

Andrzej WILK¹⁾, Piotr DOBROWOLSKI²⁾, Grzegorz KOSTRO³⁾

BADANIA DYNAMIKI DRGAŃ WAŁU HYDROGENERATORÓW

Streszczenie. W artykule przedstawiono eksperymentalne wyniki drgań giętnych wału wybranych hydrogeneratorów. Badano hydrogeneratory o mocy od 1 MV·A do 3 MV·A mające wały osadzone pionowo, ale posiadające różne prędkości synchroniczne. Badania drgań wykonywano na dostępnym fragmencie wału pomiędzy turbiną a generatorem. Pomiary wykonano przed procesem synchronizacji oraz po zsynchronizowaniu generatora z siecią przy różnych obciążeniach mocą czynną. Zastosowano bezdotykową metodę z wykorzystaniem czujnika na prądy wirowe. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że w każdym przypadku dynamika drgań wału hydrogeneratorów jest chaotyczna. Badana dynamika drgań charakteryzuje się niepowtarzalną trajektorią osi wału. Trajektorja ta w przestrzeni fazowej jest w sposób istotny zależna od obciążenia generatora mocą czynną. Najbardziej niepowtarzalna trajektorja występuje przy obciążeniu znamionowym.

DYNAMICS INVESTIGATION OF ROTOR VIBRATION IN HYDROGENERATOR

Summary. Experimental results of hydrogenerator transverse rotor vibrations are presented in the paper. The scope of investigations covers hydrogenerators from 1MVA to 3MVA, with vertical shafts and different synchronous speed. The vibration measurements were made with the sensor mounted near the shaft between the generator and the turbine. The measurements were taken before and after generator synchronization for different values of active power. An eddy current sensor system for non-contact radial rotor vibration was used. The results of investigations showed that the character of radial rotor vibration was chaotic. The trajectories of a shaft axis movement were of an irregular (unrepeatable) character. These trajectories in the phase space depend on the load. For the nominal load they have stable, almost periodic, orbits.

Key words: hydrogenerator, rotor, transverse vibrations, vibration shift, eddy current sensor, phase space

1. WSTĘP

Problematyce drgań wirników maszyn synchronicznych poświęcono do tej pory wiele prac o charakterze teoretycznym i doświadczalnym. Dotyczy to zwłaszcza turbozespołów energetycznych dużej mocy. Mniej prac poświęcono drganiom wałów hydrogeneratorów. Zagadnienia dynamiki generatorów synchronicznych sprzężonych z elementami wirującymi są nadal przedmiotem intensywnych prac badawczych. Wynika to z wielu różnorodnych sprzężeń ze sobą zjawisk fizycznych zachodzących w obszarze generatora, łożysk oraz turbiny. Można tu wymienić np. sprzężone drgania gięte z drganiami skrętnymi lub wzdłużnymi. Charakter takich sprzężeń wskazuje na nieliniowy model opisujący dynamikę drgań i może prowadzić do bardzo złożonych trajektorii drgań[1,4,5].

Rozwijane są także systemy diagnozowania i monitoringu [2,3,7] oparte na nowych przyrządach i technikach pomiarowych bardziej odpornych na czynniki zakłócające, tj. drgania mechaniczne, duże zmiany temperatur, zakłócenia elektromagnetyczne itp.

¹⁾ Dr inż., Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, 80-952 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12, tel: 3471087, fax: 3410880, e-mail: awilk@ely.pg.gda.pl

²⁾ Mgr inż., Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, 80-952 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12, tel: 3471157, fax: 3410880, e-mail: pdobrow@ely.pg.gda.pl

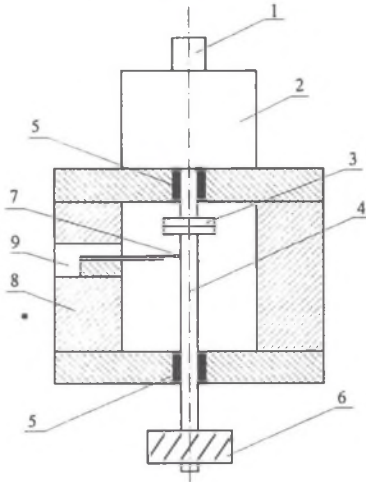
³⁾ Mgr inż., Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, 80-952 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12, tel: 3471157, fax: 3410880, e-mail: kapral@ds.pg.gda.pl

Osobliwy charakter drgań giętych wału obserwowano także w niektórych krajowych elektrowniach wodnych. Jak wykazały badania doświadczalne, drgania te mogą mieć chaotyczny charakter[6].

Celem pracy było zbadanie, czy chaotyczna dynamika drgań wałów występuje w hydrogeneratorach pracujących w innych elektrowniach. Obiektami badań były hydrozespoły pracujące w zespole elektrowni wodnych zlokalizowanych na rzece Raduni, zarządzanych przez Gdańską Kompanię Energetyczną „ENERGA S.A.”. Pomiaru wykonano na trzech prądnicach różnych typów, o mocach rzędu 1 MVA i prędkościach obrotowych nie przekraczających 500 obr/min. Wszystkie maszyny miały wały ułożone pionowo.

2. METODYKA I NARZĘDZIA POMIAROWE

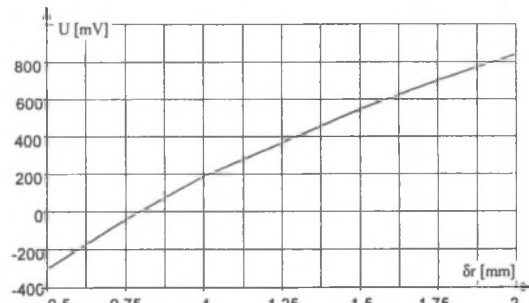
Zastosowano bezdotykową metodę pomiaru przemieszczenia drgań z wykorzystaniem czujnika na prądy wirowe. Przyrząd zainstalowano w komorze, w której znajduje się sprzęgło łączące wał prądnic z wałem turbiny. Uproszczony schemat hydrozespołu z miejscem zainstalowania czujnika przedstawiono na rys.1. Aparatura mierzyła przemieszczenie powierzchni wału w kierunku promieniowym. Czujnik zainstalowany był w układzie odniesienia związanym z masywnym fundamentem.



Rys.1. Uproszczony schemat hydrogeneratora z zaznaczonym punktem pomiarowym oraz układem odniesienia: 1-wzbudnica, 2-hydrogenerator, 3-sprzęgło, 4-wał, 5-łożyska, 6-turbina, 7-czujnik, 8-fundament, 9-wnęk

Fig.1. Simplified diagram of a hydro-generator with measuring point and reference point: 1-exciter, 2-hydrogenerator, 3-coupler, 4-shaft, 5-bearings, 6-turbine, 7-sensor, 8-foundation, 9-recess

Aparaturę pomiarową łącznie z czujnikiem i układem regulacji odległości wykonano na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Przed pomiarami dokonano statycznego skalowania przyrządu w celu uzyskania charakterystyki czujnika z uwzględnieniem topologii powierzchni wału, jego cech materiałowych oraz nieliniowości. Przykładową charakterystykę przyrządu, czyli zależność napięcia wyjściowego w funkcji szczeliny pomiędzy powierzchnią wału a powierzchnią czołową czujnika przedstawiono na rys.2.



Rys. 2. Charakterystyka statyczna zastosowanego czujnika na prądy wirowe

Fig. 2. Static characteristic of the eddy current sensor used for measurements

Ustrój pomiarowy aparatury to klasyczny mostek czterech indukcyjności z różnicowym pomiarem napięcia w gałęzi poprzecznej. Częstotliwość napięcia zasilającego mostek wynosiła 33 kHz. Wyznaczone charakterystyki $u=f(\delta r)$ w większym zakresie szczelin były nieliniowe, co miało wpływ na pewne zniekształcenie sygnału pomiarowego.

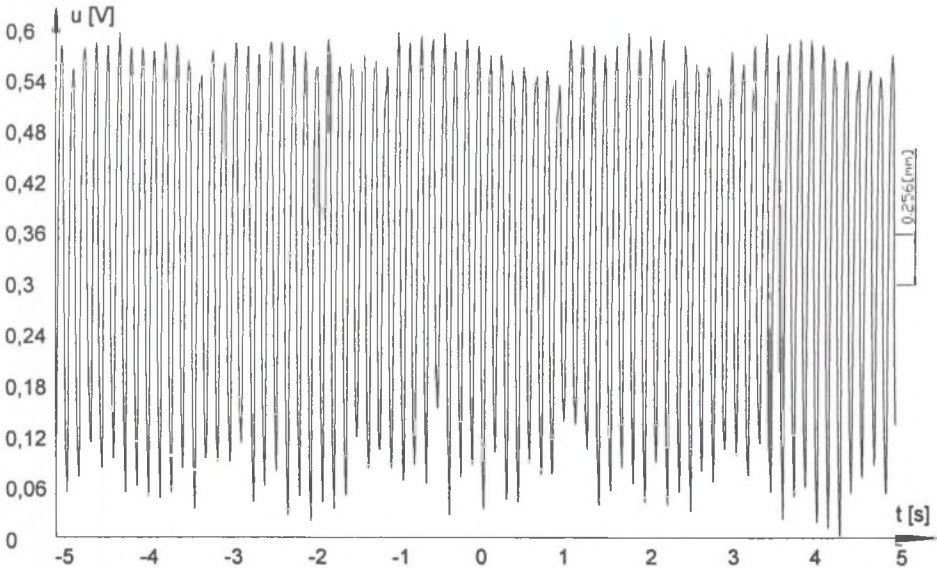
3. WYNIKI POMIARÓW DRGAŃ GIĘTYCH WAŁU

Badania przeprowadzono na trzech generatorach różnych typów, mocy i prędkościach synchronicznych. Wspólnym mianownikiem tych trzech przypadków było ustawienie pionowe wałów, lokalizacja miejsca pomiarowego na odcinku wału pomiędzy prądnicą i turbiną oraz taki sam sposób przytwierdzenia czujnika do fundamentu stanowiącego względny układ odniesienia. W zakres badań weszły pomiary drgań giętych wału w stanach ustalonych dla następujących przypadków:

- generator niezsynchronizowany z siecią sztywną, wzbudzony, prędkość obrotowa bliska synchronicznej;
- generator zsynchronizowany z siecią, obciążenie mocą czynną bliskie zeru;
- generator zsynchronizowany z siecią, obciążony połową mocy znamionowej;
- generator zsynchronizowany z siecią, obciążony znamionowo.

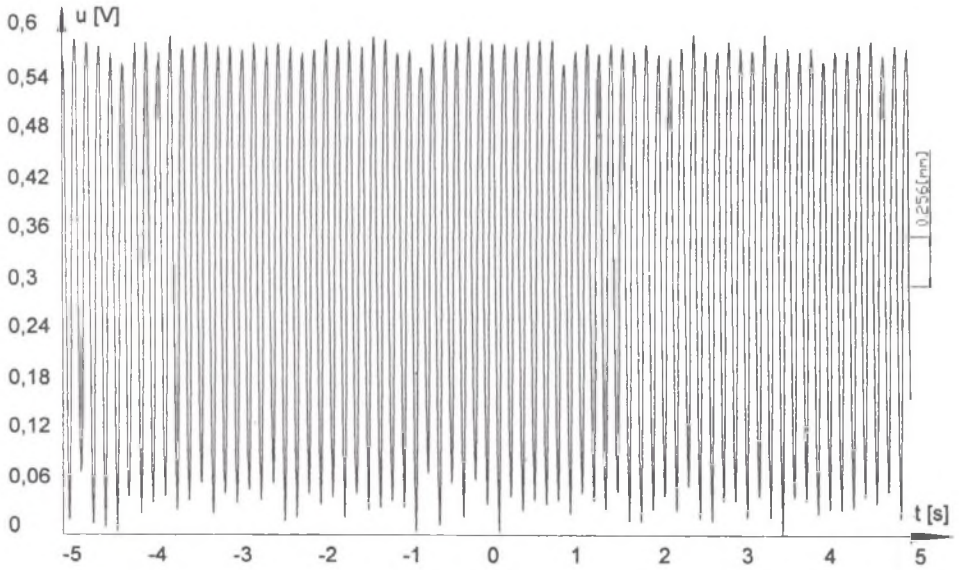
Długości mierzonych rekordów wynosiły 10 sekund. Liczba próbek w takim jednym rekordzie wynosiła 15000. Przetworzony w aparaturze pomiarowej sygnał był rejestrowany oscyloskopem cyfrowym typu TDS420 (Tektronix), z którego następowała akwizycja danych do pamięci masowej komputera za pomocą łącza GPIB.

Zgromadzone dane pomiarowe stanowią dość obszerny materiał doświadczalny. Prezentacja wyników wszystkich badanych prądnic wykracza poza ramy objętości tej pracy. Poniżej zaprezentowano jedynie przykładowe wyniki pomiarów drgań giętych wału hydrogeneratora w Elektrowni Wodnej „Straszyn”. Badanym obiektem była prądnica firmy SIEMENS-SCHUCKERT o mocy znamionowej 1750 kVA i prędkości synchronicznej 428 obr/min. Poszczególne przebiegi na rys. 3, 4, 5 i 6 odpowiadają warunkom stanu pracy generatora, które wymieniono wcześniej w podpunktach a, b, c i d.

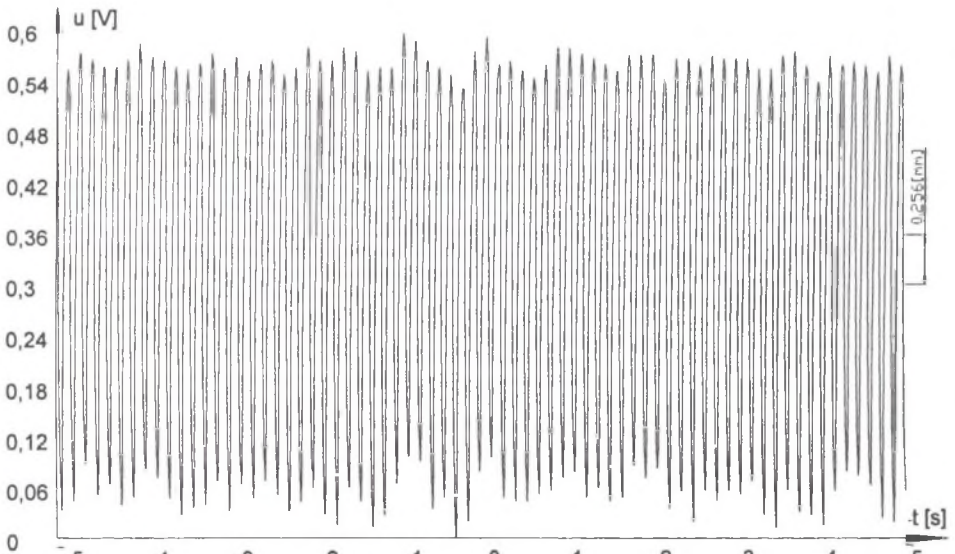


Rys. 3. Drgania gięte wału wzbudzonego hydrogeneratora niezsynchronizowanego z siecią i wirującego z prędkością zbliżoną do synchronicznej

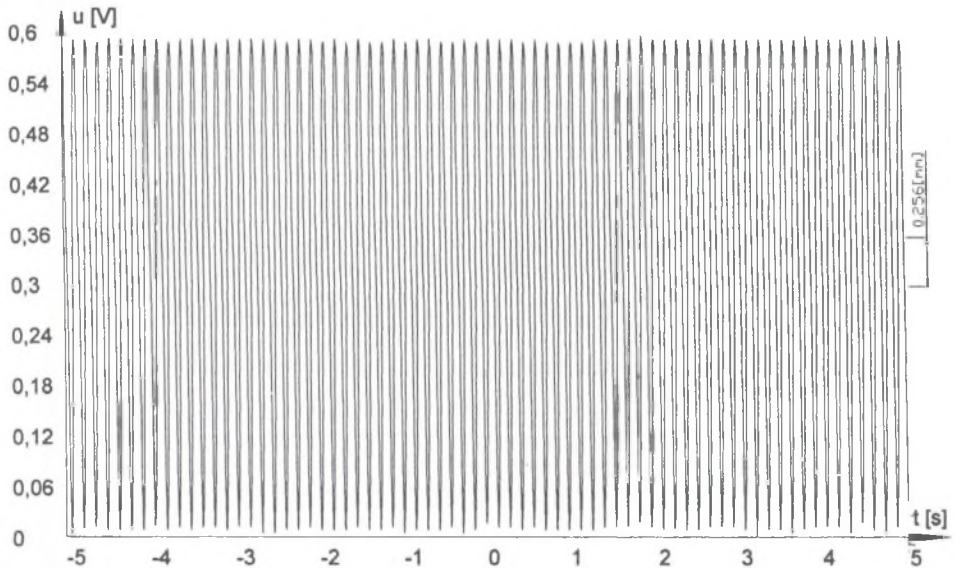
Fig. 3. Transverse vibrations of the shaft of an excited non-synchronized hydrogenerator with the rotor speed near the synchronous one



Rys. 4. Drgania giętkne wału hydrogeneratora zsynchronizowanego z siecią, biegnącego jałowo
Fig. 4. Transverse vibrations of the shaft of a synchronized hydrogenerator no-load running



Rys. 5. Drgania giętkne wału hydrogeneratora zsynchronizowanego z siecią przy obciążeniu równym połowie mocy znamionowej
Fig. 5. Transverse vibrations of the shaft of a synchronized hydrogenerator running with the half of nominal load



Rys. 6. Drgania giętkie wału hydrogeneratora zsynchronizowanego z siecią przy obciążeniu znamionowym
Fig. 6. Transverse vibrations of the shaft of a synchronized hydrogenerator running with the nominal load

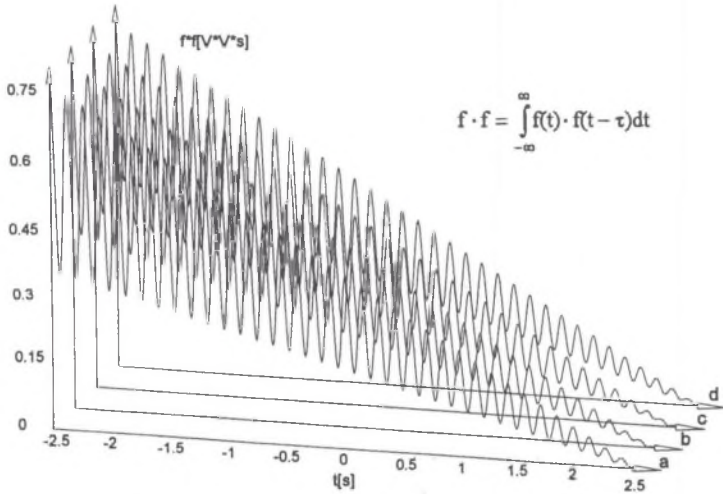
Analizując poszczególne przebiegi czasowe można zauważyć, że zakres przemieszczeń poprzecznych δr_{pp} (od szczeliny minimalnej do maksymalnej) wału jest stosunkowo duży. W przypadku przebiegów podanych na rys.3, 4, 5 i 6 zakres ten wynosi w przybliżeniu $\delta r_{pp} = 0.8\text{mm}$. Nie są to zatem drgania własne powierzchni, gdyż przekroczyłyby granicę odkształceń plastycznych. Są to przemieszczenia osi wału, której trajektoria w płaszczyźnie poprzecznej jest zbliżona do okręgu. Trajektorja ta jest niepowtarzalna i jak się okazuje jest pewną funkcją zależną od obciążenia hydrogeneratora mocą czynną. We wszystkich badanych przypadkach można zauważyć, że najbardziej powtarzalna trajektorja drgań występowała przy obciążeniu znamionowym.

4. ANALIZA WYNIKÓW

Wstępną analizę danych eksperymentalnych przeprowadzono w dziedzinie czasu oraz w dziedzinie częstotliwości. Do analizy w dziedzinie czasu zastosowano funkcję korelacji wzajemnej. Zastosowano ją w celu wyznaczenia składowych okresowych w sygnale przemieszczenia poprzecznego wału. Przykładowe wyniki funkcji autokorelacji pokazano na rys.7. Oznaczenia na osi czasu a, b, c i d odpowiadają poszczególnym przebiegom z rys.3, 4, 5 i 6.

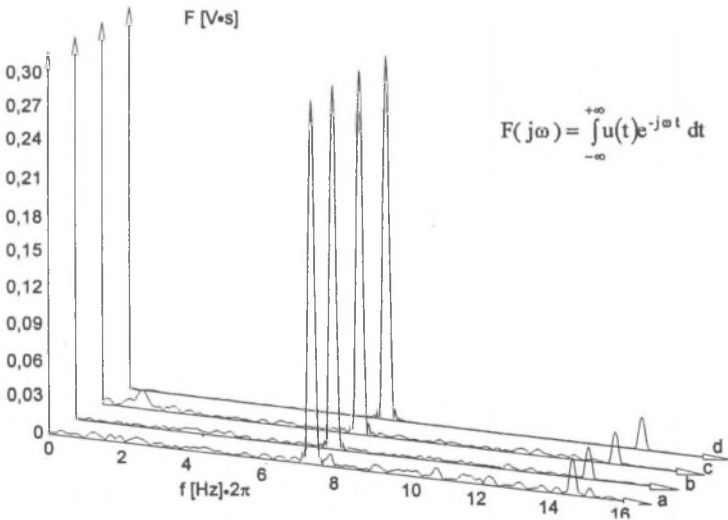
Analiza wyników w dziedzinie czasu wskazuje istnienie jednej tylko składowej okresowej, której okres jest równy czasowi trwania jednego obrotu wału. Wynik ten dotyczy wszystkich badanych przebiegów charakteryzujących się zarówno powtarzalną, jak i niepowtarzalną trajektorią osi wału w płaszczyźnie poprzecznej.

Do analizy w dziedzinie częstotliwości zastosowano Transformatę Fouriera. Wyznaczono widmo ciągłe przemieszczenia drgań w zakresie niskich częstotliwości ze względu na charakterystyczną modulację składowej okresowej wynikającej z pełnego obrotu wirnika. Obliczenia wykonano przy zastosowaniu okna typu Hamminga. Przykładowe wyniki Transformaty Fouriera przedstawiono na rys.8. Oznaczenia na osi częstotliwości a, b, c i d odpowiadają poszczególnym przebiegom z rys.3, 4, 5 i 6.



Rys. 7. Wyniki funkcji autokorelacji przemieszczenia drgań wału hydrogeneratora: a) wzbudzonego i przed synchronizacją, b) zsynchronizowanego i nieobciążonego, c) zsynchronizowanego i obciążonego połową mocy znamionowej, d) zsynchronizowanego i obciążonego mocą znamionową

Fig. 7. Autocorrelation results of the hydrogenerator shaft vibrations: a) excited and before synchronization, b) after synchronization and no-load running, c) after synchronization and with the half of nominal load, d) after synchronization and with the nominal load



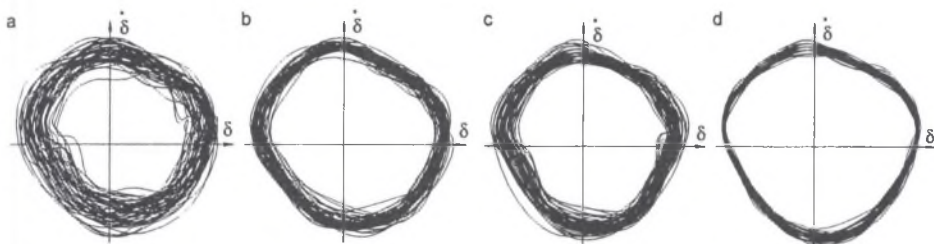
Rys. 8. Widmo amplitudowe przemieszczenia drgań wału hydrogeneratora: a) wzbudzonego i przed synchronizacją, b) zsynchronizowanego i nieobciążonego, c) zsynchronizowanego i obciążonego połową mocy znamionowej, d) zsynchronizowanego i obciążonego mocą znamionową

Fig. 8. Fourier transform of the hydrogenerator shaft vibrations: a) excited and before synchronization, b) after synchronization and no-load running, c) after synchronization and with the half of nominal load, d) after synchronization and with the nominal load

Analiza widma amplitudowego wykazała, że w każdym przebiegu występuje największa składowa o częstotliwości 7.2 Hz. Wynika ona z czasu trwania jednego obrotu wału. Następną istotną składową występującą w każdym przypadku ma częstotliwość 14.4 Hz. Wynika ona po części z nieliniowej charakterystyki czujnika i wyższych harmonicznych w trajektorii osi wału.

Zmiany zachodzące w widmie przemieszczenia (od uruchomienia do obciążenia znamionowego) drgań giętnych wału można przedstawić według następującego scenariusza. Przy wzbudzonej prądnicy i niesynchronizowanej z siecią występuje w widmie całe spektrum składowych o częstotliwościach zawartych w badanym przedziale (od 0 do 16 Hz). Są one rozłożone równomiernie i nie można wskazać wyróżniającej się grupy składowych z wyjątkiem dwóch wskazanych wcześniej. Po zsynchronizowaniu generatora z siecią i braku obciążenia widmo zmienia się. Nadal występuje spektrum składowych o częstotliwościach w całym badanym zakresie, ale ich poziom jest znacznie mniejszy niż przed synchronizacją. Przy obciążeniu prądnicy połową mocy znamionowej widmo przemieszczenia drgań ulega kolejnej zmianie. Dotyczy to pojawienia się grupy składowych wokół częstotliwości 0.68 Hz. Składowa ta jest niezależna od częstotliwości 7.2 Hz, występującej we wszystkich przypadkach. Po obciążeniu prądnicy mocą czynną znamionową widmo zmienia się w sposób istotny. Występujące w poprzednich przypadkach spektrum składowych w zakresie badanych częstotliwości praktycznie znika (jest silnie stłumione). Pozostają tylko dwie wyraźne składowe o częstotliwościach 7.2 i 14.4 Hz.

W celu wyznaczenia trajektorii drgań w przestrzeni fazowej wyznaczono zmienne niezależne – przemieszczenie δ i jego pochodną $d\delta/dt$. Przykładowe wyniki drgań, w przestrzeni fazowej dwuwymiarowej (δ , $d\delta/dt$) dla czasu około 5s pokazano na rys.9. Jak widać, trajektorie tych drgań są zbliżone do okręgu. Są one najbardziej powtarzalne przy obciążeniu prądnicy mocą znamionową.



Rys. 9. Trajektorie drgań wału hydrogeneratora w dwuwymiarowej przestrzeni fazowej: a) wzbudzonego i przed synchronizacją, b) zsynchronizowanego i nieobciążonego, c) zsynchronizowanego i obciążonego połową mocy znamionowej, d) zsynchronizowanego i obciążonego mocą znamionową

Fig. 9. The trajectories of hydrogenerator shaft chaos motions in 2D phase space: a) excited and before synchronization, b) after synchronization and no-load running, c) after synchronization and with the half of nominal load, d) after synchronization and with the nominal load

5. WNIOSKI

1. Badania dynamiki drgań giętnych wału badanych hydrogeneratorów wykazały, że charakter tych drgań był chaotyczny. Trajektorja przemieszczeń poprzecznych (promieniowych) osi wału była niepowtarzalna. Stan taki zaobserwowano na różnych badanych hydrozespołach.
2. Chaotyczna dynamika drgań giętnych jest zależna od wielkości obciążenia prądnicy mocą czynną. Najbardziej zbliżone trajektorie osi wału występują przy obciążeniu znamionowym.
3. Funkcja autokorelacji wykazała we wszystkich przypadkach obecność jednej składowej okresowej przemieszczenia drgań, której czas trwania był równy okresowi jednego obrotu wału.
4. Chaotyczna dynamika w stanach chaotycznych zawierało spektrum częstotliwości w całym badanym zakresie. Amplitudy składowych tego spektrum zmieniały się w procesie uruchomienia hydrozespołu (przed synchronizacją i po synchronizacji), a następnie w funkcji obciążenia mocą czynną.

LITERATURA

1. Adams ML.: Non-linear dynamics of flexible multi-bearing rotors. *Journal of Sound & Vibration*, vol.71, no.1, 8 July 1980, pp.129-44. UK.
2. Edmonds JS, Churchill TL. Unique sensor applications for hydroelectric generator rotor-mounted sensor scanning technology. *IEEE Technical Applications Conference. Northcon/96*. 1996, pp.73-7. New York, NY, USA.
3. Rong Jili, Zou Jingxiang, Zhang Jiazhong, Huang Wenhui, Li Zhihe, Cao Chunlin, Ma Decai. Computational method and resultant analysis of the transverse self-oscillation characteristic of shaft system of hydrogenerator set with finite element method. *Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*, vol.17, no.1, Jan. 1997, pp.33-6, 41. Publisher: Chinese Soc. Electr. Eng, China.
4. Rosenberg LT. Abnormal vibration problems in large turbine-driven generators and their solutions. *IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems*, vol.PAS-101, no.10, Oct.1982, pp.4131-5. USA.
5. Walczyk Z.: Dynamika wirnikowych maszyn energetycznych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej* 1992 nr 64 *Mechanika*.
6. Wilk A., Piłuta J., Michna M.: Narażenia zestyku ślizgowego hydrogeneratorów w dłuższym okresie eksploatacji. *XXXV Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych. Maszyny Elektryczne w Energetyce*. 14-16 czerwca 1999, pp.117-126. Kazimierz Dolny, Poland.
7. Xuezhai Y., Puchiang Y., Leshan M.: Measurement of Absolute Vibration of Rotating Shaft. *Proceedings of the 7th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery. ISROMAC-7*. 22-26 Feb. 1998. Honolulu, Hawaii, USA.

Recenzent: Dr hab. inż. Bronisław Drak

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 marca 2001 r.

Abstract

Experimental results of hydrogenerators radial rotor vibrations are presented in the paper. The scope of investigations covers hydrogenerators from 1MVA to 3MVA, with vertical shafts and different synchronous speed. The vibration measurements were made with the sensor mounted near the shaft between the generator and the turbine (Fig.1).

The measurements were taken before and after generator synchronization for different values of active power. Before synchronization the hydrogenerator was excited and the rotor speed was near the synchronous one. After the synchronization measurements of the shaft vibration were made in the following states of operation: no-load, the half of nominal load, and the nominal load. An eddy current sensor system for non-contact radial rotor vibration was used. Examples of the measurement results are shown in Figs. 3,4,5 and 6. The results of investigations showed that the character of radial rotor vibrations is chaotic.

The signals were analyzed in the time domain and in the frequency domain. The autocorrelation function was used in order to obtain the periodic components of the shaft movement vibration. The results of the autocorrelation (Fig.7) show that one periodic component equal to the rotation period is included in the received signals. The Fourier transform was used for the signal analysis realized in the frequency domain. It is shown that the spectrum (Fig.8) has two significant components in each state of operation. Other components in the frequency spectrum depend on the load. The shaft vibration trajectories in the phase space (Fig.9) were also determined. The trajectories of a shaft axis movement were of an irregular (unrepeatable) character. These trajectories in the phase space depend on the load. For the nominal load they have stable, almost periodic orbits.