Planiranje održavanja s obzirom na troškove kvarova postrojenja

Špehar, Lobel

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:391145

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Stručni studij

PLANIRANJE ODRŽAVANJA S OBZIROM NA TROŠKOVE KVAROVA POSTROJENJA

Završni rad

Lobel Špehar

Osijek, 2017.

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac Z1S: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu završnog rada na preddiplomskom stručnom studiju

Osijek, 18.09.2017.

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za obranu završnog rada na preddiplomskom stručnom studiju

Ime i prezime studenta:	Lobel Špehar
Studij, smjer:	Preddiplomski stručni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
Mat. br. studenta, godina upisa:	A 4093, 10.10.2016.
OIB studenta:	02250792514
Mentor:	Izv.prof.dr.sc. Dominika Crnjac Milić
Sumentor:	Marko Vukobratović
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	Izv. prof. dr. sc. Predrag Marić
Član Povjerenstva:	Marko Vukobratović
Naslov završnog rada:	Planiranje održavanja s obzirom na troškove kvarova postrojenja
Znanstvena grana rada:	**Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)**
Zadatak završnog rada	Zadatak ove teme je analitičkim pristupom istražiti utjecaj periodičnog održavanja "zdravog" postrojenja na kumulativni tok novca koje postrojenje ostvaruje. Dodatno, potrebno je razmotriti učinak interventnog održavanja na cijenu kvarova i cijenu ne isporuke traženog proizvoda. Konačno, potrebno je usporediti ta dva pristupa održavanju te donijeti konačno mišljenje.
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (završnog rada):	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	18.09.2017.

	Potpis:
	Datum: 18.09.2017.

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 28.09.2017.

Ime i prezime studenta:	Lobel Špehar
Studij:	Preddiplomski stručni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
Mat. br. studenta, godina upisa:	A 4093, 10.10.2016.
Ephorus podudaranje [%]:	1%

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Planiranje održavanja s obzirom na troškove kvarova postrojenja**

izrađen pod vodstvom mentora Izv.prof.dr.sc. Dominika Crnjac Milić

i sumentora Marko Vukobratović

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.
Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

1. UVOD 1
2. PREVENTIVNO ODRŽAVANJE 2
2.1. Dijagnostika 3
2.1.1. Mjerenje vibracija i analiza 3
2.1.2. Analiza ulja 4
2.1.3. Termovizija 4
2.1.4. Ultrazvuk 5
2.1.5. Električna mjerenja 5
2.1.6. Penetracijsko ispitivanje 5
2.2. Model odluke o zamjeni 6
2.3. Elementi planiranog održavanja 7
2.3.1. Plan upravljanja 7
2.3.2. Zalihe postrojenja, popisivanje opreme i zapisnika 7
2.3.3. Raspored održavanja i upute 8
2.3.4. Kontrola i nadzor 8
3. MATEMATIČKI MODELI ZA OPTIMALNU PREVENTIVNU POLITIKU 9
3.1.1. Optimalna dob za preventivnu zamjenu (Tip 1 politika) 9
3.1.2. Zlatni rez 11
3.1.3. Optimalni konstantni interval preventivne zamjene (Tip 2 politika) 11
3.1.4. Ekstenzija politike tipa 1 i 2 12
3.2. Modeli inspekcija 14
3.2.1. Optimalan raspored pregleda 15
3.2.2. Najisplativiji model inspekcije pojedinačnog uređaja 17
3.2.3. Inspekcijski model za minimaliziranje očekivanog troška minimalnog popravka 18
3.2.4. Model za upravljanje inspekcijama više uređaja 19
4. PRAKTIČNI PRIMJER 22
4.1. Uvod u praktični primjer 22
4.2. Mrežni fotonaponski sustavi (on-grid) 22
4.3. Izmjenjivači 23
4.3.1. Aluminijski elektrolitski kondenzator 24

4.3.2. Bipolarni tranzistor s izoliranom upravljačkom elektrodom (IGBT) 24
4.3.3. Izmjenjivači u fotonaponskom sustavu 25
4.3.4. Očekivani životni vijek kritičnih dijelova izmjenjivača 26
4.4. Izračun isplativosti zamjene izmjenjivača 26
5. ZAKLJUČAK 31
LITERATURA 32
SAŽETAK 34
Maintenance planning given the cost of plant breakdown 34
ABSTRACT 34
ŽIVOTOPIS 35

1. UVOD

Kako bi se povećala financijska isplativost postrojenja potrebno je unaprijed isplanirati održavanje i preventivne mjere. Plan održavanja svakog postrojenja se razlikuje od ostalih zbog raznih faktora, npr. broj radnih sati, vrsta materijala u upotrebi/obradi, kvaliteta materijala koji čine postrojenje, kvaliteta resursa, uvjeti u kojima se postrojenje nalazi (vjetar, sunce, vlaga, temperatura, itd.). Zbog raznolikosti postrojenja za svako postrojenje se zasebno izrađuje plan održavanja.

Održavanje može biti izvršeno na dva načina: plansko (preventivno) i neplansko (korektivno) održavanje. Plansko održavanje podrazumjeva da su svi resursi potrebni za ostvarenje zadatka dostupni, a radovi se obavljaju u skladu s postavljenim rasporedom. Ne plansko održavanje može podrazumijevati dostupnost resursa potrebnih za ostvarivanje zadatka, ali radovi se ne obavljaju po rasporedu nego „po potrebi“. Plansko održavanje se odnosi na rad obavljen planirano, s predviđanjem, kontrolirano i s praćenjem. Preventivno održavanje smatra se skupom planiranih zadataka koji se obavljaju kako bi se spriječilo moguće kvarove i popravilo ili zamijenilo dio koji je „pri kraju“. Time se osigurava dostupnost i pouzdanost opreme. Dostupnost opreme se može definirati kao mogućnost korištenja opreme u bilo kojem trenutku je to potrebno. Pouzdanost opreme jest vjerojatnost fukncioniranja opreme u potrebnom vremenu. Preventivno održavanje smatra se planiranim radom, planiranim na osnovi podataka steknutih proučavanjem proteklih neuspjeha opreme i zabilježavanjem istih. Preventivno održavanje sastoji se od dvije kategorije: na osnovi statistika ili trenutnog stanja. Neplansko, tj. korektivno održavanje se izbjegava i svodi na minimum, iz razloga što kada dođe do kvara jednog od bitnih dijelova većeg postrojenja to može prouzročiti puno veće štete zbog zaustavljanja postrojenja, te prouzročiti kvarove na ostalim dijelovima postrojenja i time koštati znatno više nego što je potrebno da se taj dio unaprijed planirano zamjeni ili popravi.

Cilj ovog rada je pobliže upoznavanje s pojmom i vrstama održavanja postrojenja, te odnos troškova pri planiranom održavanju za razliku od neplaniranog održavanja, tj. isplativost planiranog održavanja.

U drugom poglavlju ovog rada ukratko su objašnjene vrste održavanja i načini izvršavanja održavanja, te je pobliže obrađeno planirano održavanje. U trećem dijelu prikazani su matematički modeli koji se koriste pri određivanju optimalnih politika održavanja, koji su korišteni u četvrtom poglavlju na praktičnom zadatku.

2. PREVENTIVNO ODRŽAVANJE

Preventivno održavanje [1] smatra se kao niz planiranih zadataka namjenjenih sprječavanju poznatih uzroka potencijalnih kvarova [1]. Može se planirati i izvršavati s obzirom na korištenje, vrijeme ili stanje opreme. Kvarovi se dijele na trenutne (slučajni i nepredvidivi) i postupne (rezultat su degradacije i predvidivi), postupni kvarovi mogu se uočiti na vrijeme te se na njih može utjecati i usporiti ih, dok se na trenutne ne može, nego je potrebno osigurati da svi djelovi potrebni za popravak budu pri ruci. Preventivnim održavanjem može se skratiti učestalost predvidivih kvarova pravilnim i redovitim servisom, tj. podmazivanjem, čišćenjem, inspekcijom i slično. Ukoliko kvar nije moguće spriječiti, učestalom inspekcijom i mjerenjima može se predvidjeti kvar i smanjiti potencijalnu štetu te utjecaj kvara određenog dijela postrojenja na ostale dijelove. Najčešće je cijena popravka, čišćenja i zadržavanja proizvodnje uzrokovana ne planiranim održavanjem puno viša, te samo održavanje dugotrajnije i teže nego u odnosu na preventivno održavanje, iz tog razloga se ne planirano održavanje izbjegava što je više moguće.

Najzahtjevniji dio pri planiranju radova potrebnih za preventiranje kvarova jest poznavanje učestalosti i razloga kvara, zbog tog razloga raspored održavanja se razlikuje od postrojenja do postrojenja, ali također se i mjenja na istom postrojenju tijekom godine, bilo zbog godišnjeg doba, upotrebe i/ili uočavanja novih uzroka tijekom vremena, tj. učenjem iz prethodnih grešaka.

Ponekad više faktora dovodi do kvara i ne može se sa sigurnošću procijeniti kada dolazi do njega, tada je potrebno imati sve potrebne dijelove i alate pri ruci i biti u stanju što prije reagirati i ukloniti kvar.

2.1. Dijagnostika

Proces otkrivanja uzroka kvara naziva se dijagnostika. Poznati su razni pristupi dijagnosticiranju, neki od prvih u upotrebi koji se i danas koriste se baziraju na ljudskim osjetilima samih izvođača održavanja[1].

Primjeri osnovnih ljudskih osjetila i naznake mogućih uzroka su:

- Njuh – mirisi dima, zbog pretjeranog trenja, curenje plinova,ulja..
- Vid – napuknuća, istrošenost dijelova, nepravilne rotacije, pomicanje dijelova..
- Dodir – vibracije, toplina, istrošenost dijelova, vlažnost..
- Zvuk – pištanje, ribanje, škripanje, lupkanje..
- Okus – slično njuhu.

Najpopularnije moderne dijagnostičke tehnologije su:

- Mjerenje vibracija i analiza
- Analiza ulja
- Termovizija
- Ultrazvuk
- Električna mjerenja
- Penetracijsko ispitivanje

Dijagnostika je neizbježna pri planiranju održavanja i ovisno o vrsti postrojenja nekad je potrebno koristiti više dijagnostičkih tehnologija kako bi se pratili postepeni kvarovi.

2.1.1. Mjerenje vibracija i analiza

Vibracije su periodično gibanje mehaničkih sustava oko ravnotežnog položaja. Vrijeme potrebno da se vrati u ravnotežni položaj jest period, a broj ponavljanja perioda u određenom vremenu zove se frekvencija. Kod vibriranja tijela prate se amplituda, tj. najveći otklon od ravnotežnog položaja, te vršno ubrzanje tijela.

Mjerenja vibracija trenutnog stanja se bilježe i uspoređuju s mjerenjima dobivenim pri radu kada je bilo poznato da postrojenje radi ispravno.

Ova dijagnostička tehnika može se koristiti pri praćenju rada mehaničke opreme koja sadržava dinamične dijelove, najčešće rotacijske, npr. zupčanike, propelere, rolere, pumpe, generatore i slično. Ovisno o parametru koji se mjeri analiziranjem mjerenja vibracija može se vrlo precizno doći do problematičnog problema i njegovog uzroka.

2.1.2. Analiza ulja

Kod analiziranja ulja potrebno je obratiti pozornost na više parametara ovisno o potencijalnom kvaru, te se pritom koriste razne tehnike. Uzrok kvara mogu biti neodgovarajuća kompozicija ulja ili sadržavanje stranih tijela.

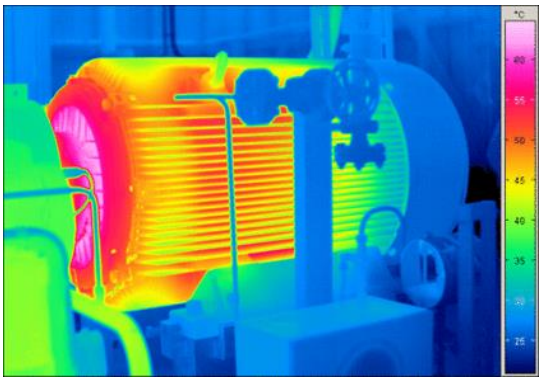
Ferografijom se otkrivaju čestice željeza koje nastaju trošenjem dijelova, može se pratiti trošenje materijala, te određivanje dijela koji se troši.

Spektroskopijom ulja mjeri se prisutnost i količina stranih tijela, za razliku od ferografije otkrivaju se i metali različiti od željeza, te nemetali. Izričito je korisno pri ranom otkrivanju kvarova jer se uočavaju vrlo sitne čestice.

Kromatografijom ulja mjere se promjene u svojstvima ulja, kao što su viskoznost, pH vrijednost, točka paljenja, trenje među česticama i količina vode.

2.1.3. Termovizija

Korištenjem infracrvene kamere prate se promjene u temperaturi površina. Termovizija[2] je korisna pri otkrivanju površina gdje se gubi najviše topline, dolazi do stanjivanja materijala ili pregrijavanja dijelova.



Slika 2.1. *Primjer termovizijske snimke elektromotora.[3]*

2.1.4. Ultrazvuk

Koristeći ovu tehniku mogu se uočiti nepravilnosti dijelova kao što su pukotine, praznine, nakupine tvari, korozija i slično. Nepravilnosti se otkrivaju odašiljanjem ultrazvučnog vala koji se odbija od tijela, te prema vremenu potrebnom da se val vrati određuje se oblik tijela. Uređaj koji se koristi u opisanom procesu prikazan je na slici Sl.2.2..



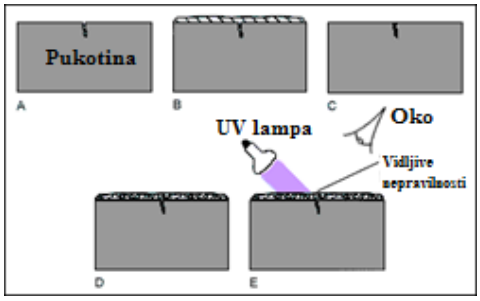
Slika 2.2. *Prijenosni uređaj za ultrazvučna mjerenja toka tekućine u cijevi.[4]*

2.1.5. Električna mjerenja

Pri izvršavanju električnih mjerenja mogu se uočiti korozivne promjene, otkrivanje dijelova pod naponom, te testirati izolacijske materijale.

2.1.6. Penetracijsko ispitivanje

Metoda nanošenja penetrirajućih tekućih boja koje ulaze u pukotine i nepravilnosti na površini, nakon ispiranja ili brisanja boje s površine mogu se uočiti dijelovi u koje je boja prodrla. Rezultati mogu biti vidljivi golim okom, dok se za sitnije nepravilnosti koriste fluorescentne boje vidljive pod UV svjetlima. Na slici Sl.2.3. nalazi se ilustracija koja slikovito prikazuje proces penetracijskog ispitivanja.



Slika 2.3. *Ilustracija penetracijskog ispitivanja[5].*

2.2. Model odluke o zamjeni

Prilikom odluke o zamjeni, popravku ili nadogradnji opreme potrebno je obratiti pažnju na razne faktore, jedan od najbitnijih jest financijska isplativost. Odluka o planu održavanja se može donositi prilikom dizajniranja sustava, pri uočavanju mogućeg kvara ili kada se kvar dogodi. U obzir se uzima cjelokupni trošak opreme tijekom vijeka trajanja do trenutka u kojem se uzima u obzir za zamjenu, mogući trošak do kojeg bi došlo prilikom kvara u odnosu na cijenu zamjene ili popravka. Svi troškovi od cijena nabave, instalacije, popravaka, zamjene, održavanja, pregleda, nadogradnje, čišćenja, rastavljanja i odlaganja moraju se uzeti u obzir pri donošenju odluke.

Prvobitno pitanje prilikom odluke jest „Popraviti ili zamjeniti?“. Ovisno o dijelu opreme koja je u pitanju obrati se pozornost na isplativost zamjene, te popravka i s obzirom na financijsku uštedu donosi se odluka. Kod kućišta i spojeva koji nisu bitni za rad opreme ukoliko dođe do oštećenja isplativije je popraviti nepravilnosti, npr. savijeni lim se ispravi ili se zavare puknuti dijelovi. Dok kod sitnijih dijelova, npr. puknuti ili istrošeni vijak se neće popravljati ili variti, nego je isplativije zamjeniti ga novim.

Prilikom nabave opreme potrebno je konzultirati se s dobavljačem o poznatim karakteristikama opreme kao što su učestalost kvarova, tj. potrebe za zamjenom potrošnih dijelova i slično. Zatim dostupnost materijala i alata za popravak i zamjenu, potrebno znanje i iskustvo za izvršavanje posla. Kod mnoge elektroničke opreme zbog garancije nije dozvoljeno sam izvršavati popravke na mjestu, nego je potrebno slati u ovlašteni servis. Ukoliko je potrebno pozvati ovlašteno osoblje ili slati opremu u za to predviđene institucije, treba obratiti pažnju na cijenu i vrijeme provedeno bez opreme.

Ukupan trošak sastoji se od troškova nabave, ulaganja, održavanja i odlaganja. Odluka se donosi primarno na ekonomskoj isplativosti.

2.3. Elementi planiranog održavanja

Planirano održavanje odnosi se na održavanje odrađeno po unaprijed postavljenom rasporedu, temelji se na predviđanju, kontroliranju i zabilježavanju. Podrazumijeva mnoge vrste održavanja i podrazumijeva preventivne, zamjenske i popravljačke pristupe. Karakteristični pristup planiranog održavanja prepoznatljiv je po slijedećem:

- Plan održavanja se pažljivo planira i stvara
- Održavanje se izvršava prema unaprijed planiranom rasporedu
- Radovi se nadgledaju kako bi se potvrdilo izvršavanje po planu
- Podatci se skupljaju, analiziraju, zabilježavaju, te se koriste kako bi promjenile tijek budućih radova.

2.3.1. Plan upravljanja

Kako bi se započelo razvijanje rasporeda održavanja potrebno je osnovati skupinu ljudi zaduženu za razvoj plana. Najčešće se jedna osoba postavlja kao voditelj skupine kako bi nadgledala razvoj i osigurala da sve ide po planu. Prvo je potrebno sastaviti osnovni plan i osnovati potrebne odjele za održavanje, nakon toga se postavlja raspored održavanja.

2.3.2. Zalihe postrojenja, popisivanje opreme i zapisnika

Potrebno je voditi detaljan zapis svih zaliha i opreme dostupne u postrojenju. Svaku zalihu kao i dio opreme potrebno je evidentirati pod jedinstvenim identifikacijskim kodom, te osmisliti sustav evidentiranja koji pomaže pri identifikacijskom procesu. Identifikacijski kod bi trebao sadržavati informacije o lokaciji, vrsti opreme i rednom broju opreme. Kompleksnost ovakvog sustava varira od postrojenja do postrojenja u ovisnosti o veličini postrojenja te količini potrebne opreme i zaliha za održavanje.

Zapisnik je dokument koji sadrži sve podatke o opremi potrebnoj za izvršavanje plana održavanja. Zapisnik sadržava trenutno stanje zaliha i opreme, predodređene norme potrebne za održavanje, te maksimalnu količinu zaliha i opreme koju postrojenje može podržati.

2.3.3. Raspored održavanja i upute

Potrebno je razviti detaljan raspored održavanja svakog dijela postrojenja. Raspored je popis zadataka osmišljenih za izvođenje radova na postrojenju, te sadržava ime i identifikacijski broj opreme, lokaciju, referentni broj u rasporedu, detaljan popis rada potrebnog za izvršavanje (inspekcija, preventivno održavanje, zamjene, popravci), učestalost izvršavanja radova, te struku, vrijeme, materijale, alate i ostale detalje potrebne za izvršavanje posla.

Upute za održavanje trebaju sadržavati referentni broj planiranog posla iz rasporeda, treba opisivati proceduru za svaki zadatak namjenjen za izvršavanje posla. Potrebno je navesti dijelove koje je potrebno popraviti ili zamjeniti, popis ukoliko je potrebno koristiti određene alate ili materijale, skice, upute za rukovanje i propise sigurnosti i zaštite na radu.

2.3.4. Kontrola i nadzor

Kako bi se osiguralo izvršavanje radova po rasporedu, te provjerilo kvalitetu izvršenih radova potrebno je osnovati grupu ljudi odgovornih za nadzor i kontrolu izvršenih radova. Potrebno je osigurati praćenje uputa i zakonski potrebnih postupaka za izvršavanje radova.

3. MATEMATIČKI MODELI ZA OPTIMALNU PREVENTIVNU POLITIKU

Postoje razne politike za sustave koji su podložni slučajnim kvarovima kako bi se odredio optimalni plan za izvršavanje održavanja. Dvije osnovne politike preventivnog održavanja koje predlažu Richard Barlow i Larry Hunter[1] biti će prikazane dalje u radu. Njihove politike se zasnivaju na dobi i konstantnom intervalu zamjene, poznati jos kao Tip 1 i Tip 2 politike. Nadalje su navedene sve oznake i značenja koja će biti korištena.

- C_p – trošak preventivnog održavanja
- C_f – trošak popravaka
- $f(t)$ – funkcija vjerojatnosti kvara u odnosu na vrijeme
- $F(t)$ – distribucija kvarova opreme
- $r(t)$ – funkcija učestalosti kvarova
- $N(t_p)$ – broj kvarova u intervalu $(0, t_p)$
- $H(t_p)$ – očekivani broj kvarova
- $R(t)$ – pouzdanost[6]
- $M(t_p)$ – očekivana vrijednost skraćene distribucije
- $C(t_p)$ – očekivani trošak po ciklusu
- $UC(t_p)$ – očekivani trošak po jedinici vremena

3.1.1. Optimalna dob za preventivnu zamjenu (Tip 1 politika)

Tip 1 politika definirana je izvođenjem preventivne zamjene nakon t_p sati kontinuiranog rada bez kvarova. t_p može biti konačan ili beskonačan. Uzmemo li slučaj kada je t_p beskonačan, nema potrebe za preventivnom zamjenom. Ukoliko dođe do kvara u sustavu prije isteka t_p sati, obavlja se održavanje, tj. zamjena, te se dogovara iduća preventivna zamjena za t_p sati. Ovom politikom osigurava se da postrojenje radi kao novo nakon bilo kakve izvršene zamjene. Ovakav pristup prilagođen je za pojedinačni dio opreme kod kojeg zamjena tog dijela ujedno znači i cjelokupni popravak. Uzmemo li u obzir situaciju u kojoj imamo dva radna ciklusa, gdje u prvom ciklusu oprema radi t_p vremena do predodređenog preventivnog održavanja, tj. zamjene, a u drugom ciklusu dođe do kvara opreme prije isteka t_p vremena, tj. prije preventivnog održavanja.

Cilj ovog modela jest odrediti optimalno vrijeme t_p, što znači da nakon t_p vremena se izvode radovi preventivnog održavanja nakon što je oprema radila konstantno i bez kvarova određeno vrijeme. Model određuje t_p vrijeme kakvo minimalizira ukupan očekivani trošak preventivnog održavanja i popravka po radnom ciklusu opreme ($UC(t_p)$).

$$UC(t_p) = \frac{Ukupan\ očekivani\ trošak\ po\ ciklusu}{Očekivano\ trajanje\ ciklusa} \tag{3-1}$$

Ukupan očekivani trošak po ciklusu sastoji se od troškova preventivnog održavanja uvećanog za trošak popravka nakon kvara, to jest:

$$C(t_p) = C_p * R(t_p) + C_f[1 - R(t_p)] \tag{3-2}$$

Gdje je $R(t_p)$ vjerojatnost da če oprema raditi bez kvara t_p vremena.

Očekivana duljina ciklusa sastoji se od očekivane duljine preventivnog ciklusa i očekivane duljine kvarnog ciklusa.

$$Očekivana\ duljina\ ciklusa = t_p R(t_p) + M(t_p)(1 - R(t_p)) \tag{3-3}$$

Gdje je

$$M(t_p) = \int_{-\infty}^{\infty} tf(t)dt/[1 - R(t_p)] \tag{3-4}$$

$M(t_p)$ jest srednja vrijednost skraćene distribucije u t_p (3-5)

$$UC(t_p) = \frac{C_p R(t_p) + C_f[1 - R(t_p)]}{t_p R(t_p) + M(t_p)[1 - R(t_p)]} \tag{3-5}$$

$UC(t_p)$ jest fukncija od t_p. Linearne metode kao što su zlatni rez ili Newtonova metoda mogu se koristiti kako bi se rješio ovaj tip problema. U nastavku pruženi su detalji o metodi zlatni rez.

3.1.2. Zlatni rez

Algoritam u ovom dijelu je izravni algoritam za pretraživanje. Ovisi o funkcionalnoj procjeni i ne koristi informacije o derivatima. Druge metode koje se baziraju na derivatima kao što je Newtonova metoda [1] mogu biti korištene za rješavanje problema koji traže minimum ili maksimum jedne varijable. Algoritam zahtjeva postavljanje zadatka u sljedećoj formi

$$Minimum\ g(t) \qquad (3\text{-}6)$$
$$Unutar\ a \leq t \leq b$$

Koraci algoritma glase:

1. Odaberite dozvoljenu krajnju razinu tolerancije, δ, te pretpostavite da početni interval u kojem leži minimum je $[a_1, b_1] = [a, b]$ i neka je
   $\lambda_1 = a_1 + (1-\alpha)(b_1 - a_1)$, $\mu_1 = a_1 + \alpha(b_1 - a_1)$ i $\alpha = 0.618$. Izračunajte g(λ_1) i g(μ_1), neka bude $k = 1$, te prijeđite na 2. korak.
2. Ako je $b_k - a_k < \delta$, stani jer optimalno rješenje jest $t^* = \frac{a_k + b_k}{2}$. Inače, ako je $g(\lambda_k) >$ g(μ_k), prijeđite na 3. korak, ukoliko je $g(\lambda_k) \leq$ g(μ_k), prijeđite na 4. korak.
3. Neka je $a_{k+1} = \lambda_k$ i $b_{k+1} = b_k$; nadalje, neka bude
   $\lambda_{k+1} = \mu_k$ i $\mu_{k+1} = a_{k+1} + \alpha(b_{k+1} - a_{k+1})$, izračunajte g($\mu_{k+1}$), zatim prijeđite na 5. korak.
4. Neka je $a_{k+1} = a_k$ i $b_{k+1} = \mu_k$; nadalje, neka bude $\mu_{k+1} = \lambda_k$ i $\lambda_{k+1} = a_{k+1} + (1 - \alpha)(b_{k+1} - a_{k+1})$, izračunajte g($\lambda_{k+1}$), zatim prijeđite na 5. korak.
5. Zamjenite k s k + 1 i prijeđite na 1. korak.

3.1.3. Optimalni konstantni interval preventivne zamjene (Tip 2 politika)

Tip 2 politika je definirana kao izvedba preventivnog održavanja na sustavu nakon što je odradio ukupno t_p sati neovisno o broju kvarova. U slučaju da se kvar dogodi prije isteka t_p sati, odrađuje se minimalan popravak. Minimalan popravak nema utjecaj na učestalost kvarova sustava, a preventivno održavanje obnovi sustav do stanja „kao nov“. Ovaj tip politike je namjenjen za kompleksne sustave kao što su turbine.

Cilj ovog modela jest odrediti optimalni t^*_p i svodi na minimum očekivane popravke i preventivno održavanje.

$$UC(t_p) = \frac{Ukupni\ troškovi\ preventivnog\ održavanja\ i\ minimalnih\ popravaka}{Trajanje\ intervala} \qquad (3\text{-}7)$$

Ukupan očekivani trošak $UC(t_p)$ sastoji se od troška preventivnog održavanja C_p uz dodatak troškova popravaka.

$$UC(t_p) = \frac{C_p + C_f H(t_p)}{t_p} \qquad (3\text{-}8)$$

Barlow i Hunter su pokazali kako očekivani broj kvarova u intervalu $(0, t_p)$ dobijemo integralom funkcije učestalosti kvarova:

$$N(t_p) = H(t_p) = \int_0^{t_p} r(t)dt \qquad (3\text{-}9)$$

$UC(t_p)$ je funkcija od t_p stoga direktna metoda potražnje kao što je zlatni rez može se koristiti pri pronalaženju t^*_p.

3.1.4. Ekstenzija politike tipa 1 i 2

Nguyen i Murthy generalizirali su dvije osnovne politike preventivnog održavanja koje su predložili Barlow i Hunter. Njihova tip 1 politika prilagođena je za pojedinačne sustave, npr. televizior i računalo. Tip 2 politika prilagođena je za višedjelne sustave kao što su osigurači i žarulje.

Tip 1 politiku definiraju na slijedeći način: sustav je potrebno zamjeniti nakon (k - 1) popravaka. Sustav podvrgnut (i - 1) broju popravaka, popravlja se(ili zamjenjuje ukoliko je $i = k$) kada dođe do kvara ili nakon T_i vremena, tj. vremena proteklog od zadnjeg popravka ili zamjene, ovisno o tome što prvo dođe.

Tip 2 politiku definiraju na slijedeći način: sustav je potrebno zamjeniti nakon (k - 1) popravaka. Za svaki sustav podvrgnut (i - 1) broju popravaka uvijek popravljamo (ili zamjenjujemo ukoliko je $i = k$) nakon T_i vremena. U slučaju kvara izvršavaju se minimalni popravci.

U slučaju kada je k = 1, prethodne dvije politike svode se na onu predloženu od Barlowa i Huntera.

- **Optimalan tip politike 1**

U ovom modelu troškovi održavanja sastoje se od troškova zamjene C_R, preventivnog održavanja C_p i troškova popravaka C_f.

Za sustave podvrgnute (i-1) broju preventivnih održavanja, ako primjenimo politiku primjene popravaka nakon kvara ili T_i vremena, što god dođe prvo, očekivani trošak preventivnog održavanja računa se na slijedeći način:

$$C_p(T_i) = C_p + C_f F_i(T_i) \tag{3-10}$$

Stoga očekivani trošak zamjenskog ciklusa je

$$C(k, T_i) = (k-1)C_p + C_R + C_f \sum_{i=1}^{k} F_i(T_i) \tag{3-11}$$

Očekivano trajanje ciklusa iznosi

$$L(k, T_i) = \sum_{i=1}^{k} \int_0^{T_i} F_i(t)dt \tag{3-12}$$

Poznato je

$$\mu_i = \int_0^{T_i} F_i(t)dt \tag{3-13}$$

Gdje je μ_i očekivana vrijednost T_i.

Model koji minimalizira očekivani trošak po jedinici vremena je

$$C(k, T_i, \dots, T_k) = \frac{[(k-1)C_p + C_r + C_f \sum_{i=1}^{k} \int_0^{T_i} F_i(T_i)]}{\sum_{i=1}^{k} \int_0^{T_i} F_i(t)dt} \quad (3\text{-}14)$$

Optimalna politika predlaže odabir k i vrijeme održavanja $\{T_i(k)\}$, i=1,...,k, tako da se minimalizira $C[k, T_1]$.

- **Optimalan tip politike 2**

U ovom modelu troškovi održavanja sastoje se od troškova zamjene, troškova preventivnog održavanja i troškova minimalnih popravaka.

Očekivani ukupni trošak po jedinici vremena za opći tip politike 2 je zadan izrazom:

$$C[k, T_1, \dots, T_k] = \frac{[(k-1)C_p + C_R + C_f \sum_{i=1}^{k} F_i(T_i)]}{\sum_{i=1}^{k} \int_0^{T_i} F_i(t)dt} \quad (3\text{-}15)$$

Gdje je $r_i(t)$ stopa kvarova za vrijeme t za sustav podvrgnut (i-1) broju popravak.

Cijena troškova u funkciji (3-15) može biti minimalizirana koristeći optimizacijske tehnike kako bi se postigla optimalna politika.

3.2. Modeli inspekcija

Glavna svrha inspekcija, tj. nadzora, je sakupljanje korisnih informacija o stanju opreme ili sustava. Inspektori sakupljaju informacije o korisnim pokazateljima kao što su nečistoće u ulju, očitavanje mjerača, trošenje ležaja, vibracije i kvalitete proizvoda. Informacije sakupljene o tim pokazateljima mogu biti korištene za predviđanje kvarova opreme i planiranje održavanja opreme s obzirom na stanje u kojem se trenutno nalazi. Korisnost nadzora može se vidjeti u sljedećem:

- Popravci su brži i jednostavniji ukoliko se potencijalni kvar uoči na vrijeme i ne prouzroči veću štetu
- Pravilno planiranje servisiranja sustava kako bi se radovi izvodili u vrijeme kada nastaje najmanje štete i ometanja u radu sustava

Održavanje s obzirom na stanje (engl. Condition based maintenance – CBM) [7] se definira kao održavanje po potrebi, tj. u trenutku kada se uoči potreba.

Održavanje se izvodi kada pokazatelji daju naznaku da dolazi do kvara sustava ili kada se uoči pad performansi sustava. Takav pristup dovodi do smanjenja troškova zbog smanjenja broja nepotrebnih popravaka, servisa i zamjena. Ova metoda zasniva se na praćenju i analiziranju podataka sakupljenih od sustava za nadzor, te raznih dijagnostičkih mjerenja. Kontinuirano praćenje i nadzor pružaju potrebne informacije o stanju sustava. Učestalost inspekcija i razina nadzora ovisi o troškovima inspekcija i koristi istih. Korisnost inspekcija i nadzora mjeri se po sposobnosti predviđanja nadolazećih kvarova s obzirom na trenutno stanje sustava, stoga preciznost i točnost dobivenih informacija je ključna za uspjeh predviđenog plana održavanja. U nadolazećem dijelu rada pobliže je opisana nekolicina modela koji pomažu pri odabiru učestalosti inspekcija.

3.2.1. Optimalan raspored pregleda

Oprema koja se koristi kao dio procesa proizvodnje može biti u dobrom stanju ili u stanju kvara. Moguće je saznati stanje opreme kroz inspekciju njenih proizvoda ili kroz neke druge pokazivače. Kada je kvar otkriven, oprema se dovodi u dobro stanje održavanjem i ciklus proizvodnje se nastavlja.

Model u ovom dijelu rada služi za procjenu optimalnog rasporeda održavanja koji minimalizira ukupni očekivani trošak po jedinici vremena u odnosu na inspekciju, održavanje i neuspješno otkrivanje kvara opreme. Ovaj model je ekvivalentan zamjenjivanju opreme kada je otkriven kvar. Inspekcijska politika je vođenje inspekcija u vrijeme $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ dok se neotkrije kvar. Kada je kvar otkriven oprema se dovodi u novo stanje održavanjem i ciklus proizvodnje ponovno počinje.

Za ovaj model koriste se sljedeće kratice:

- C_i – trošak inspekcije
- C_u – trošak po jedinici povezane s neuspješnim otkrivanjem kvara opreme
- $f(t)$ – funkcija vjerojatnosti kvara opreme u odnosu na vrijeme
- C_r – trošak popravaka
- T_r – vrijeme popravka
- $EC(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – ukupan očekivani trošak po ciklusu
- $ET(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – očekivano trajanje ciklusa
- $UE(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – ukupan očekivani trošak po jedinici vremena

Cilj je odrediti $x_1, x_2, \dots, x_n$ koji minimizira $UE(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$. Ukoliko se kvar dogodi između x_{i-1} i x_i, u vrijeme t_i, trošak ciklusa dobivamo formulom:

$$iC_i + C_u(x_i - t_i) + C_r \tag{3-16}$$

A očekivani iznos troška iznosi

$$\int_{x_{i-1}}^{x_i} [iC_i + C_u(x_u - t) + C_r] f(t)dt \tag{3-17}$$

Zbrojimo li sve i dobivamo očekivani trošak $EC(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$

$$\begin{aligned} EC(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= \sum_{k=0}^{\infty} \int_{x_k}^{x_{k+1}} [(k+1)C_i + C_u(x_{k+1} - t) + C_r] f(t)dt \\ &= C_r + \sum_{k=0}^{\infty} \int_{x_k}^{x_{k+1}} [(k+1)C_i + C_u(x_{k+1} - t)] f(t)dt \end{aligned} \tag{3-18}$$

Uzimajući u obzir slične argumente, očekivano trajanje ciklusa iznosi

$$ET(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = \mu + T_r + \sum_{k=0}^{\infty} \int_{x_k}^{x_{k+1}} (x_{k+1} - t)\, f(t)dt \tag{3-19}$$

Očekivani trošak po jedinici vremena dobiven je djeljenjem formule (3-18) s formulom (3-19)

$$C'(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = \frac{C_r + \sum_{k=0}^{\infty} \int_{x_k}^{x_{k+1}} [(k+1)C_i + C_u(x_{k+1} - t)] f(t)dt}{\mu + T_r + \sum_{k=0}^{\infty} \int_{x_k}^{x_{k+1}} (x_{k+1} - t)\, f(t)dt} \tag{3-20}$$

3.2.2. Najisplativiji model inspekcije pojedinačnog uređaja

Učestalost inspekcija za uređaje u kvaru se određuje koristeći model koji maksimizira profit po jedinici vremena. Model koji će biti korišten u daljnjem tekstu razvio je Hariga, a namjenjen je za uređaje koji se koriste u proizvodnji, te imaju klasičnu distribuciju kvara. Inspekcijom se otkriva stanje uređaja i rezultati mogo pomoći pri umanjivanju ozbiljnosti kvara. Kratice koje će se koristit u daljnjem tekstu su:

- C_r – trošak popravaka
- C_i - trošak inspekcije
- p – profit po jedinici vremena
- $P(t)$ – očekivani profit po ciklusu
- $P_1(t)$ – profit ciklusa bez kvarova
- $P_2(t)$ – profit ciklusa s kvarom

Pitanje na koje ovaj model odgovara jest „Koliko često je potrebno odraditi inspekciju uređaja da se ostvari maksimalan profit?“

Za ciklus bez kvarova koristimo

$$P_1(t) = \mathrm{pT} - C_i \tag{3-21}$$

Za ciklus s kvarom, pretpostavimo da se kvar dogodio u vrijeme t, t<T. Tada koristimo

$$P_2(t) = \mathrm{E[pt|t < T]} - C_i - C_r = \frac{\int_0^T ptf(t)dt}{F(T)} - C_i - C_r \tag{3-22}$$

Očekivani profit po ciklusu dobivamo tako što pomnožimo formule (3-21) i (3-22) s njihovim vjerojatnostima i zbrajamo ih kako je pokazano

$$P(T) = (pT - C_i)R(T) + \int_0^T ptf(t)dt - (C_i + C_r)F(T) \tag{3-23}$$

Uvrstimo li F(T) =1-R(T), dobijemo

$$P(T) = p\int_0^T R(t)dt + C_r R(T) - C_i - C_r \tag{3-24}$$

Očekivani profit po jedinici vremena $UP(T) = P(T)/T$ dobivamo iz izraza

$$UP(T) = (p\int_0^T R(t)dt + C_r R(T) - C_i - C_r)/T \tag{3-25}$$

$UP(T)$ je funkcija jedne varijable koja treba biti maksimizirana.

3.2.3. Inspekcijski model za minimaliziranje očekivanog troška minimalnog popravka

Proizvodnja koristi jedan uređaj u procesu, svaki ciklus započinje s novim uređajem ili s uređajem dovedenog do stanja „kao nov“. Nakon određenog perioda proces može izbjeći kontroli , što znači da je došlo do kvara uređaja. Kada dođe do kvara odrađuje se održavanje, tj. minimalan popravak, na uređaju kako bi se ostvarila kontrola nad procesom proizvodnje. Inspekcija se provodi u vrijeme $T_1, T_2, \dots, T_n$ promatra se proces i uređaj kako bi se poduzele primjerene mjere održavanja. Tri vrste troškova se uzimaju u obzir:

- C_i – cijena inspekcija
- C_f – cijena popravka
- s – cijena po jedinici vremena uređaja koji bude pod kontrolom, pa van kontrole
- T – ukupna očekivana cijena tojekom ciklusa proizvodnje
- C_r – cijena zamjene

Cilj je odrediti optimalnu vrijednost n i $T_i, i = 1,2, \dots, n$ takav da ukupna očekivana cijena procesa po jedinici vremena bude minimalna. Pretpostavimo da je životni vijek uređaja nasumična varijabla s distribucijom vjerojatnosti funkcija *f(t)*, te trajanje popravaka je zanemarivo, dovode uređaj u obnovljeno stanje. Popravci su minimalni i ne utječu na distribuciju kvara uređaja.

U obzir se uzima i cijena sustava kada on bude pod kontrolom, pa van kontrole, sastoji se od *n* uvjeta (jedan za svaki inspekcijski interval) što znači da se popravlja i kvari tijekom *i*-tog inspekcijskog intervala. $i = 0,1,2,3, \dots, n-1$.

$$C_{i+1} = \int_{T}^{T_{i+1}} [r + s(T_{i+1} - y]f(t)dt/F(T_i) \tag{3-26}$$

Gdje je

$$F(T_i) = 1 - F(T_i) \text{ i } F(T_i) = \int_0^{T_i} f(t)dt \tag{3-27}$$

Nadalje, očekivana cijena tijekom ciklusa proizvodnje dobiva se djeljenjem formule (3-27) s *T*

$$E(C) = C_r + nC_i + \sum_{i=0}^{n-1} C_{i+1} \tag{3-28}$$

Očekivana cijena po jedinici vremena glasi

$$E'(C) = [C_r + nC_i + \sum_{i=0}^{n-1} C_{i+1}]/T \tag{3-29}$$

Model može biti pojednostavljen uzevši u obzir $T_n = T$, dok je zadatak odrediti broj inspekcija *n*, te vrijeme za svaku inspekciju. Nadalje vidljivo je da ako učestalost kvarova prati eksponencijalnu distribuciju tada su inspekcije jednako udaljene $T_{i+1} - T_i = T_i - T_{i-1}$ za svaki *i*.

3.2.4. Model za upravljanje inspekcijama više uređaja

Model iz prošlog dijela razvili su Ben Daya i Duffuaa kako bi se kontrolirale inspekcije više uređaja. Troškovi u ovom modelu se sastoje od dva djela:

- Troškovi pripreme koji nastaju pri svakoj provjeri koji uređaj zahtjeva popravak
- Trošak kvara koji se sastoji od cijene popravka i nastalog troška zbog gubljenja kontrole

Vrijeme između dvje uzastopne pripreme smatra se osnovnim ciklusom. Upravljanje koristi troškove pripreme kako bi umanjilo ukupan očekivani trošak. Cilj ovog modela je odrediti vrijeme inspekcije, T_i, za uređaj *i* kao više osnovnih ciklusa i umanjiti očekivani trošak po jedinici vremena.

Kratice koje će se koristit u daljnjem tekstu su:

- N – broj uređaja
- A – prosječna cijena pripreme
- a_i – trošak inspekcije uređaja i
- C_{ij} – trošak kvara uređaja i tijekom intervala j
- T_0 – vrijeme između dvije uzastopne pripreme
- T_{ij} – vrijeme između (j-1)-te i j-te inspekcije uređaja i
- k_i – broj osnovnih ciklusa između dvije uzastopne inspekcije uređaja i
- $f_i(t)$ – funkcija gustoće vjerojatnosti da će uređaj prijeći u stanje „van kontrole“ uređaja i
- $F_i(t)$ – kumulativna funkcija distribucije
- r_i – trošak popravka uređaja i
- s_i – povećan trošak po jedinici vremena urađaja i koji radi u stanju „van kontrole“
- t_{ij} – vrijeme j-te inspekcije uređaja i
- T – duljina isplaniranog obzora

Pretpostavke za model su slijedeće:

1. Ciklusni raspored se ponavlja svakih T vremena.
2. Na kraju svakog intervala duljine T_0 odrađuje se provjera koji uređaj treba inspekciju o trošku A, zvano prosječna cijena pripreme. Periodična provjera u jednakim intervalima duljine T_0, praktična je iz razloga što pojednostavljuje vođenje inspekcija.
3. Svaki uređaj podložan je mjenjanju stanja iz „pod kontrolom“ u „van kontrole“ koje može biti provjereno jedino putem inspekcije. Vrijeme potrebno da se stanje uređaja i promjeni je eksponencijalna nasumična vrijednost s funkcijom gustoće vjerojatnosti $f_i(t) = \frac{1}{\lambda_i} e^{-\frac{1}{\lambda_i}}$. Ova pretpostavka dopušta nam korištenje konstantnog intervala inspekcije za svaki uređaj, te model može biti generaliziran da obuhvati opću funkciju kvara.

Ukupna očekivani trošak sastoji se od tri tipa troškova koji se mogu računati na sljedeči način:

1. Cijena pripreme nastaje kod svakog osnovnog ciklusa i računa se kao

$$\frac{T}{T_0} * A \tag{3-30}$$

2. Cijena inspekcije za svaki uređaj je zbroj cijena inspekcija svakog *i* uređaja

$$\sum_{i=1}^{N} \frac{T}{T_i} * a_i \tag{3-31}$$

3. Trošak kvara sastoji se od troška popravka uvećan za trošak vremena tijekom kojeg je uređaj radio „van kontrole“. Trošak kada uređaj ode „van kontrole“ u vrijeme *t* u intervalu $[t_{i,j}, t_{i,j+1}]$ je zadan kao

$$C_{i,j+1} = \int_{t_{i,j}}^{t_{i,j+1}} \left[r_i + s\left(t_{i,j+1} - y\right)\right] f_i(t)dt / F(t_{i,j}) \tag{3-32}$$

Ukupan iznos troška dobije se računanjem $C_{i,j+1}$ za svaki uređaj u svim intervalima, zatim se zbroje rezultati svih uređaja

$$\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=0}^{n_{i-1}} C_{i,j+1} \tag{3-33}$$

Gdje je $n_i = T/T_i$. Stoga ukupan očekivani trošak po ciklusu *T* iznosi

$$TEC(T_0, T_1, T_2, \dots, T_N) = \frac{T}{T_0} * A + \sum_{i=1}^{N} \frac{T}{T_i} * a_i + \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=0}^{n_{i-1}} C_{i,j+1} \tag{3-34}$$

Očekivani trošak po jedinici vremena dobije se djeljenjem $TEC(T_0, T_1, T_2, \dots, T_N)$ s T

$$TEC(T_0, T_1, T_2, \dots, T_N) = \frac{A}{T_0} + \sum_{i=1}^{N} \frac{a_i}{T_i} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{C_{i,j+1}}{T_i} \tag{3-35}$$

Dok je $T_i = kT_0$, gdje je k cijeli broj.

4. PRAKTIČNI PRIMJER

4.1. Uvod u praktični primjer

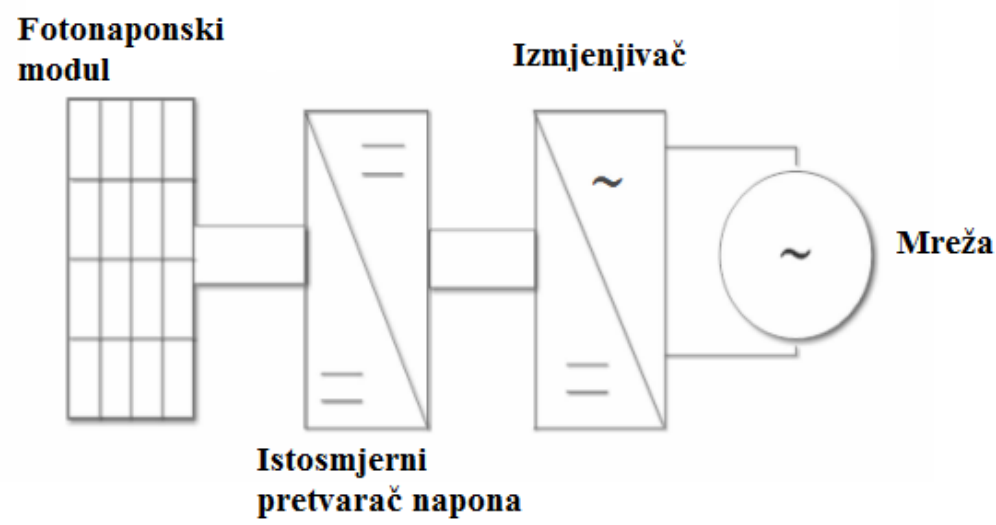
Kako bi se smanjilo zagađenje okoliša i smanjilo korištenje neobnovljivih izvora energije, kao što su nafta, ugljen i plin, dolazi do razvijanja novih tehnologija pretvorbe obnovljivih izvora energije iz vjetra, valova i sunca. Jedna popularna i vrlo dostupna tehnologija je fotonaponski sustav.

Fotonaponski sustav služi za pretvorbu sunčeve energije u električnu energiju. Dijele se na samostalne i mrežne sustave. Samostalni fotonaponski sustavi pohranjuju dobivenu električnu energiju u baterije ili akumulatore, dok mrežni fotonaponski sustavi dobivenu električnu energiju predaju u elektroenergetski sustav.

Dalje u radu pobliže će biti razrađeni mrežni fotonaponski sustavi, te isplativost zamjene jednog od dijelova, tj. pretvarača.

4.2. Mrežni fotonaponski sustavi (on-grid)

Fotonaponski sustavi koriste se u komercijalne i industrijske svrhe, te za potrebe stanovništva. Najčešće se sastoje od niza fotonaponskih modula, jednog ili više istosmjernog pretvarača napona, izmjenjivača, konstrukcije i kablova. Shema tipičnog mrežnog fotonaponskog sustava prikazana je na slici 4.1..

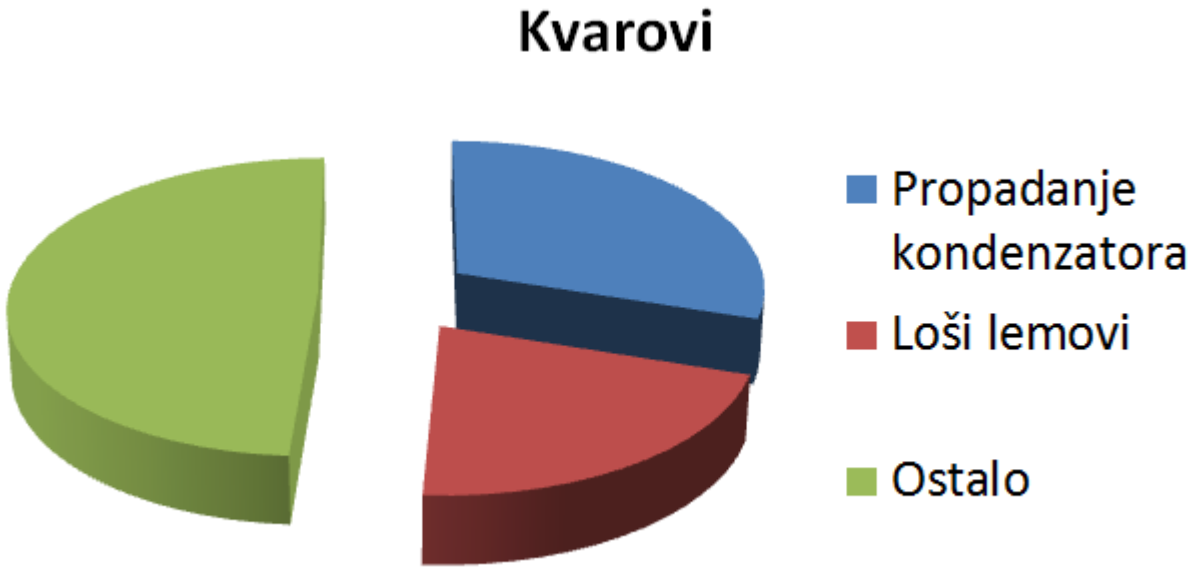


Slika 4.1. *Shema tipičnog fotonaponskog sustava [8]*

Kako bi se povećala isplativost fotonaponskih sustava radi se na postizanju što većeg stupnja pretvorbe, smanjenju cijene, boljoj pouzdanosti, te sigurnijom i održivom opskrbom. Najveći problem kod pouzdanosti kao najslabija karika u fotonaponskom sustavu su izmjenjivači. Kako bi se povećala pouzdanost fotonaponskog sustava radi se na povećavanju pouzdanosti izmjenjivača.

4.3. Izmjenjivači

Izmjenjivačima je osnovna svrha pretvorba istosmjerne struje u izmjeničnu struju koja odgovara parametrima mreže (napon i frekvencija). Pozdanost izmjenjivača ovisi o komponentama koje sadržava. Za 30% kvarova razlog je propadanje kondenzatora, za 21% kvarova krivi su loši lemovi i poluvodiči, dok je za većinu kvarova kriv aluminijski elektrolitski kondenzator koji se koristi na istosmjernoj sabirnici. Nakon toga vodeći razlog za kvarove su IGBT [9] (bipolarni tranzistor s izoliranom upravljačkom elektrodom) moduli. Uzimajući to u obzir potrebno je promotriti uzroke kvarova na kondenzatoru i IGBT-u i njihovu pouzdanost.



Slika 4.2. *Grafički prikaz razloga kvara izmjenjivača u postotcima*

4.3.1. Aluminijski elektrolitski kondenzator

Kako bi pretvorba energije bila što isplativija potrebno je imati konstantan tok struje iz fotonaponskih modula. Zbog ovisnosti o vremenskim uvjetima i različitim jakostima sunčeve svjetlosti tijekom dana i godišnjih doba, također zbog nepravilnosti istosmjernog vala dobivenog iz fotonaponskih modula, potrebno je dodati uređaj koji stabilizira tok električne energije [10], kako bi izmjenična struja bila konstantna i pretvorba energije što bolja. Tu ulogu ima aluminijski elektrolitski kondenzator.

Zbog visokog kapaciteta i jednostavnog postavljanja za pohranjivanje energije u komercijalnim izmjenjivačima koriste se elektrolitski kondenzatori. Porastom temperature zbog okoline i protoka struje dolazi do povećanja kapaciteta i smanjenja otpora. Kapacitet kondenzatora određuje se po formuli:

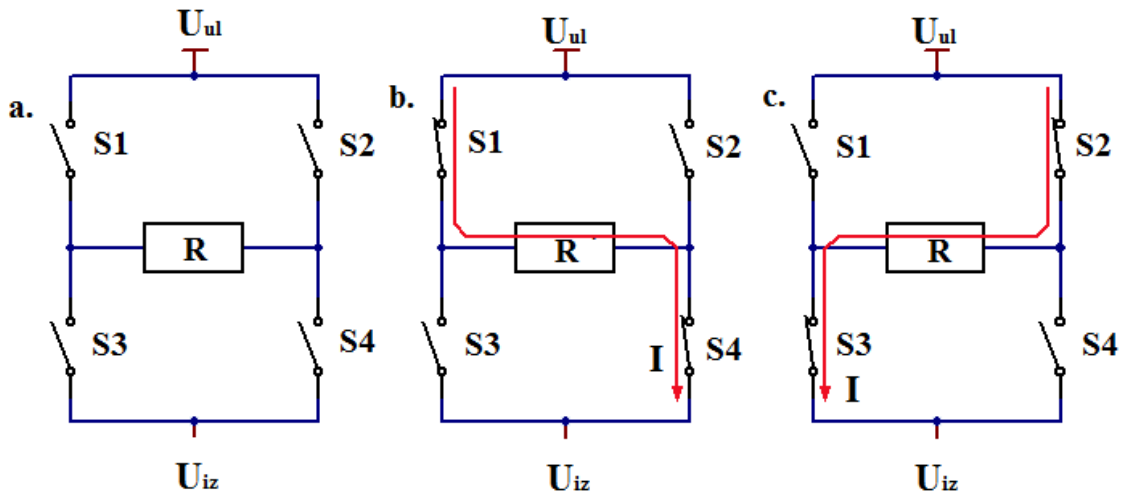
$$C = \frac{P_{PV}}{2\omega_{mreže} U_c u} \tag{4-1}$$

Gdje je P_{PV} nazivna snaga fotonaponskog modula, $\omega_{mreže}$ frekvencija mreže, U_c srednja vrijednost napona kroz kondenzator, a u vršna vrijednost struje.

Aluminijski elektrolitski kondenzatori su skupi i nepouzdani za pružanje visokog stupnja učinkovitosti u uvjetima koje pruža fotonaponski sustav. Pri radnoj temperaturi od 105ºC kondenzatori imaju ograničeni životni vijek u prosjeku od 1000~5000 sati. Životni vijek ovisi o raznim parametrima, kao što su nepovoljni vremenski uvijeti, nagle promjene temperature, valovitost struje i iznos istosmjerne struje. Kod fotonaponskih sustava ugrađenih vani uočeno je više kvarova kod kondenzatora zbog vremenskih uvjeta i utjecaja okoline.

4.3.2. Bipolarni tranzistor s izoliranom upravljačkom elektrodom (IGBT)

Izmjenjivači u fotonaponskom sustavu služe za pretvorbu istosmjerne u izmjeničnu struju. Ta pretvorba se postiže pomoću IGBT tranzistora spojenih u H-most topoligiju. H-most je elektronički sklop koji uklapa i isklapa parove tranzistora u pravilnim razmacima i time stvara izmjeničnu struju (Sl.4.2.). Na slici 4.2. ventili, tj. tranzistori su zamjenjeni sklopkama. Pod *a.* vidimo H-most gdje su sve sklopke u stanju nevođenja. Pod *b.* vode S1 i S4. Pod *c.* vode S2 i S3. Ovim načinom izmjene smjera struje dolazi do promjene smjera struje kroz trošilo.



Slika 4.3. *Prikaz H-mosta [11]*

IGBT služi kao poluvodička sklopka s tri spojke: „gate“, „collector“ i „emitter“. „Collector“ se još naziva i „drain“[12], a „emitter“ se još naziva „source“. IGBT je upravljiva, uklopiva i isklopiva sklopka, koja vodi struju u jednom smjeru.

Ona se uklapa pomoću pozitivnog naponskog impulsa na upravljačkoj elektrodi(„gate“), a isklapa kad taj impuls prestane. „Gate“ služi za kontroliranje toka među „collector“-a i „emitter“-a.

Do kvara kod IGBT-a dolazi zbog raznih uzroka. Jedan od je od rada pri visokim frekvencijama i jakim strujama. Zbog protoka struje stvara se jako magnetno polje koje s vremenom uzrokuje oksidaciju na „gate“-u i uzrokuje raspadanje. Drugi uzroci kvara mogu biti napetost vodiča zbog razlike i promjena u temperaturi. Zbog konstantne napetosti i pomicanja aluminijska žica se fizički odvoji od spoja.

4.3.3. Izmjenjivači u fotonaponskom sustavu

U prosjeku svakodnevno izmjenjivači rade 6-8 [13] sati tijekom najjačeg sunca. Poželjno je da im životni vijek bude duži od 20 godina, no stvarni životni vijek izmjenjivača je relativno kratak, stoga je potrebno promatrati radni vijek izmjenjivača i uzroke kvarova, raditi na sprječavanju poznatih uzroka kvara, te osmisliti i držati se plana preventivnog održavanja.

Temperatura okoline varira od -60ºC do 50ºC. Radna granica u punoj snazi mu inosi od -20ºC do 50ºC. Zbog lošeg utjecaja temperature na izmjenjivač potrebno je kontrolirati uvjete u fotonaponskom sustavu ventilatorima, grijačima i filterima. Potrebno je osmisliti automatizirani sustav za kontroliranje uvjeta.

4.3.4. Očekivani životni vijek kritičnih dijelova izmjenjivača

Pouzdanost izmjenjivača ovisi o pouzdanosti komponenti izmjenjivača. Životni vijek kritičnih komponenti je sljedeći:

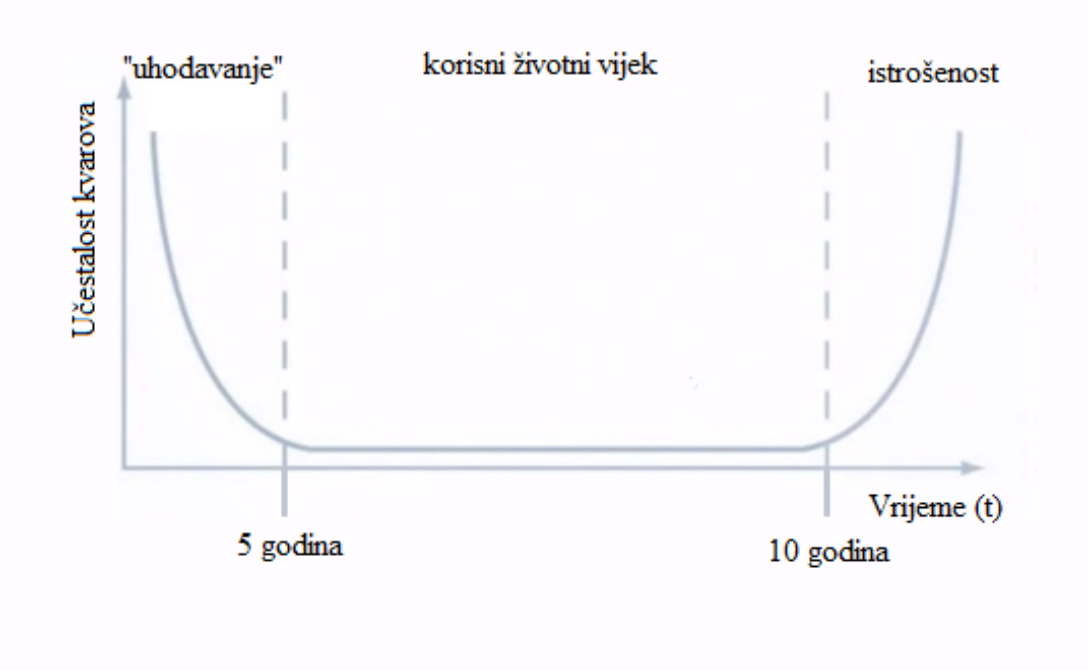
- IGBT – lemljeni spojevi pri radu na 50ºC - 40000 ciklusa/5(po danu)/365 = 21.92 godina
- Istosmjerna sabirnica kondenzatora – 40000(sati)/8/365 = 13.7 godina
- Glavna istosmjerna razdjelnica – 30000 ciklusa pri 2050A i 1000V. 30000/2 (ciklusa po danu)/365 = 41 godina
- Ventilatori za hlađenje – 36591/8(sati dnevno)/365 = 12.5 godina
- Optička vlakna odašiljača i prijemnika – 10 godina pri temperaturi 40ºC i 60mA

4.4. Izračun isplativosti zamjene izmjenjivača

Cijena izmjenjivača varira od proizvođača do proizvođača, stoga je cijena odabrana sa web stranice koja se bavi online prodajom, za „PSW7 10kW 96V 220vac/240vac DC to AC power inverter pure sine wave 10000w solar inverter“ [14] koja iznosi 1,330.20 $, što je po trenutnom tečaju (1 $ = 6.61 kn) 1330.20 * 6.61 = 8794.62 kn. Trajanje dostave varira od 20-30 dana. Tijekom čekanja dostave izgubi se u prosjeku 25*76.40 = 1910kn. Ukupna cijena popravka u ovom slučaju iznosi 10704.62kn.

Proizvođači najčešće pružaju garanciju od 10 godina, te je u tom periodu moguče izvršiti zamjenu uređaja s minimalnim iznosima koji nebi trebali prelaziti 30% vrijednosti opreme. Troškovi zamjene uključuju i troškove isporuke neispravnog uređaja.

Uzimajući u obzir tu informaciju, svaki kvar koji se dogodi u prvih 10 godina sveden je na 30% od 8794.62 kn, što je ~2638.38 kn, plus gubici čekanja novog uređaja koje zbog trajanja dostave (20-30 dana), te se tijekom čekanja dostave izgubi u prosjeku 25*76.40 = 1910kn. Ukupan trošak kvara dok traje garancija iznosi 4548.38kn.



Slika 4.4. *Učestalost kvarova izmjenjivača tijekom životnog vijeka [16]*

Krivulja prikazana na slici 4.3. prikazuje broj kvarova s obzirom na starost izmjenjivača. Vidljivo je da prvih i zadnjih 5 godina životnog vijeka izmjenjivači se najčešće kvare. Razlog tome je što u prvih 5 godina može doći do kvarova zbog nepogodnih uvijeta, neispravnog upravljanja uređajem ili tvorničkih grešaka, dok u zadnjim godinama dolazi do istrošenosti i dugog utjecaja topline i mnoštva odrađenih sati.

Tijekom prvih 5 i zadnjih 5 godina broj kvarova na izmjenjivačima iznosi 0.96 [15] godišnje po uređaju. S druge strane tijekom „korisnog životnog vijeka“ broj kvarova po izmjenjivaču godišnje spušta se na 0.01, što je drastična razlika s obzirom na prijašnji podatak.

Uzimajući u obzir da 1kWh = 1.91kn [17], a fotonaponski sustav od 10kW u prosjeku dnevno proizvede 40kWh(76.40kn), što je godišnje 14600kWh(27886kn). Očekivano je da životni vijek fotonaponskog sustava iznosi minimalno 20 godina. U tih 20 godina proizvede 292000kWh (557720kn).

Korištenjem znanja i formula stečenih tijekom pisanja ovog rada dobiveni su slijedeći podatci.

Uzimajući svaku godinu kao zaseban ciklus:

- C_p – 8794.62 kn
- C_{fbg} – 8794.62 + 1910 = 10704.62kn
- C_{fg} – 2638.38+ 1910 = 4548.38kn
- C_i - u ovom slučaju zanemariv, odrađuje se osobno
- p – 76.40kn dnevno
- $P(t)$ – 27886kn
- $P_1(t)$ – 27886kn
- $P_{2bg}(t)$ – 17181.38 kn
- $P_{2g}(t)$ – 23337.62kn

Iz dobivenih podataka vidljivo je kako zbog povećanja troškova održavanja istekom garancije smanjuju se očekivani prihodi u tom periodu.

Za ciklus bez kvarova koristimo:

$$P_1(t) = \mathrm{pT} - C_i$$
$$P_1(t) = 76.40 * 365 - 0$$
$$P_1(t) = 27886$$

Za ciklus s kvarom, pretpostimo li da se kvar dogodio u vrijeme t,t<T. Tada se koristi:

1. Prvih 10 godina dok traje garancija:

$$P_2(t) = \mathrm{E}[\mathrm{pt}|\mathrm{t} < \mathrm{T}] - C_i - C_r$$
$$P_2(t) = 27886 - 0 - 4548.38$$
$$P_2(t) = 23337.62$$

2. Nakon isteka garancije:

$$P_2(t) = \mathrm{E}[\mathrm{pt}|\mathrm{t} < \mathrm{T}] - C_i - C_r$$
$$P_2(t) = 27886 - 0 - 10704.62$$
$$P_2(t) = 17181.38$$

Pomnoži li se očekivane prihode s njihovim vjerojatnostima po periodima dobije se:

1. Tijekom prvih 5 godina s garancijom:

$$P(T) = P(t) - C_r * 0.96$$
$$P(T) = 27886 - 4548.38 * 0.96$$
$$P_{5g}(T) = 23519.55$$

2. Od 5-10 godina dok još traje garancija:

$$P(T) = P(t) - C_r * 0.96$$
$$P(T) = 27886 - 4548.38 * 0.01$$
$$P_{5-10g}(T) = 27840.51$$

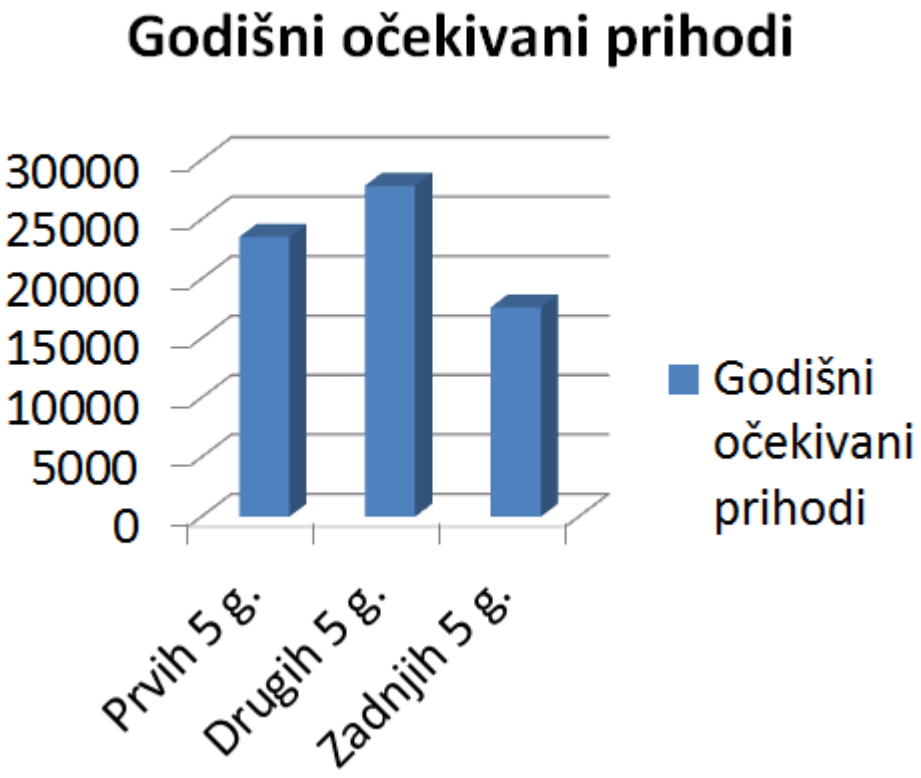
3. Zadnjih 5 godina bez garancije:

$$P(T) = P(t) - C_r * 0.96$$
$$P(T) = 27886 - 10704.62 * 0.96$$
$$P_{bg}(T) = 17609.56$$

Ukoliko se uređaj pokvari točno nakon 15 godina, očekivano je da fotonaponski sustav proizvede u posljednjih 5 godina životnog vijeka (od očekivanih 20) proizvede 139430kn. Cijenu novog invertera s gubicima zbog čekanja ($p_{5g} = 64.43$) isplati za 166.14 dana. Te u preostalom vremenu proizvede 106880.34kn.

Očekivana prosječna dnevna proizvodnja po periodima iznosi:

1. $p_{5g} = 64.43$ kn
2. $p_{5-10g} = 76.27$ kn
3. $p_{bg} = 48.24$ kn



Slika 4.5. *Grafička usporedba očekivanih godišnjih prihoda s obzirom na troškove održavanja izmjenjivača*

Uzme li se novi uređaj čim istekne garancija isplati se za 166.14 dana, te do kraja godine proizvede (zanemarujući čekanje, uređaj bi u ovom slučaju naručivali 30 dana prije isteka garancije) 198.86*64.43=12812.54kn, a u idućih 9 godina $(4 * 23519.55)+(5 * 27840.51) = 233280.75$, to zajedno u 10 godina iznosi 246093.29kn. Dok bi dotrajali uređaj u zadnjih 5 godina proizveo u najboljem slučaju $5 * 17609.56 = 88047.8$, plus 5 godina novog uređaja 106880.34kn, zajedno iznosi 194928.14kn.

U ovom slučaju najisplativije je izvršiti preventivnu zamjenu uređaja nakon 10 godina, tj. čim istekne garancija.

5. ZAKLJUČAK

U slučaju koji je obrađen u praktičnom primjeru, gdje se radi o održavanju izmjenjivača kod fotonaponskih sustava, napravljene su kalkulacije isplativosti zamjene uređaja prije i poslije kvara te su iste napravljene u raznim periodima života izmjenjivača gdje on u ovisnosti o kvaru ne pridonosi jednak iznos zarade. Najisplativiji period izmjenjivača jest onaj od 5-10 godina, gdje je uređaj „uhodan“, ima najniži broj kvarova i pod garancijom je, što uvelike smanjuje troškove održavanja. Dok, s druge strane, najneisplativiji period jest onaj gdje je uređaju istekla garancija i on je u stanju „istrošenosti“ te je samo pitanje vremena kada će se pokvariti, te mu je cijena zamjene tada puno veča nego dok ima garanciju, čak dovoljno velika da ga se isplati zamjeniti odmah nakon isteka garancije gledajući dugoročnu zaradu.

Tijekom pisanja rada uočeno je mnogo novih informacija i problema o kojima se ne razmišlja svakodnevno. Primjerice pristupi i prepreke s kojima se ljudi susreću pri osmišljavanju plana održavanja, te kako nepostoji nekakav univerzalan plan. Svaki uređaj i svako postrojenje zahtjeva posebnu pažnju i promatranje kako bi se tijekom godina i učeći na prijašnjim iskustvima izradio plan održavanja isplativ isključivo za to postrojenje koje se sastoji od točno tih uređaja i u tim uvjetima rada. Promijeni li se jedna varijabla, ili doda/makne jedan uređaj to može uvelike promjeniti potrebe postrojenja za održavanjem jer zasebno svaka komponenta može imat drugačiji životni vijek od onog koji ima kada se koristi zajedno s nekom drugom komponentom. Razlog tomu mogu biti toplina(prijelaz topline s jednog uređaja na drugi), dodirivanje uređaja(prijenos vibracija), i drugi međusobni utjecaji kao što je, u slučaju odrađenom u praktičnom zadatku nestabilni tok električne energije koju prima izmjenjivač. Taj isti izmjenjivač može imati puno veću pouzdanost u povoljnijim uvjetima kao što su niža radna temperatura ili stabilniji tok električne energije.

LITERATURA

[1] R. Barlow i L. Hunter, Optimum Preventive Maintenance Policies, Springer International Publishing Switzerland 2015

[2] M.Köntges, S. Kurtz, C. Packard, U. Jahn, K. A. Berger, K. Kato, T. Friesen, H. Liu i M. V. Iseghem. Performance and Reliability of Photovoltaic Systems. Dostupno na:

http://iea-pvps.org/fileadmin/dam/intranet/ExCo/IEA-PVPS_T13-01_2014_Review_of_Failures_of_Photovoltaic_Modules_Final.pdf

[3] Slika preuzeta s: http://www.infratec-infrared.com/

[4] Slika preuzeta s: http://www.ekodoma.lv/lv

[5] Slika preuzeta s: http://www.thcs.net/

[6] D. Maršić, 2006. Pouzdanost komponenti. Dostupno na:

http://www.ss-strukovna-vvlatkovica-zd.skole.hr/images/pages/Nastavni_materijali/Spahic/DIOU/diou-2-pouzdanost.pdf

[7] Održavanje po stanju. Dostupno na:

https://hr.wikipedia.org/wiki/Odr%C5%BEavanje_po_stanju

[8] Q. Zhou, C. Xun, Q. Dan i S. Liu, Grid-connected PV inverter reliability considerations: A review,2015 16th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)

[9] Insulated-gate bipolar transistor. Dostupno na:

https://en.wikipedia.org/wiki/Insulated-gate_bipolar_transistor

[10] E. D. Anese, S. V. Dhople i G. B. Giannakis. Photovoltaic Inverter Controllers Seeking AC Optimal Power Flow Solutions. 2015. Dostupno na: https://arxiv.org/pdf/1501.00188.pdf

[11] Slika preuzeta s: http://axotron.se/

[12] L. Balog. Fundamentals of MOSFET and IGBT Gate Driver Circuits. 2002. Dostupno na: http://www.ti.com/lit/ml/slua618/slua618.pdf

[13] J. Ma. Component Reliability in Photovoltaic Inverter Design. 2013. Dostupno na:

http://energy.sandia.gov/wp-content/gallery/uploads/3-Component-Reliability.pdf

[14] © 1999-2017 Alibaba.com. All rights reserved. Dostupno na: https://www.alibaba.com/

[15] E. Collins, M. Dvorack, J. Mahn, M. Mundt i M. Quintana. Reliability and availability analysis of a fielded photovoltaic system. Dostupno na: http://energy.sandia.gov/wp-content/gallery/uploads/093004c.pdf

[16] K. Zipp. How to calculate solar reliability. 2014. Dostupno na:

http://www.solarpowerworldonline.com/2014/02/calculating-solar-inverter-reliability/

[17] Tarifni sustav za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije. Dostupno na:

http://files.hrote.hr/files/PDF/Dokumenti/Obnovlj.%20izvori%20energije%20i%20kog/Tarifni_sustav_za_proizvodnju_EE_iz_OIEIK_NN_133_13.pdf

SAŽETAK

U ovom radu dan je pregled osnova održavanja. Obrađene su razne vrste održavanja, kao što su planirano i neplanirano održavanje, te njihovi pristupi, prednosti i mane. Obrađene su vrste inspekcija i alati te tehnike potrebne za njihovo izvršavanje. Nadalje u radu su prikazane vrste matematičkih modela koji se koriste pri određivanju optimalnih politika održavanja, te njihove prednosti i mane. Neki od matematičkih modela su zlatni rez, tip1 i tip 2 politika. Na kraju odrađen je praktični rad koji prikazuje kako se određuje optimalna politika održavanja za jedan uređaj, konkretno izmjenjivač u fotonaponskom sustavu.

Ključne riječi: održavanje, preventivna zamjena, popravak, kvar, isplativost, dijagnostika, pouzdanost, inspekcija, trošak, izmjenjivač

Maintenance planning given the cost of plant breakdown

ABSTRACT

This graduation work gives overview of maintenance. Few kinds of maintenance, like planned and unplanned maintenance, and their aproaches, advantages and disadvantages have been processed. Furthermore, in this graduation work mathematical models, like golden section, type 1 and type 1 policy, used in maintenance planning, and their advantages and disadvantages have been shown. In the end I presented practical work that shows how optimal maintenance policy for single device is determined, specifically inverter in photovoltaic system.

Ključne riječi: maintenance, preventive replacement, repair, breakdown, profitability, diagnostics, reliability, inspection, cost, inverter

ŽIVOTOPIS

Osobni podaci	
Ime i Prezime	*Lobel Špehar*
Datum rođenja	*15.04.1992., Pula*
Telefon	*0997676516*
E-mail	*lobel.spehar.os@gmail.com*
Adresa	*Svetog Roka 60, 31000 Osijek (Hrvatska)*
Državljanstvo	*Hrvatsko*

Obrazovanje	
Srednja školska sprema	*Jezična gimnazija, Osijek* *2007-2011*
Škola stranih jezika	*Pučko otvoreno učilište Osijek – Engleski jezik* *1998-2010*
Fakultet	*FERIT, Osijek - Stručni studij, smjer elektroenergetika* *2011-2017*

Radno iskustvo	
Transcom, Osijek	*Služba za korisnike Tele2* *3 mjeseca – 2011/2012 g.*
Agenor, Osijek	*Asistent na odjelu za projektiranje elektroinstalacija* *6 mjeseci – 2016 g.*
Aminess, Novigrad	*Pomoćnik u IT odjelu* *3 mjeseca – 2017 g.*

Ostalo	
Vozačka dozvola	*B kategorija*
Hobi	*Parkour* *Podvodni ribolov* *Sviranje gitare*