



A XVII-a Conferință internațională – multidisciplinară
„Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”
SEBEȘ, 2017

STUDII PRIVIND STABILITATEA STATORULUI HIDROGENERATOARELOR

Iulian BĂRBOIANU, Mircea GRIGORIU, Marius Constantin POPESCU

HYDROGENERATOR STATOR STABILITY STUDY

The paper analyses the hydro generators stator stability, based on the problems that occurred during the operation of the Romanian power plants. In order to highlight the stator components role in these problems, it is analysed the stability of the stator housing and hydro operation found in samples and tests hydro Power Plant No. 1 hydropower from Great River Retezat, where the curvature of the stator creates vibration and instability in operation. The stability of the stator in this case can be obtained by an adequate construction of the building system of the winding heads to prevent any movement of the coils during operation of the hydro. Hydro generator stator is conditional stability dynamic stability of the metal housing because the stator housing design and construction of a great height without adequate consolidation creates problems of vibration and dynamic stability housing.

Key words: hydro generator, vibrations, numerical tests
Cuvinte cheie: hidrogenerator, vibrații, teste numerice

1. Introducere

Statorul unui hidrogenerator este unul din elementele componente de importanță deosebită. O stare tehnică corespunzătoare presupune ca miezul magnetic să fie stabil din punct de vedere mecanic și magnetic [1]. Stabilitatea mecanică impune o rigiditate corespunzătoare fără vibrații ale tolelor care formează pachetul elementar al carcasei statorului precum și a rigidizării barelor de

curbură. Calitatea necorespunzătoare a sistemului de izolație și de realizare a acestora determină 40 % din totalul defecțiunilor hidroagregatelor [2]. Este indicat ca încălzirea înfășurărilor să fie cu cel puțin 5 °C mai mică decât limita admisibilă ceea ce prezintă două avantaje: prelungirea duratei de viață cu 8-10 ani și posibilitatea supraîncălzirii hidrogeneratoarelor până la limita de încălzire când are loc o funcționare la randamente mai mari decât randamentul nominal. La hidrogeneratoare din CHE Râul Mare-Retezat, CHE Tismana Subteran [3] și CHE Remeți s-a constatat o instabilitate termică a bobinajului, temperaturile de funcționare depășind uneori 100 °C, fapt ce poate conduce la deteriorarea prematură a izolației. Este important ca înainte de punerea în funcțiune a unui hidroagregat să se efectueze verificări complexe asupra performanțele reale de funcționare atât din punct de vedere mecanic cât și din punct de vedere electric. Pentru a pune în evidență problemele privind stabilitate din punct de vedere al elementelor constructive se va analiza problema apărută și depistată după efectuarea probelor și verificărilor la punerea în funcțiune a hidrogeneratorului nr. 1 al Centralei Hidroelectrice Râul Mare Retezat.

2. Stabilitatea statorului

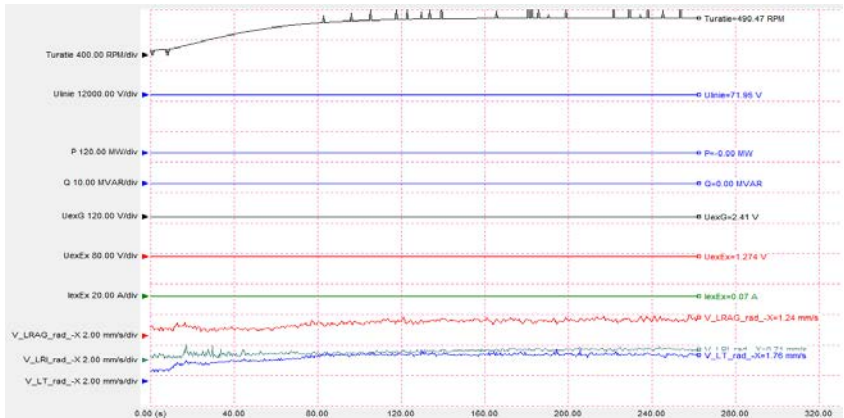
Puterea activă, tensiunile și curenții la bornele generatorului au fost măsurate cu o instalație CCHAPT tip VPA323, analizor de parametrii electrici și parametrii de procese [4, 5], iar turația hidrogeneratorului a fost măsurată cu un senzor laser de turație tip QS30LDQ, 120000 rpm, distanța de sesizare la 2 m, produs de Banner [6]. Vibrațiile pe lagărul superior al generatorului și lagărul turbinei au fost măsurate cu trei senzori de vibrații Hansford Sensors [7], [8]. La punerea în funcție a hidroagregatului după o lucrare de mentenanță, se impun a se efectua următoarele operații de verificare și măsurare:

1. S-au înregistrat regimurile de funcționare cu generatorului deconectat de la rețea:

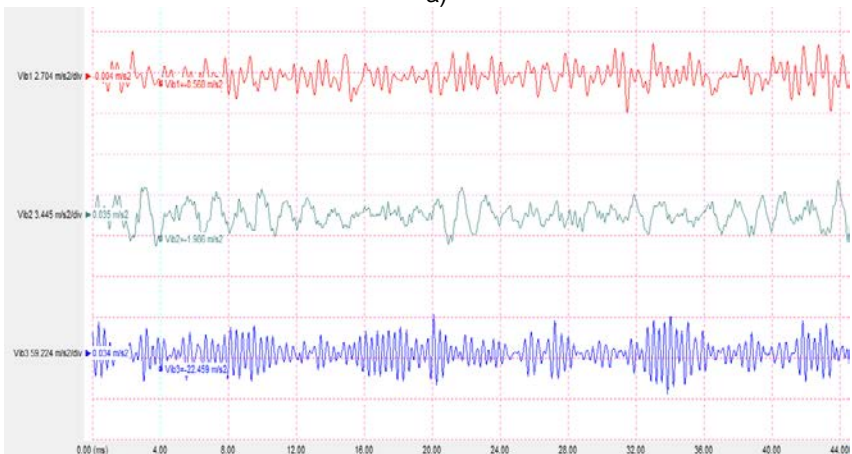
1a. S-au făcut verificării ale vibrațiilor în regimul de mers în gol neexcitat, prin care s-a determinat performanțele de montaj mecanic a hidrogeneratorului prin măsurarea vibrațiilor atât în regimul tranzitoriu de pornire (figura 1a), cât și în regimul stabilizat de mers în gol (figura 1b) [9].

1b. S-au făcut verificării ale vibrațiilor în regimul de mers în gol excitat - conectarea tensiunii de excitație a generatorului determină o valoare nominală a tensiunii în stator (figura 2a). Rezultă că axa geometrică are o poziție spațială apropiată de axa magnetică a

ansamblului rotor-stator. Întrucât în regim de mers în gol, curentul de sarcină este nul ($I=0$), tensiunea la bornele generatorului va fi egală cu tensiunea electromotoare U_{eE} , indusă de fluxul de excitație Φ_p determinat de curentul I_{exG} din înfășurarea rotorului. În condițiile în care turația generatorului se menține constantă, $n = 500 \text{ rpm}$, ceea ce corespunde la frecvența $f = 50\text{Hz}$, se modifică curentul de excitație I_{exEx} prin înfășurarea de excitație și se citesc valorile corespunzătoare ale tensiunii la bornele U_0 .

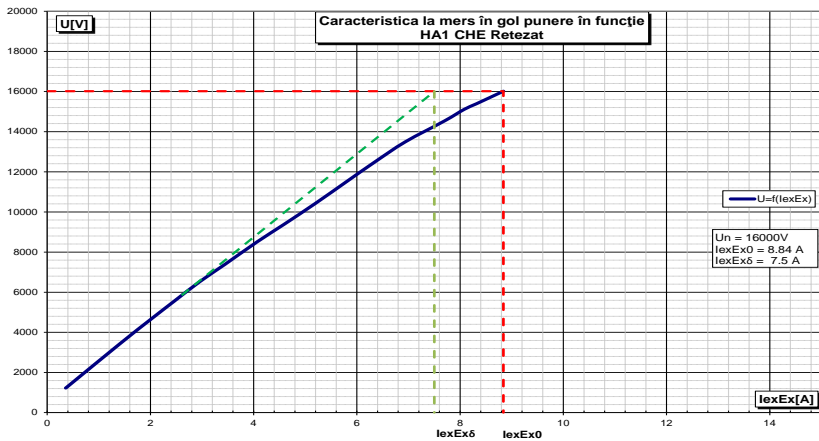


a)

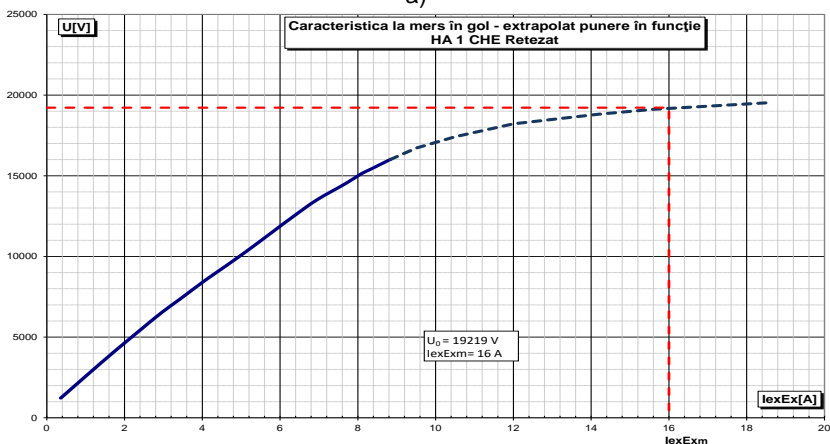


b)

Fig.1 Valorii înregistrate: a) variația parametrilor măsurați în regim tranzitoriu de pornire; b) forma de undă a vibrațiilor în regim de mers în gol neexcitat



a)



b)

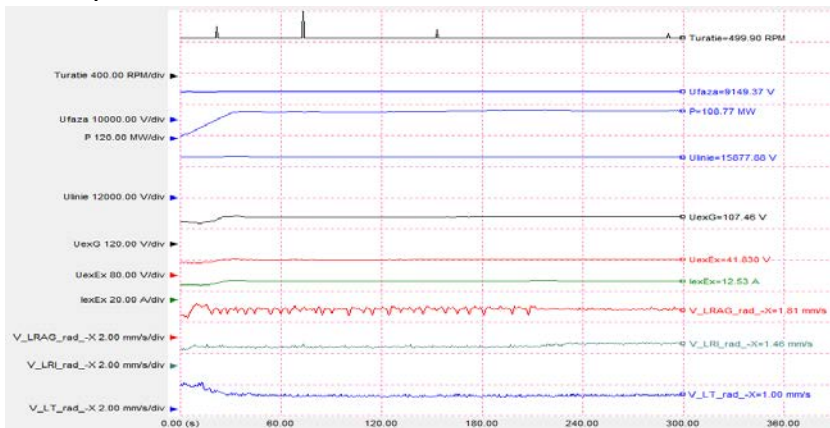
Fig. 2 Caracteristicile la mers în gol (b-extrapolată)

Valorile pentru caracteristica de mers în gol sunt reprezentate grafic $U_0 = f(I_{exG})$ – **Eroare! Fără sursă de referință.** Din caracteristicile de mers în gol rezultă, pentru generatorul din CHE Retezat: curentul de excitație de întrefier $I_{exEX\delta} = 7,5$ A, curentul de excitație de mers în gol $I_{exEX0} = 8,84$ A, curentul de excitație maxim pentru $U_0 = 1,2U_n = 19219$ V, rezultă din caracteristica de mers în gol extinsă $I_{exEXm} = 16$ A.

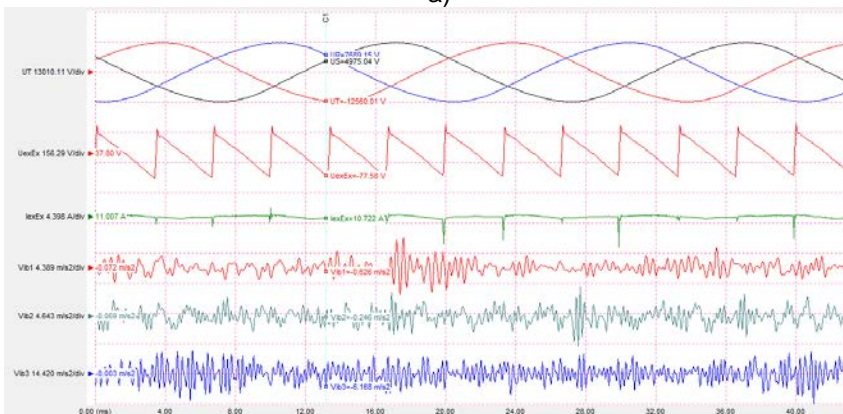
2. Încercările în regim de mers în sarcină au în vedere determinarea performanțelor de funcționare a hidrogenatorului din

CHE Retezat HA1, în regim de mers în sarcină. În acest regim s-au înregistrat următorii parametri: turația rotorului n , vibrațiile lagărului axial radial superior pe direcția orizontală VLRAG_X_rad, vibrațiile lagărului axial radial superior pe direcția radial VLRI_X_rad, vibrațiile lagărului radial inferior pe direcția VLT_X_rad, tensiunea de linie a generatorului U_{linie} , tensiunea de excitație a generatorului U_{exG} , curentul de excitație a excitatoarei I_{exG} , puterea activă P și curentul statoric I .

2.a. Verificarea vibrațiilor în regim de mers în sarcină. Rezultatele măsurătorilor sunt reprezentate în figura 3 (variația în timp a parametrilor măsurați [9]).



a)



b)

Fig. 3 Valorii înregistrate la regim de mers în sarcină, $P = 108,7$ MW F:

a) variația parametrilor în regim stabilizat; b) forma de undă

În **Eroare! Fără sursă de referință.** este reprezentată forma de undă a vibrațiilor la nivelul lagărului superior radial-axial pe axa +x și +x, a vibrațiilor la nivelul lagărului inferior radial al generatorului pe axa +x, precum și forma de undă a semnalelor de tensiune și curent din stator, cât și semnalele mărimilor electrice din circuitul de excitație. Valorile vibrațiilor sunt măsurate la un interval de o secundă pe un interval de timp, la putere activă $P = 108,7$ MW. Analizând rezultatele măsurătorilor rezultă, că în regim de funcționare în sarcină, vibrațiile la nivelul lagărului radial inferior și lagăr turbină nu se modifică, valorile lor fiind același ca și în regim de mers în gol excitat, dar se constată la nivelul lagărului radial superior o tendință de modificare periodică a vibrațiilor în sensul creșterii lor timp de 4s și o scădere a lor timp de 2 s, rezultând o oscilație cu o perioadă de circa 6 s.

2b. Caracteristica în regim de mers în sarcină pentru $P = 115$ MW. Generatorul fiind conectat pe rețea, la $P = 115$ MW se modifică curentul de excitație din înfășurarea rotorică măsurându-se valorile corespunzătoare: tensiunile de linie U_R , U_S , U_T ; curentul statoric I ; curentul de excitație al generatorului I_{exG} ; tensiunea de excitație a generatorului U_{exG} ; puterea activă P ; puterea reactivă Q ; factorul de putere $\cos\varphi$; frecvența f . În condițiile în care generatorul funcționează la $\cos\varphi = 1$ se obțin următorii parametri: $U_{linie} = 15881$ V, $I_s = 4236$ A, $P = 116,4$ MW. Dacă funcționarea în sarcină are loc la $\cos\varphi = 0,9$ în aceste condiții parametrii electrice vor fi: $U_{linie} = 16256,8$ V $I_s = 4598$ A, $P = 116,4$ MW.

2c. Aruncarea din sarcină apare în momentul în care generatorul fiind conectat pe rețea și debitând o anumită putere activă P se deconectează brusc de la rețea prin deschiderea întrerupătorului principal. Apare un proces tranzitoriu electromecanic în care regulatorul de viteză acționează la închiderea aparatului director, iar regulatorul de tensiune întrerupe după o anumită lege de variație curentul de excitație din înfășurarea rotorului. Regimul tranzitoriu ce însoțește procesul tranzitoriu de aruncare din sarcină poate fi caracterizat prin solicitări mecanice și electrice ce uneori pot fi periculoase și din acest motiv este absolut necesar să se cunoască modul de evoluție a acestor procese electromagnetice și mecanice.

În procesul de aruncare din sarcină se înregistrează următoarele mărimi: tensiunile de linie din înfășurarea statorică, puterea activă debitată, puterea reactivă debitată, vibrațiile la nivelul lagărelor după direcție radială, tensiunea de excitație rotorică și turația rotorului. Forma de variație a acestor mărimi în timpul procesului tranzitoriu de aruncare din sarcină este dată în figura 4.

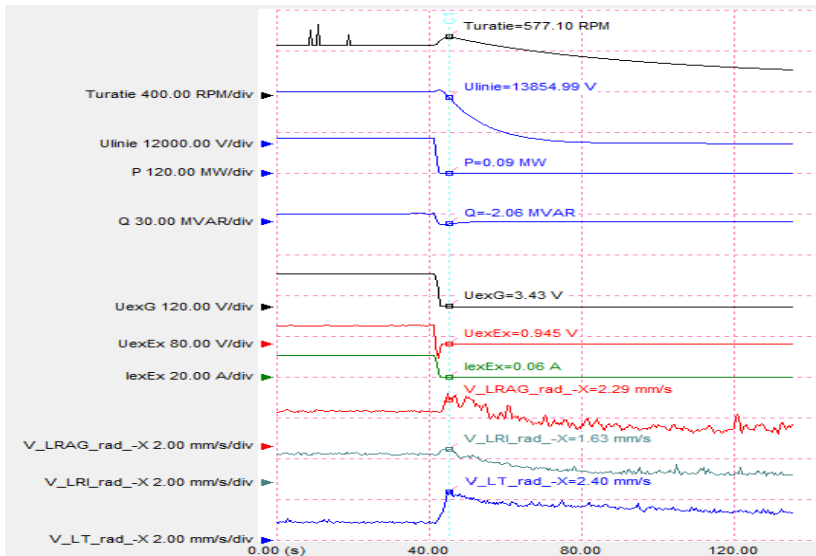


Fig.4 Aruncare din sarcină $P = 100$ MW

Se observă că în momentul deschiderii întrerupătorului apare în primul moment o tendință de creștere a tensiunii și turației cauzate de inerția sistemelor automate de reglaj a tensiunii și turației. În cazul de față se constată că nivelul de vibrații este dependent atât de turație cât și de tensiunea la bornele generatorului deci de nivelul de magnetizare al rotorului. Se observă că în prima etapă de creștere a turației, rotorul este magnetizat puternic și vibrațiile au o anumită formă de variație, iar în momentul când tensiunea tinde către zero, deci când rotorul se demontează, forma de variație a vibrațiilor se schimbă, apărând un nou vârf de vibrații la o turație inferioară turației maxime. Acest fenomen se întâmplă doar în situația în care rotorul nu este centrat corect, din punct de vedere electric axa sa magnetică nesuprapunându-se peste axa geometrică. În această situație există o tendință continuă de deplasare a rotorului în spațiu în funcție de starea de magnetizare a sa, cu consecințe negative asupra stabilității dinamice în timpul funcționării în sarcină și în special în timpul proceselor tranzitorii ce apar în timpul exploatării agregatului. Instabilitatea dinamică a rotorului este în același timp, de natură să conducă la uzura prematură a lagărelor prin faptul că pelicula de ulei este în pericol să se rupă datorită mișcării bruște a axei rotorului în timpul funcționării în sarcină a hidroagregatului.

3. Interpretarea rezultatelor

S-au efectuat o serie de încercări experimentale în vederea determinării performanțelor reale de funcționare a grupului HA1 cu ocazia punerii în funcțiune după finalizarea lucrărilor de reparație de tip LN3. În urma prelucrării rezultatelor acestor măsurători rezultă următoarele:

- vibrațiile maxime în timpul procesului tranzitoriu de pornire a hidroagregatului nu depășesc valori de 1 mm/s;
- vibrațiile în regim stabilizat de mers în gol neexcitat nu depășesc valoarea de 1,88 mm/s;
- regimul de vibrații la nivelul lagărelor nu este afectat de procesul electromagnetic de excitare a rotorului fapt evidențiat de nivelul vibrațiilor, rămânând aproape același ca și la mers în gol neexcitat ceea ce indică faptul că axa geometrică a rotorului are o poziție apropiată de axa magnetică a ansamblului rotor-stator;
- în regim de funcționare în sarcină vibrațiile la nivelul lagărului radial inferior și al lagărului turbinei nu se modifică, mărimea lor fiind practic aceeași ca în regim de mers în gol excitat;
- în regim de funcționare în sarcină la $P = 100$ MW se constată o tendință de modificare periodică a nivelului de vibrații în sensul creșterii lor timp de 4 s și apoi scăderea lor timp de 2 s, deci o tendință de oscilație cu o perioadă de circa 6 s.
- la funcționarea în sarcină se constată un anumit nivel de vibrații a stelei superioare deci și a statorului, în punctele de fixare a brațelor stelei pe inelul suport de pe peretele fosei. De remarcat este faptul că vibrațiile stelei superioare deci implicit a statorului au aceeași lege de variație ca și vibrațiile constatate la nivelul lagărelor.
- în timpul procesului de aruncare din sarcină la $P = 80$ MW respectiv 100 MW se constată o supraturare a rotorului cu 10,4 % respectiv 15,4 % față de turația nominală;
- valoarea maximă a vibrațiilor la nivelul lagărului radial axial a fost de 2,82 mm/s la $P = 80$ MW respectiv 2,59 mm/s la $P = 100$ MW rezultă că dinamica rotorului în timpul procesului tranzitoriu de aruncare din sarcină este mai stabilă la puteri mai mari;
- în timpul procesului tranzitoriu de aruncare din sarcină se constată aceeași tendință de oscilație a nivelului vibrațiilor în lagărul radial axial, oscilație determinată de fixarea necorespunzătoare a carcasei;

- fixarea necorespunzătoare a statorului față de pereții fosei conduce în același timp și la oscilația în spațiu a poziției axei de rotației a subansamblului rotor generator – rotor turbină fapt ce conduce la o instabilitate a dinamicii rotorului în timpul procesului de aruncare din sarcină respectiv la solicitării suplimentare în lagăre;
- procesul de stingere a câmpului în rotor, condiționat de constanta înfășurării de excitație, este foarte lent astfel că descreșterea tensiunii la bornele înfășurării statorice, de la valoarea maximă 16014 V până la valoarea de 4671,9 V se face într-un interval de timp 15,5 s;
- în regimul în care s-au efectuat încercările, la $P = 100$ MW, turbina funcționează la 60 % din puterea nominală, deci la performanțe mecanice mult sub cele impuse la puterea nominală, ca atare nu se justifică o funcționare îndelungată la această putere;

4. Concluzii

■ Întrucât în România există foarte multe hidrogeneratoare cu înălțimi mari ale carcasei fără consolidare, toate aceste agregate funcționează într-o stare tehnică necorespunzătoare, cu consecințe ce decurg de aici. Pentru a se asigura o stabilitate corespunzătoare carcasa trebuie rigidizată față de pereții fosei la nivelul brațelor steei superioare prin intermediul unor buloane reglabile.

■ Întrucât documentația existentă nu prevede consolidarea carcasei la nivelul brațelor steei superioare în prezent generatoarele funcționează fără consolidare. Pentru aducerea hidrogeneratoarelor într-o stare tehnică corespunzătoare se impune întocmirea documentației tehnice de consolidare a carcasei la nivelul superior.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Aghamohammadi, M.R., Pourgholir, M., *Experience with SSFR Test for Synchronous Generator Model Identification Using Hook-Jeeves Optimization Method*, International Journal Of Systems Applications, Engineering & Development, Volume 2, Issue 3, 2008, pp.122-127.
- [2] Colak, I., Garip, I., Sagioglu, S., Bayhan, S., *Remote monitoring of the load characteristics of synchronous generators*, Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2011 International Conference on, 11-13 May 2011, pp.1-4.
- [3] Grigoriu, M, Mastorakis, N, Popescu, J-O., *Hydroelectric Compenents Modeling and Simulation*, Proceedings of the International Conference on

ENERGY and ENVIRONMENT TECHNOLOGIES and EQUIPMENT, 2010, pp.375-381.

[4] Petrica, C., Liuba, G., Pădeanu, L., Nedelea, V., *Air Gap Influence On The Functional And Constructive Performance Of The Hydrogenerator*, 2nd THINK-HYDRO.com International Conference, 13-15 November, Resița 2013.

[5] Călinoiu, D., Ionel, R., Lascu, M. Cioabla, A., *Arduino and LabVIEW in educational remote monitoring applications*, Frontiers in Education Conference, 2014 IEEE, 22-25 octomber 2014; pp.1-5.

[6] Guo, F., Chu, D., Chen, *The unbalanced magnetic pull and its effects on vibration in a three-phase generator with eccentric rotor*, Journal of Sound and Vibration, vol. 254, Issue 2, 4 July 2002, pp.297-312.

[7] Kuemlee, H., Gross, T., Kolerus, J., *Machine vibrations and diagnostics the world of ISO*, Petroleum and Chemical Industry Technical Conference, Record of Conference Papers Industry Applications Society 60th Annual IEEE, 23 September 2013, pp.1-13.

[8] Popescu, M.C, Naaji, A., *Study on the Influence of the Number of Transient States (Starts/Stops) on Cogenerator Operation*, Published in: Region 10 Conference (TENCON), 2016 IEEE, november 2016, <http://ieeexplore.ieee.org/document/7848733/>

[9] Bărboianu, I., *Cercetări asupra influenței sistemului constructive și al montajului asupra performanțelor tehnice a hidrogeneratoarelor sincrone de mare putere*, București, ianuarie 2017.

[10] Bejan, M., *În lumea unităților de măsură*, ediția a doua revăzută și adăugită, Editura Academiei Române, București 2005 și Editura AGIR, București, 2005.

Dr. Ing. Iulian BĂRBOIANU
Hidroelectrica S.A., Sucursala hidrocentrale Porțile de Fier,
membru AGIR
e-mail: iulian.barboianu@hidroserv.ro

Conf.Dr.Ing. Mircea GRIGORIU
Universitatea Politehnica București,
membru AGIR,
e-mail: mircea.grigoriu@gmail.com

Prof.Dr.Ing. Marius Constantin POPESCU
Universitatea de Vest "Vasile Goldiș" din Arad,
Departamentul de Inginerie și Informatică
e-mail: mpopescu@uvvg.ro