



A XV-a Conferință internațională – multidisciplinară
„Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”
SEBEȘ, 2015

MĂSURĂTORI DE VIBRAȚII DE JOASĂ FRECVENȚĂ LA TURBINE FRANCIS

Iulian BĂLĂUNȚESCU

LOW FREQUENCY VIBRATION MEASUREMENTS ON FRANCIS TURBINES

This paper presents an analysis on vibration measurements performed on Francis turbines. Absolute vibration measurements on draft cone tube and proximate measurements on shaft were presented with respect to low frequency phenomena.

Keywords: absolute vibration, kurtosis analysis, relative vibration, draft cone tube

Cuvinte cheie: vibrații absolute, vibrații relative, con aspirator, analiza kurtosis

1. Introducere

Excitațiile de natură hidraulică care induc vibrații la turbine hidraulice au cauze diverse: distribuție neuniformă a vitezei care conduce la dezechilibru hidraulic, cavitație, vibrații autoexcitate, fluctuații de presiune în conducte forțate, vibrații hidroelastice generate de profile cu forme neadaptate curgerii, interacțiuni rotor/stator, instabilități ale curgerii în con aspirator [1, 2].

Prezența curgerii rotaționale este cauza fluctuațiilor de presiune și a vibrațiilor în zona conului aspirator a turbinelor cu reacție în particular a turbinelor Francis. Frecvența relativ joasă a acestor

perturbații produce vibrații radiale/torsionale semnificative și oscilații ale puterii ansamblului hidroagregat.

La turbine Francis unghiul bordului de fugă a palei rotorice fiind fix este proiectat pentru o anumită valoare a debitului la care se obține și randament maxim. La această valoare componenta rotațională a vitezei la ieșirea din rotor este scăzută, apropiată de zero. La curgere inferioară acestui punct componenta rotațională este în sensul direcției de rotație a rotorului. La nivele mai mari ale debitului o mișcare de rotație în sens invers este prezentă la ieșirea din rotor.

Primele studii efectuate au arătat că la componentă rotațională scăzută miezul staționar nu se formează iar curgerea cuprinde toată secțiunea conului de aspirație. Peste anumite valori ale debitului se formează un punct de stagnare la ieșire din rotor și aval de acest punct. Această zonă se deplasează amonte pe măsură ce crește componenta rotațională. Dacă această componentă rotațională este suficientă ia naștere un turbion care se rotește în jurul axei centrale a conului aspirator.

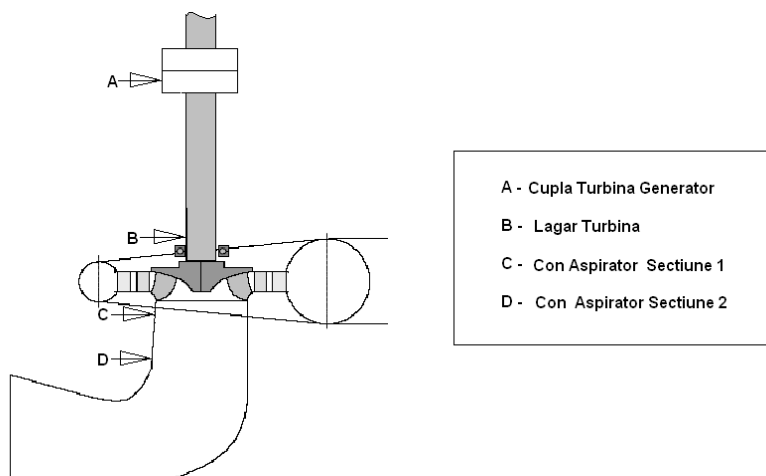


Fig. 1 Amplasarea punctelor de măsură. În secțiunile A și B se măsoară vibrații relative ale arborelui turbinei; în secțiunile C și D se măsoară vibrații absolute pe con aspirator

La turbine Francis turbionul apare la valori de debit cuprinse între 0,5 și 0,85 din debitul la randament maxim.

Fenomenul este bine observat în zona de debite mici și este pus în evidență cu senzori de presiune plasați pe con aspirator – se

măsoară pulsații de presiune cu frecvența aproximativ a precesiei turbionului format. Valoarea frecvenței pulsațiilor f_v este :

$$f_v = (0.2 \dots 0.4) f_n \quad (1)$$

valorile peste 0,3 fiind mai probabile [1]; f_n reprezintă frecvența de rotație a rotorului.

Primele studii ale fenomenului sunt menționate în 1940 de W. J Rheingans în “Power swings in hydroelectric power plants” – se evidențiază probleme legate de pendulații de putere și se propune o primă estimare a frecvenței de precesie la valoarea de $0,278 f_n$.

Studiile pe prototip ale pulsațiilor de presiune efectuate la mai multe valori ale presiunii în tub de aspirație pun în conexiune fenomenul de vortex și cavitație.

Dacă presiunea este suficient de mare aspectul de funie al vârtejului nu se mai observă - presiunea nefiind suficientă pentru apariția cavitației – cu toate acestea nestăționaritatea legată de vortex există și măsurători de pulsații arată aceeași frecvență a pulsației ca și la presiune redusă.

Măsurătorile de vibrații prezentate au fost efectuate pe un hidroagregat vertical echipat cu turbină Francis de 50 MW - prezentat schematic în figura 1. Turbina cu un diametru nominal de 2300 mm și turație nominală 300 rot/min este operată în gama de căderi cuprinsă între 87 m și 144 m la debit nominal de 47 m³/s.

Măsurătorile au urmărit vibrația absolută radială măsurată cu accelerometre de joasă frecvență în două secțiuni (C și D distanțate cu circa 1,5 m) ale conului aspirator și vibrații relative ale arborelui turbinei măsurate cu proximitoare în zona lagărului turbinei și a cuplei turbină/generator (secțiune A și B distanțate cu circa 4 m) (figura 1).

Regimul de funcționare la care s-au efectuat măsurătorile a fost la o cădere de 130 m în regim cuplat la debit variabil între 0 - 47 m³/s obținut prin variația cvasistaționară a aparatului director între 0 % - 85 %.

Regimurile pulsatorii la sarcină parțială sau sarcină superioară punctului optim de funcționare sunt reduse prin injecție de aer prin coloana centrală.

2. Măsurători de vibrații absolute con aspirator

Semnalul de vibrații măsurat la nivelul conului aspirator conține, pe lângă semnalele deterministe induse de forțe periodice sau

răspuns periodic al modurilor proprii de vibrație, un procent determinant de semnal stochastic.

La sarcină parțială se remarcă un conținut ridicat al componentei impulsive a semnalului de vibrații măsurat la nivelul conului aspirator ceea ce face ca histograma să se abată semnificativ de la distribuția normală.

Este necesară caracterizarea semnalului de vibrație prin momente centrale superioare, spre exemplu factorul Kurtosis - mărime derivată, adimensională definită ca momentul 4 raportat la pătratul varianței în situația semnalelor de medie nulă [3].

$$K_x = \frac{M_4}{\sigma_x^4} \quad (2)$$

pentru distribuții cu medie nenula definiția devine:

$$K = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} [x - \mu]^4 f(x) dx}{\sigma^4} \quad (3)$$

Ambele puteri sunt pare, prin urmare toate valorile în sumă sunt pozitive.

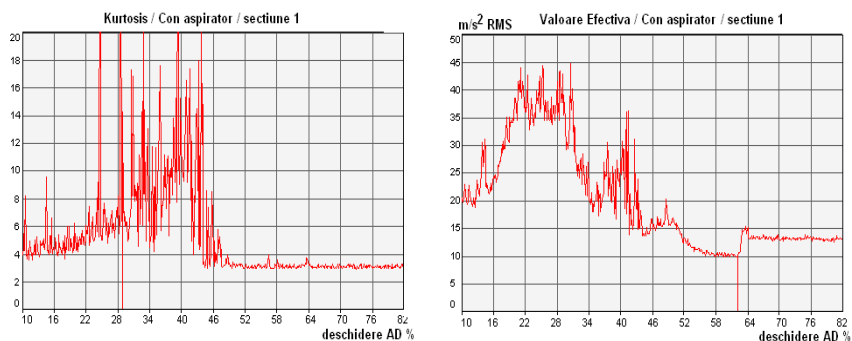


Fig. 2 Factorul Kurtosis și valoarea efectivă a accelerației absolute măsurată în secțiunea C – con aspirator

Termenul Kurtosis are valoarea 3 pentru o distribuție normală. Pentru mărime sinusoidală Kurtosis este 1,5. Compoziția spectrală este similară cu a zgomotului alb cu distribuție relativ constantă în bandă largă de frecvență. De remarcat că semnalul Kurtosis este o măsură a

impulsivității dar nu și a creșterii valorii densității spectrale a unui tip de semnal.

Măsurătorile prezentate au fost efectuate în două plane transversale pe conul aspirator: secțiune C – în imediata vecinătate a rotorului în apropiere de inel inferior și D – la jumătatea conului aspirator la circa 1,5 m aval de secțiunea C. Vibrația în ambele plane este dominată de componenta aleatoare cu valori ale factorului Kurtosis sensibile la fenomenul de turbion prezent la sarcină parțială după cum este prezentat în figura 2.

Vibrația radială are valori efective ale accelerației care depășesc $20 \text{ m/s}^2 \text{ RMS}$ în zona de debite parțiale pentru planul C.

Secțiunea D (figura 3) are același tip de evoluție la nivele de factor Kurtosis mai redus.

Începând cu deschidere AD peste 50 % factorul Kurtosis este 3 caracteristic semnalului aleator cu distribuție normală.

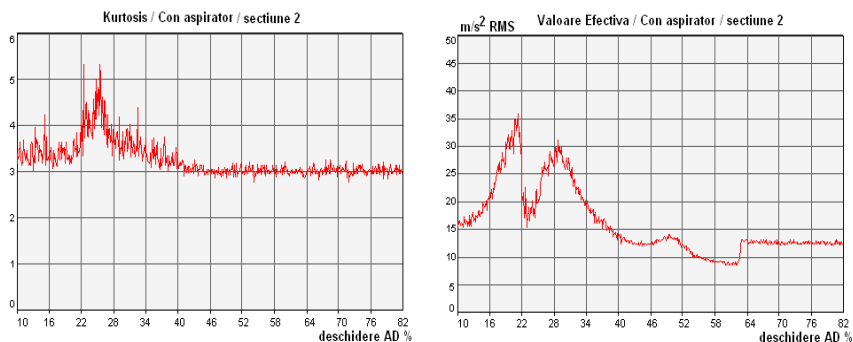


Fig. 3 Factorul Kurtosis și valoarea efectivă a accelerației absolute măsurată în secțiunea D – con aspirator

3. Măsurători de vibrații relative

Măsurătorile de vibrație relativă s-au efectuat în două plane radiale: lagăr turbină și cuplă turbină/generator.

Vibrația relativă se referă la mișcarea radială a suprafeței arborelui în rotație față de elemente fixe.

În situația în care suprafața arborelui are o abatere de la circularitate redusă vibrația relativă măsurată într-un plan transversal

pe arbore pe două direcții perpendiculare furnizează informație asupra mișcării centrului de masă a secțiunii respective.

Măsurătorile includ componenta staționară de curent continuu și au ca rezultat o mărime proporțională cu deplasarea.

Componentele de joasă frecvență încep practic de la 0 Hz, discriminarea cu precizie a frecvențelor joase se face prin alegerea adecvată a duratei de măsură.

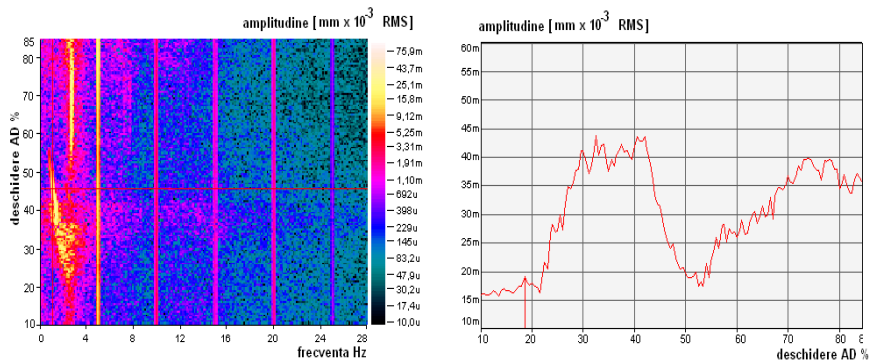
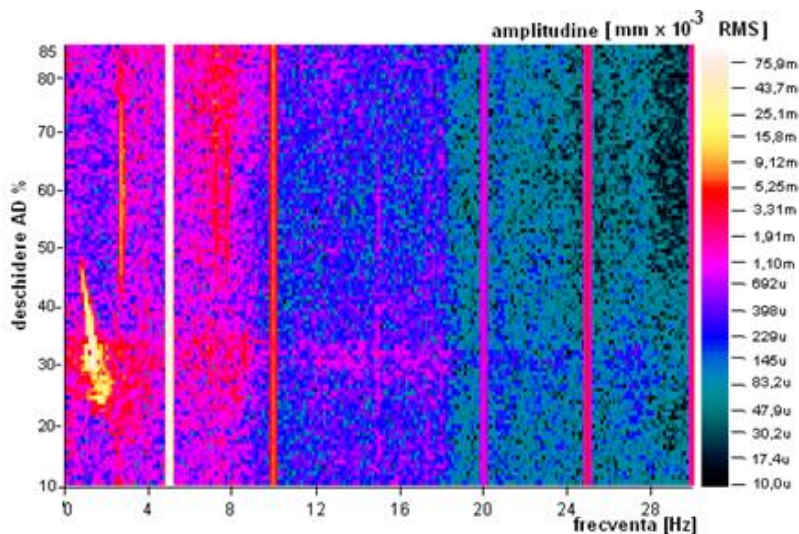


Fig. 4 Spectrul de joasă frecvență a semnalului de vibrație relativă secțiune lagăr turbină funcție de deschidere aparat director în %. Valoarea efectivă a vibrației relative funcție de deschidere aparat director în %



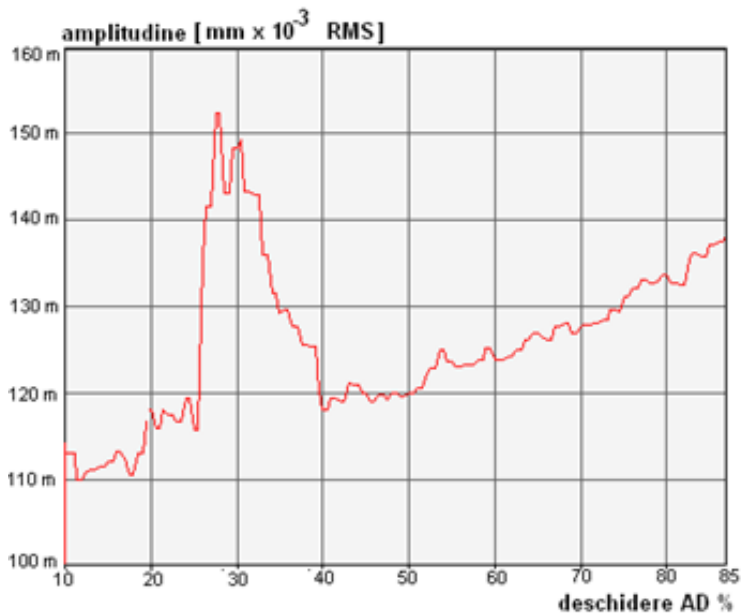


Fig. 5 Spectrul de joasă frecvență a semnalului de vibrație relativă secțiune cuplă turbină/generator funcție de deschidere aparat director în %.
 Valoarea efectivă a vibrației relative funcție de deschidere aparat director în %

Spectrul vibrației relative a secțiunii B lagăr turbină, prezentat în figura 4, este dominat de componenta sincronă cu turația – 5 Hz (corespunzător la 300 rot/min – turație nominală) și de armonicile acesteia.

Efectul turbionului la sarcină parțială este pus în evidență prin prezența frecvențelor subsincrone care se sumează la armonica fundamentală măbind semnificativ amplitudinea.

Se remarcă prezența componentei de joasă frecvență atât la sarcină parțială cât și la sarcină superioară punctului optim.

La sarcină parțială efectul precesiei vortexului central este transmis rotorului în gama de frecvențe cuprinsă între 0,85 Hz și 1,6 Hz cu maxim la 1,365 Hz (0,273 x fn) foarte apropiată de frecvența estimată de Rheingans – 0,278 x fn.

Începând cu deschiderea aparat director de circa 52 % (corespunzător unui debit de circa 24,4 m³/s) vibrația radială este

redușă și se poate presupune că acesta este punctul de debit optim cu componenta rotațională minimă.

Regăsim același profil al vibrației radiale la cupla dintre turbină și generator prezentat în figura 5. Amplitudinile subsincrone ale vibrației sunt prezente în gama de debite parțiale cu aport considerabil la amplitudinea RMS a semnalului de vibrație.

3. Concluzii

- Regimul turbionar la sarcină parțială a turbinelor Francis afectează nivelul și caracteristica vibratorie a hidroagregatului în ansamblul său.
- Factorul Kurtosis poate fi utilizat ca indicator al regimului pulsatoriu la sarcină parțială pentru componenta vibrației stochastice măsurată la nivelul conului aspirator.
- Componenta de frecvență egală cu precesia turbionului central se regăsește în spectrul vibrației radiale măsurat în două secțiuni ale arborelui turbinei.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Dörfler, P., Sick, M., Coutu, A., *Flow-Induced Pulsation and Vibration in Hydroelectric Machinery* Springer-Verlag London 2013.
- [2] Wu, Y., Liu, S., Li, S., Dou, H.S., Qian, Z., *Vibration of Hydraulic Machinery*, Springer Science, Dordrecht, 2013.
- [3] Bendat, J.S., & Piersol, A.G., *Random data analysis and measurement procedures*, 3rd ed., Wiley. 2000.
- [4] * * * ISO 7919 *Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts Part 1: General guidelines Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pumping plants.*

Ing. Iulian BĂLĂUNȚESCU
S.C. Hidroelectrică S.A., Sucursala Bistrița
E-mail: iulian.balautescu@hidroelectricra.ro