

Modelovanje pouzdanosti i rizika vetrogeneratora primenom simulacione Monte Karlo metode

Božo Ilić, Branko Savić, Anita Petrović

Visoka tehnička škola strukovnih studija,

Školska 1, Novi Sad, Republika Srbija

ilic@vtsns.edu.rs, savic@vtsns.edu.rs, petrovic.a@vtsns.edu.rs

Sažetak — Često su tokom izrade i eksploatacije složenih tehničkih sistema potrebni podaci koji se odnose na predviđanje kako će se ti sistemi ponašati tokom svoje eksploatacije. To se pre svega odnosi na njihove tehničke osobine kao što su pokazatelji pouzdanosti (pouzdanost, raspoloživost, srednje vreme između otkaza, intenzitet otkaza itd.). Pouzdanost i raspoloživost složenih tehničkih sistema, građenih od velikog broja komponenti, koji imaju veliki broj mogućih stanja, teško je odrediti pomoću analitičkih izraza, jer zahteva postavljanje i rešavanje velikog broja jednačina. Zbog toga su autori ovog rada razvili sopstveni model za proračun pokazatelja pouzdanosti i rizika složenih tehničkih sistema, kao što su vetrogeneratori koji su građeni od električnih, elektromehaničkih ili mehaničkih komponenti. Razvijeni model se bazira na primeni simulacione Monte Karlo metode.

Ključne riječi: pouzdanost, vetrogeneratori, simulaciona Monte Karlo metoda.

I. UVOD

Sve veća proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora posledica je povećane svesti stanovništva za očuvanjem okoline, kao i podsticaja od strane države. Sve više na značaju dobijaju do sada na neki način zanemarevani ili ignorisani izvori energije. Vetar je jedan od takvih takozvanih nekonvencionalnih izvora koji se, na primer, u severnoj i srednjoj Evropi već duži niz godina koristi sve više kao izvor električne energije. Instalirana snaga vetroelektrana u svetu u značajnom je porastu, što je prvenstveno posledica državnih podsticaja obnovljivim izvorima energije, ali i stalnog pada cene vetroagregata. Ubrzano instaliranje vetroelektrana je dovelo do potrebe za tehnološkim napretkom u korišćenju energije vetra. Nove tehnologije su dostigle visoki nivo kvaliteta, a time i visoka raspoloživost vetroelektrana. Iako je raspoloživost današnjih vetroelektrana vrlo visoka popriličan broj otkaza uzrokuju neplanirane prekide rada, a time i velike novčane gubitke zbog zastoja u proizvodnji električne energije.

Tehnologija korišćenja energije vetra nije više tako nova, ali je proizvodnja električne energije postojećom tehnologijom još uvek rizičnija nego eksploatacija fosilnih goriva ili vodotokova. Jedan od uzroka povećanog rizika u odnosu na poznate tehnologije je i brzi razvoj, te stalne inovacije opreme za korišćenje vetra. Problem je što predviđanje mogućih otkaza komponenti zahteva dugogodišnje praćenje i analiziranje podataka koje je kod opreme za korišćenje vetra još u početku. Zbog toga su autori ovog rada razvili sopstveni model za

proračun pokazatelja pouzdanosti vetrogeneratora, koji omogućava kvantitativnu analizu pouzdanosti složenih tehničkih sistema. Pomoću ovog modela moguće je vršiti proračun pokazatelja pouzdanosti korišćenjem empirijskih i analitičkih relacija, kao i simulacione Monte Karlo metode, a osnove njegovog razvoja opisane su u nastavku.

Projekat vetrogeneratora je složeni projekat koji je izložen brojnim rizicima od kojih su neki toliko visoki da mogu dovesti u pitanje uspešnost čitavog projekta. Rizik se može posmatrati kao funkcija verovatnoće nastanka nekog neželjenog događaja i negativnih posledica koje može uzrokovati taj neželjeni događaj. Rizik se može smanjiti smanjenjem verovatnoće nastanka neželjenog događaja V ili smanjenjem negativnih posledica koje može uzrokovati neželjeni događaj P ili smanjenjem i jednog i drugog. Rizike je moguće izbeći samo ako se od početka uzmu u obzir i analiziraju. U pripremnoj fazi se pojavljuje najveći broj rizika. Kvalitetno merenje vetropotencijala je jedan od najvažnijih faktora koji utiče na to da li će se isplatiti finansijska ulaganja u projekat izgradnje vetrogeneratora. Rizici vezani za merenje vetropotencijala su rizici vezani za slab vetar. Kvalitetno merenje podrazumeva i kvalitetnu obradu podataka. Merenje vetropotencijala sastoji se od dva dela. Prvo se određuju potencijalne lokacije na kojima će se vršiti merenja, a zatim se na odabranim lokacijama vrše merenja. Potencijal vetra neke lokacije određuje se preliminarno i uopšteno iz postojećih hidrometeoroloških podataka, a konačno i precizno merenjem na konkretnoj lokaciji. Posledica dobijanja nekvalitetnih rezultata merenja vetropotencijala je visok rizik da projekat vetrogeneratora može imati malu proizvodnju električne energije. Pored kvaliteta merenja vetropotencijala bitna je i dužina vremenskog intervala u kome se vrše merenja [1], [7].

II. PRORAČUN POKAZATELJA POUZDANOSTI KORIŠĆENJEM EMPIRIJSKIH PODATAKA

Pouzdanost $R(t)$ (engl. reliability) tehničkog sistema, predstavlja verovatnoću da će tehnički sistem uspešno, bez otkaza, obaviti funkciju za koju je namenjen pod određenim uslovima u posmatranom vremenskom intervalu, pod pretpostavkom da je radio ispravno na početku tog vremenskog intervala.

Empirijska funkcija nepouzdanosti $F(t)$, predstavlja verovatnoću da će tehnički sistem otkazati u posmatranom vremenskom intervalu $[0, t]$. Može se predstaviti kao odnos između broja tehničkih sistema koji su otkazali u posmatranom vremenskom intervalu $N-n(t)$ i ukupnog broja

tehničkih sistema koji su radili ispravno na početku tog vremenskog intervala N [1], [2]:

$$F(t) = \frac{N - n(t)}{N} \quad (1)$$

gde je:

$n(t)$ - broj tehničkih sistema koji nisu otkazali do kraju posmatranog vremenskog intervala $[0, t]$, to je diskretna slučajna promenljiva koja poprima vrednosti: $0, 1, 2, \dots, N$

$N - n(t)$ - broj tehničkih sistema koji su otkazali u posmatranom vremenskom intervalu $[0, t]$

N - ukupan broj posmatranih tehničkih sistema koji su radili ispravno na početku posmatranog vremenskog intervala $[0, t]$

Empirijska funkcija pouzdanosti $R_e(t)$, predstavlja verovatnoću da tehnički sistem neće otkazati u posmatranom vremenskom intervalu $[0, t]$. Može se predstaviti kao odnos između broja tehničkih sistema koji nisu otkazali do kraja posmatranog vremenskog intervala $n(t)$ i ukupnog broja posmatranih tehničkih sistema koji su ispravno radili na početku tog vremenskog intervala N [4], [5]:

$$R_e(t) = \frac{n(t)}{N(t)}, \% \quad (2)$$

Empirijska funkcija intenziteta otkaza $\lambda_e(t)$ tehničkih sistema se definiše kao broj otkaza tehničkih sistema u jedinici vremena u odnosu na trenutni broj ispravnih tehničkih sistema:

$$\lambda_e(t) = \frac{N - n(t)}{n(t) \cdot t}, 10^{-6} \times \text{broj otkaza/h} \quad (3)$$

Raspoloživost $A(t)$ (engl. availability) tehničkog sistema, predstavlja verovatnoću da će tehnički sistem u bilo kom trenutku vremena biti raspoloživ da uspešno obavi funkciju za koju je namenjen, kada se koristi pod određenim uslovima.

Operativna raspoloživost $A_o(t)$ (engl. operation availability) se računa po obrascu:

$$A_o(t) = \frac{\bar{t}_r}{\bar{t}_r + \bar{t}_z} \cdot 100 = \frac{MTBM}{MTBM + MDT} \cdot 100\% \quad (4)$$

gde je:

$MTBM$ - srednje vreme u radu, tj. srednje vreme između održavanja (korektivnih i preventivnih)

MDT - srednje vreme u zastoju

Sopstvena (unutrašnja, inherentna) raspoloživost $A_i(t)$ (engl. inherent availability) se računa po obrascu:

$$A_i(t) = \frac{\bar{t}_r}{\bar{t}_r + \bar{t}_{ako}} \cdot 100 = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \cdot 100\% \quad (5)$$

gde je:

$MTBF$ - srednje vreme između otkaza

$MTTR$ - srednje vreme popravke

III. PRORAČUN POKAZATELJA POUZDANOSTI KORIŠĆENJEM ANALITIČKIH (TEORIJSKIH) RELACIJA

Istraživanja sprovedena u industriji pokazuju da se verovatnoća otkaza sastavnih delova i/ili sistema, može najbolje opisati Weibull-ovom raspodelom otkaza tokom eksploatacije kada je intenzitet otkaza konstantan ili raste. Kako je eksponencijalna raspodela specijalan slučaj Weibull-ove, to Weibull-ova raspodela obuhvata i eksponencijalnu raspodelu. Kako mnogi otkazi u praktičnim situacijama, naročito u slučajevima neelektronskih sistema, kao što su vetrogeneratori, pokazuju rastuću tendenciju u toku vremena, primena Vajbulove raspodele, omogućuje razmatranje oblika ovakvih otkaza [8]. Zbog toga je za proračun pokazatelja pouzdanosti složenih tehničkih sistema, kao što su vetrogeneratori, korišćena Weibull-ova raspodela.

Funkcija gustine otkaza $f(t)$ u slučaju Weibull-ove raspodele glasi:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta - 1} e^{-\left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta}, \quad t \geq \gamma, \beta > 0, \eta > 0 \quad (6)$$

Funkcija pouzdanosti tehničkog sistema u posmatranom vremenskom intervalu $[0, t]$ u slučaju tro-parametarske Weibull-ove raspodele vremena rada do otkaza, može se dobiti iz jednačine (6) i računa se po obrascu [5], [6]:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^\infty f(t) dt = e^{-\left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (7)$$

$t \geq \gamma, \beta > 0, \eta > 0$

gde je:

t - dužina posmatranog vremenskog intervala

γ - parametar položaja raspodele

β - parametar oblika raspodele

η - parametar razmere raspodele

$F(t)$ - funkcija raspodele otkaza (funkcija nepouzdanosti)

Za proračun pokazatelja pouzdanosti složenih tehničkih sistema primenom razvijenog sopstvenog modela korišćena je dvo-parametarska Weibull-ova raspodela, koja predstavlja specijalan slučaj tro-parametarske Weibull-ove raspodele kada je parametar položaja $\gamma = 0$, tj. kada postoji mogućnost otkaza odmah na početku posmatranog vremenskog intervala $[0, t]$.

Srednje vreme između otkaza (korektivnih održavanja) $MTBF$ (Mean Time Between Failure), računa se po obrascu:

$$MTBF = \int_0^\infty t \cdot f(t) dt = - \int_0^\infty t \cdot \frac{dR(t)}{dt} dt = \gamma + \eta \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right), \text{ h} \quad (8)$$

gde je:

$$\Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) - \text{tzv. gama funkcija od } \left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$$

Vreme između otkaza TBF (Time To Repair) se dobija iz obrasca za pouzdanost (7) u slučaju tro-parametarske Weibull-ove raspodele i računa se po obrascu:

$$TBF = \gamma + \eta \ln\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (9)$$

Lognormalna raspodela se koristi prilikom proračuna vremena popravki *MTTR*. Lognormalna raspodela ima veliku primenu u održavanju sistema. Isto tako, ona je veoma dobra za proučavanje otkaza čiji je uzrok zamor materijala ili postepeno starenje tehničkog sistema tokom upotrebe kada se javlja istrošenost. Normalna raspodela je dvoparameterska raspodela sa parametrima μ i σ .

Funkcija gustine otkaza u slučaju lognormalne raspodele glasi:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right)^2}, \quad t > 0, \mu > 0, \sigma > 0 \quad (10)$$

gde je:

- μ - srednja vrednost
- σ - standardna devijacija
- t - dužina posmatranog vremenskog intervala

Srednje vreme popravke *MTTR* (Mean Time To Repair), zove se i srednje vreme do ponovnog uspostavljanja funkcije tehničkog sistema, računa se po obrascu:

$$MTTR = e^{\frac{\mu + \frac{1}{2}\sigma^2}{\sigma^2}} \quad (11)$$

IV. RAZVOJ MODELA ZA PRORAČUN POKAZATELJA POUZDANOSTI KORIŠĆENJEM SIMULACIONE MONTE KARLO METODE

U ovom delu prikazan je razvoj modela za proračun pokazatelja pouzdanosti vetrogeneratora. Ovaj model je razvijen u programu za tabelarnu obradu podataka Microsoft Excel koji omogućava lak rad, laku simulaciju koju je lako čitati, kao i ponovo izračunavati po potrebi.

Tokom izrade i eksploatacije različitih tehničkih sistema, često su potrebni podaci koji se odnose na predviđanje kako će se ti sistemi ponašati tokom svoje eksploatacije. To se pre svega odnosi na njihove tehničke osobine kao što su pouzdanost i raspoloživost. Pouzdanost i raspoloživost složenih tehničkih sistema građenih od velikog broja komponenti, kao što su vetrogeneratori, koji imaju veliki broj mogućih stanja, teško je (praktično gotovo nemoguće) odrediti pomoću analitičkih izraza, jer se zahteva postavljanje i rešavanje velikog broja jednačina. Zbog toga se za proračun pouzdanosti i raspoloživosti vetrogeneratora građenih od električnih, elektromehaničkih ili mehaničkih komponenti koristi simulaciona Monte Karlo metoda. Ovom metodom se vrši simulacija životnog veka vetrogeneratora, pomoću raznih programa koji pokušavaju da što vernije prikažu njegove osobine i uslove u kojima rade (uticaje okoline) [5].

Simulaciona Monte Karlo metoda je numerička metoda koja je, zahvaljujući brzom razvoju računara, postala jedna od najmoćnijih i najvažnijih metoda za rešavanje komplikovanih matematičkih problema. Simulaciona Monte Karlo metoda koristi statistiku da matematički modeluje realni proces i zatim utvrđuje verovatnoću mogućih rešenja. Ova metoda ima nedostatak kao i sve metode bazirane na statistici, a to je da rešenja nisu egzaktna, tj. skroz tačna nego postoje izvesna odstupanja (devijacije) od njih. Ovaj nedostatak treba imati na umu prilikom korišćenja ove metode. Ali i to je bolje, nego da se na takve podatke čeka po 20 godina, koliko bi bilo potrebno

bez simulacije, samo analizirajući podatke dobijene tokom životnog veka nekog sistema [5].

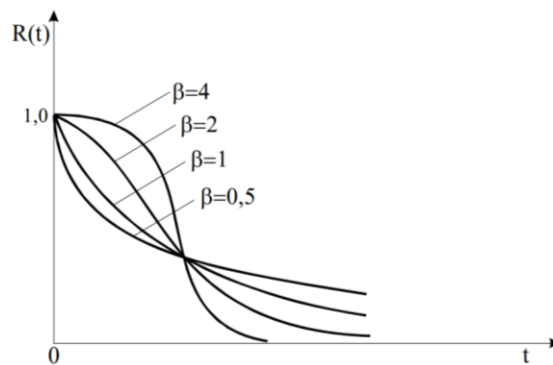
Osnova od koje se počinje u ovoj metodi su već poznati podaci (to se pre svega odnosi na poznate funkcije gustine otkaza koje opisuju evoluciju datog sistema u vremenu) koji se preko generatora pseudo-slučajnih brojeva generišu i kao takvi ulaze u potrebne proračune.

U nedostatku već gotovih programa, najpogodnije je za ovu simulaciju koristiti neki od programa za tabelarnu obradu podataka, kao što je npr. Microsoft Excel, koji obezbeđuje najlakši i najpregledniji postupak, kao i mogućnost lakog manipulisanja izlaznim vrednostima. Tabelarna struktura programa za obradu podataka omogućava da se proračuni i rezultati organizuju na prirodan i intuitivan način [5].

Prilikom primene razvijenog modela, podaci sa kojima se ulazi u ovaj proces su parametri Weibull-ove raspodele vremena do otkaza i parametri Lognormalne raspodele vremena popravki.

Vrednosti parametara Weibull-ove raspodele vremena do otkaza γ , β i η se određuju simulacionom metodom i unose u odgovarajuće ćelije, i to:

- γ - parametar položaja (vreme minimalnog rada tehničkog sistema do pojave otkaza), unosi se u ćeliju C4;
- β - parametar oblika, unosi se u ćeliju C5 (za električne komponente je $\beta=1$, a za elektromehaničke i mehaničke komponente je $\beta > 1$), Sl. 1;
- η - parametar razmere, unosi se u ćeliju C6; i
- t - posmatrani vremenski interval, unosi se u ćeliju C9.



Slika 1. Funkcija pouzdanosti u slučaju Weibull-ove raspodele za $\gamma = 0$, $\eta = const.$ i različite vrednosti parametra β [8]

Negativna vrednost parametra γ bi značila da sistem može da otkaze pre početka korišćenja. U momentu puštanja sistema u rad parametar γ jednak je 0, a vreme otkaza t uvek je veće ili jednako γ . Na oblik funkcije intenziteta otkaza najveći uticaj ima parametar β . Kada je $0 < \beta < 1$ funkcija intenziteta otkaza opada sa vremenom, kada je $\beta = 1$ intenzitet otkaza ne zavisi od vremena (eksponencijalna raspodela), a kada je $\beta > 1$ funkcija intenziteta otkaza je rastuća [8].

Metode ocenjivanja parametara mogu se najopštije podeliti na grafičke i analitičke (statističke). Grafičke metode koriste konstrukciju grafova sa transformisanim podacima iz uzorka. Crtanjem grafika se takođe vidi koliko je dobar model na osnovu rastojanja tačaka. Grafički dobijene ocene mogu se

koristiti kao početna aproksimacija za neke statističke metode ocenjivanja. Ocene dobijene grafičkim metodama nisu toliko precizne kao one dobijene statističkim metodama. Neke grafičke metode su: Graf empirijske kumulativne raspodele, Weibull-ov verovatnosni graf. Najčešće korišćene statističke metode su: Metoda momenata, Metoda maksimalne verodostojnosti, simulaciona metoda itd.

U slučaju Weibull-ove dvoparametarske raspodele, Weibull-ove verovatnosni graf se koristi za ocenjivanje parametara. Ova metoda uključuje određivanje prave linije tako da suma kvadrata rastojanja tačaka od te linije bude minimalna. Koeficijent determinacije r^2 daje kvantitativnu meru u kojoj model objašnjava varijacije zavisne promenljive [9].

Primenom simulacione metode za određivanje parametara raspodele popravljivih komponenti kompleksnih tehničkih sistema uvažava se porast nivoa pouzdanosti komponenti koji nastaje zbog korektivnih aktivnosti održavanja. Takođe ova metoda je primenljiva u slučajevima nedostatka potpune evidencije o otkazima, kao i u slučajevima malog broja otkaza pojedinih komponenti sistema.

Vrednosti parametara Lognormalne raspodele vremena popravki μ i σ , se određuju grafoanalitičkim metodama i unose se u odgovarajuće ćelije, i to:

μ - srednja vrednost, unosi se u ćeliju E4; i

σ - standardna devijacija, unosi se u ćeliju E5

V. REZULTATI PRORAČUNA POKAZATELJA POUZDANOSTI VETROGENERATORA PRIMENOM RAZVIJENOG MODELA

Analiza rada vetrogeneratora se sprovodi radi sprečavanja pojave otkaza i poboljšanja pouzdanosti komponenti, odnosno raspoloživosti vetrogeneratora. U ovu svrhu analizirani su dostupni podaci o broju otkaza vetrogeneratora [3], [5], [7] i na osnovu navedenih podataka primenom razvijenog modela izvršen je proračun pokazatelja pouzdanosti pojedinih komponenti vetrogeneratora, kao što su: lopatice, bidirekcionih energetskih pretvarači, generatori i kontrolno-upravljački moduli.

Proračun pokazatelja pouzdanosti je vršen tako što su parametri Weibull-ove raspodele procenjeni na osnovu eksploatacionih uslova i kvaliteta komponenti vetrogeneratora. Prilikom procene ovih parametara uzimane su u obzir elementarne nepogode (olujni vetar, udar groma), moguća oštećenja usled ljudskih aktivnosti, korozija, starost materijala, nečistoće na kontaktima, požari u pružnom pojasu, kvalitet preventivnog i korektivnog održavanja, kvalitet hlađenja i konstantnost protoka vazduha između rotora i statora, zaštita električnih komponenti, kvalitet upravljanja itd. Nepravilna procena velikih brzina vetra može dovesti do pogrešnog izbora vetrogeneratora, a time i smanjenja pouzdanosti. Otklanjanjem uočenih neispravnosti u početnoj fazi nastanka može se smanjiti broj otkaza i povećati pouzdanost.

Otkazi uzrokuju produženje vremena u prekidu rada vetrogeneratora, a time i smanjenje proizvodnje električne

energije. Svrha analize otkaza je da se otkriju uzroci otkaza. Broj otkaza kroz godine nije konstantan zbog promena spoljašnjeg opterećenja. Mehaničkim otkazima se smatraju otkazi lopatica, bidirekcionih energetskih pretvarača, hidraulike, sklopova za zakretanje lopatica i kočnica. Dok se električnim otkazima smatraju otkazi kontrolno-upravljačkih modula i generatora. Otkazi mehaničkih komponenti iznose 79%, a električnih samo 21% u ukupnom broju otkaza. Što znači da je znatno veći intenzitet otkaza mehaničkih komponenti nego električnih.

Analiza mogućih otkaza služi da se omogući procena na nivou celog vetrogeneratora koje su komponente sa kritičnim karakteristikama. To upućuje kojim komponentama se mora posvetiti veća pažnja prilikom nabavke opreme i projektovanja održavanja. Postoji više metoda za ovu vrstu analize, jedna od njih je FMEA (Failure Mode Effect Analysis) koja omogućuje analitički pristup kada se radi sa potencijalnim otkazima događajima i njihovim uzrocima. FMEA metoda određuje koji rizik će imati najveći uticaj i daje način kako prevazići problem pre nego što se pojavi. Implementacija metode se sprovodi u sledećim koracima: 1. Identifikovati komponente ili procese koji će se analizirati, 2. Identifikovati načine, efekte, uzroke i akcije za svaku komponentu koja će se analizirati, 3. Oceniti rizik komponente, 4. Odrediti prioritet korektivnih akcija, 5. Sprovesti i oceniti rezultate korektivnih akcija [9].

Rezultati tih proračuna prikazani su u tabeli I. Na Sl. 2. prikazan je primer rezultata proračuna pokazatelja pouzdanosti vetrogeneratora primenom razvijenog modela. U Excel-ovoj tabeli je prikazan deo simuliranih događaja (iteracija) i dat je raspored ćelija u kojima se prikazuju rezultati proračuna, tako da se mogu uporediti rezultati dobijeni korišćenjem analitičkih i empirijskih relacija, kao i simulacione Monte Karlo metode. Što su ovi rezultati bliži to je simulacija bolje urađena. Posle određenog broja iteracija primenom simulacione Monte Karlo metode za navedene ulazne podatke se izračunavaju vrednosti za pouzdanost $R_i(t)$ i sopstvenu raspoloživost $A_{i_i}(t)$ tehničkih sistema. Na osnovu rezultata proračuna nacrtani su dijagrami promene pouzdanosti pojedinih delova vetrogeneratora: bidirekcionih energetskih pretvarača (Sl. 3) i to: a) A - u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivano održavanje prema stanju i B - u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivano održavanje prema stanju; b) predikcija pouzdanosti u vremenskom intervalu od deset godina.

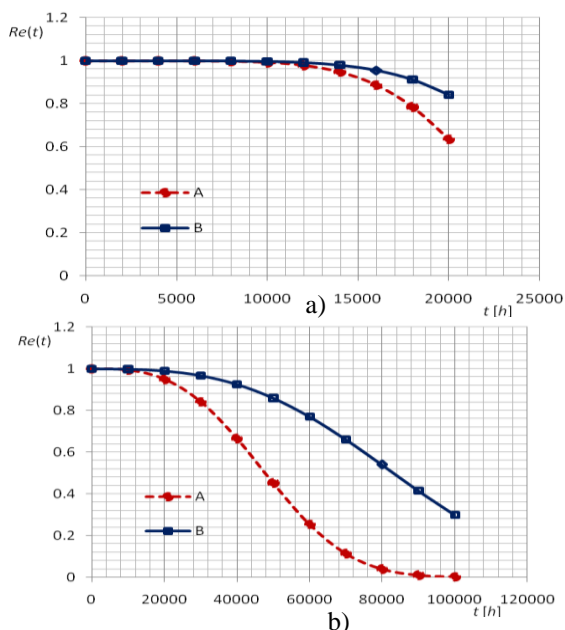
Otkazi znatno utiču na raspoloživost vetroelektrane i na njenu proizvodnju. Zbog toga otklanjanjem uzroka nekoliko ključnih otkaza, vreme u otkazu se može smanjiti u velikoj meri. Analiza je napravljena za četiri ključne komponente vetroagregata: lopatice, bidirekcionih energetskih pretvarača, hidrauliku i sistem za zakretanje. Frekvencija otkaza navedenih komponenti kroz desetogodišnji vremenski interval je 26,9%, 25%, 25% te 23,1%.

TABELA I. REZULTATI PRORAČUNA POKAZATELJA POUZDANOSTI POJEDINIH KOMONENTI VETROGENERATORA: A - U VREMENSKOM INTERVALU OD DVE GODINE KADA NIJE PRIMENJIVANO ODRŽAVANJE PREMA STANJU I B - U VREMENSKOM INTERVALU OD DVE GODINE KADA JE PRIMENJIVANO ODRŽAVANJE PREMA STANJU

Vrsta posmatrane komponente	Broj posmatranih komponenti N	Broj otkaza N-n(t)		Intenzitet otkaza $\lambda_e(t)$, $10^{-6} \times$ broj otkaza/h		Srednje vreme između otkaza MTBF, h		Pouzdanost $R_s(t)$ %	
		A	B	A	B	A	B	A	B
Lopaticice	160	45	24	22,30	10,07	44773	99280	71,87	85,00
Bidirekcionni energetski pretvarači	80	18	11	16,57	10,09	60346	109898	77,50	86,25
Generatori	80	6	2	4,26	1,46	216080	683280	92,50	97,50
Kontrolno-upravljački moduli	80	7	3	5,47	2,22	182708	449680	91,25	96,25

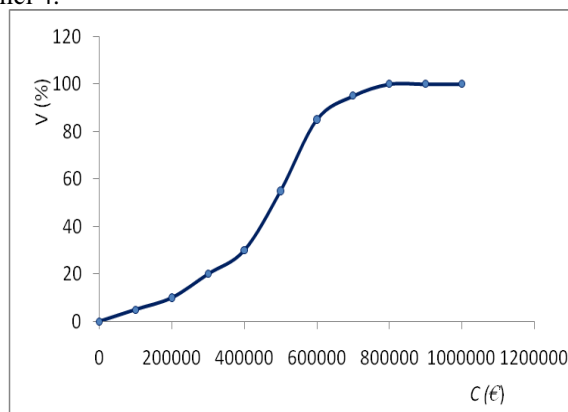
A	B	C	D	E	F	G	H
Proračun pokazatelja pouzdanosti vetrogeneratora							
$\gamma =$	500	$\mu =$	3	$N =$	45		
$\beta =$	1.56	$\sigma =$	0.5	$n(t) =$	17		
$\eta =$	1520	MTTR =	22.7598951	$N-n(t) =$	28		
MTBF	1866.16042	$Rt(t) =$	0.37548023	$Ait(t) =$	0.987950844		
		$Re(t) =$	0.37777778	$Aoe(t) =$	0.975		
$t =$	2000	$Rs(t) =$	0.36692333	$Ais(t) =$	0.988006976		
MTBMe =	1950	$Ae(t) =$	0.00082353				
MDTe =	50						
	Vreme između otkaza TBF	Vreme popravke TTR	Trenutak pojave otkaza	Trenutak završetka popravke			Uspešnost iteracije
14	16		16				0
15	2295	36	806	52			1
16	1225	17	1277	823			0
17	1826	20	2649	1297			0
18	806	24	2103	2673			0
19	3730	11	6403	2114			1
20	3829	60	5943	6463			1
21	1703	26	8166	5969			0
22	1071	33	7040	8199			0
23	2398	25	10597	7065			1
24	2273	26	9338	10623			1
25	773	25	11396	9363			0
26	673	13	10036	11409			0
27	2047	38	13456	10074			1

Slika 2. Primer proračuna pokazatelja pouzdanosti vetrogeneratora primenom razvijenog modela



Slika 3. Dijagrami promene pouzdanosti bidirekcionnih energetskih pretvarača: a) A - u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivano održavanje prema stanju i B - u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivano održavanje prema stanju, b) predikcija pouzdanosti u vremenskom intervalu od deset godina

Ukupni troškovi investiranja u izgradnju vetrogeneratora je varijabla s normalnom raspodelom verovatnoće i prikazani su na slici 4.



Slika 4. Kumulativna raspodela verovatnoće varijable ukupni troškovi investiranja u izgradnju vetrogeneratora

Moderni vetroagregati danas dostižu visoku raspoloživost od 95% do 99%. Industrijski standard je oko 97%. Raspoloživost vetroelektrana varira kroz njihov životni ciklus. Na početku rada vetroelektrana ima raspoloživost oko 93%, do kraja druge godine rada raspoloživost naraste na 96%, a nakon toga se ustalila na 97 - 98%. Iako je raspoloživost vetroelektrana vrlo visoka, popriličan broj otkaza uzrokuje neplanirane prekide rada, do deset prekiada godišnje, što uzrokuje velike napore pri održavanju, gubitke u proizvodnji i velike novčane gubitke [4], [7].

Tehnička raspoloživost je skoro konstantna kroz desetogodišnji vremenski interval i prosečna vrednost iznosi 94%. Tehničku raspoloživost je moguće povećati smanjenjem tehničkih otkaza vetroelektrane. Prosečna stvarna raspoloživost je manja od tehničke raspoloživosti i iznosi 82,9%. Vetrogeneratori ne rade celo vreme zbog otkaza i slabog vetra, te je zbog toga stvarna raspoloživost manja od tehničke. Vetrogeneratori su jedne godine imali vrlo nisku stvarnu raspoloživost zbog produženog vremena u otkazu mreže i vremena slabog vetra. Smanjenjem broja otkaza mreže i otkaza komponenti, stvarni nivo raspoloživosti se može povećati što vodi i do porasta nivoa pouzdanosti. Porastom nivoa raspoloživosti električne mreže može se povećati nivo raspoloživosti vetrogeneratora. Nivo raspoloživosti vetrogeneratora se može povećati i pravilnim održavanjem. Da bi vetroagregati radili neprekidno i proizvodili optimalnu

količinu električne energije potrebno ih je pravilno održavati, a takođe je potreban i nesmetan protok vazduha do njih [3], [7].

VI. ZAKLJUČAK

Primenom analitičkih i empirijskih relacija, kao i simulacione Monte Karlo metode moguće je izračunati raspoloživost i pouzdanost jednostavnih tehničkih sistema. Poređenjem rezultata proračuna utvrđen je visok stepen njihove podudarnosti, odnosno utvrđeno je da su rezultati dobijeni simulacijom vrlo bliski rezultatima dobijenim analitičkim i empirijskim relacijama. Time je potvrđena ispravnost primene razvijenog sopstvenog modela za simulaciju pouzdanosti i raspoloživosti složenih tehničkih sistema, kao što su vetrogeneratori.

Razvijeni model omogućava raspodelu srednjeg vremena između otkaza za komponente tehničkih sistema i optimizaciju rizika, pouzdanosti i raspoloživosti tehničkih sistema, što je veoma važno u procesu projektovanja, proizvodnje i utvrđivanja isplativosti korišćenja vetrogeneratora. Primenom predloženog modela moguće je izračunati stvarnu raspoloživost vetrogeneratora, koja pored vremena u zastoju vetrogeneratora uzrokovanih otkazima uzima u obzir i vremena u zastoju vetrogeneratora uzrokovane slabim vetrom. Zatim se na osnovu stvarne raspoloživosti vetrogeneratora može izračunati količina električne energije koju on može proizvesti za godinu dana, a na osnovu te količine proizvedene električne energije i njene cene, kao i cene vetrogeneratora može se izračunati vremenski period povratka investicionih ulaganja u vetrogenerator i proceniti rizik projekta vetrogeneratora.

LITERATURA

- [1] Adamović, Ž., Ilić, B., Nauka o održavanju tehničkih sistema, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2013.
- [2] KEMA (Hans Cleijne, Walter Ruijgrok), Nizozemska: „Modelling Risks of Renewable Energy Investments“, Report of the Green-X Project within the 5th framework programme of the EC, July 2004.

- [3] ECN Policy Studies - NL (co-ordinator): RISOE, Denmark; ZEW, Germany; CSIC, Spain; Observer, France; SERVEN, Italy (until December 2002): „Renewable electricity market developments in the European Union“ „Final report of the ADMIRE REBUS project, listopad, 2003.
- [4] RETScreen International Clean Energy Decision Support Centre: „Wind Energy Project Analysis“, CANMET Energy Technology Centre u suradnji s NASA-om, UNEP-om i GEF-om, 2003.
- [5] Ilic, B., Adamovic, Ž., Savic, B., Proposed model for calculation of reliability wind generators using Monte Carlo simulation method, Proceedings/IV International Conference - STED 2015, Banja Luka, 1-2.10.2015.
- [6] Marsh&McLennan Companies: „Scoping Study Financial Risk Management Instruments for Renewable Energy Projects; Sustainable Energy Finance Initiative (SEFI) United Nations Environment Programme“, 2004.
- [7] Špoljarić, M., Raspoloživost i rizik rada vjetroelektrana, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2011.
- [8] Ramović, R., Pouzdanost sistema elektronskih, telekomunikacionih i informacionih, Beograd, 2005.
- [9] Čović, D., Vejbulovala raspodela i njena primena u teoriji pouzdanosti, master rad, Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad, 2017.

ABSTRACT

Often during the development and operation of complex technical systems required data pertaining to predict how these systems behave during its exploitation. This is primarily related to their technical characteristics such as reliability indicators (reliability, availability, mean time between failures, failure intensity etc.). Reliability and availability of complex technical systems, built from a large number of components, which have a large number of possible states is difficult to determine using analytical expressions, because it requires setting up and solving a large number of equations. Therefore, the authors of this paper developed its own model for the calculation of the reliability and risk of complex technical systems, such as wind turbines, which are made up of electrical, electromechanical or mechanical components. This model is based on the use of Monte Carlo simulation methods.

RELIABILITY AND RISK MODELING OF WIND TURBINES USING THE MONTE CARLO SIMULATION METHOD

Božo Ilić, Branko Savić, Anita Petrović