Produljenje životnog vijeka regulacijskih lopatica jedne vodne turbine

The lifetime prolongation of the one water turbine wicket gate

Borivoj Novaković[a], Ljiljana Radovanović[a] Jasmina Pekez[a] Darko Žikić[b] Držislav Vikadović[c]

[a] University of Novi Sad, Tehnical faculty "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, Serbia
[b] Hidra HP, Zrenjanin, Serbia
[c] Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet, Hrvatska

*Corresponding author: novakovicborivoj1812@gmail.com

INFORMACIJE O ČLANKU

Kategorija:
Stručni rad

Ključne riječi:
Turbina
Regulacijska lopatica
Oštećenje
Hidroelektrana

Licenca: CC BY-NC-SA 4.0.

SAŽETAK

Prosječni radni vijek vodnih turbina iznosi oko 35 godina i zadnjih 20-ak godina Europu i svijet je zahvatila era revitalizacija dotrajalih vodnih turbina. Cilj revitalizacija je obnova elektrana za dodatnih 35 godina bez velikih građevinskih radova i zadiranja u okoliš. U ovom radu je dan primjer produljenja životnog vijeka jedne Francis turbine za više od deset godina prvenstveno kvalitetnim preventivnim i korektivnim održavanjem i uporabom metoda ispitivanja bez razaranja prije početka projekta revitalizacije hidroelektrane.

ARTICLE INFORMATION

Category:
Professional paper

Keywords:
Turbine
Wicket gate
Damage
Hydro power plant

License: CC BY-NC-SA 4.0.

ABSTRACT

The water turbine average working life is about 35 years and the last 20 years, Europe and the world is gripped era refurbishment of dilapidated water turbines. The goal of refurbishment is the renewal of power plants for an additional 35 years without major construction work and environmental impacts. This paper is example of extending the lifetime of one Francis turbine for more than ten years ago primarily to quality preventive and corrective maintenance and use of NDT methods before the refurbishment of hydroelectric power plants project.

1. Uvod

Prosječni životni odnosno radni vijek vodnih turbina iznosi oko 35 godina i zadnjih 20-ak godina Europu i svijet u globalu je zahvatila era revitalizacija dotrajalih vodnih turbina. GHE Zakučac je prva u Hrvatskoj još ratne 1992. godine započela s inicijalnim aktivnostima vezanim kako za vodne turbine tako i za zamjenu i obnovu cjelokupne primarne i sekundarne opreme hidroelektrane.

Prisjetimo se da se sama izgradnja GHE Zakučac odvijala u dvije etape: u prvoj etapi izgradnje 1961 -1962. godine ugrađene su dvije proizvodne jedinice s turbinama tipa Francis, snage 110.5 MW, svaka s instaliranim protokom od 50 m3/s i brzinom vrtnje 300 okr/min. U drugoj etapi gradnje, 1979 - 1980. godine, ugrađene su preostale dvije proizvodne jedinice također s turbinama tipa Francis, snage 135 MW i instaliranim protokom od 60m3/s, brzinom vrtnje 333 okr/min [8].

Tijekom svog više od pola stoljeća dugog radnog vijeka turbina A odradila je 332.836 sati. Ugašena je 11. travnja. 2012., a dva dana poslije započeli su radovi na najopsežnijem i najsloženijem segmentu rekonstrukcije GHE Zakučac – rekonstrukciji strojarnice. Glavni razlog inicijacije ovog iznimno kompleksnog projekta je dotrajalost i nepouzdanost primarne opreme, tu se prvenstveno misli na turbine i generatore, čiji je životni vijek odavno istekao a samo kvalitetnim održavanjem je produljen za gotovo 50 %. Spomenuto se posebice odnosi na regulacijske lopatice turbine A na kojima su prve pukotine pronađene 1998. (lopatica broj 18.) godine tijekom redovitog remonta. Znanjem i iskustvom osoblja Hrvatske elektroprivrede i specijaliziranih outsourcing tvrtki tj. tvrtke Marting d.o.o iz Zagreba, kroz redovito praćenje, ispitivanja metodama bez razaranja radile su još dodatnih četrnaest godina.

Na Slici 1 dane su fotografije podzemne strojarnice prije početka Projekta rekonstrukcije GHE Zakučac 2012. godine i nakon završetka 2018.



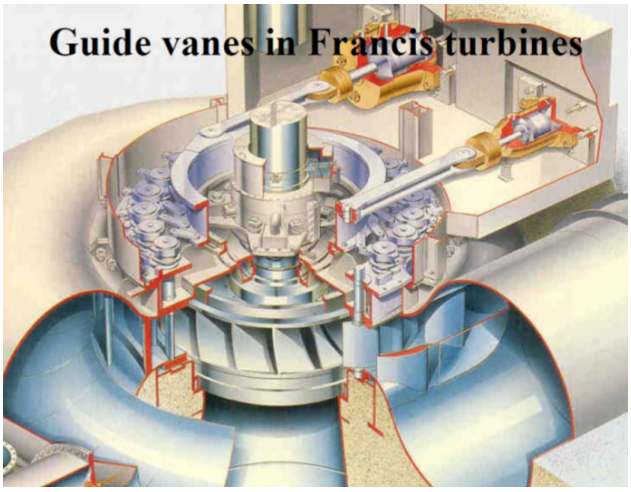


Slika 1. Pogled na strojarnicu GHE Zakučac: strojarnica prije početka rekonstrukcije (lijevo), nova strojarnica nakon završetka projekta rekonstrukcije (desno)
Figure 1 View on the machine room of Zakučac HPP: the old one before beginning refurbishment project (left), the new one after the refurbishment project (right)

Kako je riječ o iznimno kompleksnom i nadasve tehnički zahtjevnom projektu dobro je istaknuti još nekoliko podataka. Primjerice, danas je Projekt rekonstrukcije GHE Zakučac u fazi zatvaranja projekta nakon što su ostvareni svi zacrtani projektni ciljevi, zamjena cjelokupne primarne i sekundarne opreme uz povećanje snage, raspoloživosti, efektivnosti i efikasnosti rada same hidroelektrane.

2. Uloga regulacijskih lopatica

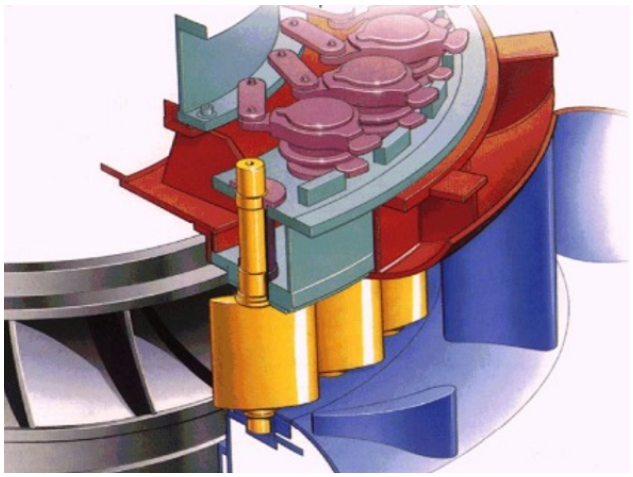
U sprovodnom aparatu Francis turbina potencijalna se energija vode samo djelomično pretvara u kinetičku, tako da s određenim pretlakom dospijeva na radno kolo (turbinski rotor) i njemu predaje svoju energiju. Dovod vode u samu turbinu omogućuje tlačni cjevovod i turbinska spirala. Turbinska spirala promjenom poprečnog presjeka mora osigurati pravilnu distribuciju vode na svom izlazu. Na izlazu iz rotora voda se difuzorom odvodi u odvodni kanal, povećavajući ukupnu iskoristivost kompletne turbine, slika 2.



Slika 2. Francis turbina - presjek
Figure 2 Francis turbine - section

Regulacijske lopatice (wicket gates, guide vanes), ili kako se u pojedinoj literaturi navode, sprovodne lopatice, sastavni su dio regulacijskog uređaja pomoću kojeg se regulira protok vode kroz radno kolo Francis turbine, slika 3.

Regulacijske lopatice montiraju se u protočnom traktu turbine, između statorskih (stay vanes) lopatica koje usmjeravaju vodu prema regulacijskim lopaticama i radnog kola (runner) koji pogoni cijeli agregat. Povećanjem protoka vode kroz turbinu postiže se veća snaga agregata.



Slika 3. Francis turbina - regulacijske
Figure 3 Francis turbine - wicket gates

3. Osnovni tehnički parametri

Regulacijske lopatice tijekom svog radnog vijeka podložene su raznim oblicima oštećivanja: pojavi pukotina, oštećenjima uslijed kavitacijske erozije, udarcima stranih tijela o list lopatice itd.

Kako bi se produljio životni vijek lopatice, nužno je provoditi redovite kontrolne preglede i ispitivanja metodama bez razaranja (Non Destructive Testing, NDT) površinskim i volumetrijskim NDT metodama te, ukoliko se kontrolnim pregledima i NDT ispitivanjima utvrde oštećenja koja su bitna za siguran i pouzdan daljnji rad turbine, biti spreman na provedbu reparature iste, a sve u cilju produljenja životnog vijeka.

Prve lopatice HE Zakučac (za turbine br. A i B), izrađene su oko 1960. godine tehnikom lijevanja iz materijala G-X8CrNi13. Čelični lijev G-X8CrNi13

Tablica 1. Kemijski sastav čeličnog lijeva G-X8CrNi13 (DIN 17445), izvor [1]
Table 1 The chemical contain of the cast steel G-X8CrNi13 (DIN 17445), source [1]

C	Si max	Mn max	P max	S max	Cr	Mo	Ni
0.06 ÷ 0.12	1.0	1.0	0.045	0.030	12.0 ÷ 13.5	≤ 0.5	1.0 ÷ 2.0

Table 2. Mechanical properties of cast steel G-X8CrNi13 (DIN 17445)
Tablica 2. Mehanička svojstva čeličnog lijeva G-X8CrNi13 (DIN 17445)

Stanje toplinske obrade	Tvrdoća HB	Granica razvlačenja $R_{P0.2\ min}$ N/mm^2	Vlačna čvrstoća R_m N/mm^2	Istezljivost A_5 min	Udarna radnja loma	
					KV min, J	KU min, J
Poboljšano	170 ÷ 200	440	590 ÷ 700	≥ 15%	≥ 27	≥ 27

spada u skupinu lijevanih martenzitno-feritnih nehrđajućih čelika. Zahtjevi vezani uz kemijski sastav čeličnog lijeva G-X8CrNi13 te njegova mehanička svojstva, odnosno, stanje isporuke glede toplinske obrade propisani su standardom DIN 17445.

Prema standardu DIN 17445 glavni legirni elementi kod ovog čelika su krom (Cr), nikal (Ni) i molibden (Mo). U Tablici 1, [1], dan je kemijski sastav koji propisuje DIN 17445 za čelični lijev G-X8CrNi13.

U Tablici 2, [1], dan je prikaz minimalnih zahtjeva za potrebna mehanička svojstva i stanja toplinske obrade koji se prema referentnom standardu DIN 17445 propisuje za lijevani čelik G-X8CrNi13.

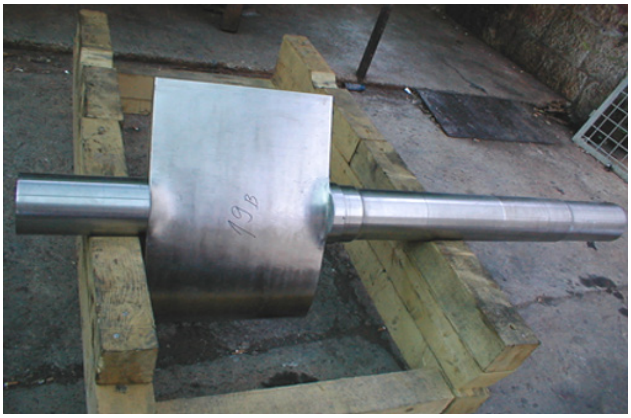
4. Kontrolni pregledi i praćenje

Tijekom redovnog godišnjeg pregleda turbine 1998. godine registrirana je prva pukotina na regulacijskim lopaticama i to u zoni donjeg čepa bliže izlaznom bridu lopatice gdje je opterećenje lopatica najveće. Prema dostupnim podacima, turbina je od puštanja u pogon 16.9.1961. do tada odradila približno 260.200 pogonskih sati. S obzirom na to da je agregat tada bio u pogonu više od 35 godina te je imao više od 250.000 radnih sati može se reći da je nastupio zamor materijala.



Slika 4. Turbina A - generalni remont 2000.- pogled na regulacijski lopatice
Figure 4 Turbine A - general overhaul 2000 - view on wicket gates

Osim 1998. godine, u redovnim godišnjim pregledima turbine, a time i regulacijskih lopatica, 2004. i 2009. godine registrirana je pojava novih pukotina i na drugim regulacijskim lopaticama.
Generalni remont turbine A, Slika 4, obavljen je 2000. godine tijekom kojeg je, uz ostale aktivnosti, obavljena kontrola registriranih pukotina, Slika 5. a pet regulacijskih lopatica je zamijenjeno rezervnima.



Slika 5. Turbina A - regulacijska lopatica 2000.
Figure 5 Turbine A - wicket gate 2000.

Kako je u tom trenutku postojao plan zamjene kompletne turbine, odnosno kako je Projekt rekonstrukcije GHE Zakučac bio u tijeku tj. fazi planiranja i realizacije, propagacija pukotina na regulacijskim lopaticama je praćena u kraćim vremenskim intervalima te, kada su za to postojali uvjeti i procijenjeno da daljnji rad turbine predstavlja opasnost za siguran i pouzdan rad, pukotine su reparirane.

Prilikom redovnog kontrolnog pregleda turbine u lipnju 2009. godine registrirana je pukotina duljine 28 mm na regulacijskoj lopatici br. 1 u zoni donjeg čepa bliže izlaznom bridu lopatice.

Kako u tom trenutku zbog povoljne hidrometeorološke situacije te potrebe za električnom energijom nije bilo moguće provesti reparaturu, propagacija pukotine je praćena kontrolnim pregledima svaka 4 mjeseca.

Trend propagacije pukotine registriran kroz četiri kontrolna pregleda počevši od redovnog godišnjeg

Tablica 3. Regulacijska lopatica broj 1 - propagacija pukotine, izvor [6]
Table 3 Wicket gate No. 1 - crack propagation, source [6]

	Duljina pukotine	Dubina pukotine	Propagacija duljine pukotine u odnosu na lipanj 2009.	Propagacija duljine pukotine u odnosu na studeni 2009.	Propagacija duljine pukotine u odnosu na ožujak 2010.
lipanj 2009.	28 mm	9-15 mm	-	-	-
studeni 2009.	36 mm	10-17 mm	22%	-	-
ožujak 2010.	60 mm	10-17 mm	115%	67%	-
lipanj 2010.	75 mm	15-20 mm	168%	108%	25%

Tablica 4. Regulacijska lopatica broj 2 - propagacija pukotine, izvor [7]
Table 4 Wicket gate No. 2 - crack propagation, source [7]

	Duljina pukotine	Dubina pukotine	Propagacija duljine pukotine u odnosu na studeni 2009.	Propagacija duljine pukotine u odnosu na ožujak 2010.
studeni 2009.	cca. 70 mm	-	-	-
ožujak 2010.	cca. 90-100 mm	-	cca. 29-43%	-
lipanj 2010.	cca. 110 mm	max. 22 mm	cca. 57%	cca. 10-22%

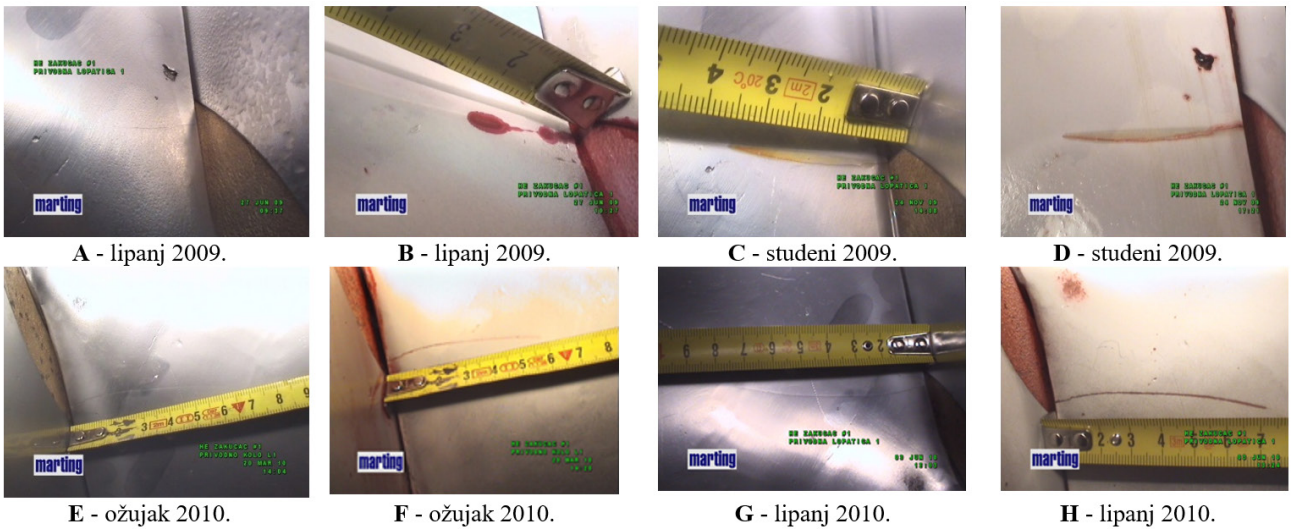
remonta u 2009. godini pa sve do redovnog godišnjeg remonta u 2010. godini kada je ista i reparirana dan je u tablici 3, [6].

Tijekom kontrolnog pregleda regulacijskih lopatica u studenom 2009. godine, osim propagacije pukotine registrirane na lopatici br. 1, registrirana je i nova pukotina na regulacijskoj lopatici br. 2. Pukotina je registrirana u zoni gornjeg čepa bliže izlaznom bridu a trend njene propagacije dan je u tablici 4, [7].

Znači, posljednji pregled i reparatura regulacijskih lopatica na turbini A provedeni su u lipnju 2010. godine. Turbina A je do tada od početka puštanja u pogon odradila cca 320.000 sati.

Trend propagacije pukotine na regulacijskoj lopatici br. 1 prikazan je na Slici 6:

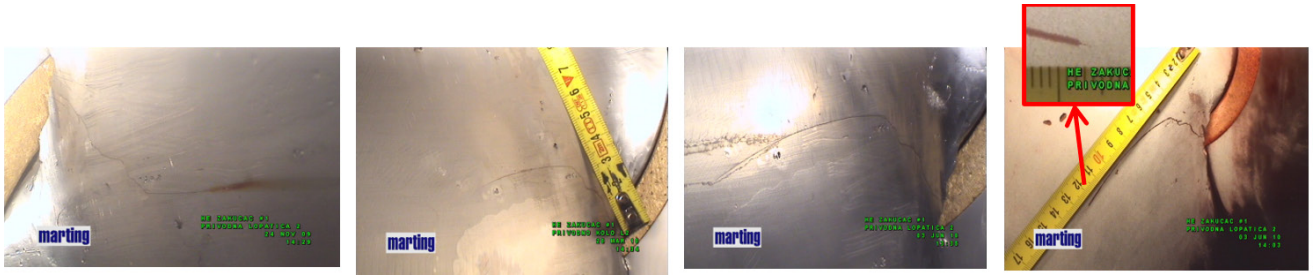
- A i B - pukotina duljine 28 mm registrirana u lipnju 2009. godine (slika A - VT pregled, slika B - PT ispitivanje);
- C i D - pukotina propagirala na duljinu 36 mm, registrirana u studenom 2009. godine (slika C - VT pregled, slika D - PT ispitivanje);
- E i F - pukotina propagirala na duljinu 60 mm, registrirana u ožujku 2010. godine (slika E - VT pregled, slika F - PT ispitivanje);
- G i H - pukotina propagirala na duljinu 75 mm, registrirana u lipnju 2010. godine (slika G - VT pregled, desna slika H - PT ispitivanje).



A - lipanj 2009. **B** - lipanj 2009. **C** - studeni 2009. **D** - studeni 2009.

E - ožujak 2010. **F** - ožujak 2010. **G** - lipanj 2010. **H** - lipanj 2010.

Slika 6. Regulacijska lopatica broj 1 - propagacija pukotine
Figure 6 Wicket gate No. 1 - crack propagation



Slika 7. Regulacijska lopatica broj 2 - propagacija pukotine
Figure 7 Wicket gate No. 1 - crack propagation

Trend propagacije pukotine na regulacijskoj lopatici br. 2 dan je u tablici 4 i prikazan je na slici 7:

- A - pukotina duljine cca. 70 mm registrirana u studenom 2009. godine;
- B - pukotina propagirala na duljinu cca. 90-100 mm, registrirana u ožujku 2010. godine;
- C - pukotina propagirala na duljinu cca. 110 mm registrirana u lipnju 2010. godine;
- D - pukotina duljine cca. 110 mm nakon PT ispitivanja, registrirana u lipnju 2010. godine.

5. Reparatura pukotina

Kako je kontrolnim pregledima utvrđeno da pukotine na regulacijskim lopaticama br. 1 i 2 propagiraju, provedena je reparatura pukotina. Reparatura regulacijskih lopatica provedena je u montiranom stanju i to na način da su lopatice bile zakrenute u maksimalno moguć položaj koji je omogućavao da se reparatura provede kroz međulopatični prostor statorskih lopatica, tj. iz prostora spiralnog kućišta turbine.

Registrirane pukotine izvađene su profilnim glodalima do zdravog materijala što je i potvrđeno međufaznim VT pregledom i PT ispitivanjem, Slika 8. Dimenzije kalota nakon vađenja pukotina iznosile su 80×30 mm dubine 11-28 mm (lopatica br. 1) odnosno 130×25 mm dubine 31-39 mm (lopatica br. 2).

Na Slici 8 dane su snimke pukotina tijekom međufazne kontrole i vađenja:

- A - Regulacijska lopatica br. 1 – pukotina snimljena tijekom međufaznog PT ispitivanja;
- B - Regulacijska lopatica br. 1 – PT ispitivanje kalote nakon vađenja pukotine;
- C - Regulacijska lopatica br. 2 – pukotina snimljena tijekom međufaznog PT ispitivanja;
- D - Regulacijska lopatica br. 2 – PT ispitivanje kalote nakon vađenja pukotine.

Nakon što su pukotine izvađene u potpunosti, provedeno je reparaturno zavarivanje REL postupkom.



A - reg. lopatica broj 1 **B** - reg. lopatica broj 1 **C** - reg. lopatica broj 2 **D** - reg. lopatica broj 2

Slika 8. Regulacijske lopatice br. 1 i br. 2 – tijekom reparature
Figure 8 Wicket gates no 1 and no 2- during repairing procedure



A **B** **C** **D**

Slika 9. Regulacijske lopatice br. 1 i br. 2 nakon reparatura
Figure 9. Wicket gates no 1 and no 2 after reparation

24 sata nakon završenih reparaturnih radova provedena su površinska i volumetrijska NDT ispitivanja. Provedenim NDT ispitivanjima nisu registrirane površinske niti volumetrijske nehomogenosti u metalu zavara, zoni utjecaja topline kao niti u osnovnom materijalu dostupnog dijela regulacijskih lopatica br. 1 i 2. Bitno je napomenuti da provedenom reparaturom nije eliminirana potencijalna opasnost od pojave novih pukotina na repariranim lopaticama kao i na bilo kojoj od preostalih 18 regulacijskih lopatica s obzirom na radni vijek turbine. Na temelju provedenih ispitivanja, zaključno se konstatiralo da je reparatura pukotina izvršena na zadovoljavajući način i u skladu s pravilima struke što je i potvrđeno periodičkim kontrolnim pregledima i NDT ispitivanjima koji su uslijedili nakon reparature, a koji su se kontinuirano provodili sve do zamjene turbine 2012. godine.

Na Slici 9. dane su slike lopatica nakon reparature:
- A - Regulacijska lopatica br. 1 – mjesto reparature nakon završnog poliranja;
- B - Regulacijska lopatica br. 1 – PT ispitivanje mjesta reparature;
- C - Regulacijska lopatica br. 2 – mjesto reparature nakon završnog poliranja;
- D - Regulacijska lopatica br. 2 – PT ispitivanje mjesta reparature.

Zaključak

Osigurati optimalnu raspoloživost instalirane opreme u proizvodnim procesima, uz što manje troškove, je jedan od osnovnih ciljeva održavanja.

U ovom radu dan je primjer produljenja životnog vijeka jedne Francis turbine za više od deset godina što je postignuto prvenstveno kvalitetnim preventivnim i korektivnim održavanjem: praćenjima, ispitivanjima, zamjenama lopatica rezervnim, sanacijama i sl. Naime, na regulacijskim lopaticama pronađene su pukotine čija je duljina tijekom višegodišnjih praćenja i ispitivanja propagirala za 47 mm na prvoj lopatici, a na drugoj lopatici 40 mm. U trenutku kad se procijenilo da je definitivno ugrožen siguran rad turbine izvršena je sanacija vađenjem pukotina tzv. kalotiranjem i reparaturnim navarivanje mjesta oštećenja.

Uzme li se u obzir srednja godišnja proizvodnja GHE Zakučac 1440,46 GWh (četiri proizvodne jedinice) nije teško izračunati da je ovo produljenje životnog vijeka regulacijskih lopatica osiguralo financijska sredstva za zamjenu svih četiriju proizvodnih jedinica GHE Zakučac.

Uz korištenje stručnih resursa HEP Proizvodnje i outsourcinga i kroz ovaj primjer je pokazano i dokazano "…održavanje je razvoj…".

Literatura

[1] Unterweiser P. M. (1996), Worldwide Guide to Equivalent Irons and Steels" Third Edition (ASM Internacional, USA.

[2] Deželić R., (1987), Metali 2, Sveučilište u Splitu, FESB, Split.

[3] James P. Womack, Daniel T. Jones, Daniel Roos, (1991), The Machine that changed the World (How Japan's secret weapon in the global auto wars will revolutionize western industry), Harper Perennial, New York.

[4] Grupa autora, (2009): Marting izvješće br. 0915-HEZ – Izvješće o NDT ispitivanju i reparaturi strojarske opreme agregata 1(A) HE Zakučac (remont 2009.).

[5] Grupa autora, (studeni 2009), Marting izvješće br. 0927-HEZ – Izvješće o NDT ispitivanju privodnih lopatica turbine br. 1(A) HE Zakučac.

[6] Grupa autora, (lipanj 2010), Marting izvješće br. 1013-HEZ – Izvješće o NDT ispitivanju privodnih lopatica turbine br. 1(A) HE Zakučac.

[7] Grupa autora, (lipanj 2010), Marting izvješće br. 1016-HEZ – Izvješće o reparaturi privodnih lopatica br. 1 i 2 turbine br. 1(A) HE Zakučac.

[8] Sever Z., Franković B.. Pavlin Ž., Stanković V. (2000), Hydroelectric power plants in Croatia; Hrvatska elektroprivreda, Zagreb.