

DYNAMICKÉ CHOVÁNÍ JEZOVÝCH UZÁVĚŘŮ

DYNAMIC BEHAVIOUR OF FLOOD GATES

Dr. Ing. Petr Nowak, Ing. Martin Králík, Ph.D., Doc. Ing. Ladislav Satrapa, CSc., Ing. Miroslav Brouček, Ph.D.
České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra hydrotechniky

Abstrakt

Ve vodohospodářské praxi se často setkáváme s případy nežádoucích kmitání ocelových konstrukcí. Tyto nežádoucí vibrace jsou nepříjemné z hlediska šíření zvukové vlny do okolí a nebezpečné z hlediska negativního ovlivnění okolních částí a vlivu na cyklickou únavu materiálu. V případech jezových klapek dochází k nechtěnému chvění konstrukce nejen při zvýšených povodňových stavech, ale zejména při běžných či malých průtocích. Cílem výzkumu bylo vytipování manipulačních stavů a částí jezových uzávěřů náchylných na nežádoucí vibrace včetně popisu negativních vlivů na konstrukci a na okolí. Klapkové uzávěry mají mnoho výhod – rovnoměrné namáhání spodní stavby a podloží od zatížení, dobrá regulace hladiny ve zdrži, dobré hydraulické podmínky při sklopení klapky, úspora materiálu na výrobu a velmi vhodné statické působení. Statické výhody jsou v kontrastu s omezenou tuhostí subtilní konstrukce. Popis statického a dynamického působení klapky byl zkoumán na hydraulickém fyzikálním modelu klapky v laboratoři, na matematickém modelu a na skutečné klapce. Tyto metody výzkumu mají své přednosti i nedostatky, nicméně vhodným skloubením všech vědeckých postupů hybridního modelování lze z výzkumu získat mnoho zajímavých a pro praxi užitečných výsledků.

Klíčové slova: klapka, modelování, měření vibrací.

Abstract

In water management engineering practise it is often necessary to deal with undesirable vibrations which are observed on steel constructions at hydraulic structures. Such vibrations usually not only induce inconvenient noise but also influence the surrounding structures and fatigue life of the steel construction itself. Flap gates suffer with flow induced vibrations mainly during low or normal flow periods. An observation of vibrations during floods when the flap gates are lowered is relatively scarce. The completed research was focused on selection of the operating states, i.e. positions of the gate and discharge, and parts of the gate construction which are likely to suffer from undesirable vibrations. Detailed description of the negative impact on the gate was also part of the research. The use of flap gates in general presents several advantages such as even distribution of the load on foundation structure, good performance in water table regulation; favourable hydraulic conditions when the gate is lowered, construction material economy and convenient structural action. The structural advantages contrast with low compliance of the subtle structure. Both in situ experiments and physical modelling in laboratory were used for proper description of structural and dynamic behaviour of flap gates. Although certain merits and deficiencies can be attributed to both methods,

a proper combination of different scientific approaches can result in interesting and in practise applicable conclusions.

Key words: flap gate; modelling; vibration; measurement

1 Úvod

Článek se zabývá hydraulickou a dynamickou analýzou proudění vody přes pokloповé uzávěry – klapky. Problematikou přepadu vody přes klapky a případným chvěním konstrukce uzávěru a spodní stavby je nutno se zabývat z provozních důvodů, z důvodu trvanlivosti konstrukce a v neposlední řadě z hlediska hygienických norem. Teoretická část výzkumu se zabývá výpočtovými metodami a přístupy k výčtu jednotlivých hydraulických, statických a dynamických charakteristik jezového uzávěru. Praktickou část výzkumu tvoří popsání postupu měření a vyhodnocení změřených fyzikálních veličin ve skutečnosti na konkrétním vodním díle. Výsledky z matematického modelování jsou v podobě pevnostního výpočtu pro statické a dynamické namáhání a napětí v konstrukci. Tyto výsledky jsou ve výzkumu vzájemně propojeny a porovnávány, aby došlo k co největší shodě s realitou. Výsledky výzkumu byly implementovány do „metodiky pro měření a vyhodnocení vibrací jezových konstrukcí hydrotechnických staveb“ [1], [2], [3].

2 Ustálené stavy

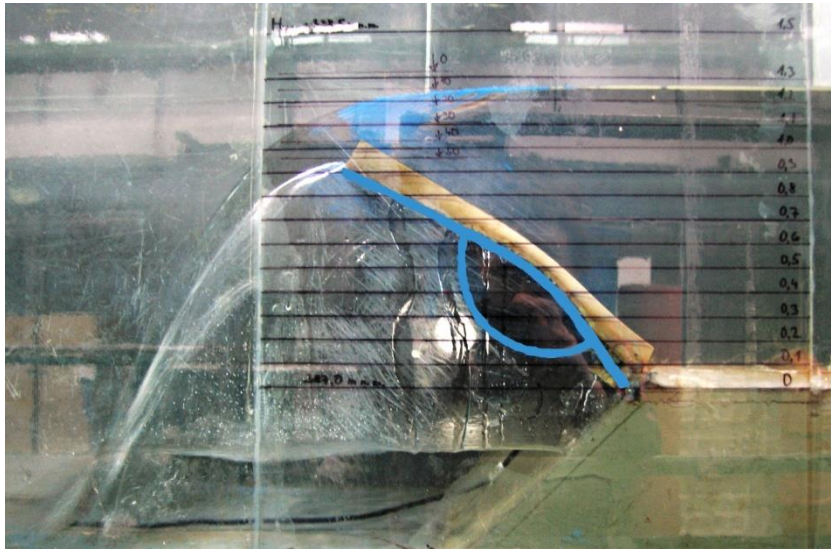
Pro správný návrh jezové konstrukce včetně ocelového uzávěru je nutné znát jeho základní hydraulické parametry jako např. měrné křivky pro jednotlivé polohy uzávěru a různé polohy hladiny dolní vody, průběhy tlaků na konstrukci ke zjištění případných podtlakových oblastí, ve kterých by mohlo docházet ke kavitaci apod. Ocelový uzávěr včetně závěsů a ložisek je nutné vhodně nadimenzovat, a proto je nutné znát zatížení hydrodynamickým tlakem pro vybranou sadu zatěžovacích stavů. Zejména pro klapkové uzávěry není možné provést návrh a posouzení konstrukce pouze na základě zatěžovacího stavu odpovídajícího plně vztyčené poloze za předpokladu hydrostatického zatížení hradícího plechu vodou. Maximální sklopné momenty na uzávěr jsou zpravidla dosaženy v mezipoloze odpovídající částečně sklopenému uzávěru.

3 Modelování

Zatížení pro dané zatěžovací stavy je možné zjistit na základě měření na fyzikálním nebo matematickém modelu. Další možností je měření tlaků a zatížení již na stávajících uzávěrech. To ale považujeme za okrajové řešení, náročné na čas a na prostředky vynaložené na měření in situ.

3.1 Fyzikální modelování

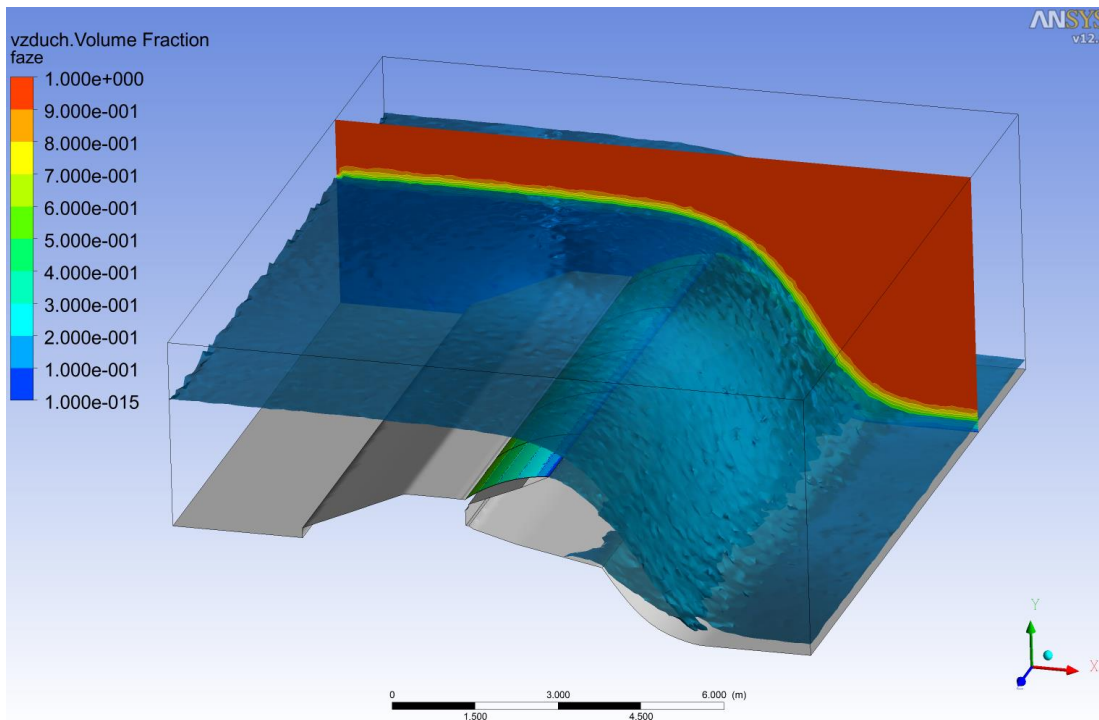
Fyzikální modelování je v mnoha případech prakticky nevyhnutelné, zejména jde-li o prostorově složité proudění vody a vzduchu s velkým podílem vodní tříště, s odrazy paprsku apod. Obr. č. 1 dokumentuje tvar přepadového paprsku přes horní hranu jezového uzávěru.



Obr. 1 – Proudění vody na fyzikálním modelu klapky

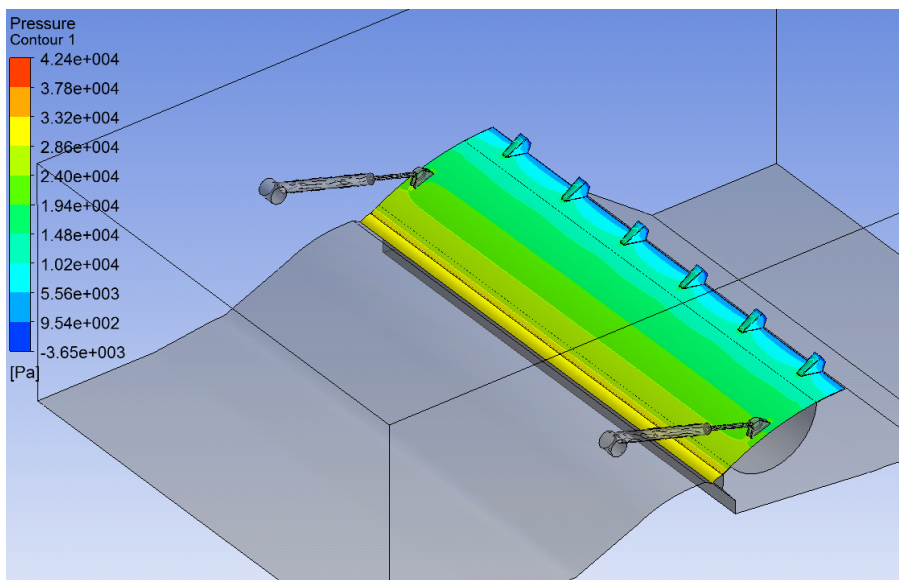
3.2 Matematické modelování

Dnešní prostředky pro matematické modelování a výkonnost moderních počítačů umožňují již věrohodné modelování proudění tekutin (CFD – Computational Fluid Dynamics). Pro analýzu jezového uzávěru musí matematický model popisovat dvoufázové prostředí o proudění směsi vody a vzduchu. Při nastavení správného vektoru tíhového zrychlení umožní výpočet na základě rozdílných měrných hmotností oddělení obou fází (voda a vzduch) zjistit koncentraci vody v jednotlivých výpočetních buňkách sítě a následně stanovit průběh volné hladiny viz. obr. č. 2. Tímto způsobem je možné stanovit nejen průtok při dané hladině, ale i zjistit např. průběhy hydrodynamických tlaků na hradící konstrukci viz. obr. č. 3. Provedeme-li výpočet pro celou sadu poloh uzávěru, jednoduše získáme měrné křivky uzávěru. Model proudění tekutin lze navíc použít nejen pro zjištění hydraulických parametrů ale i pro zjištění průběhů tlaků pro další pevnostní výpočty vlastní ocelové konstrukce.

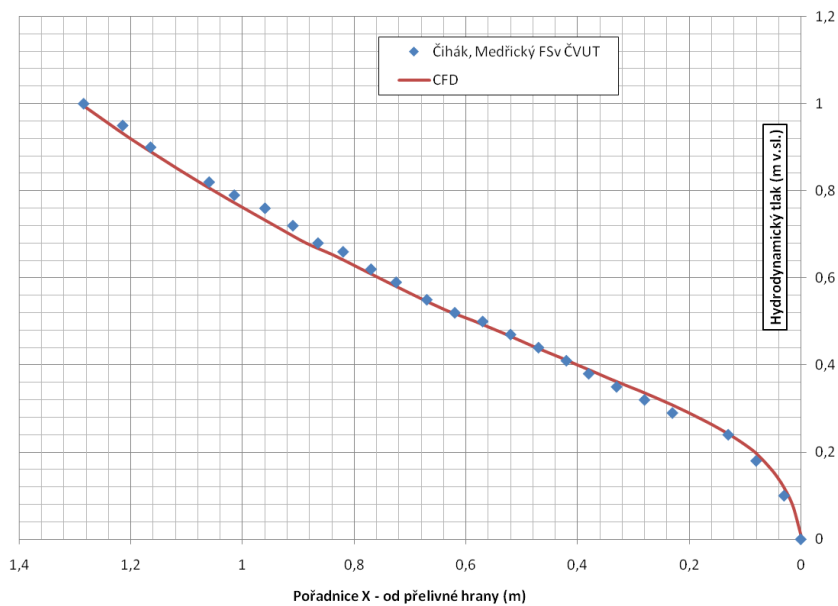


Obr. 2 - Znáznornění koncentrace vzduchu v příčném řezu jezů a pohled průběh hladiny přepadu přes konstrukci

Tlaky na hradící konstrukci, která tvoří okrajovou podmínku CFD modelu, jsou následně předány modelu pro analýzu napětí a přetvoření ocelové konstrukce (SA – Structural Analysis). Obr. č. 4 dokládá velmi dobrou shodu mezi výsledky matematického a fyzikálního modelu shodné konstrukce klapkového uzávěru.

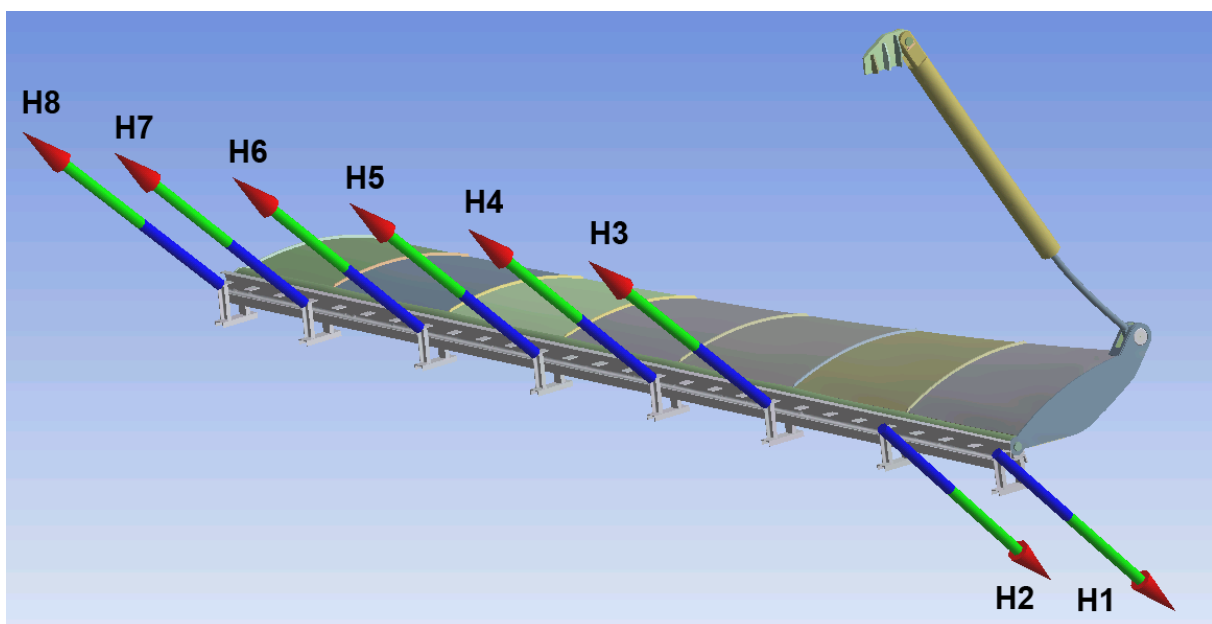


Obr. 3 - Průběh hydrodynamického tlaku na hradící konstrukci



Obr. 4 - Porovnání průběhu tlaků na hrací plech

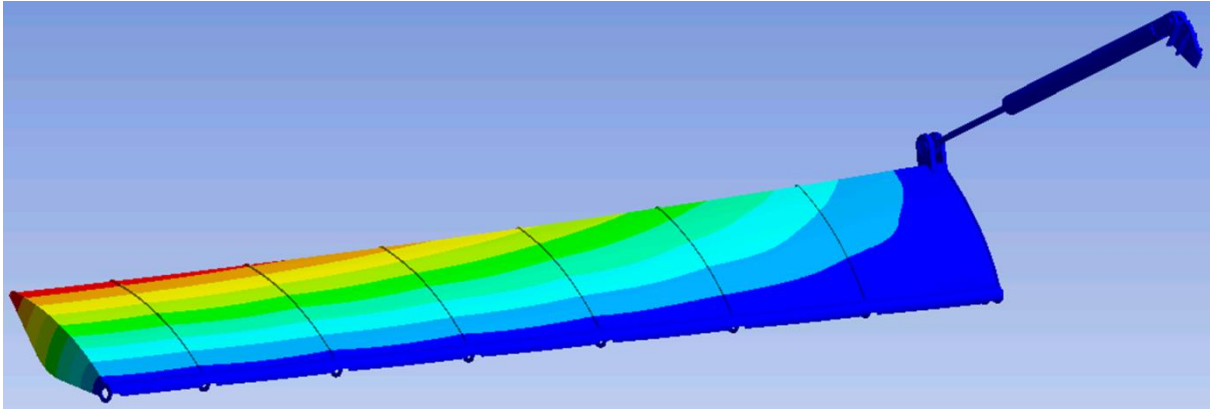
Integrací hydrodynamických tlaků po ploše návodní hradící stěny je následně možno zjistit celkovou zatěžovací hydrodynamickou sílu včetně velikosti, směru a místa působení. Výslednice hydrodynamického tlaku velmi dobře poslouží pro základní kontrolu silové výminky a pro kontrolu reakcí v jednotlivých podporách, viz. obr. č. 5.



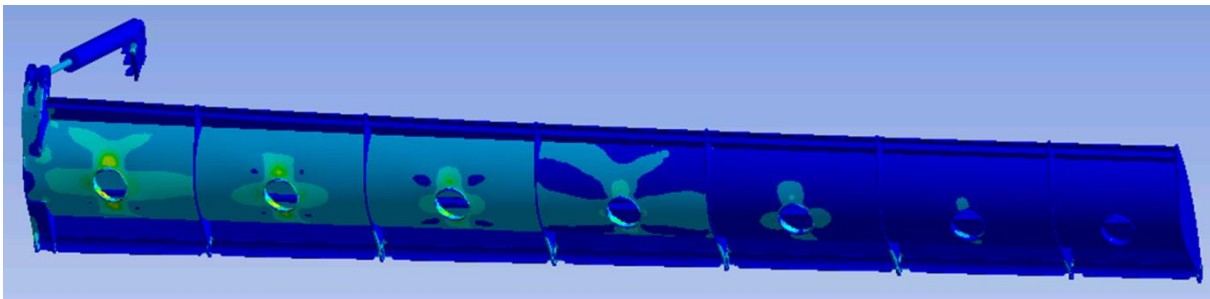
Obr. 5 - Zobrazení reakcí v ložiskách

Výpočty přetvoření konstrukce za daného zatěžovacího stavu mohou sloužit i pro zjištění maximálních deformací například s ohledem na zajištění rovnoměrnosti přepadového paprsku. Zpravidla je vyžadována i kontrola deformací při havarijních stavech s ohledem na možné zapříčení ocelového uzávěru mezi bočními betonovými stěnami pilířů. Přetvoření konstrukce pro havarijní zatěžovací stav odpovídající zajištění klapky pouze jedním hydromotorem dokumentuje obr. č. 6.

Přetvoření konstrukce odpovídají napjatostnímu stavu konstrukce, který je dokumentován na obr. č. 7.



Obr. 6 - Zobrazení průběhu totální deformace

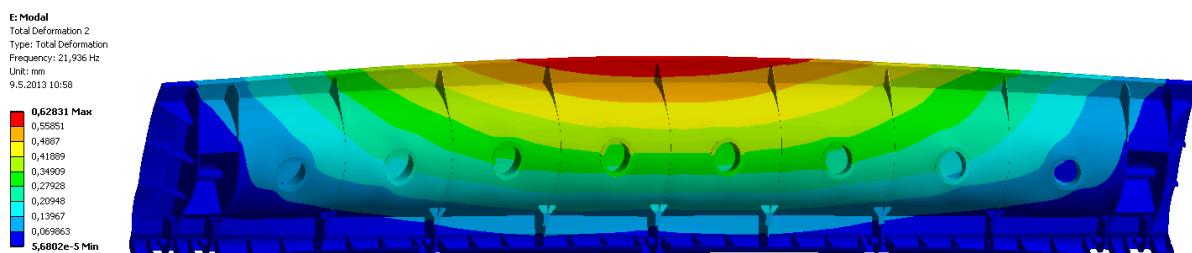


Obr. 7 - Zobrazení průběhu srovnávacího napětí

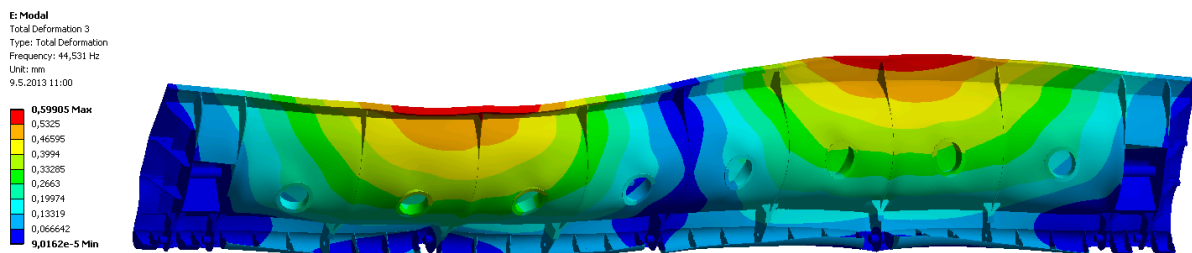
4 Modální analýza

Doposud jsme zjišťovali hydrodynamické ustálené zatěžovací stavy. Důležitým krokem směrem k poznávání dynamických vlastností ocelové konstrukce je provedení tzv. modální analýzy samotné konstrukce bez zahrnutí vlivu okolní kapaliny. Tato analýza je velmi citlivá na okrajové podmínky uchycení konstrukce, proto je velmi důležité správně namodelovat závěsy, ložiska, vedení apod. Z hlediska účinků kmitání jsou důležité zpravidla pouze nejnižší vlastní frekvence kmitání a jím odpovídající vlastní tvary kmitání. Výsledky modální analýzy je nutné posoudit i s ohledem na další, v modelu zjednodušená nebo nezahrnutá omezení a případné vlastní tvary a frekvence vyloučit jako nereálné. Model nezahrnuje vliv tlumení vody na hradící plech konstrukce, a proto jsou na reálných dílech naměřeny podstatně nižší frekvence kmitání. Tvary kmitání jsou však tlumením ovlivněny pouze nepatrně.

Kmitání se běžně modeluje u rotačních strojů, v oblasti návrhu ocelových jezových uzávěrů je však dynamická analýza těchto konstrukcí zcela výjimečná. Je to zejména a zapříčiněno složitostí problému a případné provozní problémy se zpravidla řeší pouze ad hoc. obr. č. 8 a 9 zobrazuje vlastní tvar konstrukce odpovídající první a druhé vlastní frekvenci.



Obr. 8 - První vlastní tvar kmitání s frekvencí 21,9 Hz (Doksany)



Obr. 9 - Druhý vlastní tvar kmitání s frekvencí 44,5 Hz (Doksany)

5 FSI model

V předchozích kapitolách jsme se dotkli možností modelování proudění vody a vzduchu. Vypočtené tlaky byly následně přeneseny jako zatížení ocelové konstrukce. Oba výpočty proběhly odděleně, pouze výsledky modelu proudění byly přeneseny jako zatížení pro SA model. Následně vypočtená přetvoření již nebyla zahrnuta do nového výpočtu proudění jako změna okrajových podmínek. Spojíme-li oba modely a budeme provádět výpočet s vhodným časovým krokem, můžeme zjišťovat dynamické chování ocelové konstrukce (Fluid-Structure Interaction – looped calculation). Aby konstrukce ustáleně kmitala na své vlastní frekvenci, je nutné přivést do této soustavy energii, která bude krýt mechanické ztráty kmitání. Tuto energii může např. představovat změna hydrodynamického zatížení v důsledku změny tvaru konstrukce. Vznikne-li kladná zpětná vazba mezi deformací a zatížením, může se konstrukce ustáleně kmitat (Flow Induced Vibrations). Tento jev patří do kategorie samobuzených kmitů. Zapojení vazby mezi oběma modely (CFD a SA) je velmi náročné z hlediska výpočetního výkonu, není potřebná zkušenost mezi projektanty, a proto se tento typ výpočtu v hydrotechnické praxi využívá zcela výjimečně. Obr. č. 10 dokumentuje rozkmitanou horní hladinu u klapkového jezového uzávěru. Kmitání konstrukce se projevuje i na tvaru volně přepadajícího zvlněného paprsku. Video sekvence přepadajícího paprsku umožnila zjistit frekvenci kmitání paprsku a odhadnout jeho vlnovou délku.



Obr. 10 - Projev samobuzených kmitů ocelové klapky na zvlněné hladině a přepadovém paprsku (Doksany)



Obr. 11 - Projev samobuzených kmitů ocelové klapky na zvlněné hladině a přepadovém paprsku (České Vrbné)

6 Měření vibrací ocelových uzávěrů in situ

Pro pochopení a vhodné odstranění příčin samobuzených kmitů doporučujeme provést na díle měření těchto vibrací. Vibrace je možné popsat např. časovým průběhem některé z pohybových veličin – výchylka, rychlost, zrychlení.

$$\text{výchylka: } x = \int v dt = \int (\int a. dt) dt \quad (1)$$

$$\text{rychlost: } v = \frac{dx}{dt} = \int a dt \quad (2)$$

$$\text{zrychlení: } a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (3)$$

Pro praxi nejdůležitější harmonický pohyb jsou tyto relace vyjádřeny následovně:

$$\text{výchylka: } x = \bar{x} \cdot \sin \omega t \quad (4)$$

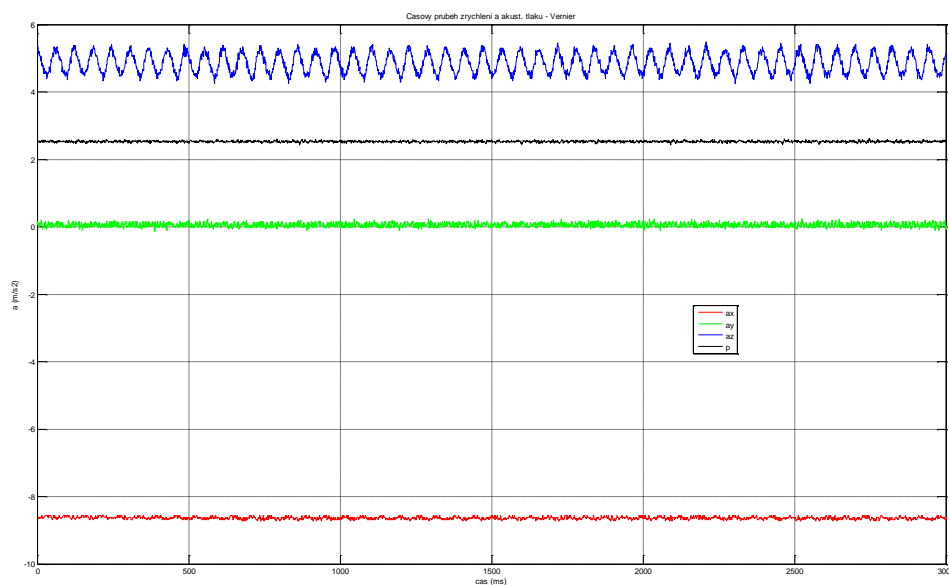
$$\text{rychlost: } v = \omega \bar{x} \cdot \cos \omega t = \bar{v} \cdot \cos \omega t \quad (5)$$

$$\text{zrychlení: } a = -\omega^2 \bar{x} \cdot \sin \omega t = -\omega \bar{v} \cdot \sin \omega t = -\bar{a} \cdot \sin \omega t \quad (6)$$

kde ω je úhlová rychlost harmonických vibrací a $\omega = 2\pi f$

Protože jsou tyto tři vektorové veličiny navzájem propojeny jako časové integrály, popř. časové derivace, je možné změřit pouze veličinu jednu a integrací, resp. derivací dopočítat veličiny ostatní. Zatím se v praxi osvědčilo použití inerciálních triaxiálních akcelerometrických snímačů s rozsahem cca ± 3 až ± 5 g. Doporučujeme použití snímačů s frekvenčním rozsahem 0-1 000 Hz, protože v praxi jsou frekvence kmitání konstrukcí v oblasti desítek Hz. Při použití triaxiálních snímačů lze provést kontrolu výslednice tíhového zrychlení, využít střední hodnotu výslednice jako inklinometr a dopočítat hlavní směr kmitání.

Akcelerometry je vhodné ke konstrukci přichytit silnou magnetickou příchytkou, která dovoluje snadnou montáž a změnu polohy. Výstupní signál ze snímače je nutné digitalizovat ve vhodném A/D převodníku s rozlišením alespoň 12 bit s předřazeným antialiasingovým filtrem. Na obr. č. 22 je uveden příklad časového průběhu zrychlení ve třech měřených osách. Hlavní směr kmitání je prakticky shodný se směrem osy Z použitého snímače.



Obr. 12 – Časový průběh tří složek zrychlení

Pro zjištění frekvencí kmitání je vhodné provést Fourierovu transformaci (zpravidla FFT) a vykreslit frekvenční spektrum signálu [4].

7 Vyhodnocení měření

Časový průběh pohybových veličin, zejména zrychlení, může obsahovat větší množství frekvenčních složek. Pro posouzení jednotlivých případů je zapotřebí porovnávat stav konstrukce na základě jednoho integrálního kritéria, které bude zahrnovat celé spektrum signálu. Proto je v praxi běžně používána srovnávací efektivní veličina, která ve své podstatě odpovídá energii vibrací a která se nazývá mohutnost kmitání (hodnota RMS – „Root Mean Square“) a je stanovena vztahem

$$v_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}$$

kde $v(t)$ časově závislá rychlost vibrací

v_{ef} výsledná efektivní hodnota rychlosti

T doba vzorkování, která je rovna jedné nebo několika (zpravidla mnoha) periodám jakékoli hlavní frekvenční složky, z nichž se $v(t)$ skládá.

Efektivní hodnotu lze stanovit nejen pro rychlost kmitání, ale rovněž pro výchylku nebo zrychlení. V některých případech je možné přisuzovat různým frekvencím různé váhy, které odpovídají např. vlivu na zdraví člověka.

Pro stanovení mezí klasifikace stavu zařízení vycházíme z velmi propracovaných metod vibrodiagnostiky rotačních strojů. Jako hodnotící kritérium je stanovena efektivní hodnota rychlosti vibrací. Pro oblast hydrotechniky doporučujeme následující stanovení mezních efektivních hodnot rychlosti vibrací.

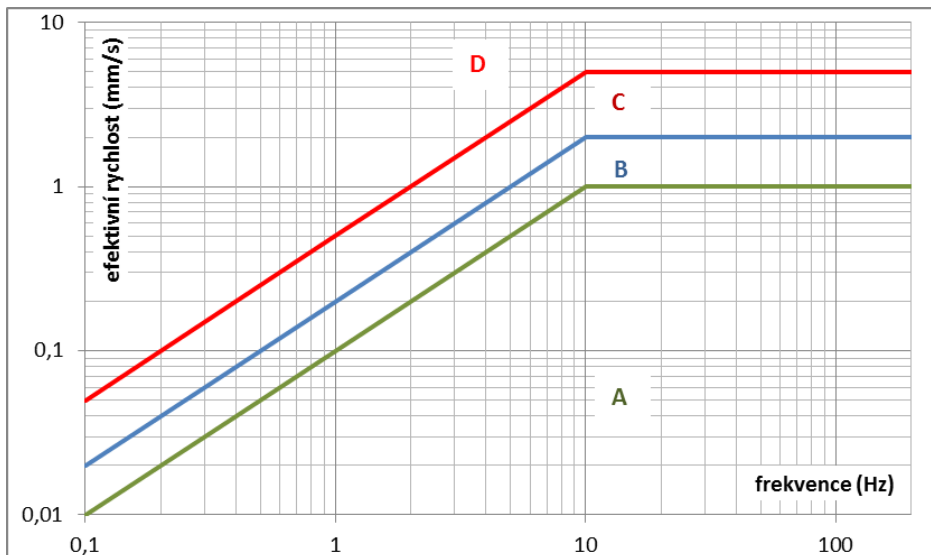
Tab. 12 – Návrh tabulky pro vyhodnocení stavu konstrukce

stav	efektivní hodnota rychlosti [mm.s ⁻¹]	efektivní hodnota výchylky [um]
A	<1	<15
B	1-2	15-30
C	2-5	30-80
D	>5	>80

Popis jednotlivých oblastí:

- A. bez vibrací
- B. možný dlouhodobý provoz
- C. neuspokojivé pro dlouhodobý provoz – nutná náprava – VÝSTRAHA
- D. ohrožující stav – nutné odstavení – PŘERUŠENÍ PROVOZU

Tato tabulka je sestavena na základě dosavadních zkušeností a s jejich rozšířením ještě může být upřesněna. V tabulce je uvedena nejen efektivní hodnota rychlosti, ale i efektivní hodnota výchylky při mezní frekvenci 10 Hz. Naopak u velmi vysokých frekvencí kmitání je doporučeno klasifikovat stav podle efektivní hodnoty zrychlení, s tím se ale u hydrotechnických konstrukcí prakticky nesetkáme. Protože se v případě vibrací hydrotechnických ocelových konstrukcí zpravidla jedná o velmi nízké frekvence, považujeme za rozumné snižovat mezní hodnoty efektivních rychlostí s klesající frekvencí. Vibrace se potom nebudou hodnotit dle efektivní rychlosti, ale správněji podle efektivní výchylky. Pro hodnocení přípustných limit vibrací pod mezní frekvencí 10 Hz je vhodný využít následující graf.



Obr. 13 – Znázornění vlivu frekvence na hodnocení stavu konstrukce

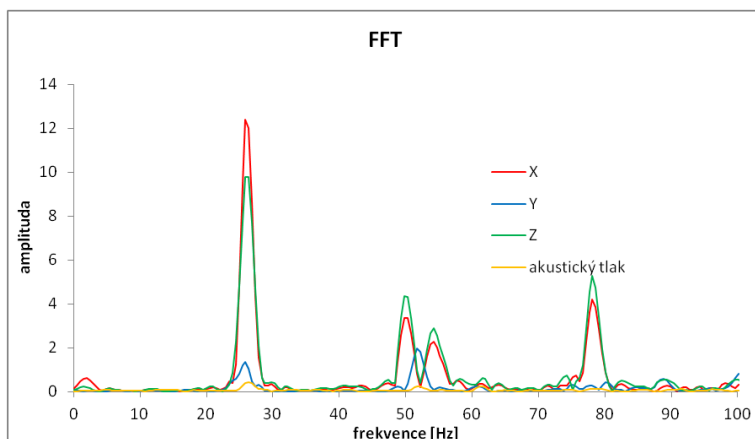
Pro určení stavu konstrukce je vhodné i vyhodnocování časové změny vibrací se stanovením trendu. Dojde-li k výrazné změně trendu (zejména zrychlování velikosti vibrací v čase), lze poměrně spolehlivě předvídat výskyt poruchy, popř. provést plánovanou opravu. Pro tyto účely je potřeba zajistit kontinuální nebo periodické měření. Kontinuální měření je pro hydrotechnické konstrukce poměrně náročné, ale umožňuje detekci opotřebení např. ložisek, závěsů, pohybovacích mechanismů.

8 Příklady z praxe

Úkolem bylo změřeni kmitání ocelové konstrukce jezové klapky na jezu, provedení analýzy naměřených dat a posouzení, zda vlastní konstrukce uzávěru je vibracemi nepřiměřeně namáhána. První místní šetření prokázalo, že stav vibrací klapky je reprodukovatelný za dodržení výšky přepadového paprsku. Slyšitelné pulzace odpovídaly tomu, že se bude jednat o nízkofrekvenční jev, proto jsme navrhli snímání mechanických vibrací pomocí akcelerometrů MEMS s připojeným data loggerem.

8.1 Klapka – České Vrbné

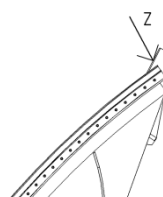
Měření proběhlo na levém jezovém poli, které je již přibližně dva roky v provozu po výměně původního hydrostatického uzávěru. Měření vibrací na klapce bylo prováděno při malé přepadové výšce (ve srovnání s výškou klapky) s umístěním akcelerometru na rozrážeči na levé straně klapky. Při chvění konstrukcí dochází i ke zvýšenému hluku, proto byl měřen akustický tlak v místě přepadajícího paprsku. Naměřené hodnoty zrychlení byly vyhodnoceny pomocí FFT analýzy. Dominantní frekvence kmitání konstrukce a akustického tlaku při těchto podmínkách je 26 Hz, viz. obr. č. 14. Při této frekvenci kmitání konstrukce dochází k doprovodnému zvukovému jevu – nežádoucímu zvýšení hlukové emise do okolí.



Obr. 14 - FFT analýza zrychlení a akustického tlaku

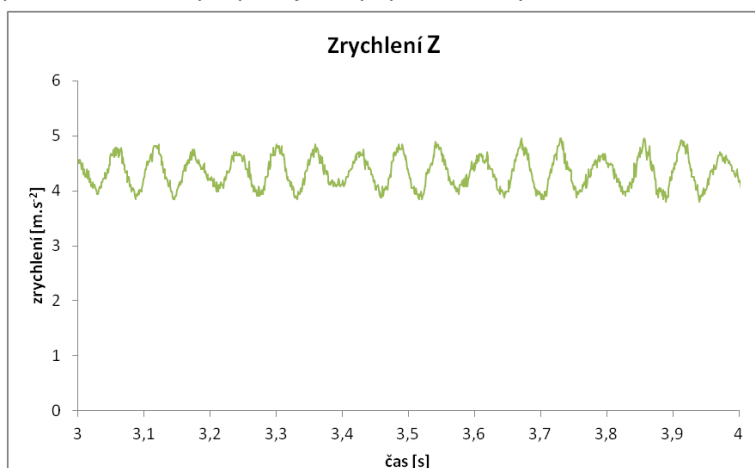
Tab. 2 – Výsledky měření a výpočtu dynamických charakteristik

zrychlení Z	rychlost Z	výchylka Z	frekvence Z
(m.s ⁻²)	(mm.s ⁻¹)	(um)	(Hz)
efektivní	efektivní	efektivní	
1,374	7,5	45	25,4



8.2 Klapka - Doksany

Měření proběhlo na pravém jezovém poli, které je již přibližně rok v provozu po výměně původního válcového uzávěru. V úzké provozní oblasti vykazuje dutá ocelová klapka vibrace, hluk je slyšitelný v širším okolí a na přilehlých konstrukcích dochází ke zdatelným vibracím. Tento nežádoucí stav se projevuje pouze za podmínky, že výška přepadového paprsku je přibližně 6-10 cm. Vibrace jsou patrné na volně přepadajícím paprsku, který se vlní.

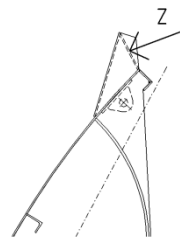


Obr. 15 - Zrychlení -Doksany

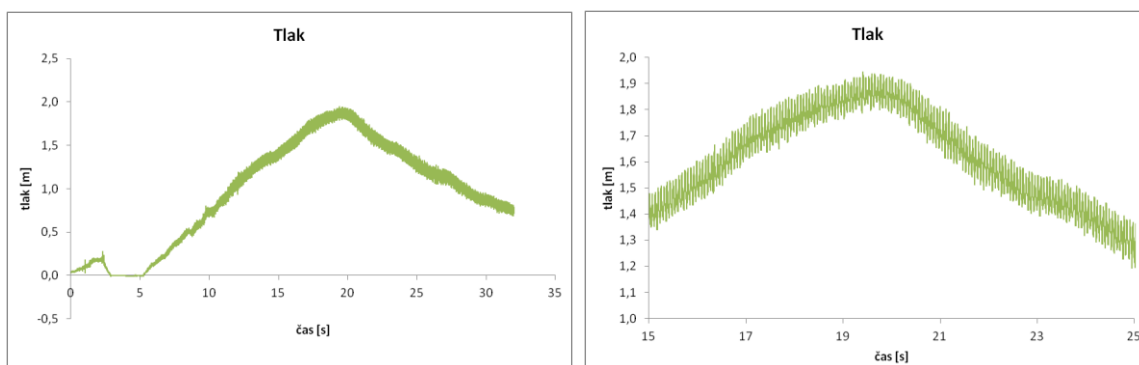
Největších zrychlení je dosahováno kolmo na hradící plech. Dominantní frekvence kmitání konstrukce a akustického tlaku při těchto podmínkách je 16,6 Hz.

Tab. 3 – Výsledky měření a výpočtu dynamických charakteristik

zrychlení Z	rychlost Z	výchylka Z	frekvence Z
($m.s^{-2}$)	($mm.s^{-1}$)	(μm)	(Hz)
efektivní	efektivní	efektivní	
0,302	2,9	28	16,3



Taktéž byly změřeny tlakové pulzace pomocí upraveného snímače relativního tlaku s integrovaným A/D převodníkem a komunikační jednotkou s USB rozhraním. Snímač byl zabudován v plastové ochranné trubce a ponořován do vody a zpět vynořován ke hladině. Tomu odpovídá časový průběh tlaku uvedený na obr. č. 16. Naměřené hodnoty byly nezávisle zkontrolovány pomocí ponorného tlakového snímače. Sada měření prokazuje propagaci kmitů do vody a vytvoření měřitelných tlakových vln. Frekvenční analýzou signálu je dokázáno, že tlakové pulzy ve vodě jsou opět s hlavní frekvencí 16,6 Hz.



Obr. 16 - Tlak a pulsace tlaku vody

9 Závěr

V textu jsou uvedeny příklady přístupů a postupů pro testování spolehlivosti a správné funkce jezového uzávěru – klapky. Za vhodné považujeme kombinovat jednotlivé spolehlivých výsledků vědeckého bádání. Pro předpokládané výsledky výzkumu byl zvolen postup, který efektivně a hospodárně zajistí kvalitní výsledky.

Přínos matematického modelování je v možnosti zjistit fyzikální veličiny, které není možno jednoduše nebo spolehlivě zjistit konvenčními metodami měření (např. napětí v konstrukci a místní deformace). Matematický výpočet vlastních tvarů a frekvencí konstrukce klapky je potřebný pro analýzu životnosti a spolehlivosti konstrukce.

Vodní dílo České Vrbné bylo v roce 2011 modernizováno a již v prvních měsících užívání se objevily některé projekční nedostatky, které byly odstraněny v rámci zkušebního provozu. Klapky jsou velice náchylné na zavzdušnění prostoru pod klapkou při sklopeném uzávěru – negativní dopad je na statické a dynamické zatížení uzávěru. Na tomto vodním díle bylo dodatečnou stavební úpravou dobudováno zavzdušňovací potrubí, které přispělo ke správné hydraulické funkci celého jezu. Tyto detaily se často dají odhalit a vyřešit již při výzkumných činnostech na hydraulickém modelu, pokud je takový výzkum prováděn.

V průběhu rekonstrukce vodního díla Doksany se objevily nežádoucí doprovodné, hlukové jevy při malých průtocích v toku a při malé přepadové výšce na jezovém uzávěru. Tento nepříjemný hluk

vyprovokoval správce vodního díla k nápravě. Především bylo zapotřebí najít příčinu hluku a následně jej odstranit. Hluk v okolí jezu je způsoben vlastními kmity konstrukce ocelového uzávěru. Budící silou je hydrodynamické zatížení, které je ovlivněno tvarem hradící konstrukce. Odstranění nechtěného hluku se docílilo změnou přepadového paprsku pomocí přidavných rozrážečů. Další velice zajímavou možností eliminace kmitání je rozladění budící síly – rozdělení přepadajícího paprsku vody na menší nestejně velké části. Odstranění nechtěného hluku se docílilo rozdělením přepadového paprsku pomocí instalace dalších rozrážečů. Tím došlo k přerušení chvění a eliminace kmitání vodního paprsku. V neposlední řadě lze vhodnou manipulací na jezu nežádoucí stav omezit na minimální časové období v průběhu provozu. Toto opatření lze jednoduše udělat, neboť vodní dílo Doksany je vybaveno dvěma poli, a tudíž je možno průtok převádět jedním nebo oběma poli v závislosti na velikosti průtoku (tato manipulace musí být v souladu se schváleným manipulačním řádem). Zamezení převádění průtoku při dané hladině, kdy se objevují nechtěné vibrace, je nejčastějším a nejjednodušším řešením používaným v praxi.

Poděkování

Tento článek vznikl za podpory grantu ministerstva vnitra VG20102014056 „Zvýšení spolehlivosti manipulačních uzávěrů“.

Literatura

- [1] KOLÁŘ Václav, PATOČKA Cyril, BÉM Jiří. Hydraulika, SNTL, (in Czech), Hydraulics, 1983, 480 s
- [2] GABRIEL a kol. Jezy, SNTL, (in Czech), Weirs, 1989, 453 s
- [3] ČIHÁK František, MEDŘICKÝ Vladimír, Navrhování jezů, ČVUT, (in Czech), The design of weirs, 1991, 150 s
- [4] Vibrations of hydraulic equipment for dams, ICOLD, 1996