

# POTISKIVANJA VIBRACIJA VRATILA AGREGATA A HE DUBRAVA ZASNOVANO NA DETALJNOJ DIJAGNOSTICI ROTORA

Đuro Dvekar, Goričan – Branko Bajić, Zagreb/Luksemburg – Ivan Bacinger, Pušćine – Damir Magić, Čakovec – Josip Sabolek, Čakovec – Muharem Demirović, Zagreb

UDK 621.311.21.005  
PREGLEDNI ČLANAK

Opisuje se način smanjenja razine vibracija vratila cijevnog agregata A HE Dubrava uzrokovanih labavljenjem zaklinjenog spoja polnog kotača i vratila. Provedeno je precizno namještanje polnog kotača na vratilo zasnovano na opsežnim dijagnostičkim ispitivanjima i detaljnoj analizi kinematike i dinamike rotora agregata. Položaj je fiksiran elementima koji su imuni na postojeći tip trošenja.

**Cljučne riječi:** vratilo, polni kotač, rotor, vibracije, dijagnostika.

## 1. UVOD

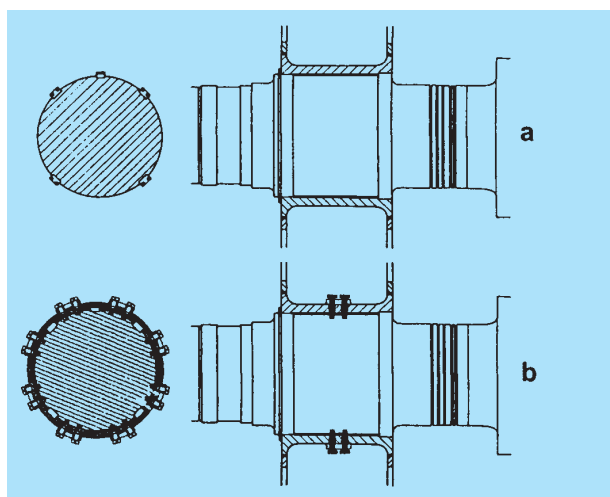
Vratila oba cijevna agregata HE Dubrava snage po 40 MW uležištena su pomoću dva radijalna ležaja na krajevima i jednog aksijalnog između njih, a polni kotač generatora je spojen na vratilo zaklinjenjem (sl. 1). Ovaj spoj ima nekoliko mana [1]: tanka i elastična glavina, premalen preklap između glavine polnog kotača i vratila, te neodgovarajuće izvedeni utori za klinove. Sve ovo je uzrok dugogodišnjeg trošenja i labavljenja spoja na agregatu A, što je rezultiralo visokim vibracijama vratila (sl. 2) i skakanjem polnog kotača po vratilu [2]. Konačno, povećanje amplituda vibracija vratila na 0,5 mm pod teretom i 0,8 mm u praznom hodu onemogućilo je daljnju eksploataciju.

Stroj je osposobljen za daljnji rad kroz dvije sanacije, koje se opisuju u nastavku.

## 2. PRVA SANACIJA

Središnji dio glavine polnog kotača fiksiran je na vratilo pomoću 32 zatika koji su radijalno stegnuti vijcima, a postojeći klinovi su doklinjeni (sl. 1). Ideja ovakve sanacije bila je da se polni kotač osloni na središnji dio glavine, koji se ne deformira zbog radijalnih sila. Isto tako, kako je novo oslanjanje smješteno u uskom pojasu na sredini glavine, izostaje klizanje između dosjednih ramena glavine i vratila, uzrokovano savijanjem vratila.

Nakon zahvata obavljena su detaljna dijagnostička ispitivanja [2]. Provedena su mjerenja zračnog raspora, magnetskog toka i relativnih vibracija vratila da bi se otkrio uzrok visokih vibracija i ocijenio uspjeh sanacije. Utvrđeno je da je uzrok vibracija ekscentričnost pol-

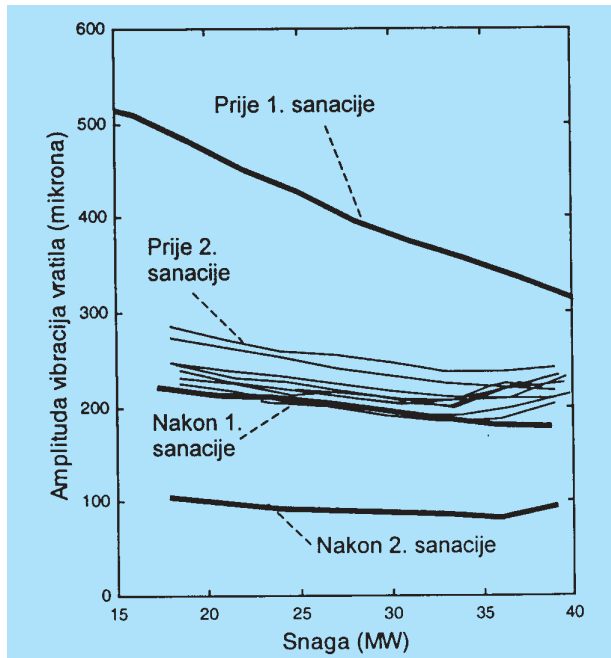


**Slika 1. Spoj vratilo – polni kotač:**  
(a) prije i  
(b) poslije 1. sanacije radijalnim prizonima

nog kotača u odnosu na os vrtnje. Magnetske sile između rotora i statora slijede promjenu zračnog raspora, a kinetička komponenta njihove rezultante ima smjer minimuma zračnog raspora. Ova sila uzrokuje prisilne vibracije vratila na frekvenciji vrtnje.

Sanacijom je ekscentričnost u mehaničkoj vrtnji smanjena i fiksirana na 0,35 mm s nizvodne strane, te 0,15 mm s uzvodne strane generatora, uz kut između smjerova ekscentričnosti od 90°. Amplituda vibracija vratila smanjena je za faktor reda 2 u odnosu na stanje prije remonta (sl. 2).

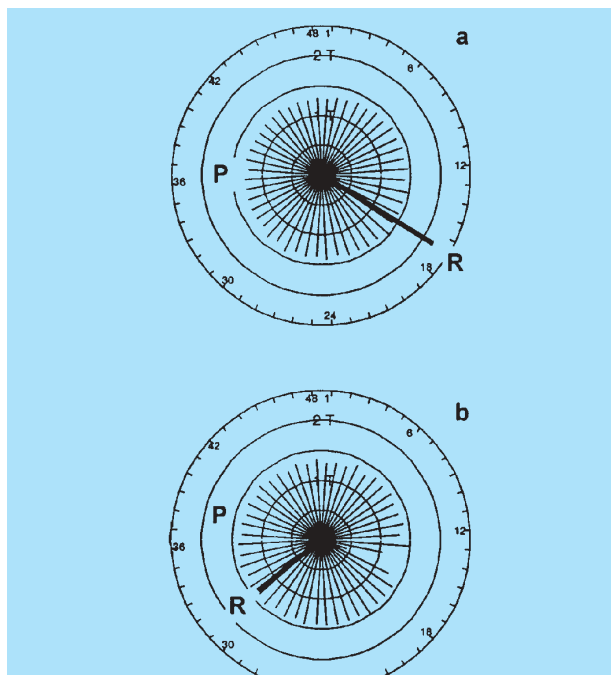
Da bi se ocijenila stabilnost strukture spoja postignuta sanacijom i eventualno našao još jedan način smanjenje razine vibracija vratila, proveden je pokus s isključivanjem djelovanja odabranog pola kratkim



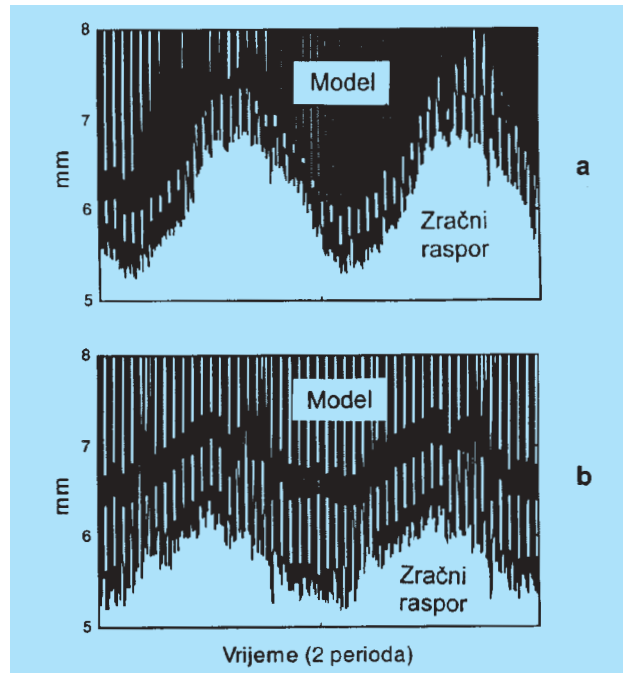
Slika 2. Sanacijskim zahvatima amplituda vibracija vratila smanjena je za faktor 3 do 5

spajanjem njegovog namota. U pokusu, provedenom u praznom hodu, za to je odabran pol što leži približno u smjeru kinetičke rezultante magnetske sile, s ciljem da se smanji njen iznos.

Pokusom je utvrđeno da je kinetička magnetska rezultanta smanjena (sl. 3), a struktura spoja stabilna (sl. 4). Evidentno je da se odgovarajućim izborom pola ili



Slika 3. Rezultanta (R) dinamičke komponente magnetskog toka polova (P):  
(a) bez kratkog spoja  
(b) s kratkim spojem na jednom polu



Slika 4. Model za provjeru stabilnosti strukture spoja vratilo – polni kotač:

Ako je spoj stabilan vrijedi:

1. Zračni raspor u mehaničkoj vrtnji je obodno stalan.
2. Zračni raspor = Model – Obodno stalna deformacija zračnog raspora uzrokovana magnetskim silama, gdje je Model = Zračni raspor u mehaničkoj vrtnji + Dinamička komponenta pomaka vratila u ravnini i smjeru zračnog raspora.

Pokus pokazuje da su oba uvjeta zadovoljena, što znači da je prvom sanacijom postignuta stabilnost strukture. Porast vibracija tijekom naredne godine, između 1. i 2. remonta (sl. 2), pokazuje pak da se nestabilnost spoja ponovno razvijala.

polova i stupnjem smanjenja njihova djelovanja promjenjiva magnetska sila može praktično potpuno eliminirati i time stroj dodatno umiriti.

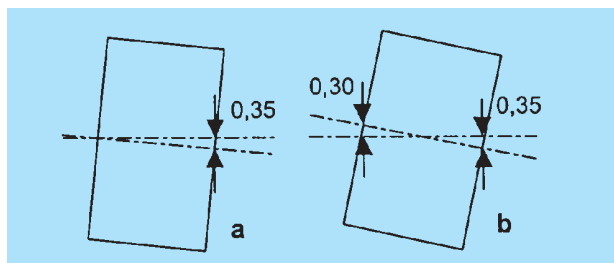
### 3. DRUGA SANACIJA

Neidealno učvršćenje polnog kotača na vratilo dozvolilo je porast ekscentričnosti u eksploataciji. U jednogodišnjem periodu ova je porasla na 0,4 mm s nizvodne i 0,17 s uzvodne strane generatora, dok su smjerovi ekscentričnosti ostali nepromijenjeni. Amplituda vibracija vratila porasla je za cca 30% (sl. 2).

Ovakvo pogoršavanje zahtijevalo je ponovnu sanaciju. Svi zatici zamijenjeni su novima, a na nizvodnoj strani glavine montirano je 8 vijaka za centriranje s pripadnim osloncem.

Polni kotač namješten je temeljem opsežnih dijagnostičkih ispitivanja i detaljne analize kinematike i dinamike rotora agregata. Ekscentričnost s nizvodne strane postavljena je na iznos iz prethodnog remonta, dok je ona s uzvodne strane generatora namjerno povećana na 0,3 mm, ali u suprotnom smjeru u odnosu

na ekscentričnost s nizvodne strane (sl. 5). Ovakvo "ekscentriranje" provedeno je jer fizički nije bilo moguće potpuno centriranje na nizvodnoj strani, a na temelju proračuna koji je pokazao da će nakon ovakvog zahvata razina relativnih vibracija vratila biti manja. Mjerenja su ovo potvrdila: ovim je zahvatom razina vibracija vratila smanjena za daljnjih 2 puta (sl. 2). Time su značajno smanjena dinamička opterećenja spoja, te je labavljenje spoja u idućem dvogodišnjem periodu bilo jedva primjetno.



Slika 5. Položaj polnog kotača u odnosu na os vrtnje (mjere u mm)

(a) nakon 1. sanacije – centriranje

(b) nakon 2. sanacije – ekscentriranje

#### 4. DISKUSIJA

Ekscentričnosti polnoga kotača u odnosu na os vrtnje, koje se gore spominju, izmjerene su u mehaničkoj vrtnji, dakle bez magnetskih sila. Kad je uključena uzbuda, one se promijene za iznos amplitude vibracija vratila, kojoj su pak same i uzrok. Kinetička magnetska rezultanta može izazvati relativno velike amplitude vibracija vratila zbog izvedbe uležištenja rotora; težište polnoga kotača udaljeno je od najbližeg vodećeg ležaja (generatorskog) više od 2 m.

Balansiranjem koje je provedeno nakon svake sanacije rotor je uravnotežen prema masenom debalansu. Utjecaj ovoga na vibracije vratila kad je uključena uzbuda nije značajan.

Prije dvije opisane sanacije pokušano je učvršćenje spoja ugradnjom aksijalnih zatika između vratila i glavine na nizvodnoj strani. Zbog karaktera trošenja, zahvat se nije pokazao učinkovitim.

Sanacija radijalnim prizonima ipak je privremena zbog nemogućnosti agresivnijeg zahvata na spoju bez demontaže generatora. Ograničenja tehnoloških postupaka provedivih na licu mjesta ne dozvoljavaju dovoljne dimenzije nosivih elemenata potrebne za trajnu pouzdanost ovakvog rješenja.

#### 5. PREGLED I ZAKLJUČCI

Nakon što je stroj morao biti zaustavljen zbog labavosti spoja polnoga kotača i vratila, sanacijama radijalnim zaticima osposobljen je za privremeni rad.

Prvom sanacijom otklonjena je akutna nestabilnost strukture spoja i obavljeno centriranje polnoga kotača

na vratilo uz primjenu klasičnih mjernih metoda. Time su vibracije vratila, ranije ekstremno visoke zbog labavosti spoja, smanjene za faktor reda 2.

Daljnji korak donio je daljnje smanjenje razine vibracija za faktor reda 2. Ovo je izvedeno uz primjenu modernih metoda dijagnostike kinematike i dinamike rotora, koje osim mjerenja vibracija uključuju i mjerenje zračnog raspora i magnetskog toka, te odgovarajuća modeliranja i interpretacije rezultata ispitivanja. Drugom sanacijom prošireno je dozvoljeno radno područje agregata sa 28-33 MW na 18-38 MW.

Nije moguća konačna stabilizacija zaklinjenog spoja vratilo – polni kotač. Sanacije s radijalnim zaticima omogućile su rad agregata do konačnog rješenja – zamjene rotora generatora novim rotorom sa zavarenim spojem vratila i polnog kotača.

Dani slučaj razvoja grešaka u vremenu ukazuje na značaj trajnog nadzora putem automatskog sustava za monitoring ili dovoljno čestih dijagnostičkih ispitivanja. Provedena ispitivanja pokazala su da je moguće značajno povećati pouzdanost nadzora ako se algoritmi tog nadzora urede po mjeri stroja i ako se nadzor vodi preko odgovarajućih izvedenih veličina.

#### LITERATURA

- [1] I. BACINGER, Đ. DVEKAR: "Pogonska iskustva na hidrogeneratorima sa zaklinjenim spojem glavine polnoga kotača rotora na vratilo", V. Savjetovanje Hrvatskog komiteta CIGRE, Cavtat, listopad 2001.
- [2] B. BAJIĆ, J. SABOLEK, Đ. DVEKAR, D. MAGIĆ: "Ispitivanje vibracija, zračnog raspora i magnetskog toka na cijevnom agregatu 1 HE Dubrava", 1. Međunarodni simpozij Hidroelektrane HEPP 2001, Elektrotehničko društvo Zagreb, Šibenik, lipanj 2001.

#### VIBRATION DECREASE OF HPP DUBRAVA AGGREGATE A AXLE BASED ON DETAILED ROTOR DIAGNOSTICS

The paper describes possible vibration decrease of tube aggregate A axle in HPP Dubrava caused by looseness of wedge-shaped connection between pole wheel and axle. A precise set of pole wheel on axle has been realized based on extensive diagnostic tests and detailed dynamic analysis of rotor aggregate. The position has been fixed using elements immune to existing damage type.

## HERUNTERDRÜCKEN VON WELLENSCHWINGUNGEN DES TURBOSATZES DES WASSERKRAFTWERKES "DUBRAVA" AUF GRUND DETAILLIERTER ROTORUNTERSUCHUNG

Beschrieben wurde das Herunterdrücken von Wellenschwingungen des Turbosatzes A des Wasserkraftwerkes "Dubrava", verursacht durch die Lockerung der Keilverbindung des Polrades mit der Welle. Präzise Aufstellung des Polrades an die Welle ist auf Grund sehr umfangreicher Untersuchungen und detaillierter Erörterung der Kinematik und der Dynamik des Rotors durchgeführt worden.

Die Lage ist durch verschleisefeste Elemente befestigt worden.

Naslovi pisaca:

**Đuro Dvekar, HE Dubrava, Sveta Marija<sup>1</sup>**  
**Branko Bajić, Korto Cavitation Services, Luxemburg<sup>2</sup>**  
**Ivan Bacinger, PP HE Sjever, Varaždin<sup>3</sup>**  
**Damir Magić, HE Dubrava, Sveta Marija<sup>1</sup>**  
**Josip Sabolek, HE Dubrava, Sveta Marija<sup>1</sup>**  
**Muharem Demirović, Končar Generatori i motori, Zagreb<sup>4</sup>**

Uredništvo primilo rukopis:  
2002 – 11 – 29.

<sup>1</sup> 40326 Sveta Marija, tel.: 042 408300; fax: 042 408308;  
e-mail: djuro.dvekar@hep.hr; damir.magic@hep.hr;  
josip.sabolek@hep.hr

<sup>2</sup> 12, rue Ste Zithe; L-2763 Luxembourg; Luxemburg;  
tel.: 01 2452900; mob. 091 5806433; fax: 01 2452901 (sve u  
Hrvatskoj); e-mail: korto@cavitation.de; web: www.cavitation.de

<sup>3</sup> p.p. 74, 42001 Varaždin; tel.: 042 408001; fax: 042 408088;  
e-mail: ivan.bacinger@hep.hr

<sup>4</sup> Falerovo šetalište 22, 10000 Zagreb; tel.: 01 3655126;  
fax: 01 3667475; e-mail: design.gim@koncar1.tel.hr