

MĚŘENÍ VIBRACÍ VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMEROU

VIBRATION MEASUREMENT USING A HIGH-SPEED CAMERA

Luboš Smolík a Roman Pašek

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.

Abstrakt

Moderní vysokorychlostní kamery umožňují nahrávat video ve vysokém rozlišení (HD) snímkovací frekvencí vyšší než 1000 snímků za sekundu. Díky takto vysoké frekvenci snímání jsou ve videu zaznamenány vibrace natáčených objektů. Pokud je video zpracováno algoritmem pro *zvětšení pohybu* (*motion amplification*), je možné zaznamenané vibrace vidět pouhým okem. Příspěvek se zabývá metodikou měření vibrací zařízení a staveb pomocí vysokorychlostní kamery využívající algoritmus pro zvětšení pohybu, diskutovány jsou přednosti této zkušební metody i její limity.

Abstract

A state-of-the-art high-speed camera is capable of recording a video at more than 1000 frames per second (fps) at high definition (HD) resolution. Thanks to such a high frame rate, vibrations of the captured objects are recorded in the video. The vibrations are invisible to the naked eye unless the video is post-processed using a *motion amplification* algorithm. The motion amplification algorithm is introduced in this paper. Furthermore, a typical measurement workflow is described and advantages and limits of the introduced method are discussed.

Úvod

Systém pro měření vibrací kamerou se skládá z vysokorychlostní kamery, profesionálního laserového dálkoměru, počítače, který slouží k ukládání a vyhodnocování dat, a osvětlovací techniky napájené stejnosměrným napětím. Typická podoba systému je ukázána na obr. 1.



Obr. 1: Systém pro měření vibrací kamerou IRIS MX (bez osvětlovací techniky)

Předpokládejme nyní, že jsme pomocí vysokorychlostní kamery pořídili nahrávku vibrujícího zařízení se snímkovací frekvencí 1300 snímků za sekundu. Dle Nyquistova-Shannonova teorému je možné v této nahrávce analyzovat děje, jejichž frekvence je nižší než polovina sním-

kovací frekvence, tj. nižší než 650 Hz [1]. Pokud ale přehrajeme pořízenou nahrávku, budou na ní viditelné pouze vibrace s rozkmitem větším než zhruba 0,5 – 1 pixel.

Proto se pořízené video dodatečně zpracovává algoritmem pro *zvětšení pohybu* (*motion amplification*). Tento algoritmus analyzuje změnu jasu jednotlivých pixelů (obrazových bodů). Každý dostatečně světlý pixel nahrávky může být analyzován a ze změn jasu jsou získány informace o horizontálním a vertikálním pohybu pixelu [2]. Tyto informace mají formu časových řad, které mohou být dále zpracovávány např. frekvenčními filtry nebo rychlou Fourierovo transformací (FFT), která převádí data z časové oblasti do frekvenční [1].

Amplitudy pohybu jednotlivých pixelů jsou vypočítány na základě zadané vzdálenosti mezi objektivem kamery a měřeným povrchem. Proto je součástí měřicího systému laserový dálkoměr. Alternativně je možné měřit vibrace současně kamerou a kalibrovaným snímačem, např. akcelerometrem, a nastavit citlivost měření tak, aby si výsledky odpovídaly.

Frekvenční rozsah závisí na maximální snímkovací frekvenci kamery, obvykle je 0–700 Hz nebo vyšší. Minimální měřitelná amplituda vibrací je uváděna v rozsahu 1 – 2,5 μm .

Postup při měření

Měřicí metoda nevyžaduje žádné zvláštní úpravy povrchu zkoušených zařízení a technologií. I tak je příprava měření poměrně časově náročná.

Prvním krokem při přípravě měření je výběr místa, na kterém bude stát stativ s vysokorychlostní kamerou. Základními kritérii pro výběr místa jsou viditelnost povrchů zkoušených zařízení a technologií a minimální vibrace povrchu, na kterém bude stativ uložen. Měřicí systémy jsou vybaveny elektronickou či optickou stabilizací obrazu, přesto je kvůli minimalizaci chyb měření doporučeno stativ neumísťovat na vibrující povrch. Pokud takový povrch není k dispozici, je nutné stativ umístit na antivibrační podložky.

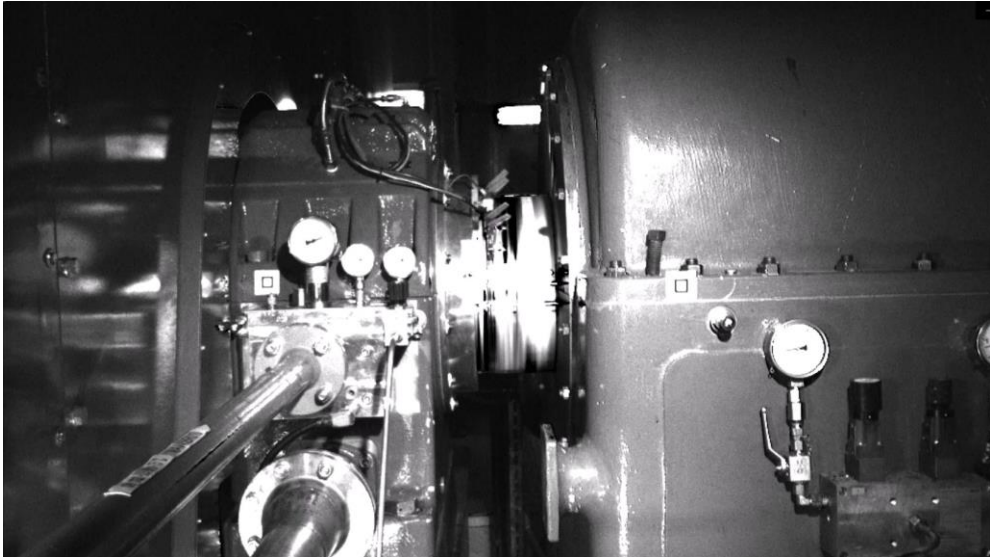
Dále je nutné zajistit dostatečné osvětlení měřených povrchů. Pro osvětlení se používají výhradně světelné zdroje napájené stejnosměrným napětím. Zdroje napájené střídavým napětím, např. ze sítě, mění intenzitu světla [3] a protože algoritmus pro zvětšení pohybu analyzuje změnu jasu pixelů, vedlo by použití takového světelné zdroje k hrubým chybám měření. S výběrem místa pro stativ a výsledným osvětlením zkoušených zařízení a technologií úzce souvisí volba objektivu kamery. Objektiv kamery je vybírán tak, aby měl dostatečnou světelnost a hloubku ostrosti a aby obsáhl celou scénu.

Typická nahrávka zkoušených zařízení a technologií je několik jednotek až desítek sekund dlouhá a je možné ji analyzovat přímo na místě. Problematické části zařízení a technologií se dále snímají v detailu nebo mohou být změřeny standardními kontaktními snímači.

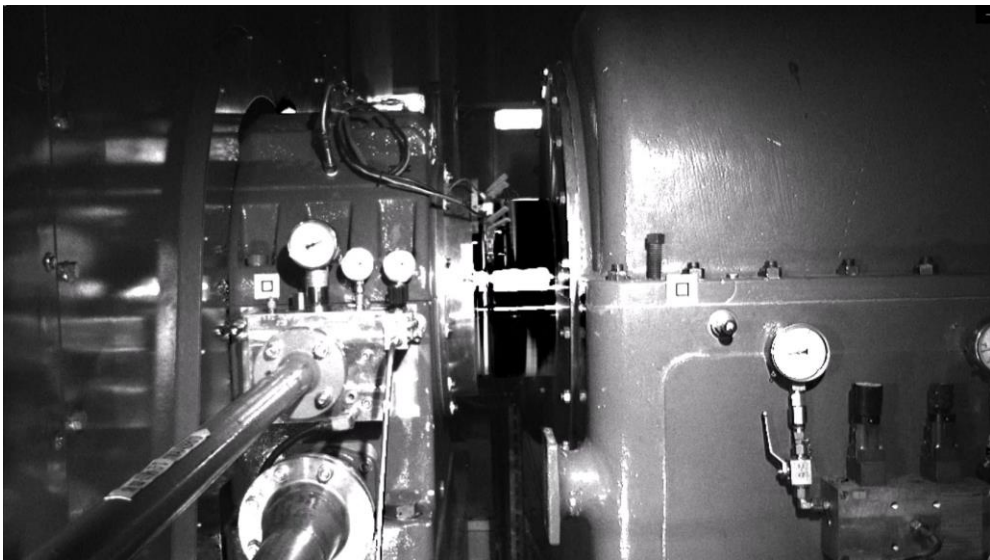
Využití měřicí metody a ukázky výsledků

Nespornou výhodou představené metody je okamžitá vizualizace provozního tvaru kmitu zkoušeného zařízení či technologie. Z vizualizace je možné ihned určit oblasti s vysokými amplitudami vibrací, dynamicky aktivní trhliny, poškozený spojovací materiál, nedostatečnou tuhost spojení jednotlivých částí zařízení apod. Kameru je také možné použít pro současnou analýzu většího množství zařízení nebo velkých konstrukcí. Díky frekvenčnímu rozsahu může být kamera využita i pro měření nízkofrekvenčních vibrací, což se využívá především při zkouškách mostů a lopatek a pylonů větrných elektráren.

Výsledky z měření provozního tvaru kmitu dvojice ložiskových stojanů turbogenerátoru jsou ukázány na obr. 2 a obr. 3. Je zřejmé, že pro zobrazení výsledků jsou statické obrázky nevhodné a použití videa je prakticky nutné. Na obr. 4 jsou ukázány rozdíly mezi obr. 2 a obr. 3.



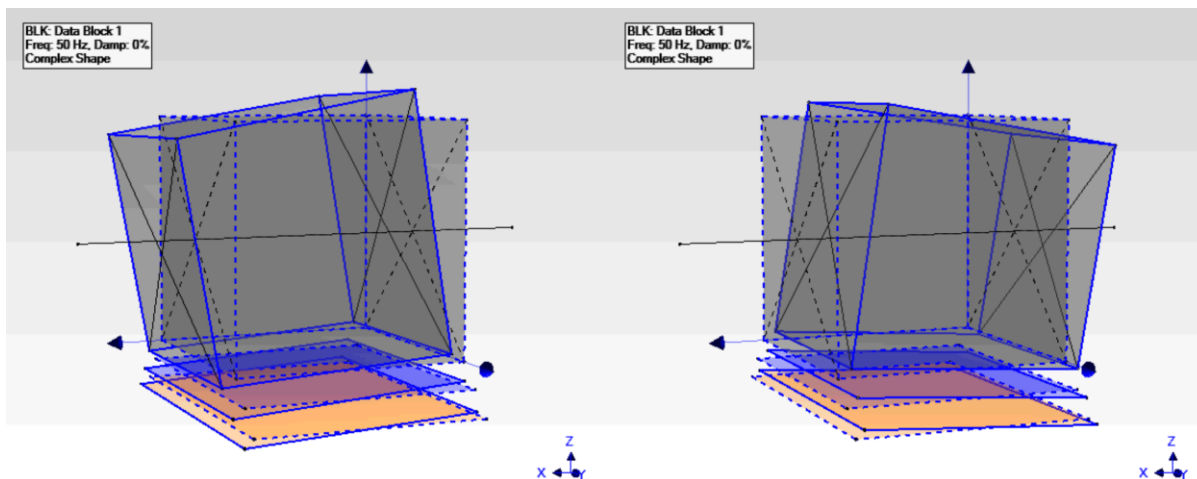
Obr. 2: Provozní tvar kmitu dvojice ložiskových stojanů na frekvenci 50 Hz



Obr. 3: Provozní tvar kmitu dvojice ložiskových stojanů na frekvenci 50 Hz



Obr. 4: Vizualizace rozdílů mezi obr. 2 a obr. 3



Obr. 5: Provozní tvar kmitu pravého ložiskového stojanu na frekvenci 50 Hz

Z obr. 4 je patrné, že se pravý stojan kmitá v axiálním (vodorovném vůči kameře) směru na otáčkové frekvenci 50 Hz, což je patrné především z posuvů pixelů v oblastech a) a b), zatímco levý stojan prakticky nekmitá. Také obě dělicí roviny jsou celistvé a v jejich oblasti nedochází k pružným deformacím stojanů. Dále na levé straně dochází ke značnému kmitání štítu statoru v axiálním směru, což se projevuje změnami v oblasti c). Černá neoznačená oblast uprostřed obr. 4 je způsobena otáčením hřídele a nesouvisí s kmitáním stojanů.

Výsledky měření byly verifikovány standardním měřením provozního tvaru kmitu pomocí snímačů zrychlení. Výsledky verifikační zkoušky jsou ukázány na obr. 5. Odtud je zřejmé, že se pravý stojan naklání, což způsobuje vysoké hladiny vibrací v axiálním a vertikálním směru. Spojení stojanu s příčnickem je ale dobré, uvolnění nebylo indikováno.

Výsledky obou měření si odpovídají a lze tvrdit, že pro danou aplikaci je měření pomocí vysokorychlostní kamery dostatečné.

Závěr

Měření vibrací vysokorychlostní kamerou, které využívá algoritmus pro zvětšení pohybu, je nová metoda, která otevírá celou řadu možností pro moderní diagnostiku zařízení a technologií. Značnou výhodou metody je frekvenční rozsah od 0 Hz a možnost měření většího množství zařízení současně. Díky tomu může být velmi snadno zjištěn výchozí (nultý) stav zařízení a technologií a lokalizovány případné poruchy. Metoda je limitována skutečností, že jde o optickou metodu, která je závislá na kvalitě osvětlení zkoušených zařízení. Určitou nevýhodou je také komplexnost výsledků, která sťažuje jejich prezentaci v tištěných zprávách a protokolech. V tištěných materiálech je nutné použít klasické výstupy ve formě grafů a tabulek. I tyto výstupy lze pomocí software kamery z videozáznamů získat.

Literatura

- [1] Norton, M. P., Karczub, D. G. (2003): *Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers*. Cambridge University Press, Cambridge. ISBN 978-0-521-49561-6
- [2] Hay, J. (2018): *Basics of motion amplification*. Pumps & Systems, Vol. 26, No. 11, pp. 80-81. ISSN 1065-108X
- [3] Sekulovski, D. et al. (2016): *Visual Aspects of Time-Modulated Lighting Systems – Definitions and Measurement Models*. Technical Note, CIE TN 006:2016, CIE, Vienna.