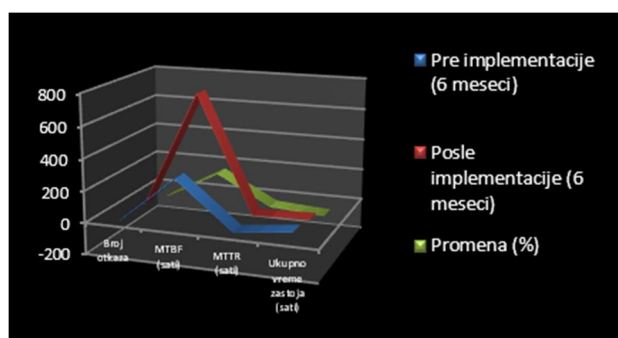
Slika 3 - Dijagram FMEA analize za jednu godinu (pre i posle primene preventivnih mera)

Ovaj dijagram jasno pokazuje efikasnost preventivnih postupaka održavanja u smanjenju rizika i poboljšanju pouzdanosti SCP pumpi. Smanjenje RPN vrednosti ukazuje na smanjenje ukupnog rizika i povećanje operativne efikasnosti i pouzdanosti sistema.

Podaci su analizirani kako bi se utvrdila razlika u pouzdanosti pre i posle implementacije preventivnih postupaka održavanja. Rezultati su prikazani u tabeli 7. (slika 4).

Tabela 7. Povećanje pouzdanosti SCP pumpe posle implementacije preventivnog održavanja

Parametre	Pre implementacije (6 meseci)	Posle implementacije (6 meseci)	Promena (%)
Broj otkaza	5	3	-40
MTBF (sati)	300	750	+150
MTTR (sati)	10	6	-40
Ukupno vreme zastoja (sati)	50	18	-64



Slika 4 - Povećanje pouzdanosti SCP (Pre i posle implementacije od 6 meseci)

Rezultati pokazuju značajno smanjenje broja otkaza i ukupnog vremena zastoja, kao i povećanje MTBF (prosečno vreme između dva uzastopna otkaza), što ukazuje na povećanje pouzdanosti SCP pumpe posle implementacije postupaka preventivnog održavanja. Smanjenje MTTR (prosečno vreme potrebno za popravku sistema nakon otkaza), dodatno ukazuje na efikasniju popravku i održavanje pumpe.

7. ZAKLJUČAK

Ovo istraživanje je pokazalo da primena preventivnog održavanja SCP pumpi, uz korišćenje FMEA metode, značajno doprinosi povećanju njihove pouzdanosti. Dobijeni rezultati ukazuju na smanjenje broja otkaza i ukupnog vremena zastoja, povećanje MTBF i smanjenje MTTR, čime se unapređuje operativna efikasnost sistema.

Primena FMEA metode omogućila je sistematsku identifikaciju kritičnih komponenti, potencijalnih načina otkaza i njihovih uzroka i posledica, što je omogućilo efikasnije planiranje preventivnih aktivnosti održavanja i smanjenje verovatnoće neplaniranih zastoja. U realnom industrijskom okruženju, u JKP „Gradska toplana“ Zrenjanin, tokom jednogodišnjeg

perioda, implementacija definisanih preventivnih mera dovela je do smanjenja broja otkaza, povećanja pouzdanosti i bolje raspoloživosti postrojenja. Iako preventivno održavanje zahteva početna ulaganja, analiza je pokazala da se ona dugoročno isplate kroz smanjenje troškova popravki, kraće zastoje i produžen radni vek opreme, uz istovremeno povećanje bezbednosti rada. Zaključno, primena FMEA metode u planiranju preventivnog održavanja SCP pumpi predstavlja efikasan pristup za unapređenje pouzdanosti, efikasnosti i sigurnosti rada tehničkih sistema, kao i dobru osnovu za primenu u sličnim industrijskim uslovima.

LITERATURA

- [1] Lala H, Bellaouar A, Zellagui R. & Bacha S. Reliability-based Maintenance Modelling of Multi-Component Systems using the Proportional Intensity Model. *International Journal of Performability Engineering*, 18(1), 56, 2022.
- [2] Bouyaya L. & Chaib R. Maintenance and Reliability of a Motor Pump: A Case Study. *International Journal of Performability Engineering*, 18(8), 559, 2022.
- [3] Marić B. & Medaković V. Procesi održavanja. Zbornik radova 5. Konferencije „Održavanje – Maintenance 2018, Zenica, Bosna i Hercegovina, 10–12. maj 2018, str. 141–146, 2018.
- [4] Karnakanti S. Study of Mechanical Performance Affecting Factors in Split Casing Pump, 2020.
- [5] Matlakala M. E, Kallon D. V. V, Simelane S. P. & Mashinini P. M. Impact of design parameters on the performance of centrifugal pumps. *Procedia Manufacturing*, 35, 197–206, 2019.
- [6] Bozorgasareh, H., Khalesi, J., Jafari, M., & Gazori, H. O. Performance improvement of mixed-flow centrifugal pumps with new impeller shrouds: Numerical and experimental investigations. *Renewable energy*, 163, 635–648, 2021.
- [7] Wong Z. M, Xin J. G, Tong S. G, Yang Z. Q, Zhao J. Y. & Mao J. H. Internal flow structure, fault detection, and performance optimization of centrifugal pumps. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 21(2), 85–117, 2020.
- [8] Chen L, Wei L, Wang Y, Wang J. & Li W. Monitoring and predictive maintenance of centrifugal pumps based on smart sensors. *Sensors*, 22(6), 2106, 2022.
- [9] Stevanović, A. Upravljanje rizicima primenom fmea metode na primeru mikro preduzeća. *Engineering management*, 8(1), 24–35, 2022.
- [10] Fabis-Domagala J, Domagala M. & Momeni H. A matrix FMEA analysis of variable delivery vane pumps. *Energies*, 14(6), 1741, 2021.

- [11]Emzain Z. F, Wardhana Z. G, Adiwidodo S, Rosady S. D. N, Prasetyo P. & Nova M. A. Implementation of Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) for centrifugal pump maintenance in water supply distribution system. *Jurnal Polimesin*, 22(3), 295-298, 2024.
- [12]Ivančan J, Lisjak D, Pavletić D. & Kolar D. Improvement of failure mode and effects analysis using fuzzy and adaptive neuro-fuzzy inference system. *Machines*, 11(7), 739, 2023.
- [13]Rahmania W. S, Prasetya H. E. G. & Sholihah F. H. (2020, September). Maintenance analysis of boiler feed pump turbine using failure mode effect analysis (FMEA) methods. In 2020 *International Electronics Symposium (IES)* (pp. 54-59). IEEE, 2020.
- [14]Bouyaya L. & Chaib R. Maintenance and Reliability of a Motor Pump: A Case Study. *International Journal of Performability Engineering*, 18(8), 559, 2022.
- [15]Srivyas P. D, Singh S. & Singh B. Study of various maintenance approaches types of failure and failure detection techniques used in hydraulic pumps: a review. *Industrial Engineering Journal*, 2017.
- [16]Shafiee M. & Sørensen J. D. Maintenance optimization and inspection planning of wind energy assets: Models, methods and strategies. *Reliability Engineering & System Safety*, 192, 105993, 2019.
- [17]Sitompul E. & Rohmat A. IoT-based running time monitoring system for machine preventive maintenance scheduling. *ELKHA: Jurnal Teknik Elektro*, 13(1), 33-40, 2021.
- [18]Gustavsson E, Patriksson M, Strömberg A. B, Wojciechowski A. & Önnheim M. Preventive maintenance scheduling of multi-component systems with interval costs. *Computers & Industrial Engineering*, 76, 390-400, 2014.

SUMMARY

ANALYSIS OF THE IMPACT OF THE FMEA METHOD ON REDUCING FAILURE RATE AND INCREASING THE RELIABILITY OF SCP PUMPS

This paper analyzes the impact of implementing preventive maintenance procedures based on the FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) method on the failure rate and reliability of split-case centrifugal pumps (SCP pumps). The research was conducted under real industrial operating conditions on an SCP pump used in a district heating system. The methodological approach included the collection of data on failures, downtime, and repair time over a period of six months before and six months after the implementation of preventive maintenance procedures. By applying the FMEA method, significant failure modes of key pump components were identified, risk assessment was performed using SOD parameters (Severity, Occurrence, Detection), and the Risk Priority Number (RPN) was determined. Based on the obtained results, targeted preventive maintenance procedures were defined and implemented. The results indicate a significant reduction in RPN values, a decrease in the number of failures and total downtime, as well as an increase in MTBF and a reduction in MTTR, confirming the effectiveness of the FMEA method in improving the reliability of SCP pumps

Key Words: FMEA method, SCP pumps, preventive maintenance, system reliability, failure rate, industrial maintenance