

TESTING TECHNOLOGIES OF HYDROAGGREGATE FOR THE PURPOSE OF ASSESSMENT OF VIBRATIONAL STATE IN EXPLOITATION

Zoran Janjić

The Academy of Applied Technical and Preschool Studies, Serbia, zoran.janjin@visokaskola.edu.rs

Abstract: Vibrations of the basic assemblies of the hydrogen generator cause variable forces and loads that occur during operation and depending on the operating mode. This paper presents some test results performed on a Kaplan vertical type turbine. Measurements were performed at 3 measuring points (N1, N2 and N3; Figure 1) using non-contact sensors, placed in pairs under 90° at each measuring point. Based on the measurements performed and the analysis of the obtained results, the following can be concluded: hydraulic tests of the turbine were performed on instruments that ensure high accuracy of these measurements. The tables show the absolute vibrations on the bearings of the hydro unit, as well as the vibrations of the turbine guide bearing.

Keywords: HPP, pipe turbines, hydraulics, tests.

ТЕХНОЛОГИЈЕ ИСПИТИВАЊА ХИДРОАГРЕГАТА У ЦИЉУ ОЦЕНЕ ВИБРАЦИОНОГ СТАЊА У ЕКСПЛОАТАЦИЈИ

Зоран Јањић

Академија техничко-васпитачких струковних студија, Србија, zoran.janjin@visokaskola.edu.rs

Резиме: Вибрације основних склопова хидрогенератора изазивају променљиве силе и оптерећења која се јављају у току погона и у зависности од режима рада. У оквиру овог рада се приказују неки резултати испитивања које је извршено на Каплан-овој турбини вертикалног типа. Мерења су извршена на 3 мерна места (N1, N2 и N3; слика 1.) помоћу бесконтактних сензора, постављена у пару под 90° на сваком мерном месту. На основу обављених мерења и извршене анализе добијених резултата може се закључити следеће: хидрауличка испитивања турбине су обављена на инструментима који обезбеђују високу тачност ових мерења. У табелама су приказане апсолутне вибрације на лежајевима хидроагрегата, као и вибрације турбинског водећег лежаја.

Кључне речи: НЕ, цевне турбине, хидраулика, испитивања.

1. МЕРЕЊЕ ВИБРАЦИЈА НА ХИДРОТУРБИНИ

Узроци вибрације хидрогенератора

Вибрације основних склопова хидрогенератора изазивају променљиве силе и оптерећења која се јављају у току погона и у зависности од режима рада, како је то дато у наставку (на сликама и у табелама).

Појава и промена вибрација у зависности од режима рада

У случају идеално израђеног и монтираног агрегата, на склопове генератора делују електромагнетне периодичне силе привлачења од 100Hz и чије су амплитуде веома мале.

Међутим, у стварности генератори су монтирани са одређеним дозвољеним одступањима, што практично значи појаву одређених асиметрија и нарушавања равнотеже, што доводи и до појаве одређених сила и вибрација. Пошто су дозвољена одступања мала, силе које се јављају су мале, а самим тим и амплитуде вибрација изазване тим силама.

За дијагностику о стању генератора битно је праћење промена вибрација полне учестаности и вибрација.

Вибрације полне учестаности

Вибрације језгра полне учестаности ($2f=100\text{Hz}$) су увек присутне на статору генератора и последица су промене сила привлачења између статора и ротора када је машина пробуђена.

Уколико нема отказа на опреми ове вибрације су мале амплитуде. Вибрације језгра учестаности од 100Hz могу да се појаве и као последица лоше изабране шеме намотаја.

Повећане вибрације језгра полне учестаности јављају се у случајевима када долази до слабљења компактности спојева језгра статора.

Нискофреквентне вибрације

Нискофреквентне вибрације статора генератора представљају више хармонијско померање на основу учестаношћу која је једнака са учестаношћу обртања ротора. Осим хармоника основе учестаности, битан је хармоник другог и по неки пут хармоник трећег реда.

Основни извор нискофреквентних вибрација је несиметрија ротора.

Узрок нискофреквентних вибрација може да буде и кратак спој у намотају полова ротора.

Идентификациони подаци, ознаке, мерна места и мерне тачке

Примарни циљ испитивања хидроагрегата је оцена динамичког стања у експлоатацији.

1. Испитивања вибрационих параметара:

- Релативне вибрације вратила ротора
- Орбите релативних померања осе вратила у експлоатацији
- Промене положаја орбита у експлоатацији
- Положаји осе вратила током експлоатације
- Апроксимација кинетичка линије ротора
- Параметри ротора у прелазним режимима

2. Валидација резултата испитивања:

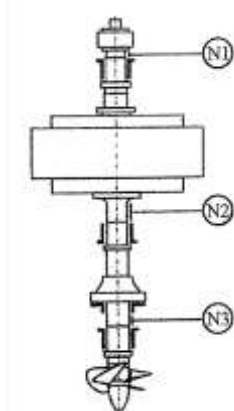
- Валидација вибрација вратила ротора у складу са ISO 7919-5:2005

3. Идентификација динамичког стања

4. Процена сигурности функционисања

Испитивање је извршено на Каплан-овој турбини вертикалног типа. Мерења су извршена на 3 мерна места (N1, N2 и N3; слика 1.) помоћу бесконтактних сензора, постављена у пару под 90° на сваком мерном месту.

Слика 1. Шематски приказ мерних места на хидротурбини у ХЕ Газиводе

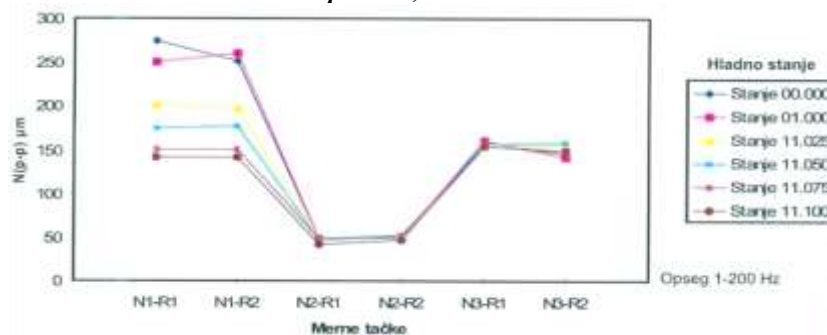


Овде су дати спектрални и временски записи релативних помака осе вратила симултано снимљени помоћу два бесконтактна сензора у зони водећег лежаја турбине (ознака мерног места N1), у зони доњег водећег лежаја синхроног генератора (ознака мерног места N2) и помоћу два бесконтактна сензора у зони горњег водећег лежаја (ознака мерног места N3). Сигнали су идентификовани и обрађени у складу са групом стандарда ISO 7919, а посебно са ISO 7919-1:1996 и ISO 7919-5:2005 (1, 4, 7).

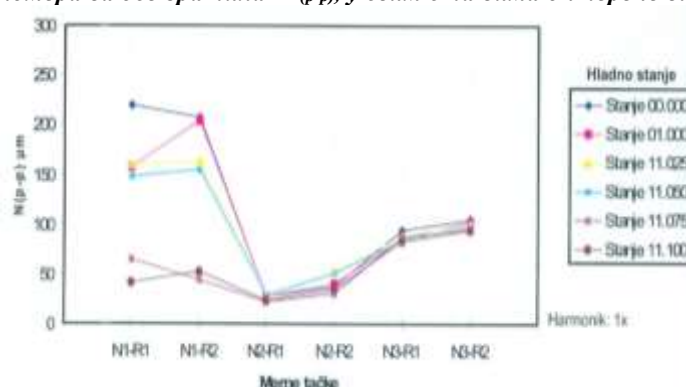
2. ГРАФИЧКИ ПРИКАЗ РЕЗУЛТАТА ИСПИТИВАЊА (СЛИКА 1)

Релативна померања осе вратила, $N_{(p-p)}$ μm

Слика 2. Релативна померања осе вратила $N_{(p-p)}$, у свим стањима оптерећења, опсег 1-200 Hz

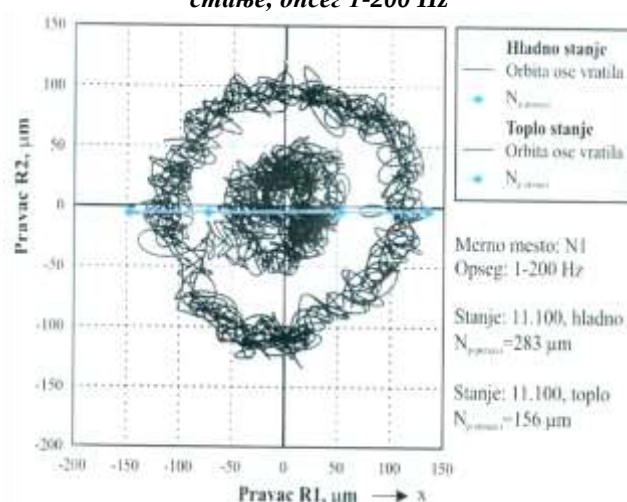


Слика 3. Релативна померања осе вратила $N_{(p-p)}$, у свим стањима оптерећења, Хармоник 1x (1, 4, 7)

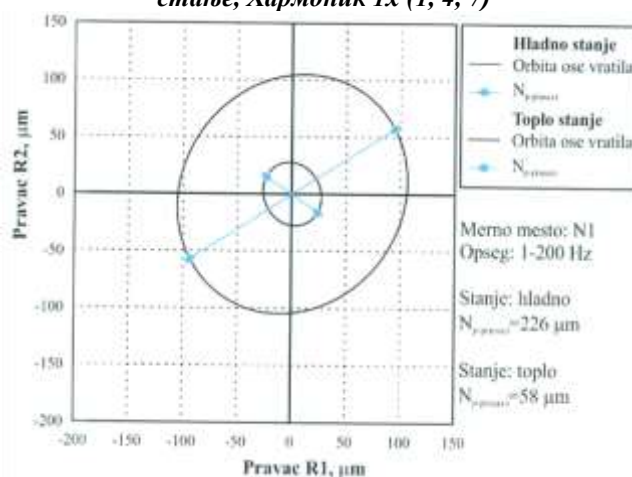


3. МЕРНО МЕСТО N1, ПОГОНСКО СТАЊЕ 10.100, ХЛАДНО/ТОПЛО СТАЊЕ

Слика 4. Орбите релативних померања осе вратила за мерно место N1, погонско стање, хладно/топло стање, опсег 1-200 Hz



Слика 5. Орбите релативних померања осе вратила за мерно место N1, погонско стање, хладно/топло стање, Хармоник 1x (1, 4, 7)



Значења усвојених симбола:

↓ - недостатак података и/или неприступачности мерног места;

⊗ - назначена активност није предмет испитивања;

□ - податак и/или параметар није дефинисан;

Закључци и дијагностички налаз

Статус квалитета и идентификоване неусаглашености

Статус квалитета испитиваних делова/склопова

а) Вратило ротора хидроагрегата

Погонски део агрегата, мерно место N1

- Вибрационо стање усаглашено са захтевима квалитета стандарда ISO 7919-5:2005, Annex A, Figure A.2.

Радни део агрегата, мерна места N2 и N3

- Вибрационо стање усаглашено са захтевима квалитета стандарда ISO 7919-5:2005, Annex A, Figure A.2.

Идентификоване неусаглашености, симптоми и индиције*

- У готово свим погонским стањима код вратила ротора присутни симптоми „колена“.

*Неусаглашености, симптоми и индиције дати у складу са SRPS ISO/IEC 17025:2006, тачка 5.10.5.

Процена сигурности и предлози за побољшање*

б) Процена сигурности функционисања хидроагрегата

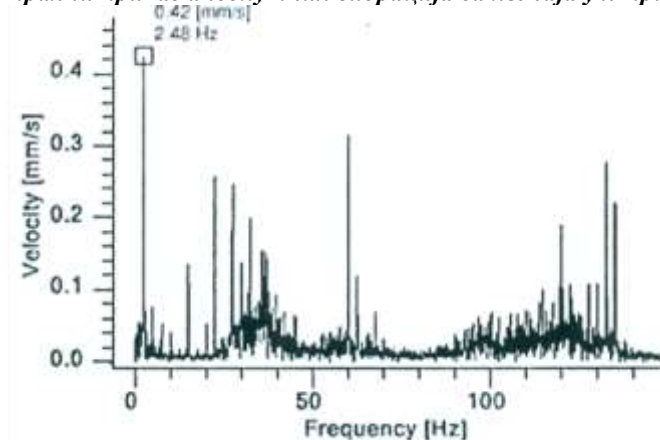
На основу резултата испитивања динамичког стања лежајева и вратила ротора у експлоатацији следи да су испуњени потребни услови у складу са захтевима ISO 7919-5:2005 за трајни погон испитиваног уређаја, хидро-агрегата.

6. ПРЕДЛОЗИ ЗА ПОБОЉШАЊЕ ИДЕНТИФИКОВАНОГ СТАЊА

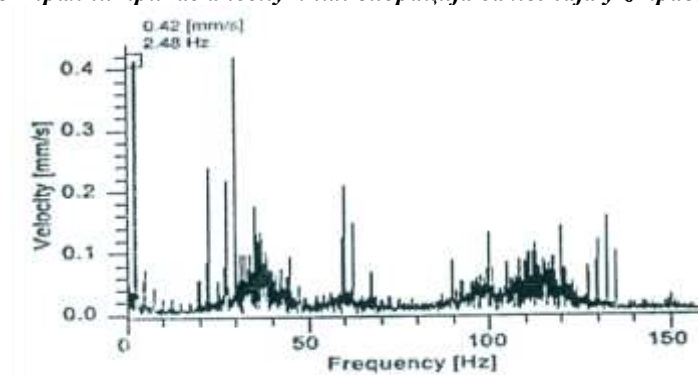
1. Извршити анализу градијента смањења снаге у циљу корекције хистерезиса вибрација вратила.
2. Извршити инспекцијски и по потреби корекције на сегментима носећег лежаја.
3. Извршити инспекцијски преглед и по потреби корекције на спојници укључујући и контролу завртњских веза.
4. У наредном ремонту планирати контролу саосности турбинског лежаја у односу на генераторске вибрације на лежајима хидроелектране Газиводе.

Овде су дати спектрални прикази апсолутних вибрација на лежајевима хидротурбина Газиводе (мерење извршено у марту 2020. године; мерење извршено инструментом PRUFTECHNIK AG VIBROCORD – Omitrend 1.60).

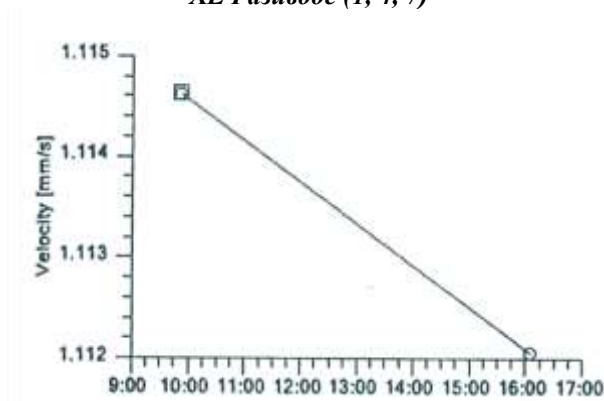
Слика 8. Спектрални приказ апсолутних вибрација са лежаја у x-правцу ХЕ Газиводе



Слика 9. Спектрални приказ апсолутних вибрација са лежаја у z-правцу XE Газиводе



Слика 10. Укупни ниво вибрација, мерено на лежају у у-правцу XE Газиводе (1, 4, 7)



У следећим табелама дате су апсолутне вибрације на лежајевима хидроагрегата (празан ход) (табела 2), вибрације генераторског носећег лежаја (табела 3), вибрације турбинског водећег лежаја (табела 4).

Табела 2. Апсолутне вибрације на лежајевима хидроагрегата (празан ход) (1, 4, 7)

Лежај	Правац-х					Правац-у					Правац-з				
	$\sum \left(\frac{mm}{s}\right) V_{RMS}$	1X	2X	Φ_{a3} 1X	Φ_{a3} 2X	$\sum \left(\frac{mm}{s}\right) V_{RMS}$	1X	2X	Φ_{a3} 1X	Φ_{a3} 2X	$\sum \left(\frac{mm}{s}\right) V_{RMS}$	1X	2X	Φ_{a3} 1X	Φ_{a3} 2X
N1	0.48	0.34	0.08	-	-	0.47	0.51	-	-	-	0.56	0.52	-	-	-
N2	0.39	0.42	0.09	-	-	0.26	0.25	-	-	-	0.49	0.40	-	-	-
N3	0.58	0.29	0.06	-	-	0.29	0.30	-	-	-	0.62	0.50	-	-	-

Табела 3. Авибрације генераторског носећег лежаја Arms (mm/s)

Мерна места	Anlx	Anly	Anlz
1	2,85	2,02	0,39
2	2,98	2,06	0,36
3	2,99	2,07	0,33
4	2,80	1,99	0,39
5	2,73	1,85	0,41

Табела 4. Вибрације турбинског водећег лежаја Arms (mm/s)

Мерна места	Anlx	Anly
1	0,51	0,41
2	0,50	0,41
3	0,49	0,47
4	0,56	0,49
5	0,59	0,51

6. ЗАКЉУЧАК

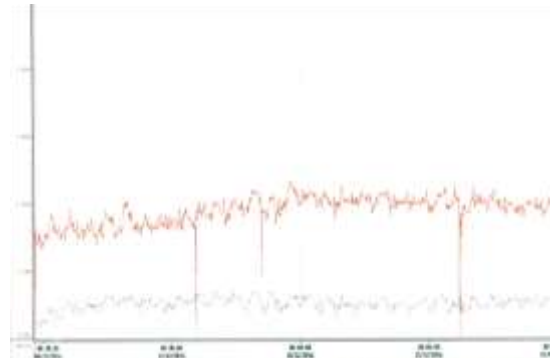
На основу обављених мерења и извршене анализе добијених резултата може се закључити следеће: Хидрауличка испитивања турбине су обављена на инструментима који обезбеђују високу тачност ових мерења. У табели 3 приказане су апсолутне вибрације на лежајевима хидроагрегата, као и вибрације турбинског водећег лежаја.

На сликама су приказана експлоатациона праћења брзина вибрација за одређене временске периде клизно лежишта. Приликом мерења није било могуће одржавати константан пад за дужи временски период те су вредности добијене мерењем прерачунаване на средњу вредност пада поступком описаним у поглављима 3 и 6.

Слика 11. Експлоатационо праћење брзина вибрација ја период од 04.12.2016. до 01.01.2016. у току 24 часа за клизно лежиште број 6³⁷



Слика 12. Експлоатационо праћење брзина вибрација за период од 04.12.2016. до 01.01.2016. у току 24 часа за клизно лежиште број 7³⁷



РЕФЕРЕНЦЕ

- Адамовић, Ж. (2008). *Техничка дијагностика*, Завод за уџбенике и наставна средства, Београд (ISBN 978-86-17-06434-X).
- Адамовић, Ж., & Илић, Б. (2013). *Наука о одржавању техничких система*, Српски академски центар, Нови Сад.
- Вуловић, С. (2017). *Интегрисани модел одржавања заснован на успостављању законитости промене механичких вибрација и њихов утицај на прогностику стања ротационих машина* (докторска дисертација), Универзитет у Новом Саду.
- Вуловић, С., Вуловић, М., Петров, Т., Савић, Д., & Адамовић, Ж. (2017). *Оцена вибрационог стања генератора*, Мајски скуп одржавалаца Србије „Бука, вибрације и проактивно одржавање машина“ (уводно предавање), Врњачка Бања.
- Студија: *мониторинг хидроагрегата за дијагностику*, Институт „Никола Тесла“, Београд, 2012.
- Cornel, H., et al. (2017). Vibration analysis of a hydro generator for different operating regimes. In: *IOP Conference Series Materials Science and Engineering* 163(1):012030, DOI:10.1088/1757-899X/163/1/012030
- ISO 7919-5:2005, *Mechanical vibration-Evaluation of machine vibration by measurement on rotating shaft-Part 5*.

- Härtel, P. (2017). Aggregation Methods for Modelling Hydropower and Its Implications for a Highly Decarbonised Energy System in Europe. In: *Energies* 10(11), DOI:10.3390/en10111841
- Kougis, I., *et al.* (2019). Analysis of emerging technologies in the hydropower sector. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 113, DOI:10.1016/j.rser.2019.109257
- Perić, M., Buenker, R., & Peyerimhoff, S. (2011). Theoretical study of the vibrational structure of the $1(n,\pi^*)$ transition in diimide: potential curves and Franck–Condon analysis. In: *Canadian Journal of Chemistry* 55(9):1533-1545, DOI:10.1139/v77-214
- Ro, T. (2016). *Извештај и вибротијагностици турбо-генераторског постојења у ТЕ Костолац-Дрмно*, Блок 1, Београд.
- Saberi, O., *et al.* (2021). New Technology to Increase Hydropower Plant Operational Flexibility, DOI:10.5923/j.ijhe.20211001.01
- Xu, J. (2015). Hydropower development trends from a technological paradigm perspective. In: *Energy Conversion and Management* 90:195-206, DOI:10.1016/j.enconman.2014.11.016