

REZULTATI EKSPERIMENTALNOG ISTRAŽIVANJA NIVOA VIBRACIJA NA USTAVI "TOMAŠEVAC" -HIDROSISTEM DTD

Dr Emil POPOVIĆ, dipl.inž.građ.
JVP "Vode Vojvodine" Novi Sad

Prof. dr Radomir FOLIĆ, dipl.inž.građ.
Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu

REZIME

Na objektu ustave "Tomaševac" zapažen je povišen nivo vibracija segmentnog zatvarača srednjeg polja. Sprovedeno je probno i osnovno merenje intenziteta vibracija. Program eksperimentalne analize vibracija tokom osnovnog merenja je obuhvatio merenje nivoa vibracija konstrukcije segmentnog zatvarača i ispitivanje konstrukcije segmentnog zatvarača putem merenjem efektivnih vrednosti vibracionih parametara. Korišćena je vremenska, frekventna i fazna analiza vibracionih parametara. Analizom rezultata merenja dobijeni su oblici deformacija segmentnog zatvarača srednjeg polja ustave "Tomaševac" za prva dva tona. Rezultati istraživanja ukazuju da je najverovatniji uzrok pojave vibracija dejstvo hidrostatičkog pritiska na telo segmentnog zatvarača sa uzvodne strane, a ne udar vodenog mlaza i turbulencija prilikom isticanja.

Ključne reči: Ustava, segmentni zatvarač, vibracije, dijagnostika stanja

1. OPIS OBJEKTA I PROBLEMA

Ustave "Novi Bečej", "Stajićevo" i "Tomaševac" pripadaju grupi najvažnijih hidrotehničkih objekata koji su izgrađeni na kanalima Hidrosistemu Dunav – Tisa – Dunav. Sva tri objekta se svrstavaju u kategoriju "velikih ustava" i poseduju segmentne zatvarače širine 24,5 metara. Putem njih se diriguje vodnim režimom na području severnog i srednjeg Banata. Pad segmentnih zatvarača na ovim ustavama (naročito pri nailasku velikih voda) može izazvati katastrofalne prodore vode u branjeni deo srednjeg i južnog Banata. Osnovni problem uočen tokom njihove eksploatacije jeste pojava vibracija segmentnih zatvarača na ustavama "Stajićevo" i "Tomaševac". U cilju sticanja saznanja o uzrocima nastanka ove pojave na reprezentativnom objektu ustave

"Tomaševac" sprovedeno je merenje intenziteta vibracija.

Osnovni zadatak ustave "Tomaševac" (koja se nalazi na kilometru 80+900 reke Tamiš uzvodno od sela Tomaševac) je omogućavanje prelaza Magistralnog kanala Hidrosistema Dunav – Tisa – Dunav preko reke Tamiš kod sela Botoš ukrštanjem u nivou. Kroz ustavu se propuštaju i velike vode reke Tamiš u pravcu Pančeva. Veći deo ovih voda propušta se kroz 330 metara široku inundaciju koja se nalazi sa desne strane ustave Tomaševac dok se manji deo prepušta preko same ustave. Ustava i inundacija su razdvojene nasipom dužine 150 metara.

Konstruktivni elementi ustave "Tomaševac" (fotografija 1) su:

1. Telo ustave sa tri protočna polja.
2. Drumski most postavljen na nizvodnoj strani sa osloncima na stubovima prelivnih polja.
3. Krilni zidovi i platoi.
4. Uzvodna protivfiltraciona zaštita koja se sastoji od čelične "Larsen" dijafragme, betonskih ploča i glinenog čepa.
5. Nizvodna protivfiltraciona zaštita slapišta koja se sastoji od betonskih ploča položenih preko filterskog sloja, nizvodne antierozione grede i nizvodne čelične "Larsen" dijafragme.
6. Tri segmentna zatvarača u prelivnim poljima. Segmentni zatvarač raspona 24,5 metara montiran je na srednjem prelivnom polju dok su segmentnih zatvarači raspona 12 metara montirani na bočnim prelivnim poljima.
7. Pogonski uređaji za manipulaciju zatvaračima.

U konstruktivnom smislu ustava se sastoji od tri armiranobetonska bloka međusobno povezanih dilatacionim spojnica. Svi blokovi imaju istu dužinu (dimenzija paralelna sa pravcem toka) od 21,6 metara i istu visinu od 12,8 metara. Krajnji blokovi imaju širinu (dimenzija upravna na pravac toka) od 17,5 metara, dok je središnji blok širine 28,0 metara. Svaki blok se sastoji od horizontalne armiranobetonske ploče i dva bočna armiranobetonska zida.

Najmanja debljina horizontalne armiranobetonske ploče na njenom srednjem delu iznosi 1,5 metara. Na nizvodnoj strani formirano je nadvišenje duž koga debljina ploče iznosi 3,8 metara. Na uzvodnoj strani formiran je prag ustave i na tom delu debljina horizontalne ploče iznosi 5,8 metara. U pragu su ostavljene kasete podužnog preseka (preseka u pravcu toka) od 3,3 x 4,0 metara. U toku građenja ove kasete su napunjene peskom. Prag ustave se nalazi na koti 71,00 m.n.m.



Fotografija 1: Ustava "Tomaševac" – pogled sa nizvodne strane

Zidovi armiranobetonskih blokova formiraju stubove koji prihvataju opterećenje od segmentnih zatvarača. Stubovi ujedno predstavljaju i oslonce za konstrukciju drumskog mosta. Svaki od srednjih stubova (2 komada) se sastoji od po dva vertikalna armiranobetonska zida međusobno povezana dilatacionom spojnicom. Minimalna debljina ovih vertikalnih zidova iznosi 1,15 metara. Bočni – obalni stubovi (2 komada) su formirani od po jednog vertikalnog zida minimalne debljine 1,0 metara. Na stubovima su postavljene pogonske zgrade u kojima su smešteni uređaji za podizanje i spuštanje zatvarača.

Zaustavni (uzvodni) lim segmentnih zatvarača ima radijus od 10,0 metara. Razmak između zaustavnog lima i praga ustave kroz koji prolazi vodeni mlaz iznosi 0,143 metara. Na nizvodnom limu predviđena su tri reda otvora za ulazak vode u unutrašnjost segmentnog zatvarača. Ulaskom vode u unutrašnjost segmentnog zatvarača njegova konstrukcija dobija dovoljnu težinu za savladavanje uzgona vode prilikom spuštanja. Prvi red otvora (računato od praga ustave) obezbeđuje ispiranje mulja koji se taloži u telu segmentnog zatvarača.

"Ruke" segmentnog zatvarača su kutijastog poprečnog preseka. Upuštene su u beton tako da ne smanjuju svetli otvor pri kretanju segmentnog zatvarača. Svaka "ruka" segmentnog zatvarača je osovinom povezana sa pripadajućim ležištem. "Galovi" lanci su jednim krajem preko priključka za lance povezani sa telom segmentnog zatvarača dok su drugim krajem povezani sa postoljem mehanizma za podizanje i spuštanje. Podizanje bilo kog od tri segmentna zatvarača vrši se elektromotorima postavljenim iznad oba njegova kraja.

Segmentni zatvarač srednjeg polja ustave "Tomaševac" se zbog pojave vibracija u normalnim režimima vodostaja stalno drži na koti 76,00 m.n.m. Pri ovom položaju segmentnog zatvarača proticaj kroz srednje

polje ustave "Tomaševac" je jednak nuli. Regulacija proticaja se obavlja podizanjem i spuštanjem segmentnih zatvarača na bočnim prelivnim poljima. Pri nailasku poplavnih talasa segmentni zatvarač srednjeg polja se spušta na dno ustave gde ostaje sve do normalizacije vodostaja. Pojava vibracija je praćena udarima "galovih" lanaca o bočne srednje stubove, podrtavanjem mostića i kućica na stubovima, pomeranjima "ruku" segmentnog zatvarača, pomeranjima tela segmentnog zatvarača i pojavom velikih talasa visine i do 1 metra koji se rasprostiru i do 70 metara uzvodno od srednjeg polja. Položaji segmentnog zatvarača pri kojima su vibracije zabeležene dati su u tabeli 1.

Tabela 1: Zabeleženi položaji segmentnog zatvarača srednjeg polja ustave "Tomaševac" i kote gornje i donje vode u momentu pojave vibracija

Datum	Položaj segmenta (m.n.m.)	Kota gornje vode (m.n.m.)	Kota donje vode (m.n.m.)	Primedbe
<i>Pre remonta obavljenog 1998. – 2000. godine</i>				
nepoznat	74,50	73,50	71,46	Snažne vibracije i oscilacije segmentnog zatvarača, savijanje segmentnog zatvarača u pravcu ose polja, oscilatorno spuštanje i podizanje segmentnog zatvarača sa trzajima na lancima za dizanje, pojava talasa visine oko 70 cm.
nepoznat	Segment vibrira u svim položajima od kote 74,35 do kote 74,90	74,06	71,20	
nepoznat	Segment vibrira u svim položajima od kote 74,60 do kote 74,90	74,10	72,80	
nepoznat	Segment vibrira u svim položajima od kote 74,60 do kote 74,70	74,02	71,36	
<i>Nakon remonta obavljenog 1998. – 2000. godine</i>				
05.12.2000.	74,05	74,06	71,90	
07.12.2000.	74,25	74,09	71,89	
27.07.2001.	74,10	74,20	72,56	Do pojave vibracija je došlo tek nakon 5 minuta mirovanja zatvarača na koti 74,10 m.n.m.

2. PROGRAM ISTRAŽIVANJA

Merenja intenziteta vibracija segmentnog zatvarača srednjeg polja ustave "Tomaševac" su bila podeljena u dve celine:

1. Probno merenje sa ciljem upoznavanja objekta, utvrđivanja karakterističnih nivoa vibracija i izbora adekvantne opreme za osnovno merenje.
2. Osnovno merenje.

Program eksperimentalne analize vibracija tokom osnovnog merenja je obuhvatio:

1. Merenje nivoa vibracija konstrukcije segmentnog zatvarača srednjeg polja u uslovima bliskim onima pri kojima su se vibracije pojavljivale.
2. Ispitivanje konstrukcije segmentnog zatvarača:
 - a) Merenjem efektivnih vrednosti vibracionih parametara.

- b) Korišćenjem vremenske analize vibracionih parametara.
- c) Korišćenjem frekventne analize vibracionih parametara.
- d) Korišćenjem fazne analize vibracionih parametara.

Probno i osnovno merenje je obavila ekipa Laboratorije za eksperimentalnu modalnu analizu, analizu signala i balansiranje Vojnotehničkog instituta iz Beograda.

Probno ispitivanje je obavljeno dana 04.08.2005. godine u intervalu od 10 časova i 15 minuta do 14 časova i 30 minuta. U trenutku započinjanja probnog ispitivanja kota gornje vode je iznosila 74,27 m.n.m., a kota donje vode 72,48 m.n.m. Srednji segmentni zatvarač se nalazio na koti 76,00 m.n.m. dok su se oba bočna segmentna zatvarača nalazila na koti 73,60 m.n.m. Segmentni zatvarač je postepeno spuštan sa kote 76,00 m.n.m. na kotu 73,80 m.n.m. Tokom probnog ispitivanja nije došlo do pojave vibracija.

Na bazi analiza kaskadnih dijagrama snimljenih tokom probnog merenja usvojene su i ispoštovane sledeće preporuke za obavljanje osnovnog merenja:

1. Osnovno merenje je potrebno obaviti pri denivelaciji gornje i donje vode koja je veća od 2 metara.
2. Osnovno merenje je potrebno obaviti pri niskom nivou donje vode.
3. Potrebno je obezbediti zaštitu akcelerometara od uticaja vode i direktnog udara vodenog mlaza.
4. Na "rukama" segmentnog zatvarača dovoljno je meriti ubrzanja samo u pravcu osa y i z.
5. Na telu segmentnog zatvarača je dovoljno registrovati ubrzanja u pravcu osa x i z.
6. Segmentni zatvarač se može tretirati kao simetrična konstrukcija sa vertikalnom osom simetrije postavljenom na polovini njegove dužine (na sredini raspona između leve i desne "ruke").

Pre započinjanja osnovnog merenja u mašinskoj radionici Laboratorije za eksperimentalnu modalnu analizu, analizu signala i balansiranje Vojnotehničkog instituta su urađena posebna vodonepropusna kućišta za smeštaj akcelerometara (fotografija 2).

3. MERENJE NA OBJEKTU

Osnovno ispitivanje nivoa vibracija segmentnog zatvarača srednjeg polja ustave "Tomaševac" je obavljeno dana 14.10.2005. godine u intervalu od 9 časova i 15 minuta do 15 časova i 30 minuta. U trenutku započinjanja osnovnog ispitivanja kota gornje vode je iznosila 74,37 m.n.m., a kota donje vode 72,07 m.n.m. Pre započinjanja osnovnog ispitivanja srednji segmentni zatvarač se nalazio na koti 76,00 m.n.m.

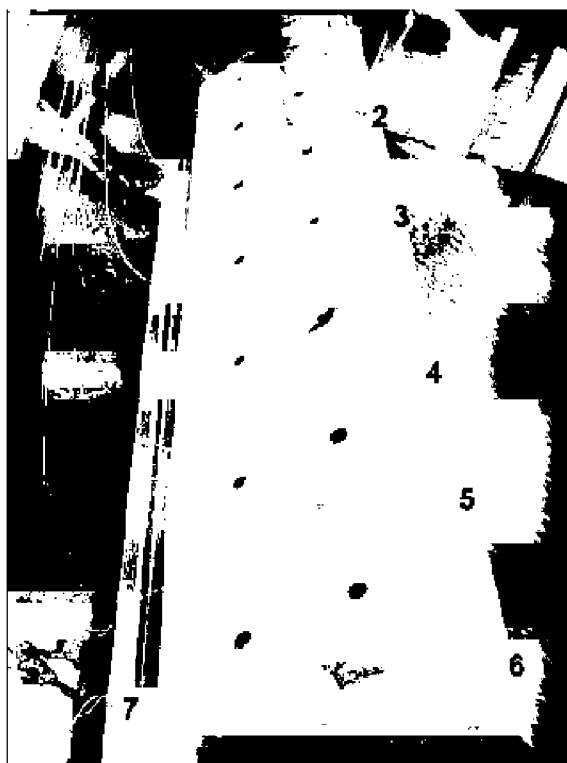


Fotografija 2: Kućište za smeštaj akcelerometara

Prilikom osnovnog ispitivanja je korišćena oprema Laboratorije za eksperimentalnu modalnu analizu, analizu signala i balansiranje Vojnotehničkog instituta u Beogradu koja se sastojala od:

1. Osam akcelerometara B&K DeltaTron 4507B001 (SN 2308544, 2308545, 2308546, 2308553, 2308554, 2308555, 2308563, 2308566).
2. Četiri akcelerometara B&K DeltaTron 4507B002 (SN 10131, 10132, 10133 i 10134).

3. Jednog analizatora dinamičkih signala B&K PULSE 3560D sa dva šestokanalna ulazna modula B&K 3032.
4. Računarske opreme za arhiviranje i grafičko praćenje rezultata merenja.



Fotografija 3: Raspored mernih mesta [10]

Navedenih 12 akcelometara su bili raspoređeni na sedam mernih mesta i smešteni u odgovarajuća kućišta. Raspored mernih mesta i orijentacija akcelometara dati su u tabeli 2. Kućište za smeštaj akcelometara se sastojalo od:

1. Metalne "čaje" sa odgovarajućim brojem nosača za akcelometre (jedan ili dva).
2. Poklopca kućišta.
3. Gumenog creva dužine 2 metara za zaštitu električnog kabela.

Sva kućišta ("čaje" i poklopci) su bila urađena od aluminijuma. Hermetičko zaptivanje "čaje" kućišta i poklopca ostvareno je korišćenjem zaptivača i šest vijaka. Montaža akcelometara i kablova i hermetičko zatvaranje kućišta je obavljeno u radionici

Vojnotehničkog instituta u Beogradu. Na objekat ustave su donešena pripremljena kućišta. Gumena creva su sa poklopcem kućišta bila povezana na načina koji je onemogućavao prodor vode u kućište. Dužina gumenog creva od 2 metara je procenjena kao dovoljna da spreči prodor vode prilikom uranjanja kućišta u vodu. Za poklopce svih kućišta bili su privezani kanapi pomoću kojih su kućišta sa drumskog mosta bila ručno spuštana do odgovarajućih mernih mesta.

U cilju kontrole vodonepropustljivosti sva kućišta su u laboratoriji Vojnotehničkog instituta potapana u posudu sa vodom.

Pre postavljanja kućišta sva merna mesta su bila očišćena od prljavštine. Pričvršćivanje kućišta za podlogu se vršilo pomoću specijalnog vodootpornog lepka. Spoj kućišta sa limom podloge je po dodirnim ivicama dodatno obezbeđen nanošenjem sloja plastike po dodirnoj ivici "čaje" kućišta.

Za potrebe osnovnog ispitivanja odabrana su dva FFT analizatora:

1. FFT analizator do 25 Hz.

Za opseg merenja do 25 Hz je odabrano 400 linija sa dužinom trajanja svakog snimka od 16 sekundi odnosno rezolucijom od 0,0625 Hz ($df = 0,0625$ Hz). Učestalost uzorkovanja je iznosila 64 Hz ($dt = 15,625$ ms) odnosno svaki snimak je imao 1024 uzorka. Korišćeno je linearno osrednjavanje 5 spektara signala koji su bili vremenski smaknuti za interval od 2 sekunde tako da je ukupno vreme snimanja iznosilo 24 sekunde.

2. FFT analizator do 100 Hz.

Za opseg merenja do 100 Hz je odabrano 800 linija sa dužinom trajanja svakog snimka od 8 sekundi odnosno rezolucijom od 0,125 Hz ($df = 0,125$ Hz). Učestalost uzorkovanja je iznosila 256 Hz ($dt = 3,906$ ms) odnosno svaki snimak je imao 2048 uzoraka. Korišćeno je linearno osrednjavanje 15 spektara signala koji su bili vremenski smaknuti za interval od 1 sekunde tako da je ukupno vreme snimanja iznosilo 22 sekunde.

Spektri signala na oba analizatora su prikazani na kaskadnim dijagramima koji sadrže po pet kaskada.

Tok merenja nivoa vibracija je prikazan u tabeli 3. Po okončanju merenja konstatovano je:

1. Da nijedno od sedam kućišta postavljenih na segmentnom zatvaraču nije došlo u kontakt sa vodom.
2. Da nije došlo do pojave isticanja vode ispod donje ivice segmentnog zatvarača niti preliivanja preko kote krune preliiva.

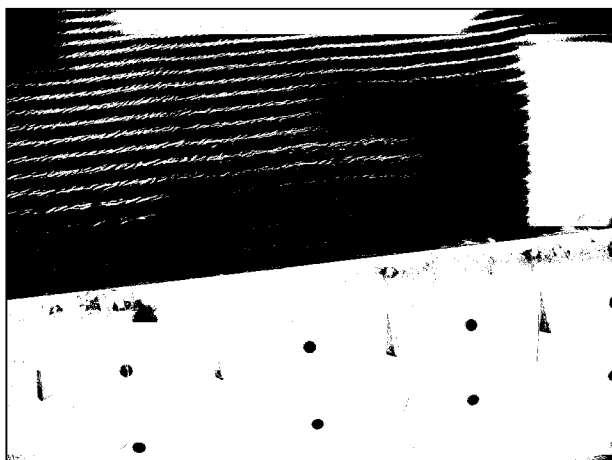
Raspored mernih mesta prikazan je na fotografiji 3. Na fotografijama 4, 5 i 6 prikazani su najkarakterističniji primeri formiranja talasa i njihovog rasprostiranja.

Tabela 2: Prikaz mernih mesta u toku osnovnog merenja vibracija segmentnog zatvarača srednjeg polja ustave "Tomaševac"

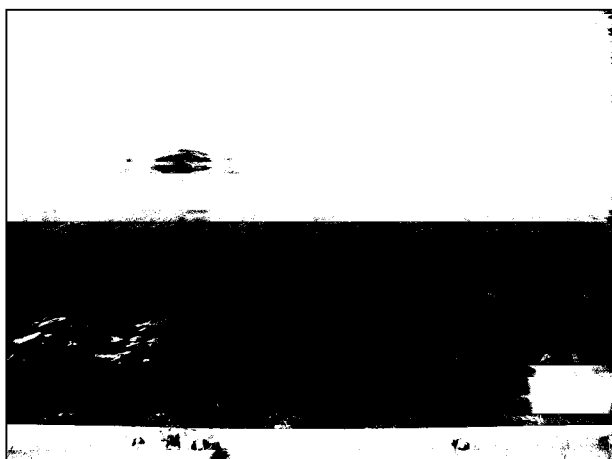
Merno mesto broj	Oznaka signala	Opis mernog mesta
1	<i>DR - y</i>	<i>DR</i> – desna "ruka". Na podužnoj osi gornjeg čeličnog nosača koji formira desnu "ruku" na odstojanju od 5,10 metara od ose rotacije koja povezuje osovine levog i desnog oslonca segmentnog zatvarača.
	<i>DR - z</i>	
2	<i>ZH - 045 - x</i>	<i>ZH</i> – zatvarač, hrbat. Iznad drugog razbijača vodenog mlaza (računato od desnog kraja tela segmentnog zatvarača). b = 4,5 metara.
3	<i>ZH - 075 - x</i>	<i>ZH</i> – zatvarač, hrbat. Na sredini rastojanja između trećeg i četvrtog razbijača vodenog mlaza odnosno iznad četvrtog otvora (računato od desnog kraja tela segmentnog zatvarača – veličina b). b = 7,5 metara.
	<i>ZH - 075 - z</i>	
4	<i>ZH - 105 - x</i>	<i>ZH</i> – zatvarač, hrbat. Iznad petog razbijača vodenog mlaza (računato od desnog kraja tela segmentnog zatvarača). b = 10,5 metara.
	<i>ZH - 105 - z</i>	
5	<i>ZH - 125 - x</i>	<i>ZH</i> – zatvarač, hrbat. Iznad šestog razbijača vodenog mlaza (računato od desnog kraja tela segmentnog zatvarača). b = 12,5 metara.
	<i>ZH - 125 - z</i>	
6	<i>ZH - 145 - x</i>	<i>ZH</i> – zatvarač, hrbat. Iznad sedmog razbijača vodenog mlaza (računato od desnog kraja tela segmentnog zatvarača). b = 14,5 metara.
	<i>ZH - 145 - z</i>	
7	<i>ZI - 125 - x</i>	<i>ZI</i> – zatvarač, ispod. Ispod šestog razbijača vodenog mlaza odnosno ispod mernog mesta broj 5 na nizvodnoj oplati segmentnog zatvarača. Po visini kućište se nalazilo na odstojanju od 2,2 metara od donje ivice segmentnog zatvarača računato po tangenti. b = 12,5 metara.

Tabela 3: Vremenska šema i visinski položaji segmentnog zatvarača u toku glavnog ispitivanja nivoa vibracija segmentnog zatvarača srednjeg polja ustave "Tomaševac"

Redni broj merenja	Vreme započinjanja merenja (čas i minut)	Kota krune preliva (m.n.m.)	Primedba
0.	12:55	76,00	Snimljen prirodni šum
Započeto spuštanje segmentnog zatvarača sa kote 76,00 m.n.m. na kotu 74,30 m.n.m. U toku spuštavanja na koti 74,80 m.n.m. primećena pojava talasa na površini vode.			
1.	13:02	74,80	Segmentni zatvarač je odmah podignut sa kote 74,80 m.n.m. na kotu 75,20 m.n.m. Vibracije segmentnog zatvarača su prestale iznad kote 74,90 m.n.m.
Segmentni zatvarač je spušten sa kote 75,20 m.n.m. na kotu 75,00 m.n.m. Prilikom spuštavanja nije došlo do pojave vibracija.			
2.	13:07	75,00	Nema pojave talasa na površini vodenog ogledala.
3.	13:11	74,90	Pojava vibracija segmentnog zatvarača.
Segmentni zatvarač je nakon završetka snimanja na koti 74,90 m.n.m. vraćen na kotu 75,00 m.n.m. Nakon kraćih konsultacija segmentni zatvarač je spušten na kotu 74,95 m.n.m.			
4.	13:15	74,95	Nema pojave talasa na površini vodenog ogledala.
5.	13:18	74,94	Došlo je do pojave talasa na površini vodenog ogledala.
6.	13:22	74,93	Došlo je do pojave talasa na površini vodenog ogledala.
7.	13:25	74,89	Došlo je do pojave talasa na površini vodenog ogledala te je iz bezbednosnih razloga snimanje odmah prekinuto, a segmentni zatvarač podignut na kotu 74,96 m.n.m.
Pre započinjanja sledećeg kruga merenja segmentni zatvarač je sa kote 74,96 m.n.m. podignut na kotu 75,00 m.n.m.			
8.	13:28	75,00	Nema pojave talasa na površini vodenog ogledala.
9.	13:31	74,97	Nema pojave talasa na površini vodenog ogledala.
10.	13:34	74,94	
11.	13:38	74,925	
12.	13:41	74,901	<i>Stvarna visina zatvarača na ovom merenju je 74,90 m.n.m., ali mu je zbog softverskog razlikovanja sa merenjem broj 3 operator dodelio 1 mm visine više</i> Došlo je do pojave talasa na površini vodenog ogledala.
Nakon završetka snimanja segmentni zatvarač je podignut na kotu 75,00 m.n.m. Data je pauza u trajanju od pola sata u cilju podešavanja osetljivosti instrumenata. Nakon pauze snimanja su započeta na koti preliva segmentnog zatvarača od 75,00 m.n.m.			
13.	14:27	75,00	Nema pojave talasa na površini vodenog ogledala.
14.	14:29	74,985	Nema pojave talasa na površini vodenog ogledala.
15.	14:32	74,97	Nema pojave talasa na površini vodenog ogledala.
16.	14:36	74,96	
17.	14:39	74,94	
18.	14:42	74,94	Pri ovoj koti segmentnog zatvarača urađena su dva merenja.
19.	14:44	74,92	
Nakon obavljenog snimanja segmentni zatvarač je podignut na kotu 74,95 m.n.m.			
20.	14:50	74,95	
21.	14:52	74,938	
22.	14:55	74,926	Nakon obavljenog snimanja segmentni zatvarač je podignut na kotu 76,00 m.n.m. Merenja su okončana.



Fotografija 4: Merenje pod rednim brojem 3



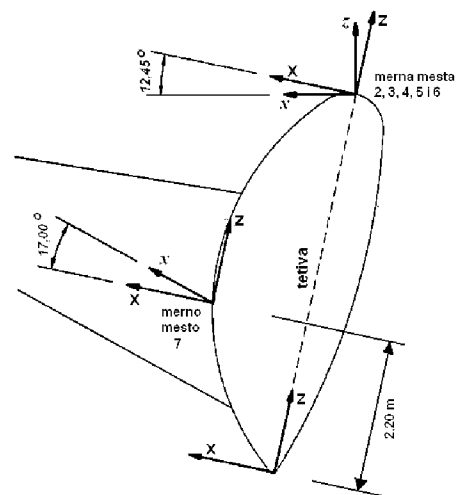
Fotografija 5: Merenje pod rednim brojem 12



Fotografija 6: Merenje pod rednim brojem 12

4. REZULTATI I NJIHOVA DISKUSIJA

Tokom merenja i pri analizi rezultata ispitivanja korišćeno je sedam lokalnih koordinatnih sistema vezanih za svako pojedinačno merno mesto i jedan glavni koordinatni sistem vezan za segmentni zatvarač kao celinu (slika 1).



Slika 1: Lokalni i glavni koordinatni sistem

Koordinatni početak glavnog koordinatnog sistema se tokom osnovnog ispitivanja nalazio na donjoj ivici noža segmentnog zatvarača na njegovom desnom kraju. Osa **Z** glavnog koordinatnog sistema je bila postavljena u pravcu tetive segmentnog zatvarača i usmerena na gore, osa **X** u pravcu normalnom na tetivu segmentnog zatvarača sa smerom nizvodno, a osa **Y** paralelno osi rotacije segmentnog zatvarača sa smerom od njegove leve ka desnoj "ruci".

Prilikom postavljanja akcelometara na odgovarajuća merna mesta nije bilo moguće obezbediti paralelnost mernih osa akcelometara i odgovarajućih koordinatnih osa glavnog koordinatnog sistema. Zbog toga je pri analizi rezultata merenja bilo potrebno preračunavati vrednosti izmerene u lokalnom koordinatnom sistemu na odgovarajuće vrednosti u glavnom koordinatnom sistemu. Ovo pravilo važi za sva merna mesta osim za merno mesto broj 1 kod koga je prilikom postavljanja kućišta bila obezbeđena paralelnost svih koordinatnih osa glavnog i lokalnog koordinatnog sistema. Ose **y** svih lokalnih koordinatnih sistema su bile paralelne osi **Y** glavnog koordinatnog sistema i jednako orijentisane.

Kućišta na mernim mestima 2, 3, 4, 5 i 6 su prilikom lepljenja na svoja merna mesta postavljena tako da stoje vertikalno. Time je i z osa lokalnih koordinatnih sistema na ovim mernim mestima postavljena vertikalno sa smerom prema gore. Kako se u tom trenutku segmentni zatvarač nalazio na koti 76,00 m.n.m. iz geometrije nosača je bilo moguće izračunati da se njegova tetiva nalazila pod uglom od 12,45° u odnosu na vertikalu. Pošto je z osa glavnog koordinatnog sistema bila postavljena u pravcu tetive segmentnog zatvarača, a ose z lokalnih koordinatnih sistema na mernim mestima 2, 3, 4, 5 i 6 vertikalno to znači da je i između njih postojao ugao od 12,45°. Na ovim mernim mestima isti ugao je postojao i između x ose glavnog koordinatnog sistema i x osa lokalnih koordinatnih sistema.

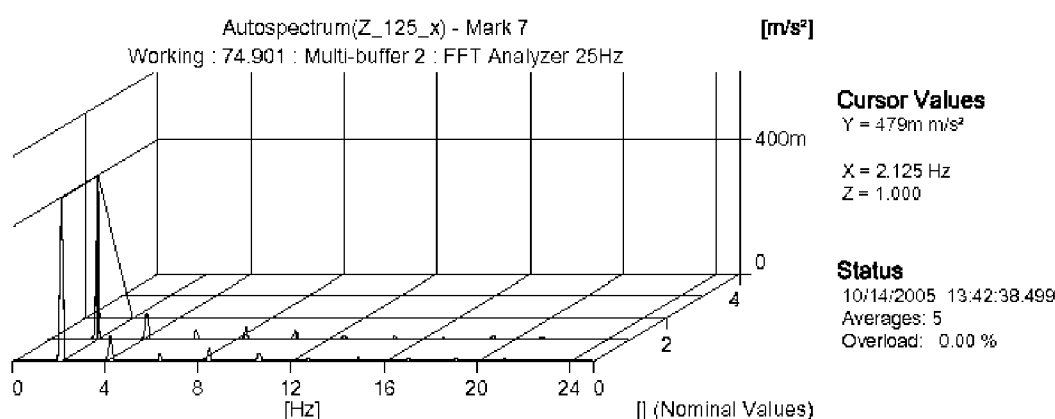
Kućište na mernom mestu broj 7 je bilo postavljeno na nizvodnoj oplati segmentnog zatvarača. Prema prvobitnom planu ispitivanja bilo je predviđeno da se ovo kućište postavi 1,0 metar iznad donje ivice (noža) segmentnog zatvarača mereno u pravcu njegove tetive. Da bi se u ovom položaju merna osa akcelerometra (x osa lokalnog koordinatnog sistema za ovo merno mesto) poklopila sa smerom tečenja vode u radionici Vojnotehničkog instituta je ovaj akcelerometar postavljen pod uglom od 23° u odnosu na dno kućišta. Na samom objektu je pre početka merenja gotovo kućište postavljeno 1,2 metara više (mereno po tetive segmentnog zatvarača) od planiranog položaja. U ovakvom položaju ugao x ose lokalnog koordinatnog sistema i X ose glavnog koordinatnog sistema je iznosio 17,00°.

Na mernim mestima 2, 3, 4, 5 i 6 akcelerometri koji su merili u pravcima osa x lokalnih koordinatnih sistema su u svoja kućišta bili montirani sa orijentacijom u negativnom smeru (uzvodno, a ne nizvodno). Na mernim mestima broj 2 i 7 ubrzanja su merena samo u pravcima x osa njihovih lokalnih koordinatnih sistema. Na mernom mestu broj 1 ubrzanja su merena u pravcima osa x i y, a na mernim mestima 3, 4, 5 i 6 u pravcima osa x i z lokalnih koordinatnih sistema.

Na objektu je obavljeno ukupno 22 merenja. Od ovih 22 merenja za dalju analizu je odabrano 14. Izostavljena su merenja pod rednim brojem 2, 4, 8, 9, 13, 14 i 15 kod kojih su zabeležene vrednosti ubrzanja bile veoma male. Merenje pod rednim brojem 7 je takođe izostavljeno pošto je prekinuto iz bezbednosnih razloga zbog pojave velikih talasa na površini vodenog ogledala. Na kaskadnim dijagramima i autospektrima signali ubrzanja su opisani efektivnim vrednostima, a signali brzina vršnim vrednostima.

Za analizu efektivnih vrednosti vibracionih parametara odabran je signal **ZH – 125 – x** snimljen na mernom mestu broj 5 (na sredini hrbata segmentnog zatvarača u pravcu ose x lokalnog koordinatnog sistema). Maksimalne efektivne vrednosti ubrzanja su se javile u dva slučaja:

1. Pri merenju broj 12 (479,4 mm/sec² pri frekvenciji od 2,125 Hz – slika 2).
2. Pri merenju broj 22 (288,9 mm/sec² pri frekvenciji od 2,125 Hz).



Slika 2: Snimak signala **ZH – 125 – x – druga kaskada** dobijen tokom merenja označenog rednim brojem 12 (kota krune preliva segmentnog zatvarača 74,90(1) m.n.m.), analizator do 25 Hz

Za frekventnu analizu vibracionih parametara odabrana su merenja pod rednim brojevima 1, 3, 12 i 22. Za odabrana četiri merenja izvršena je vremenska analiza signala ubrzanja $ZH - 125 - x$ za opseg merenja do 100 Hz. Izbor merenja je obavljen na bazi dva kriterijuma:

1. Tokom sva četiri odabrana merenja došlo je do pojave veoma visokih talasa i na uzvodnoj i na nizvodnoj površini vodenog ogleдалa.
2. U sva četiri slučaja segmentni zatvarač se za odgovarajuće cikluse merenja nalazio u najnižem položaju.

Tokom merenja pod rednim brojem 1 (kota krune preliva segmentnog zatvarača 74,80 m.n.m.) i rednim broje 3 (kota krune preliva segmentnog zatvarača 74,90 m.n.m.) snimljena je samo po jedna kaskada. Prilikom izvođenju ovih merenja došlo je do nagle pojave veoma visokih talasa na uzvodnoj površini vodenog ogleдалa te se iz bezbednosnih razloga odmah pristupilo podizanju segmentnog zatvarača. Ova činjenica je ograničila vremenski period neophodan za snimanje svih pet kaskada. Kako je zatvarač već bio u fazi podizanja početak merenja u oba slučaja ne odgovara vremenu pojave najvećih vibracija. Na prikazanim snimcima vibracije (zbog podizanja segmentnog zatvarača) opadaju u vremenu. Tokom obavljanja merenja označenih rednim brojevima 12 i 22 nije dolazilo do promene položaja segmentnog zatvarača te je u oba slučaja snimljena pojava ustaljenih vibracija.

Najveći raspon vršnih vrednosti pojavio se tokom merenja pod rednim brojem 12 i iznosio je $1,668 \text{ m/sec}^2$. Kako su tokom ovog merenja i merenja pod rednim brojem 22 snimljene ustaljene vibracije ova dva merenja su odabrana za dalju analizu vibracionih parametara.

Vršne vrednosti ubrzanja, brzine i pomeranja za merenje pod rednim brojem 12 na mernom mestu broj 5 za signal $ZH - 125 - x$ iznose:

Vršna vrednost ubrzanja (a):	0,6780 m / sec ²
Vršna vrednost brzine (v):	0,0508 m / sec
Vršna vrednost pomeranja (d):	0,0038 m

Vršne vrednosti ubrzanja, brzine i pomeranja za merenje pod rednim brojem 22 na mernom mestu broj 5 za signal $ZH - 125 - x$ iznose:

Vršna vrednost ubrzanja (a):	0,4070 m / sec ²
Vršna vrednost brzine (v):	0,0305 m / sec
Vršna vrednost pomeranja (d):	0,00228 m

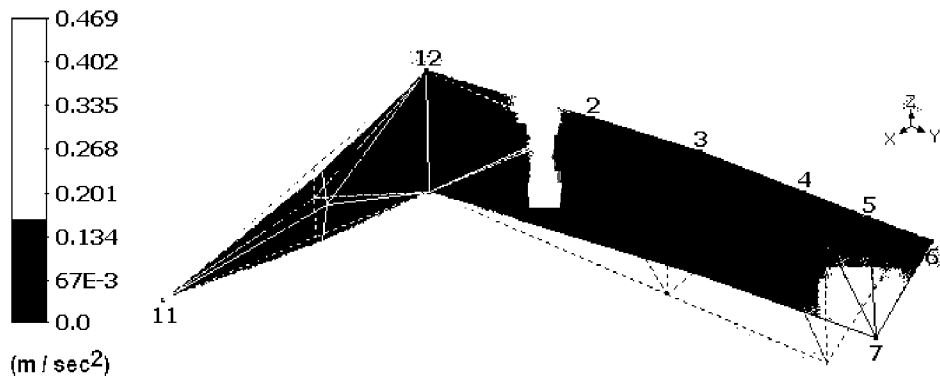
Za vremensku analizu vibracionih parametara odabrana su merenja pod rednim brojevima 12 i 22. Snimljeni signali ubrzanja su vremenski integraljeni i dobijeni su vremenski zapisi brzina koji su zatim ponovo integraljeni u cilju dobijanja vremenskih zapisa pomeranja.

Za faznu analizu vibracionih parametara odabrano je merenje pod rednim brojem 22. Na snimcima signala ubrzanja dobijenih tokom merenja pod rednim brojevima 22 uočljiva je pojava najizraženijeg signala na frekvenciji od 2,125 Hz. Za faznu analizu vibracionih parametara je usvojena pretpostavka da je frekvencija od 2,125 Hz prva sopstvena frekvencija oscilovanja segmentnog zatvarača. Za drugu sopstvenu frekvenciju oscilovanja po istoj metodologiji usvojena je sledeća uočljiva frekvencija od 4,1875 Hz.

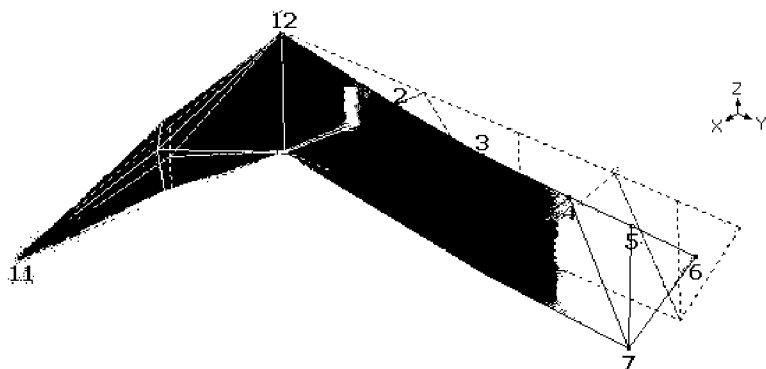
Oblici deformacije segmentnog zatvarača za ove dve frekvencije su dobijeni korišćenjem matematičkog modela nosača čija je skica za frekvenciju od 2,125 Hz prikazana isprekidanom linijom na slikama 3 i 4, a za frekvenciju od 4,1875 Hz isprekidanom linijom na slikama 5 i 6. Matematički model segmentnog zatvarača na slikama 3 i 4 je dobijen korišćenjem trouglastih elemenata čija su temena (čvorovi) merne tačke 1, 2, 3, 4, 5, 6 i 7 i pomoćne tačke 11, 12 i 13. Pri formiranju matematičkog modela je vođeno računa da se stranica trougla 5 – 7 poklopi sa vertikalnom osom simetrije segmentnog zatvarača. Pomoćna tačka 11 predstavlja ležište konstrukcije segmentnog zatvarača. Pomoćne tačke 12 i 13 kao i tri preostale neobeležene tačke dopunjuju matematičku predstavu modela i uvedene su u cilju preglednijeg predstavljanja načina na koji se konstrukcija segmentnog nosača deformiše. Matematički model segmentnog zatvarača prikazan na slikama 5 i 6 predstavlja uprošćeniju verziju matematičkog modela prikazanog na slikama 3 i 4.

Prostorni prikaz deformacije segmentnog zatvarača srednjeg polja ustave "Tomaševac" pri frekvenciji od 2,125 Hz (savijanje) dat je na slikama 3 i 4. Vrednosti ubrzanja, brzine i pomeranja izražene u lokalnim koordinatnim sistemima date su u tabeli 4, a vrednosti ubrzanja, brzine i pomeranja izražene u glavnom koordinatnom sistemu u tabeli 5.

Prostorni prikaz deformacije segmentnog zatvarača pri frekvenciji od 4,1875 Hz (torzija) dat je na slikama 5 i 6. Izmerene vrednosti ubrzanja za sva merna mesta i sve signale u lokalnim i glavnom koordinatnom sistemu date su u tabelama 6. i 7.



Slika 3: Deformacija segmentnog zatvarača pri frekvenciji od 2,125 Hz – krajnji uzvodni položaj [10]



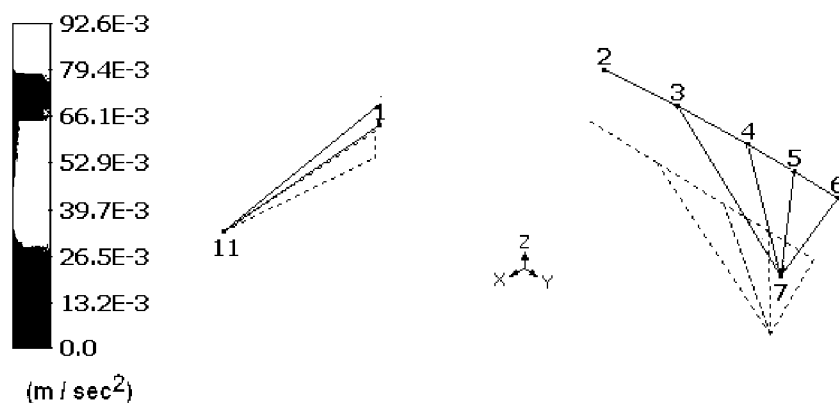
Slika 4: Deformacija segmentnog zatvarača pri frekvenciji od 2,125 Hz – krajnji nizvodni položaj [10]

Tabela 4: Vrednosti ubrzanja, brzine i pomeranja za merenje pod rednim brojem 22 dobijene pri frekvenciji od 2,125 Hz (izražene u lokalnim koordinatnim sistemima) [10]

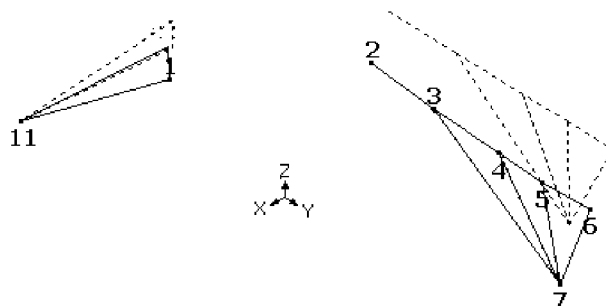
Merno mesto broj	Signal	Vrednosti izmerene u lokalnim koordinatnim sistemima		
		Ubrzanje	Brzina	Pomeranje
		(mm/sec ²)	(mm/sec)	(mm)
1	<i>DR - y</i>	100,95	7,56	0,57
	<i>DR - z</i>	14,93	1,12	0,08
2	<i>ZH - 045 - x</i>	218,44	16,36	1,23
3	<i>ZH - 075 - x</i>	331,76	24,85	1,86
	<i>ZH - 075 - z</i>	64,79	4,85	0,36
4	<i>ZH - 105 - x</i>	398,06	29,81	2,23
	<i>ZH - 105 - z</i>	104,67	7,84	0,59
5	<i>ZH - 125 - x</i>	407,48	30,52	2,29
	<i>ZH - 125 - z</i>	95,59	7,16	0,54
6	<i>ZH - 145 - x</i>	406,37	30,44	2,28
	<i>ZH - 145 - z</i>	73,54	5,51	0,41
7	<i>ZI - 125 - x</i>	454,42	34,03	2,55

Tabela 5: Vrednosti ubrzanja, brzine i pomeranja za merenje pod rednim brojem 22 dobijene pri frekvenciji od 2,125 Hz (preračunate na glavni koordinatni sistem) [10]

Merno mesto broj	Signal	Vrednosti preračunate na glavni koordinatni sistem		
		Ubrzanje	Brzina	Pomeranje
		(mm/sec ²)	(mm/sec)	(mm)
1	<i>DR - y</i>	100,95	7,56	0,57
	<i>DR - z</i>	14,93	1,12	0,08
2	<i>ZH - 045 - x</i>	223,00	16,70	1,25
3	<i>ZH - 075 - x</i>	338,00	25,31	1,90
	<i>ZH - 075 - z</i>	8,26	0,62	0,05
4	<i>ZH - 105 - x</i>	411,00	30,78	2,31
	<i>ZH - 105 - z</i>	16,40	1,23	0,09
5	<i>ZH - 125 - x</i>	419,00	31,38	2,35
	<i>ZH - 125 - z</i>	5,49	0,41	0,03
6	<i>ZH - 145 - x</i>	413,00	30,93	2,32
	<i>ZH - 145 - z</i>	15,80	1,18	0,09
7	<i>ZI - 125 - x</i>	469,00	35,13	2,63



Slika 5: Deformacija segmentnog zatvarača pri frekvenciji od 4,1875 Hz – krajnji uzvodni položaj [10]



Slika 6: Deformacija segmentnog zatvarača pri frekvenciji od 4,1875 Hz – krajnji nizvodni položaj [10]

Tabela 6: Vrednosti ubrzanja, brzine i pomeranja za merenje pod rednim brojem 22 dobijene pri frekvenciji od 4,1875 Hz (izražene u lokalnim koordinatnim sistemima) [10]

Merno mesto broj	Signal	Vrednosti izmerene u lokalnim koordinatnim sistemima		
		Ubrzanje	Brzina	Pomeranje
		(mm/sec ²)	(mm/sec)	(mm)
1	<i>DR - y</i>	8,89	0,34	0,01
	<i>DR - z</i>	55,40	2,11	0,08
2	<i>ZH - 045 - x</i>	43,50	1,65	0,06
3	<i>ZH - 075 - x</i>	53,50	2,03	0,08
	<i>ZH - 075 - z</i>	66,60	2,53	0,10
4	<i>ZH - 105 - x</i>	61,10	2,32	0,09
	<i>ZH - 105 - z</i>	66,50	2,53	0,10
5	<i>ZH - 125 - x</i>	63,30	2,41	0,09
	<i>ZH - 125 - z</i>	67,60	2,57	0,10
6	<i>ZH - 145 - x</i>	59,30	2,25	0,09
	<i>ZH - 145 - z</i>	70,00	2,66	0,10
7	<i>ZI - 125 - x</i>	8,53	0,32	0,01

Tabela 7: Vrednosti ubrzanja, brzine i pomeranja za merenje pod rednim brojem 22 dobijene pri frekvenciji od 4,1875 Hz (preračunate na glavni koordinatni sistem) [10]

Merno mesto broj	Signal	Vrednosti preračunate na glavni koordinatni sistem		
		Ubrzanje	Brzina	Pomeranje
		(mm/sec ²)	(mm/sec)	(mm)
1	<i>DR - y</i>	8,89	0,34	0,01
	<i>DR - z</i>	55,40	2,11	0,08
2	<i>ZH - 045 - x</i>	28,80	1,09	0,04
3	<i>ZH - 075 - x</i>	37,90	1,44	0,05
	<i>ZH - 075 - z</i>	76,60	2,91	0,11
4	<i>ZH - 105 - x</i>	45,30	1,72	0,07
	<i>ZH - 105 - z</i>	78,10	2,97	0,11
5	<i>ZH - 125 - x</i>	47,30	1,80	0,07
	<i>ZH - 125 - z</i>	79,60	3,03	0,11
6	<i>ZH - 145 - x</i>	42,80	1,63	0,06
	<i>ZH - 145 - z</i>	81,10	3,08	0,12
7	<i>ZI - 125 - x</i>	18,00	0,68	0,03

5. ZAVRŠNE NAPOMENE I ZAKLJUČCI

Prikazana merenja se direktno nadovezuju na merenja sprovedena na objektu ustave "Stajičevo" [4], [12], [13]. Upoređan prikaz rezultata merenja na ova dva objekta dat je u tabeli 8.

Oblik deformacije segmentnog zatvarača srednjeg polja ustave "Tomaševac" za drugi ton i oblik deformacije segmentnog zatvarača sa klapnom ustave "Stajičevo" za prvi ton su dosta slični. Razlika u obliku deformacija za prvi ton između ova dva zatvarača najverovatnije potiče iz činjenice da segmentni zatvarač ustave "Stajičevo" poseduje klapnu koja ga u dovoljnoj meri ukružuje da

spreči pojavu savijanja u podužnom pravcu (pogotovu u slučaju kada klapna leži na telu segmentnog zatvarača oslonjena na posebno oblikovana ležišta na njegovim "rukama"). Frekvencije oscilovanja za prva dva tona su kod oba zatvarača skoro identične.

Prva i druga sopstvena frekvencija segmentnog zatvarača ustave "Tomaševac" su dobijene usvajanjem pretpostavke da je izmerena frekvencija pobude identična sopstvenoj frekvenciji konstrukcije segmentnog zatvarača. Prva i druga sopstvena frekvencija segmentnog zatvarača ustave "Stajičevo" su dobijene korišćenjem matematičkog modela.

Tabela 8: Uporedni prikaz rezultata eksperimentalne dinamičke analize segmentnog zatvarača srednjeg polja ustave "Tomaševac" i segmentnog zatvarača sa klapnom ustave "Stajićevo"

Redni broj	Karakteristika koja se poredi	Segmentni zatvarač srednjeg polja ustave "Tomaševac"	Segmentni zatvarač sa klapnom ustave "Stajićevo"
1.	Širina svetlog otvora ustave:	24,5 metara	24,5 metara
2.	Konstrukcija zatvarača:	Segmentni zatvarač (sa tri stepena slobode pomeranja)	Segmentni zatvarač sa klapnom (sa tri stepena slobode pomeranja)
3.	Mehanizam za podizanje:	Galovi lanci	Galovi lanci
4.	Sopstvene frekvencije		
	Prva sopstvena frekvencija:	2,125 Hz	2,124 Hz
	Druga sopstvena frekvencija:	4,1875 Hz	4,128 Hz
5.	Deformisani oblik konstrukcije segmentnog zatvarača		
	Za prvi ton:	Savijanje	Torzija
	Za drugi ton:	Torzija	Torzija
6.	Denivelacije gornje i donje vode pri kojima je došlo do pojave vibracija segmentnih zatvarača	Od 2,30 do 2,36 metara tokom sprovođenja eksperimentalne dinamičke analize bez pojave isticanja i prelivanja odnosno 2,16 do 2,20 metara pri pojavi isticanja	1,12 metara tokom sprovođenja eksperimentalne dinamičke analize uz pojavu isticanja

Na bazi rezultata eksperimentalne dinamičke analize sprovedene na konstrukciji segmentnog zatvarača srednjeg polja ustave "Tomaševac" mogu se formulisati sledeći zaključci:

- Do pojave vibracije tokom probnog merenja nije došlo iz razloga postojanja male visinske denivelacije između gornje i donje vode (svega 1,79 metara) i visokog nivoa donje vode.
- Kako se segmentni zatvarač vodom puni sa nizvodne strane visok nivo donje vode povećava masu vode u segmentnom zatvaraču u dovoljnoj meri da sprečava pojavu opasnih vibracija. Pošto je donji deo konstrukcije segmentnog zatvarača zbog visokog nivoa donje vode bio duboko zaronjen u vodu pritisak vode na donju konstrukciju segmentnog zatvarača je prouzrokovao fluidno prigušenje.
- Do pojave vibracija prilikom izvođenja osnovnog merenja je došlo u uslovima postojanja velike visinske denivelacije između gornje i donje vode (2,30 do 2,36 metara) i niskog nivoa donje vode.
- Nizak nivo donje vode je doveo do smanjenja mase vode u konstrukciji segmentnog zatvarača u odnosu na probno merenje. Ujedno je doprineo smanjenju fluidnog prigušenja.
- Masa nataloženog mulja i granja u konstrukciji segmentnog zatvarača nije dovoljna da u uslovima postojanja velike denivelacije gornje i donje vode i niskog nivoa donje vode spreči pojavu opasnih vibracija.
- Do pojave opasnih vibracija dolazi u uslovima kada je kota donje vode dovoljno mala da obezbedi denivelaciju od 2,10 do 2,20 metara neophodnu za pojavu opasnih vibracija.
- Kao i kod ustave "Stajićevo" najniža sopstvena frekvencija konstrukcije segmentnog zatvarača (ujedno i najniža frekvencija pobudne sile pri kojoj dolazi do pojave opasnih vibracija) iznosi nešto više od 2 Hz.
- Druga sopstvena frekvencija za obe ustave iznosi nešto više od 4 Hz.

9. Pri najnižoj sopstvenoj frekvenciji konstrukcija segmentnog zatvarača srednjeg polja ustave "Tomaševac" je izložena deformaciji savijanja. Telo segmentnog zatvarača se savija u horizontalnoj ravni u pravcu toka, a "ruke" u horizontalnoj ravni upravno na pravac toka.

Kao uzrok pojave vibracija segmentnog zatvarača srednjeg polja u periodu do 1998. godine smatran je jak udar vodenog mlaza u horizontalnu zaptivnu gumu koji nastaje pri isticanju vode kroz otvor širine 143 mm i dužine 24,5 metara (prostor između zaustavnog lima segmentnog zatvarača i oblikovanog praga ustave). Prema tom mišljenju vibracije bi prestale u momentu kada se segmentni zatvarač spusti dovoljno nisko da mlaz vode nesmetano (bez udara u horizontalnu zaptivnu gumu) prolazi između zaustavnog lima i praga ustave.

U skladu sa takvim mišljenjem u toku remonta obavljenog 1998. – 2000. godine na segmentnom zatvaraču srednjeg polja u cilju zaštite od vibracija postavljen je horizontalni zaštitni lim visine 1250 mm po celoj dužini segmentnog zatvarača. Donji kraj horizontalnog zaštitnog lima je udaljen 1796 mm od krajnje donje ivice segmentnog zatvarača računato po kružnici zaustavnog lima. U momentu kada je horizontalni zaštitni lim postavljen u pragu ustave širina otvora za isticanje vode izosi svega 30 mm. Ovakva širina otvora je trebala da spreči jako isticanje odnosno smanji udar vodenog mlaza u horizontalnu zaptivnu gumu i time onemogući pojavu vibracija. Opisano rešenje nije dalo željene rezultate.

Kako tokom sprovođenja eksperimentalne dinamičke analize nije došlo do pojave isticanja ispod niti prelivanja preko tela konstrukcije segmentnog zatvarača pojavu opasnih vibracija je najverovatnije prouzrokovalo dejstvo hidrostatičkog pritiska na telo segmentnog zatvarača sa uzvodne strane. Segmentni zatvarač predstavlja elastičnu konstrukciju postavljenu na otvoru velikog raspona. Pri određenom visinskom položaju segmentnog zatvarača hidrostatički pritisak sa uzvodne strane može izazvati početno pomeranje tela konstrukcije u nizvodnom pravcu. Zbog niskog nivoa donje vode hidrostatički pritisak sa nizvodne strane konstrukcije segmentnog zatvarača nije dovoljno veliki da ovo pomeranje spreči. Nizvodnom pomeranju konstrukcije segmentnog zatvarača suprotstavlja se elastičnost njegove konstrukcije vraćajući segmentni zatvarač u početni položaj. Zbog inercije kretanje segmentni zatvarač se ne zadržava u ravnotežnom položaju već produžava svoje kretanje u uzvodnom

pravcu. Kretanju segmentnog zatvarača u uzvodnom pravcu ponovo se suprotstavljaju elastične sile konstrukcije segmentnog zatvarača i uzvodni hidrostatički pritisak vraćajući ga u ravnotežni položaj. Uzvodna hidrostatička sila i inercija kretanja produžavaju pomeranje segmentnog zatvarača u nizvodnom pravcu izazivajući ubrzanje konstrukcije segmentnog zatvarača i pojavu opasnih vibracija.

Predloženi model nastanka vibracija segmentnog zatvarača kao konstrukcije sa tri stepena slobode pomeranja blizak je modelu nastanka vibracija zatvarača sa dva stepena slobode koji je razvijen u Japanu [8]. Rezultati eksperimentalne dinamičke analize sprovedene na ustavi "Tomaševac" omogućavaju formiranje matematičkog modela na kome se mogu proučiti načini za ukrućenje konstrukcije segmentnog zatvarača.

ZAHVALNICA

Prijatna nam je dužnost da pomenemo visoki stepen stručnosti i ljubaznost ekipe *Laboratorije za eksperimentalnu modalnu analizu, analizu signala i balansiranje Vojnotehničkog instituta* iz Beograda u sastavu:

1. potpukovnik **Miodrag Marković**, dipl.maš.inž.
2. mr **Predrag Kovačević**, dipl.maš.inž.
3. **Jelena Dimitrijević**, dipl.maš.inž.

i zahvalimo im se za trud uloženi na realizaciji probnog i osnovnog merenja nivoa vibracija na segmentnom zatvaraču srednjeg polja ustave "Tomaševac".

LITERATURA

- [1] Bharagava, V.P., Narasimhan. S.: *Pressure Fluctuations on Gates*, Journal of Hydraulic Research, Vol. 27, pages 215 – 231, 1989.
- [2] Blevins, R.D.: *Flow-Induced Vibration*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1977.
- [3] *Elaborat obnavljanja (remonta) hidromašinske opreme ustave "Tomaševac", Knjiga I, Izveštaj o postojećem stanju segmentne ustave L = 24,5 m kao i način i postupak sanacije*, PPT "Inženjering" D. D., Beograd, 1998.
- [4] Folić, R., Popović, E.: *Model for Describing of Increased Segmental Valve Vibrations in "Staičvo" Sluice Gate*, Bulletins for Applied & Computer Mathematics BAM – 1974 / 2002 (XCIX), pages 136 – 144, Budapest, 2002.

- [5] www: *Hydraulic Design of Navigation Dams*, Engineer Manual No. 1110 – 2 – 1605, US Army Corps of Engineers, Washington DC, 12 May 1987 (novembar 2005).
- [6] Ishii, N., Knisely, C.W.: *Shear Layer Dynamics and Unsteady Discharge Beneath a Long Span Gate Undergoing Streamwise Vibrations*, HYDROCOMP '89 (Edited by Maksimović Č. and Radojković M.), pages 500 – 509, Elsevier Applied Science, London and New York, 1989.
- [7] Ishii, N., Knisely, C.W., Nakata, A.: *Coupled-Mode Vibration of Gates with Simultaneous Over and Underflow*, Journal of Fluids and Structures, 8, pages 445 – 469, 1994.
- [8] Ishii, N., Knisely, C.W.: *Flow-Induced Vibration of Shell-Type Long-Span Gates*, Journal of Fluids and Structures, 6, pages 681 – 703, 1992.
- [9] Ishii, N., Knisely, C.W., Nakata, A.: *Field Study of a Long-Span Shell-Type Gate Undergoing Flow-Induced Vibrations*, Journal of Fluids and Structures, 9, pages 19 – 41, 1995.
- [10] *Ispitivanje dinamičkih parametara srednjeg segmentnog zatvarača ustave "Tomaševac"*, oznaka 2000 420000 2718 – 6567690, Vojnotehnički institut, Beograd, 2005.
- [11] Кириллов, А.П., Шейнин, И.С.: *Речные гидротехнические сооружения*, Справочник проектировщика - Раздел 8., Динамический расчет специальных инженерных сооружений и конструкций, Стройиздат, Москва, 1986.
- [12] Popović, E.: *Dijagnostika stanja konstrukcije brane sa segmentnom ustavom metodama dinamičke analize*, Magistarski rad, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1998.
- [13] Popović, E., Đorđević, R., Gajin S., Folić R.: *Model za opisivanje povišenih vibracija segmentnog zatvarača ustave Stajićevo i predlog sanacije*, časopis "Izgradnja" broj 11, stranice 446 – 450, Beograd, 2001.
- [14] Popović, E.: *Razvoj modela održavanja ustava sa segmentnim zatvaračima na primeru Hidrosistema Dunav – Tisa – Dunav*, Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2007.
- [15] *Ustava Tomaševac – glavni projekat – I deo, knjiga I*, Projektni biro DTD "Hidrozavod", Novi Sad, 1969.
- [16] *Ustava Tomaševac – glavni projekat – I deo, knjiga III*, Projektni biro DTD "Hidrozavod", Novi Sad, 1969.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION RESULTS OF VIBRATION LEVEL ON SLUICE "TOMAŠEVAC" -HYDROSISTEM DTD

by

Mr Emil POPOVIĆ, dipl.inž.građ.
Public Water Management Company "Vode Vojvodine" Novi Sad
Prof. dr Radomir FOLIĆ, dipl.inž.građ.
Faculty Of Technical Sciences Novi Sad

Summary

On the sluice "Tomaševac" a heightened level of vibrations of the middle segment gate is remarked. Authors have done the proof and the main measuring of intensity of vibrations. The programme of Experimental investigations has been obtain level of vibration of segment gate structures using effective value of vibration parameters. The authors have used time, frequent and modal analysis. The described forms of

middle segment gate deformation on sluice Tomaševac the first two modes are shown. The investigation results indicate that the probably cause of vibrations is upstream hydrostatic pressure and not the strike of water and turbulence during undergoing flow.

Key words: Sluice, segment gate, vibrations, state diagnostic

Redigovano 18.05.2007.