

Borut Mavko, Gorazd Peterlin, Miha Boltežar  
INSTITUT "JOZEF STEFAN" LJUBLJANA

## ANALIZA VIBRACIJ CEVI UPARJALNIKA D-4

### ANALYSIS OF TUBE VIBRATIONS IN D-4 STEAM GENERATOR

VSEBINA - Časovni zapis pospeška najbolj izpostavljene cevi uparjalnika D-4 smo presneli na magnetni trak. Izdelali smo postopke za izračun najbolj vplivnih parametrov za spektralni analizator SD 360. Parametri, ki zadovoljivo pospešijo intenzivnost vibracij so: spekter pospeškov, minimalni in maksimalni pospešek ter srednja kvadratična vrednost pomikov. Prav tako smo, da bi ugotovili lastne frekvence cevi, naredili računalniški program za izračun večkrat podprtih cevi. Merilne postopke in računalniški program nameravamo uporabiti kot osnovo za neodvisno analizo vibracij cevi uparjalnika D-4 v Krškem.

ABSTRACT - Accelerometer data for the most exposed tube in steam generator D-4 were recorded on magnetic tape. Procedures for calculations of the most characteristic parameters were prepared for spectral analyzer on SD 360. Parameters which satisfactorily describe the vibrations are power spectral densities peak to peak acceleration value and root mean square displacement. Computer program was written to calculate the natural frequencies of a multispanned tube. Procedures and the computer program will be used for independent analysis of tube vibrations in Krško D-4 type steam generator.

#### 1. UVOD

Uparjalnik je vir pare za delovanje turbine v tlačnovodni jedrski elektrarni. JE Krško ima dva uparjalnika tipa D-4 ameriške družbe Westinghouse. Izvedena sta kot vertikalna toplotna menjalnika z obrnjenimi U-cevmi (slika 1). Primarno reaktorsko hladilo se pretaka skozi notranje strani teh cevi, ki so izdelane iz Inconela - 600. Glavna značilnosti D serije W uparjalnikov, seriji, sta predgrelnik

in spodnji dotok glavne napajalne vode v uparjalnik. Predgrelnik je del uparjalnika, kjer se napajalna voda intenzivno segreva največ do temperature nasičenosti. Vrenje v predgrelniku ni dovoljeno. Pomen predgrelnika je v tem, da vodilne ploščevine v predgrelniku usmerjajo napajalno vodo v križni tok, pri katerem se znatno poveča koeficient prenosa toplote. Uparjalniki D serije so predvideni za 25 elektrarne, od katerih imajo obratovalne izkušnje sledeče 4 elektrarne:

Almaraz	1;	Spanija
Ringhals	3;	Švedska
McGuire	1;	ZDA
NE Krško	1;	Jugoslavija

V oktobru 1981 je na Ringhals 3, ki je prišla obratovati v septembru 1981 prišlo do puščanja neakoske hladilne vode v sekundarni krog zaradi poškodbe cevi v uparjalniku tipa D3. Preizkus z metodo vrtilniških tokov je pokazal, da je poškodovanih več cevi. Enak preizkus v španski elektrarni Almaraz 1, je dal podobne rezultate poškodb, zato se je Westinghouse, ki je dobavil obe elektrarni, lotil intenzivnega iskanja vzrokov za poškodbe. V ta namen so v U-cevi uparjalnikov namestili meritnike pospeškov, s katerimi so ugotovili, da pri višjih močeh elektrarne prihaja do prevelikih vibracij cevi, kar povzroča trenje cevi ob podporne plošče ter s tem poškodbe.

Da bi zmanjšali vibracije na uparjalnikih D-4 jedrske elektrarne Krško je Westinghouse izvedel modifikacijo dotoka napajalne vode. V uparjalnik se lahko vodi 30% napajalne vode v zgornji del in 70% nazivnega dotoka v predgrelnik. Westinghouse je v Krškem izvedel tri faze meritev vibracij cevi. V skupno 16 ceveh so namestili meritnike pospeškov, ki so merili pospeške cevi v X in Y smereh.

Na Institutu "Jožef Stefan" v Ljubljani smo v želji po neodvisni analizi vibracij cevidetajno obdelali tudi časovni zapis pospeška, merjenega v fazi II, najbolj izpostavljeni cevi R 49 C 59. Ta cev je bila opremljena z štirimi pospeškometri. Dva sta bila locirana na višini podaljška plošče E (59TX, 59TY) in dva na sredini med ploščama D in B (59BX, 59BY).

## 2. SPEKTRI POSPEŠKOV PRI RAZNIH MOČEH OBRATOVANJA

S spektri pospeškov lahko ugotovimo frekvenčno sestavo vibracij. Vse analize so bile opravljene s spektralnim analizatorjem SD 360. Narejena je bila primerjava spektrov pospeškov za posamezna merilna mesta pri različnih velikostih pretoka skozi predgrelnik. Na sliki 2 so spektri za cev R49 C 59 (merilna mesta za pospeške je v višini E plošče, prečno na tok S9TX) pri 35, 95, 100% moči. Poleg naraščanja amplitude pospeškov pri posameznih frekvencah je ugotovljeno tudi spreminjanje resonančnih frekvenc z večevanjem dotoka skozi glavno napajalno šobo.

## 3. IZRACUN LASTNIH FREKVENC PRI VIBRACIJAH VEČKRATNO PODPRTIH CEVI Z METODO PRENOSNIH MATRIK

Pojavljanje resonance v spektrih gostotne moči pospeškov pri analizi vibracij cevi v uparjalnikih nas je napolilo na misel, da bi poizkusili izračunati lastne frekvence večkratno podprtih cevi. Če se namreč ugotovi, da so lastne frekvence cevi blizu resonančnih frekvenc, bi lahko z spremembo vretja dosegli zmanjšanje vibracij in s tem manjšo obrabo.

Za metodo izračuna smo izbrali metodo prenosnih matrik, ki je primerna za linijske sisteme in ki smo jo razširili za primer večkratno podprtih cevi. Pri metodi prenosnih matrik prenašamo vektor stanja - to so pomik, zasuk, moment ter prečno silo od enega konca sistema do drugega. Nato upoštevamo robne pogoje, ter nastavimo pogojne enačbe, katerih netrivialna rešitev nam da lastno frekvenco.

Izdelani računalniški program omogoča spreminjanje naslednjih parametrov: število podpor, dolžino posameznih polj, geometrijo prereza cevi, materialnih konstant, vpetje konca cevi.

Metoda bazira na diskretizaciji mase cevi med dvema podporama na več točkastih mas. Izkaže se, da daje diskretizacija mase cevi na tri masne točke že dovolj točne rezultate.

Podajamo rezultate za 1. in 2. lastno frekvenco pri dveh vrstah vpetja:

		prva lastna frekvenca (Hz)	druga lastna frekvenca (Hz)
	D	37,5	72,5
	G	24,5	55,5

Kombinacije podpor poljubno izbiramo, sama metoda pa daje dobre rezultate le za prve tri lastne frekvence.

Nadalje smo preračunali vpliv lastnega modula gostote cevi ter gostote vode v cevi na spremembo rezultatov.

Na koncu smo poizkušali izvesti še primerjavo naših rezultatov za lastne frekvence z rezultati, ki jih je posredoval Westinghouse. Polnoma točna primerjava ni možna, ker ni znano, s kakšnimi vrednostmi materialnih konstant je računal Westinghouse. Kažejo pa naši rezultati enak trend spreminjanja pri spremembah podpor kot pri Westinghouseu.

#### 4. MAKSIMALNI IN MINIMALNI POSPESKI

Pri dinamičnih obremenitvah materialov je minimalna in maksimalna sila oziroma pospešek pomemben podatek pri ugotavljanju vzdržljivosti materialov. Spektralni analizator omogoča tudi določanje porazdelitven funkcije amplitud vhodnega signala. Na sliki 3 je prikazana povprečna gostota porazdelitvene funkcije za mesto 59 TX pri 80% moči. Iz slike se lepo vidita maksimalna in minimalna vrednost pospeška.

## 5. POMIKI

Z dvokratno integracijo pospeška se dobijo pomiki. Z analizatorjem SD 360 smo preverili prenosno funkcijo dvakratnega integratorja in ugotovili, da je napaka integratorja nad frekvenco 5 Hz glede na željeno vrednost manjša od 0,5 dB (6%). Z nizkopasovnim filtrom smo izločili frekvence manjše od 5 Hz, kar je ob enem tudi spodnja meja ločljivosti merilnih pospeškov. Na sliki 4 je prikazan časovni zapis pospeška in ustreznega pomika za 57 TX pri 80% moči.

## 6. SREDNJA KVADRATICNA VREDNOST POMIKOV

Važen faktor pri oceni jakosti vibracij je srednja kvadratična vrednost pomikov, katere kvadrat je enak vrednosti avtokorelacijske funkcije v času nič. Analizator SD 360 lahko računa povprečno avto ali križno korelacijsko funkcijo za 2 n vzorcev. Na sliki 5 je prikazano avtokorelacijska funkcija  $\Psi(\tau)$  za 59 TX pri 80% moči.

## 7. ZAKLJUČEK

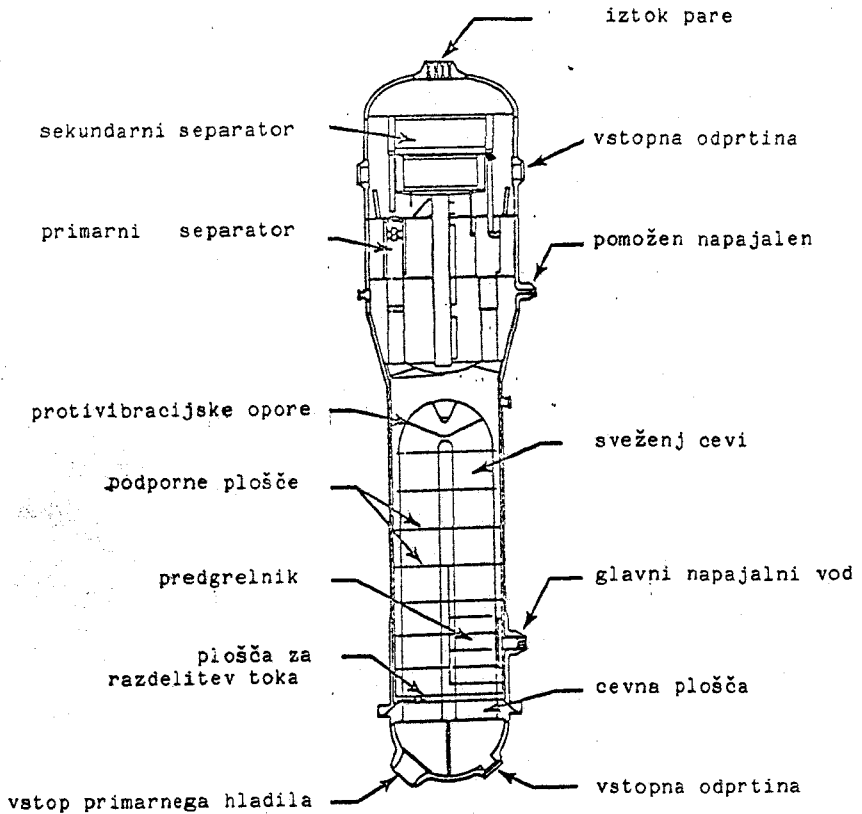
V dosedanjem delu smo razvili postopke za analizator SD 360, s katerim lahko iz časovnega poteka pospeškov ugotovimo parametre, ki dovolj dobro opišejo intenzivnost vibracij. Analizirali smo tudi spremembe teh parametrov za cev v 47. vrsti in 59. koloni pri povečanju pretoka napajalne vode. Izračunali smo lastne frekvence cevi pri različnih načinih podprtja, da bi s tem ugotovili, če so vzbujevane frekvence blizu resonančnim frekvencam.

Z dodatno opremo, ki naj bi povezala računalnik s analizatorjem, bo omogočena analiza večjega števila cevi pri raznih pretokih napajalne vode. Obdelava podatkov vseh treh faz meritev pa bo dala kompletno sliko o intenzivnosti in s tem tudi dopustnosti vibracij.

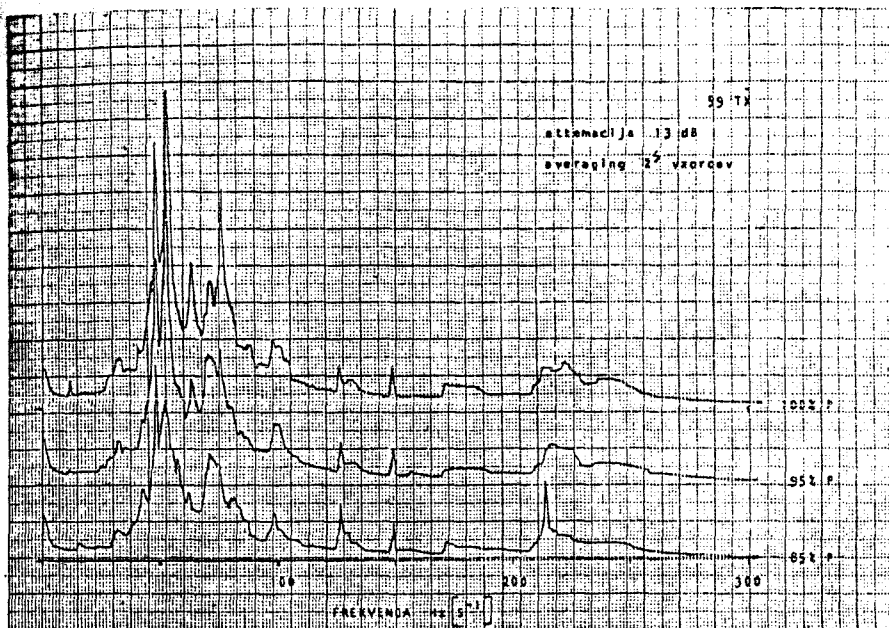
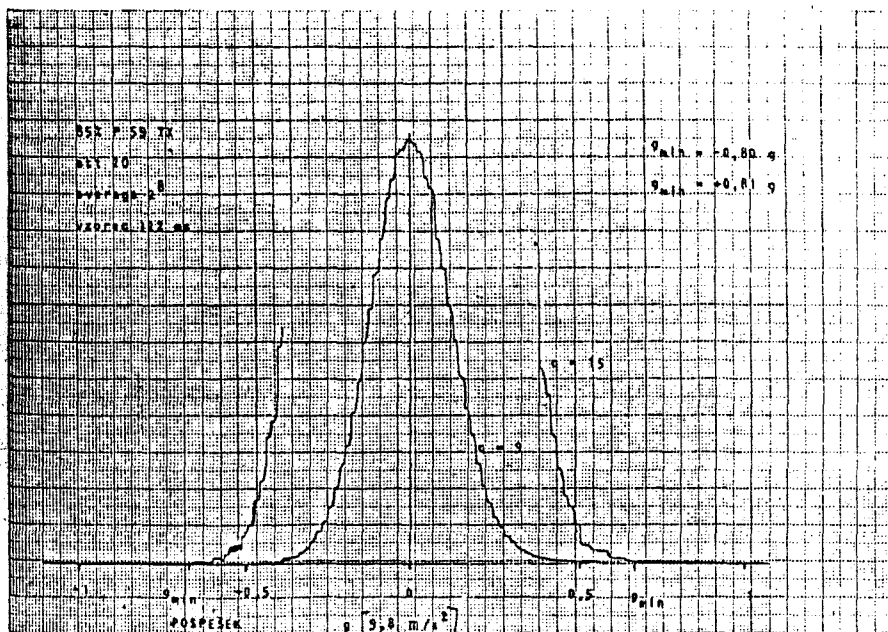
## 8. LITERATURA

- /1/ IJS-DP-2699  
Pregled problematike uparjalnikov NEK  
Ljubljana, julij 1982
- /2/ IJS-DP-2692  
Preliminarna analiza sprememb sistema napajalne vode  
NEK  
Ljubljana, maj 1982

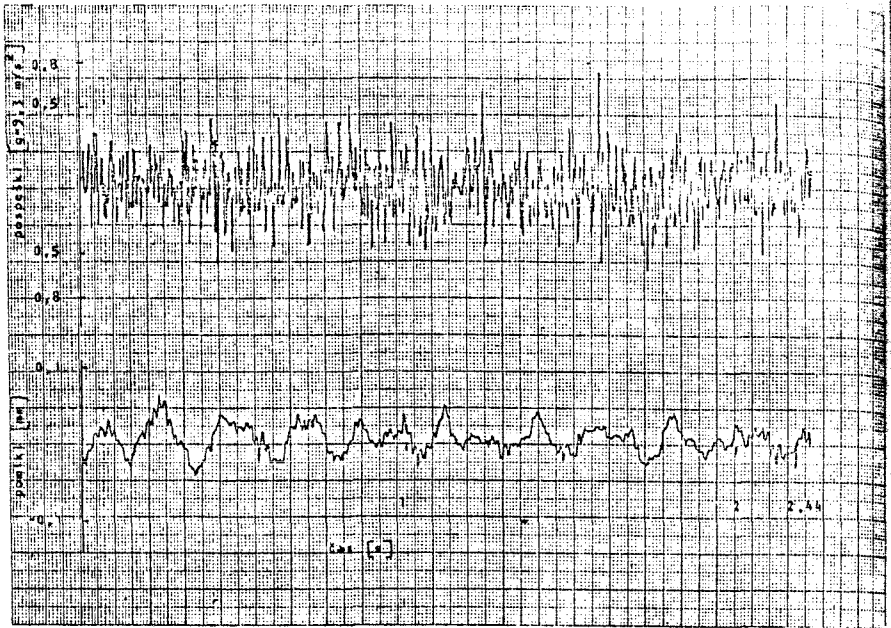
/3/ M. Boltežar  
Izračun lastnih frekvenc pri vibracijah večkratno  
podprtih cevi z metodo prenosnih matrik  
Ljubljana, november 1982



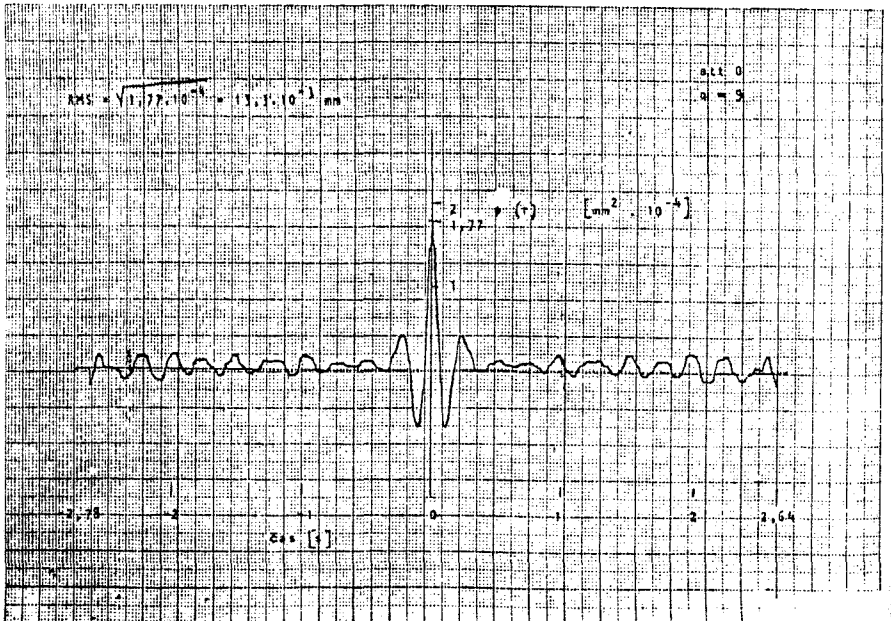
Slika 1: Uparjalnik

Slika 2: Spektri pospeškov<sup>o</sup> pri različnih močeh za 59 TX

Slika 3: Gostota porazdelitvene funkcije za 59 TX pri 85%P



Slika 4: časovni zapis pospeškov in pomikov za 59 TX pri 85% moči



Slika 5: Avtokorelacijska funkcija  $\psi(\tau)$  za 59 TX pri 85% P