

# SPOLEHLIVOST JEZOVÝCH UZÁVĚRŮ BĚHEM POVODNÍ

## RELIABILITY OF FLOOD GATES DURING FLOOD EVENTS

*Miroslav Brouček, Ladislav Satrapa, Petr Nowak, Martin Králík*

### **Abstrakt:**

Životnost a spolehlivost konstrukcí je obecně vázána na dodržování původních předpokladů pro jejich funkci. Zajištění očekávané funkce uzávěru nebo spíše předpoklad selhání některého z uzávěrů během návrhové povodně byl součástí obvyklého postupu při návrhu vodního díla. S rozvojem teorie spolehlivosti lze, s pomocí zkušeností a dat získaných v průběhu moderní éry vodního stavitelství, zohlednit pravděpodobnosti poruch jednotlivých uzávěrů, respektive jejich jednotlivých částí, s příslušným dopadem na manipulaci s uzávěrem, a tento výpočet poté zohlednit při posuzování celkové spolehlivosti vodního díla, respektive při uvažování povodňových rizik, neboť lze předpokládat dopad případné poruchy na transformaci povodňové vlny. Zcela zásadní je přizpůsobení analýzy spolehlivosti aktuálnímu stavu uzávěru neb v důsledku unikátních podmínek se ne všechny projektové předpoklady promítnou do skutečnosti. Za příklad může sloužit nežádoucí dynamické namáhání vznikající jako důsledek interakce konstrukce s proudící vodou. Příspěvek představuje možný postup pro hodnocení spolehlivosti jezových uzávěrů, jakožto komplexních konstrukcí, se zahrnutím vlivů jednotlivých funkčních částí.

### **Abstract:**

A reliability and durability of constructions are, in general, closely connected with a validity of assumptions for their function. A correct function or more likely an assumption of failure of some of the flood gates during a design flood used to be a part of a commonly used approach for a design of a hydraulic structure. Applying reliability theory, while using data and experience gained during the modern era of dam building, it is possible to calculate a probability of failure of any flood gate or its relevant parts respectively, including the appropriate consequences on the operating capabilities of the gate construction. Such results can be included into evaluation of the overall reliability of the whole hydraulic structure or flood risk assessment as the impact of a gate failure on the flood wave transformation can be predicted. The reliability analysis must apprehend the actual state of the flood gate as, due to unique circumstances, not all design assumptions are valid. Flow induced vibrations rising from the overflowing water and structure interaction can serve as an example of the just mentioned. The paper presents a practicable approach for reliability evaluation of flood gates as complex structures incorporating a reliability of relevant parts.

**Klíčové slová:** spolehlivost; pohyblivé uzávěry; povodně

## 1. ÚVOD

Selhání uzávěrů na bezpečnostních přelivech představuje primární příčinu přelití a následného poškození vodního díla v celosvětovém měřítku ve více než čtvrtině případů [1]. Přestože ze statistik vyplývá relativně nízká pravděpodobnost poruchy uzávěrů, která je z principu definována jako neschopnost uzávěru plnit požadovanou hradící funkci, a riziko koincidence s průběhem povodně by tedy mělo být výrazně nižší, lze údaje získané anonymními dotazníkovými metodami v sousedním Německu považovat za alarmující [2].

Do současné doby nebyla oficiálně reportována na našem území porucha uzávěrů v průběhu povodňových situací, respektive nebylo hlášeno významné ovlivnění v důsledku selhání ovládní uzávěrů. Havárie menšího významu se však vyskytují. Značné množství uzávěrů, osazených ve třicátých a čtyřicátých letech minulého století, se však, i přes trvalou údržbu, v současné době blíží ke konci návrhové životnosti a lze tedy očekávat nárůst intenzity poruch respektive vynucených rekonstrukcí navzdory, na mezinárodní poměry, značně intenzivnímu programu kontroly a údržby [3]. Nárůst poruch lze očekávat zejména v lokalitách, kde není tento program důsledně aplikován jak na stavební tak i na technologickou část.

Na území České republiky se v současné době nalézá 30 významných přehrad s hrazenými bezpečnostními přelivy. Jedná se přibližně o čtvrtinu našich významných přehrad, které jsou součástí světového soupisu přehrad zpravovaného mezinárodní přehradní komisí ICOLD. Mimo tyto je na našem území ještě přibližně třicet významných pohyblivých jezů, u nichž by ztráta manipulovatelnosti s uzávěry při krizových situacích znamenala rozsáhlé škody. Většina stávajících uzávěrů na vodních dílech byla navrhována a konstruována v souladu s platnými ČSN normami, které představují v zásadě deterministickou alternativu návrhu [4]. V takovém případě lze stav konstrukce hodnotit pouze vyjádřením „vyhoví“ respektive „nevyhoví“ a to prostým posouzením účinků zatížení a odolnosti konstrukce. Pomocí teorie spolehlivosti a stochastických metod je možné definovat pravděpodobnost poruchy, u které navíc předpokládáme vývoj v čase. Spolehlivostí rozumíme schopnost plnit stanovené požadavky během návrhové životnosti [5].

## 2. OBLAST ZÁJMU

Standardní přístup k definici termínu porucha v souvislosti s uzávěry vychází z obecného ustanovení, že porucha nastává v okamžiku, kdy uzávěr neplní požadovanou funkci. Jedná se tedy o poruchu v širším významu mezních stavů, zejména mezního stavu použitelnosti, a nikoli pouze o selhání uzávěru ve smyslu ztráty stability nebo vyčerpání únosnosti materiálu. V obecné rovině lze od uzávěrů požadovat funkci hradící a regulační [6]. Funkce hradící vyžaduje jednak těsnost uzávěru a bezpečnost a stabilitu hradící konstrukce. Funkce regulační vyžaduje spolehlivou manipulaci respektive spolehlivé otevření uzávěru za všech provozních podmínek.

Během povodňové či jiné krizové nebo havarijní situace však není zapotřebí vyžadovat po uzávěru bezchybné plnění všech jeho funkcí. V zásadě se potřebná funkce omezuje na požadavek vyhrazení nebo naopak bezpečného hrazení bez rizika vyvolání zvláštní povodně. Netěsnosti působící průsaky a chvění pak nepředstavují poruchu, pokud jejich předchozím působením není kompromitována manipulace s uzávěrem. Například vytvořením ledového obalu u průsaků, který znemožní manipulaci. Dalším příkladem je chvění konstrukce, které v běžném stavu vyčerpá únavovou životnost ovládacích prvků natolik, že v kritickém okamžiku selžou.

Pro hodnocení četnosti výskytu obecných poruch lze zcela zásadní význam přikládat intervalu kontrol funkčnosti uzávěru, neboť pokud bychom vycházeli pouze z případů poruch uzávěrů během povodňových situací, bylo by stanovení ovlivněno dále hydrologickou situací dané lokality a zkoumaného období a závěry by bylo obtížné zobecnit. Například při delším období příznivějším z hlediska povodní, jako byla druhá polovina 20. století, by se uzávěry jevíly výrazně spolehlivější. Naproti tomu intervaly kontrol odhalující opotřebení a poškození

prvků, stejně jako záznamy o poruchách při manipulaci za běžných podmínek umožní stanovit pravděpodobnost selhání při povodni bez rizika zmíněného ovlivňování.

### 3. ROZDĚLENÍ PORUCH

V minulosti byly příčiny poruch na uzávěrech obecně děleny na vnitřní, způsobené nedostatky při projektování, konstrukci, výrobě nebo montáži, a na vnější, způsobené provozními podmínkami nebo jejich nedodržáním [6]. Pro hodnocení spolehlivosti uzávěrů za krizových situací však tento přístup není účelný, neboť neposkytuje potřebnou informaci o pravděpodobné četnosti poruch a délce nápravných opatření.

Dále lze konstatovat, že v dnešní době je rozvoj poruch od vnějších příčin způsoben především omezenými možnostmi manipulace s uzávěry v jejich plném rozsahu a omezenými možnostmi kontroly a údržby uzávěrů, které jsou dány jak specifickými podmínkami, tedy obtížností provedení takových kontrol, tak limitovanými prostředky přidělenými na přípravu a provádění kontrol. Vnitřní příčiny, zejména nedostatky v projektové dokumentaci se vyskytují při zanedbání modelového výzkumu, což následně vede k poruchám a dodatečným opatřením (např. nedostatečné zavzdušnění a vibrace a další), nebo při opomenutí zkušeností z předchozí praxe (deformované tenké teflonové desky na bočních štítech nebo zdeformovaná těsnění u zavzdušňovacích otvorů).

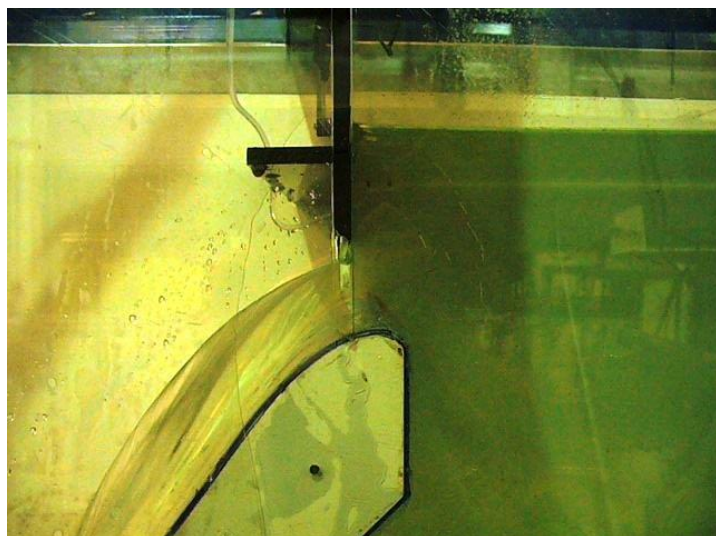
V rámci investigativní části rozsáhlého programu zaměřeného na spolehlivost byly na základě dostupných informací, dokumentovaných v provozních denících nebo souhrnných zprávách, v odborné literatuře popsaných či jen ústně sdělených, sestaveny tabulky poruch jednotlivých částí uzávěrů různých typů. Pro každou část z jednotlivých funkčních celků uzávěru, viz dále, je pak stanovena střední doba mezi poruchami a doba obnovy v případě poruchy. Pro další rozšíření báze znalostí popisující příčiny poruch a opotřebení jednotlivých částí byly prováděny fyzikální i numerické experimenty pro zvolené geometrie různých typů uzávěrů.

### 4. FYZIKÁLNÍ MODELOVÁNÍ

Za určitých podmínek reprezentují laboratorní modely věrně chování skutečné konstrukce a umožňují tak získat odpovědi na řadu otázek především z oblasti hydrauliky. Je zjevné, že pro celkové hodnocení spolehlivosti konstrukcí by bylo nejvhodnější použití Eulerovy respektive plné mechanické podobnosti. Vzhledem k použitému médiu (vodě) a v laboratorních podmínkách vodohospodářské laboratoře nezměnitelnému působícímu zrychlení je však jedinou možností jejího dosažení použití měřítko délek modelu 1:1. Zde však narážíme na kapacitní potíže jak prostorové, tak průtokové. Pro účely laboratorních modelů hradicích uzávěrů tak byl zvolen Froudův zákon podobnosti, který nejlépe vyhovuje zkoumané problematice při zvolených rozměrech modelu, respektive měřítku problému. Požadavky Weberova zákona byly, s ohledem na výšky výtokových paprsků zvolené při modelování a ve shodě s literaturou [7] a [8] zanedbány.

V centru zájmu modelového výzkumu byly zejména síly v ovládacích mechanismech, respektive jejich výchylky od ustáleného stavu. Dále zrychlení konstrukce jako celku a rozložení hydrodynamických tlaků na konstrukci nebo spodní stavbu a deformace konstrukce pro různá otevření uzávěru. Samozřejmostí je stanovení součinitelů přepadu respektive výtokových součinitelů při různých tvarech přelivných ploch. Významným faktorem, který de facto zdvojnásobí, až ztrojnásobí počet provedených experimentů, je poloha dolní vody vůči

přelivné hraně, tedy míra zatopení. V rámci laboratorních zkoušek se dále experimentuje s možností využití frekvenční analýzy zvuku a obrazu pořízeného vysokofrekvenční kamerou. Pro stanovení průtoku je používán kalibrovaný Thomsonův přeliv a / nebo ultrazvukové průtokoměry



(a)



(b)

Obr. 1: Ukázky fyzikálních modelů-stavidlový uzávěr na (a) vysokém přelivu; (b) na Jamborově prahu

Rozsah modelování umožňuje v rámci příspěvku publikovat pouze ukázky modelů a příklady výstupů. Celkem byly sestaveny 4 modely pro stavidlové uzávěry, 3 modely se segmentovými uzávěry, 2 modely s klapkovými uzávěry a jeden výsekový hydrostatický uzávěr.



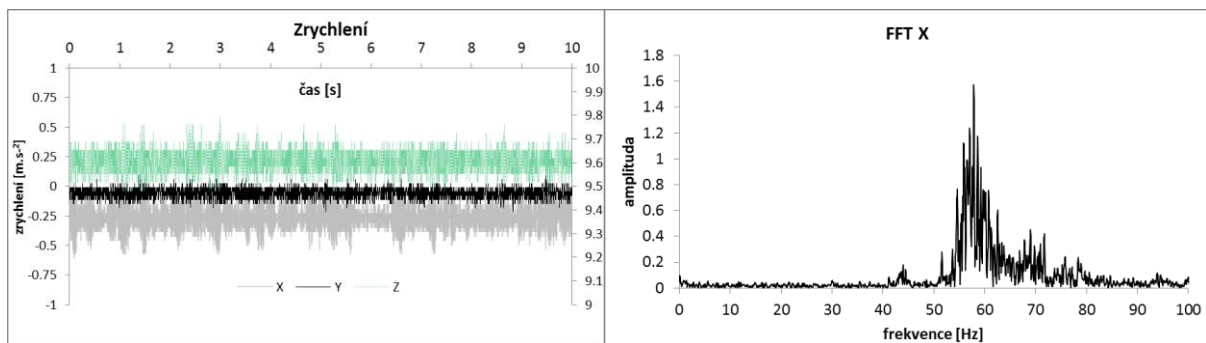
(a)



(b)

Obr. 2: Ukázky fyzikálních modelů (a) segmentový uzávěr na Jamborově prahu; (b) klapkový uzávěr s úpravou přelivné hrany

Následující dvojice grafů představuje ukázkou naměřených hodnot zrychlení akcelerometrem na segmentovém uzávěru a jejich vyhodnocení Fourierovou transformací za účelem zjištění dominantní frekvence kmitání. Svislé zrychlení není očištěno o gravitační a je proto zobrazeno na vedlejší svislé ose. Analýza většího množství experimentů provedených pro stejné otevření potvrdila jak malý rozptyl měření, tak i dominantní směr vibrací ve vodorovném směru v rovině hradícího plechu. Popsaný směr největších výchylek je typický pro reálné segmentové uzávěry a podílí se na něm jak nižší tuhost konstrukce v rovině hradícího plechu, tak i nepřesnosti ve vodících drážkách či nižší tuhost a opotřebení těsnění.



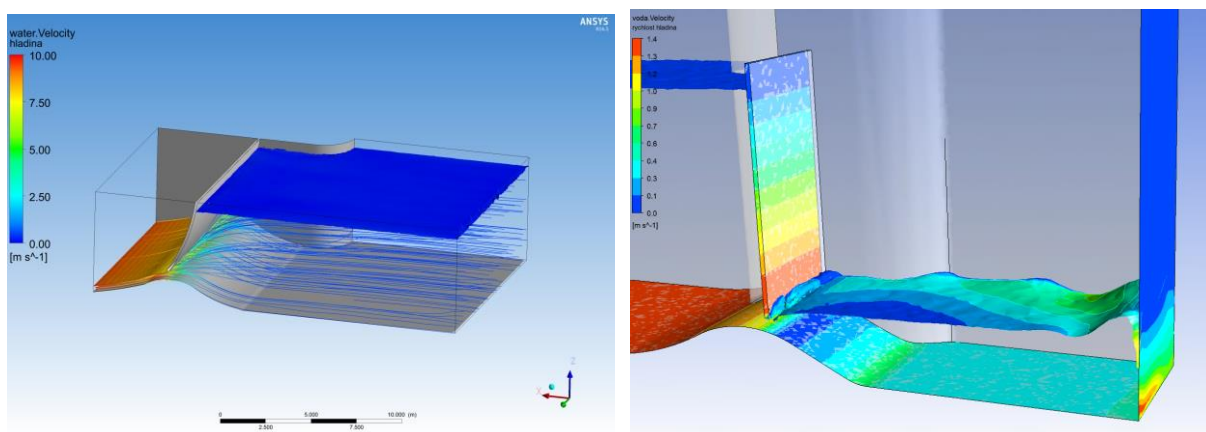
(a)

(b)

Obr. 3: Měření akcelerometrem: (a) časový záznam; (b) FFT analýza zrychlení v ose X

## 5. MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ

Numerické modely proudění a napěťové a deformační analýzy byly vytvořeny v programovém prostředí ANSYS Workbench. Při tvorbě modelů byla za účelem úspory využívána rovinná symetrie modelovaného problému, který zahrnoval samotnou konstrukci uzávěru včetně nátohu a odpadního koryta v délce dostatečné pro minimalizaci vlivu okrajových podmínek. Geometrie numerických modelů jinak zcela odpovídala modelům fyzikálním. Numerické modely proudění byly vymodelovány v softwaru Rhinoceros 4.0. Dále byla geometrie importována a upravena v modulu Ansys Geometry a převedena do modulu Ansys Meshing. Pro tvorbu výpočetní sítě byl použit automatický generátor. Síť obvykle, obsahují přes 3 miliony prvků, byly vytvořeny pomocí tetraedrů s výrazným zahuštěním u výtokových nebo přelivných hran.

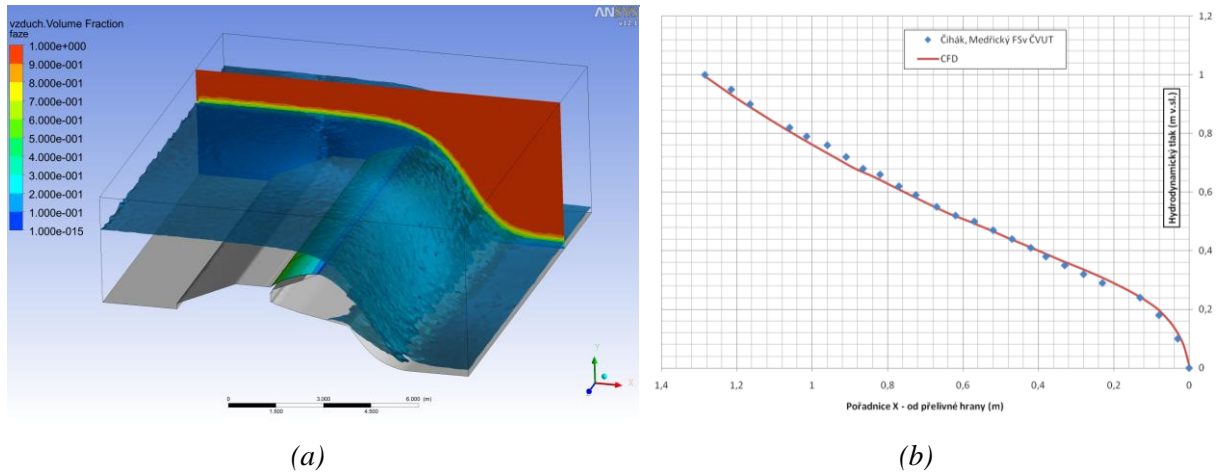


(a)

(b)

Obr. 4: CFD modely: (a) výtok do volna pod segmentem; (b) zatopený výtok pod stavidlem

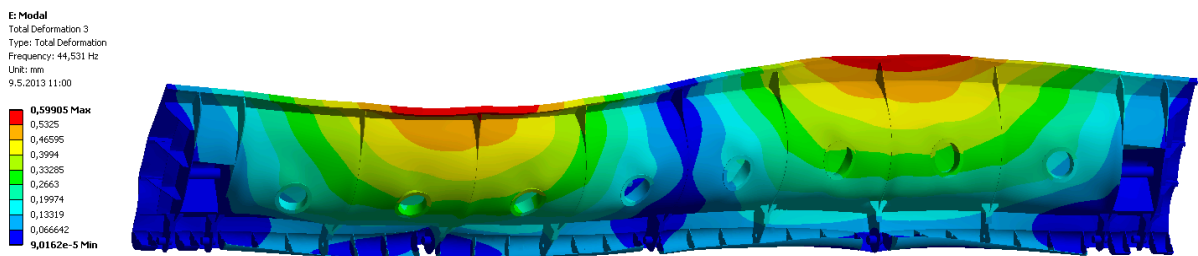
Numerické modely proudění byly řešeny v programu Ansys CFX. Nastavení okrajových podmínek úlohy odpovídalo povaze zkoumaného problému. Vstupní podmínka na vtoku byla obvykle definována pomocí konstantní hladiny. Dolní okrajovou podmínku pak představoval buď volný výtok do nulového statického tlaku, nebo nastavená úroveň dolní hladiny tak, aby se u výtoku zpod uzávěru vytvořil vodní válec nebo byl ovlivněně přepad. Pro volný pohyb vzduchu při stropu modelu byla nastavena podmínka „opening“ a v rovině symetrie modelu byla nastavena podmínka „symmetry“.



Obr. 5: (a) CFD model přepadu přes klapku; (b) srovnání hydrodynamických tlaků experimentálních [5] s výsledkem CFD modelu

Inicializace stacionárního výpočtu byla provedena pomocí homogenního vícefázového modelu voda-vzduch s časovým krokem 0,1 s se standartním modelem turbulence  $k-\varepsilon$ . Dále byl časový krok zvětšen na 0,5 s a následně změněn typ výpočetního vícefázového modelu na „mixture“.

Napěťová, deformační a modální analýza byla provedena v programu Ansys Workbench Mechanical. Vypočtené hydrodynamické tlakové zatížení na uzávěry z předchozí úlohy bylo převzato pro vstupní okrajovou podmínku zatížení. Jedná se tedy o jednocestnou FSI (Fluid-Structure Interaction) analýzu. Provedenou analýzou byly zjištěny maximální hodnoty deformací, maximální napětí (von-Mises) v místech uchycení pojezdů, stejně jako v hradici konstrukci i na příčných výztuhách. Modální analýzou bylo zjišťováno prvních deset vlastních tvarů a frekvencí.



Obr. 6: Ukázka druhého vlastního tvaru s frekvencí 44,5 Hz u oboustranně ovládané klapky

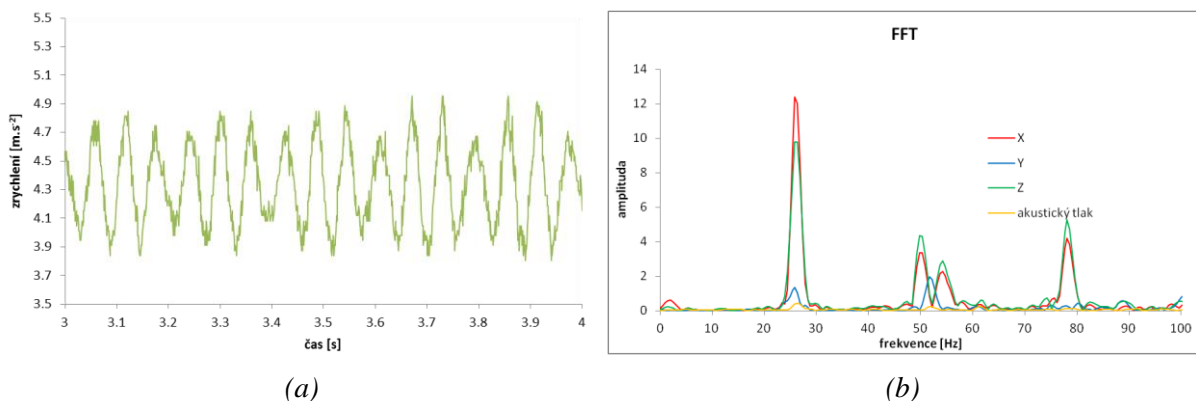
## 6. MĚŘENÍ A ROZBORY REÁLNYCH KONSTRUKCÍ

S ohledem na výše pospané limity fyzikálního modelování podle Froudova zákona mechanické podobnosti a potřebě kalibrovat numerické modely bylo prováděno měření in-situ na konstrukcích, u kterých bylo pozorováno nežádoucí chování, například chvění. Obecně lze říci, že k měření potvrzujícímu absenci či zanedbatelný vliv vibrací v provozních stavech je vhodné přistoupit během přejímacího řízení či zkušebního provozu a zároveň by v rámci provozních zkoušek uzávěrů bylo vhodné provádět periodická měření. V praxi se však k ověření rozsahu vlivu vibrací na konstrukci přistupuje až po zjištění přítomnosti vibrací obsluhou vodního díla či po stížnostech majitelů okolních pozemků obtěžovaných hlukem. Za účelem jednotného hodnocení vlivu negativních projevů na stav konstrukce vznikla na pracovišti katedry hydrotechniky metodika pro měření a vyhodnocení vibrací jezových konstrukcí hydrotechnických staveb [9], která byla certifikována ministerstvem zemědělství ČR v roce 2013 v souladu s podmínkami „Metodiky hodnocení výsledků výzkumu a vývoje“.



Obr. 7: Projevy nežádoucího chvění na reálné konstrukci (a) přepadový paprsek; (b) hladina ve zdrži

Vyhodnocení měření se opírá o časový průběh změřených respektive přepočtených pohybových veličin, zejména zrychlení. Záznam může v principu obsahovat větší množství frekvenčních složek a pro zjištění dominantních frekvencí kmitání lze použít Fourierovu transformaci (nejčastěji FFT) časového průběhu zrychlení, případně akustického tlaku.



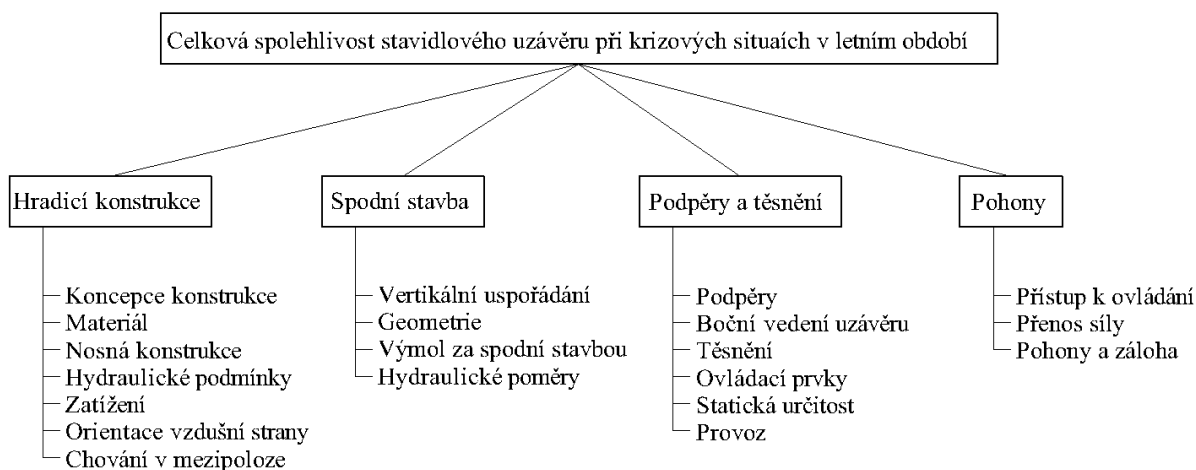
Obr. 8: Ukázky měřených hodnot: (a) digitalizovaný záznam časového průběhu zrychlení ve směru osy z; (b) FFT kompletního záznamu z jednoho měřicího bodu

## 7. METODIKA HODNOCENÍ SPOLEHLIVOSTI

V návaznosti na výše popsany rozsáhlý experimentální a investigativní program byly vytvořeny metodiky pro posouzení spolehlivosti jednotlivých typů uzávěrů (stavidlové, segmentové, klapkové, hydrostatické) [10-13]. S ohledem na specifika jednotlivých typů, respektive jejich slabin a chování za různých průtokových podmínek nelze tyto posuzovat jedním přístupem. A to i přes časté společné spolehlivostní rysy jako jsou zálohové systémy ovládacích mechanismů či transmise při oboustranném ovládní.

Základem každé metodiky je rozložení hodnocení celkové spolehlivosti uzávěru na spolehlivost jednotlivých funkčních celků konstrukce a dále na jejich části s vybranými slabými prvky, jejichž přítomnost zvyšuje pravděpodobnost omezení funkce v kritické situaci. Stanovení vlivu jednotlivých řešení funkčních celků na spolehlivost je přitom určováno pomocí zjištěné nebo stanovené doby mezi poruchami, která je pro daný celek v příslušném prostředí typická. Celkové hodnocení je potom zvláště prováděno pro klimatické podmínky zimní a letní.

Pro názornost uvádíme systém dělení na funkční celky u stavidlových uzávěrů při letním režimu.



Výše pospané metodiky podstupují certifikační proces na ministerstvu zemědělství a po jeho ukončení je bude možné volně využít pro hodnocení spolehlivosti uzávěrů za kritických situacích. Hodnocení probíhá pro každý uzávěr pomocí tabulek binárním systémem vyplňování s jasným výstupem i protokolem o provedené analýze.

## 8. ZÁVĚR

Vzhledem k blížícímu se konci návrhové životnosti významného počtu pohyblivých uzávěrů jak na bezpečnostních přelivech přehrad, tak na jezových konstrukcích a očekávatelným rekonstrukcím jsou pro účely výběru rizikových a hodnocení nově navržených uzávěrů připraveny metodiky pro hodnocení spolehlivosti uzávěrů během kritických situacích. Smyslem metodik je objektivní hodnocení spolehlivosti bez ohledu na velikost či umístění uzávěru.

Metodika jsou zpracovávána na základě statistických údajů o příčinách poruch jak na území České republiky, tak i ve světě po zahrnutí vlivu místních podmínek, získaných a



zpracovaných dostupnými věrohodnými prostředky. Jako další podklady sloužily výsledky rozsáhlého experimentálního programu zahrnujícího jak numerické tak fyzikální modelování zvolených topologií uzávěrů. Výsledky modelování byly konfrontovány s měřením na reálných konstrukcích.

## PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl zpracován na základě výsledků výzkumného projektu financovaného Ministerstvem vnitra ČR č. VG20102014056 a autoři příspěvků by tímto rádi vyjádřili svou vděčností poskytovateli.

## LITERATÚRA

- [1] CASSIDY J. J.: *Gated spillways and dam safety*. Hydropower & Dams, 2000, vol. 6, 71-75.
- [2] POHL R.: *Failure frequency of gates and valves at dams and weirs*. Hydropower & Dams, 2000, vol. 6, 77-82.
- [3] BUBENÍK M.: *Maintenance concerning the reliable operation of spillway gates on dams in Czech Republic* Q79, R20, 20th ICOLD Congress, Beijing, China 2000.
- [4] VOTRUBA L., HEŘMAN J.: *Spolehlivost vodohospodářských děl*. Česká matice technická, Praha 1993
- [5] HOLICKÝ M., MARKOVÁ J.: *Základy teorie spolehlivosti a hodnocení rizik*. ČVUT, Praha 2005
- [6] BUBENÍK M.: *Metody sledování funkce a stárnutí výpustných a přelivných zařízení přehrad a hradicích konstrukcí (jezů) za provozu*. Závěrečná zpráva, PTR č. 616. 1984.
- [7] ČÁBELKA J., GABRIEL P.: *Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice*. Academia, Praha 1987
- [8] ČÁBELKA J., NOVÁK P.: *Hydrotechnický výzkum I*. SNTL, Praha 1964
- [9] NOWAK P. A KOL. *Metodika pro měření a vyhodnocení vibrací jezových konstrukcí*. Certifikovaná metodika. ČVUT v Praze, Praha uznána 2013
- [10] SATRAPA L. A KOL. *Metodika pro rozbor a srovnání spolehlivosti stavidlových uzávěrů hydrotechnických staveb*. Certifikovaná metodika. ČVUT v Praze, Praha proces uznání probíhá
- [11] SATRAPA L. A KOL. *Metodika pro rozbor a srovnání spolehlivosti segmentových uzávěrů hydrotechnických staveb*. Certifikovaná metodika. ČVUT v Praze, Praha proces uznání probíhá
- [12] SATRAPA L. A KOL. *Metodika pro rozbor a srovnání spolehlivosti klapkových uzávěrů hydrotechnických staveb*. Certifikovaná metodika. ČVUT v Praze, Praha proces uznání probíhá
- [13] SATRAPA L. A KOL. *Metodika pro rozbor a srovnání spolehlivosti hydrostatických uzávěrů hydrotechnických staveb*. Certifikovaná metodika. ČVUT v Praze, Praha proces uznání probíhá

## AUTOŘI

Ing. Miroslav Brouček, Ph.D.

ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra hydrotechniky, Thákurova 7, Praha 6, 166 29

e-mail: [miroslav.broucek@fsv.cvut.cz](mailto:miroslav.broucek@fsv.cvut.cz)

doc. Ing. Ladislav Satrapa, CSc.

ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra hydrotechniky, Thákurova 7, Praha 6, 166 29

e-mail: [satrapa@fsv.cvut.cz](mailto:satrapa@fsv.cvut.cz)

Dr. Ing. Petr Nowak

ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra hydrotechniky, Thákurova 7, Praha 6, 166 29

e-mail: [petr.nowak@fsv.cvut.cz](mailto:petr.nowak@fsv.cvut.cz)

Ing. Martin Králík, Ph.D.

ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra hydrotechniky, Thákurova 7, Praha 6, 166 29

e-mail: [martin.kralik@fsv.cvut.cz](mailto:martin.kralik@fsv.cvut.cz)