

Bezkontaktní měření vibrací bandážovaných lopatek parních turbín

Tento příspěvek se zabývá bezkontaktním měřením a následným zpracováním vibrací bandážovaných lopatek parních turbín. Technika BTT (blade tip-timing) je založená na měření snímači, které jsou namontovány po obvodu statoru nad rotorem a jsou jimi měřeny špičky lopatek. Tato technika analyzuje čas průchodu lopatek kolem senzorů a z těchto dat jsou vyhodnocovány amplitudy a frekvence vibrací. Problematika měření bandážovaných lopatek vyžaduje specializovaný způsob měření a vyhodnocení, jehož popis je předmětem příspěvku včetně výsledků z monitorování lopatek v provozu.

ÚVOD

U lopatkových strojů velkých výkonů, zejména parních turbín jsou stále častěji používány lopatky s bandáží či vazbou. Aby se předešlo velkým haváriím s rozsáhlými ekonomickými důsledky (viz např. Jaderná elektrárna Temelín v roce 2008), ukazuje se stále naléhavěji potřeba, aby každý nízkotlaký stupeň moderní turbíny byl vybaven bezkontaktním měřicím systémem, který by za provozu podával informaci o namáhání lopatek, jejich poškození a zbytkové životnosti. Dosud známé metody a zařízení bezkontaktní provozní diagnostiky lopatek točivých strojů jsou určeny pro volné lopatky, které mají minimálně o řád vyšší výchylky a pro identifikaci statických a dynamických charakteristik lopatek spojených vazbou při vysokých obvodových rychlostech až 700 m/s nemohou být použity. Požadavek na měření vibrací bandážovaných lopatek v páře vyžaduje volbu zcela odlišných měřicích principů a metod.

Bezkontaktním měřením vibrací lopatek se zabývá řada firem, např. Siemens, Westinghouse, Rolls-Royce, Hood Technology, EDAS, Rotadata, Agilis, aj. Jedná se většinou o aplikace v plynových turbínách a na volných lopatkách. Žádná z těchto firem nemá systém pro měření na lopatkách s bandáží. Problematika parních turbín je principiálně shodná, ale finální řešení je naprosto odlišné. Hlavní role zde sehrávají prostředí páry a rozměry nízkotlakých stupňů. V současnosti je bezkontaktní měření namáhání a poškození lopatek na parních turbínách ve stadiu výzkumu a vývoje. Dosavadní systémy v ČR i analogické systémy jiných výrobců ve světě fungují především v případě volných lopatek a nemohou být pro nové typy lopatek s bandáží a vazbou použity.

POŽADAVKY NA BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ KMITŮ NA LOPATKÁCH S BANDÁŽÍ

Omezujícím faktorem bezkontaktního měření kmitání lopatek je vzorkovací frekvence měření f_s . Úroveň vzorkování má v BTT významný vliv na určení amplitudy kmitání lopatek. Maximální

$$\Delta_a = \frac{2\pi \cdot r_{\text{senz}} \cdot f_{\text{senz}}}{f_s}, \quad (2-1)$$

rozdílení výchylky lopatky Δ_a je popsáno následujícím vztahem:

, kde r_{senz} je poloměr kružnice (měřeno od středu rotoru), na které je umístěn senzor, f_{senz} je maximální frekvence rotace lopatkovaného kola pro měření (typicky 50 Hz). Pro představu o závislosti mezi vzorkovací frekvencí a rozlišením amplitudy

kmitání lopatek byla s využitím vztahu (2-1) vytvořena následující tabulka č. 1 závislosti maximálního rozlišení amplitudy kmitání na frekvenci vzorkování a rotační frekvenci 50 Hz:

f_s	lopatka 1 220 mm + 900 mm poloměr rotoru = 2 120 mm	měřená lopatka 552 mm + bandáž + poloměr rotoru = 1 481 mm
100 kHz (běžné měřicí systémy)	6660.2 μm	4652.7 μm
1 MHz	666.02 μm	465.27 μm
8 MHz (standard osciloskopu)	83.25 μm	58.16 μm
100 MHz	6.66 μm	4.65 μm
500 MHz	1.33 μm	0.93 μm

Tab. 1

V tabulce je uvedeno rozlišení výchylky kmitání - pro porovnání byly zvoleny délky lopatek - 1 220 mm a 552 mm. Je zřejmé, že např. při požadavku maximálního rozlišení blízkého se jednotkám μm (při frekvenci otáčení 50 Hz) bude muset monitorovací systém pracovat se vzorkovacími frekvencemi 500 MHz a vyššími. Požadavek maximálního rozlišení by měl být vztažen vždy k největšímu lopatkovanému kolu stroje. U menších průměrů je při zachování vzorkovací frekvence vždy zaručeno lepší rozlišení měřené výchylky lopatek. Výše uvedená tabulka také ukazuje, že pro měření BTT nejsou vhodné běžné měřicí systémy, které většinou disponují vzorkovací frekvencí do 100 kHz. Maximální rozlišení amplitudy kmitání lopatek se v takovém případě pohybuje v řádu několika milimetrů, což je za hranici předpokládaného kmitavého chování bandážovaných lopatek. Pro měření BTT a obecně pro diagnostický systém, který je schopen online monitorovat lopatky a vyhodnocovat úroveň jejich namáhání, je třeba využít speciální hardware, který umožňuje požadované vzorkování, tedy v řádech stovek MHz (viz. tab č.2).

Jedním z dalších omezujících faktorů bezkontaktního měření bandážovaných lopatek je volba snímače, který bude schopen snímat kmity při vysokých obvodových rychlostech a navíc u lopatek, jejichž bandáž jsou od sebe vzdáleny zlomky mm,

nebo jsou v přímém kontaktu. Vlastnosti měřicích principů resp. snímačů jsou uvedeny v tabulce výše současně s parametry, které je nutné dodržet pro bandážované lopatky. Pokud budeme dále

požadovat, aby snímač nepřesahoval ze statoru do průtočné části, je nutné stanovit rozsah vzdáleností, které by měl snímač měřit. Tato vzdálenost je cca 10 až 15 mm.

VÝVOJ OPTICKÉHO SNÍMAČE PRO MONITOROVÁNÍ BANDÁŽOVANÝCH LOPATEK

Vzhledem k výše uvedenému byl při vývoji sondy pro bandážované lopatky zvolen optický princip, jehož základním kamenem je volba laserového zdroje. Při určování vhodných parametrů zdroje laserového paprsku je třeba brát v úvahu především útlum paprsku v prostředí vodní páry. Je třeba zvolit vhodnou vlnovou délku zdroje, aby byl paprsek průchodem prostředím co nejméně utlumen.

Vycházíme z charakteristik absorpce elektromagnetického záření vodou v závislosti na vlnové délce záření. Tato charakteristika je ukázána na obrázku 1. Při výběru vlnové délky laserového zdroje musí být respektován i proměnlivý index lomu na rozhraní vody a páry v závislosti na vlnové délce světla. Ulpí-li na snímači kapka vody, musí být index lomu co nejmenší, aby se souběžný paprsek světla na oblé ploše co nejméně lámal do různých směrů. To platí i pro pohybující se kapky vody v pracovní tekutině. Na těchto útvarech dochází k rozptylování paprsku. Čím bude menší

Senzor	Max. měřicí vzdálenost [mm]	Odezva	Průměr snímané oblasti [mm]
optický (s čočkou)	25	0,01 μs (100 MHz)	0,2 až 0,4
optický (bez čočky)	10	0,01 μs (100 MHz)	2 až 4
elektromagnetický	5	20 μs (50 kHz)	10 až 30
vřívé proudy	5	10 μs (100 kHz)	10 až 30
kapacitní	2	3 μs (333 kHz)	10 až 30
Požadavek pro bandážované lopatky	10 až 15	0,1 až 0,01 μs	0,5 až 1

Tab. 2

index lomu, tím méně záření bude odchýleno od původního směru. Index lomu roste s klesající vlnovou délkou záření.

Kapíčky se pohybují s pracovní tekutinou vysokou rychlostí. Kapíčka vody může na sklíčku ulpět díky vysokým rychlostem pracovní tekutiny krátkodobě. Tyto vlivy na rozptyl paprsku tedy nemají dlouhodobý vliv a projevují se spíše jako šum měření.

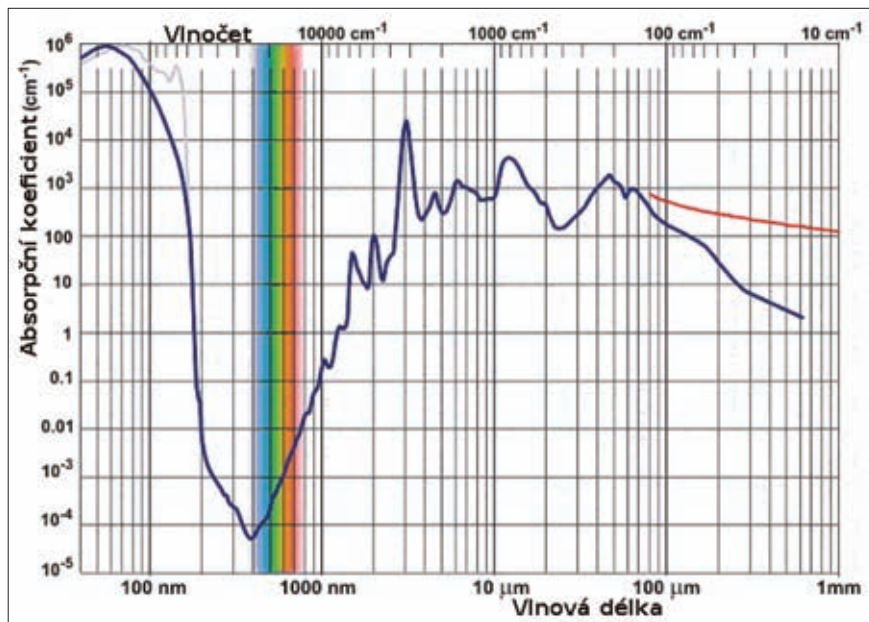
Při konečném výběru je třeba vytvořit kompromis mezi malým útlumem paprsku a malým indexem lomu. Útlum paprsku přibližně exponenciálně roste s vlnovou délkou a index lomu přibližně exponenciálně klesá s vlnovou délkou.

Také je třeba do výběru zahrnout cenu aparatury. Laserový zdroj byl vybírán s vlnovou délkou nacházející se mezi jednou třetinou až polovinou rozsahu vlnových délek viditelného spektra. Byl zvolen zdroj s vlnovou délkou 532 nm, jež se nachází v zelené oblasti viditelného spektra elektromagnetického záření.

Konstrukce snímače

Vlastní snímač je konstruován s využitím skleněných optických vláken. Skleněná vlákna umožňují použití snímače i do vysokých teplot (až 500°C). Pouzdro snímače tvoří trubička z nerez oceli, jež má po délce proměnlivý vnitřní průřez. Vnější průřez je stálý, v polovině přecházející do závitů rozměru M7 (viz obrázek 2).

Na čelní straně snímače se nachází krycí safírové sklíčko o průměru 4,4 mm a tloušťce 2 mm zalisované do pouzdra, které je odolné proti poškozování proudící párou. Za sklíčkem je umístěna sférická čočka. Přívodní optické vlákno je pevně

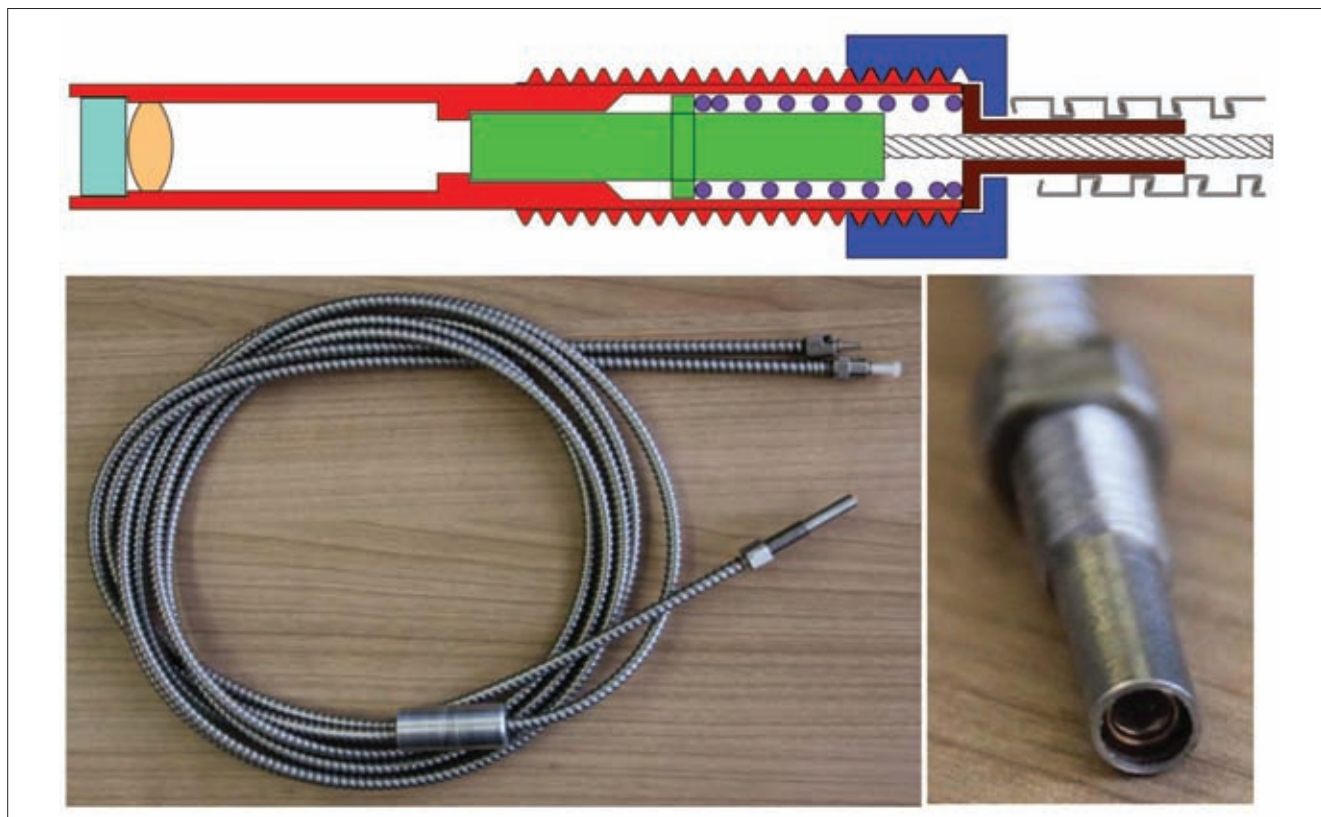


Obr. 1 – Absorpce elektromagnetického záření vodou převzata a upravena z [3]. Světlo modře vodní pára, tmavě modře voda, červeně led

spojeno s šesti výstupními optickými vlákny, která jsou po obvodu kruhu, jehož středem prochází přívodní optické vlákno (koaxiální provedení). Tento pevně spojený svazek vláken je přitlačován k zúžení vnitřního průměru pružinou, která kompenzuje případné nerovnoměrné rozpínání vnitřku snímače oproti pouzdru při změnách teplot. Zúžení vnitřního průměru se nachází přibližně uprostřed sondy. Konec optických vláken je tedy trochu vzdálen od čočky, podle vzdálenosti konce optických vláken a čočky je paprsek zaostřen na určitou vzdálenost

od sondy. Pružina se v zadní straně sondy opírá o průchodku, jež je přitlačena k pouzdru matkou.

Přes trubičku průchodky, jež vychází ze sondy, je převlečena kovová pancéřová hadice typu kopex. Svazek optických vláken prochází průchodkou a pokračuje hadicí typu kopex až k rozdvojení, které je umístěn mimo těleso turbíny a v němž rozdělují své cesty přívodní optické vlákno a výstupní optická vlákna. Oba druhy vláken pokračují svou vlastní kovovou ochrannou hadicí k ST konektorům. K výstupnímu ST konektoru je připojena lavinová



Obr. 2 – Návrh konstrukce optické sondy a její realizace

fotodiody a zdroj laserového paprsku je připojen k ST konektoru přírodního optického vlákna.

MONITOROVÁNÍ BANDÁŽOVANÝCH LOPATEK - OVĚŘENÍ FUNKCE SNÍMAČE

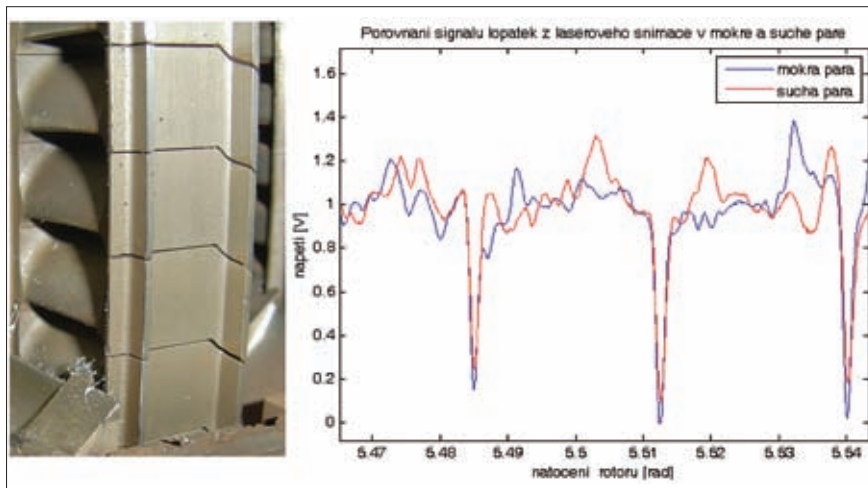
Ověření funkce optického snímače, konstruovaného pro monitorování bandážovaných lopatek probíhalo na experimentální turbíně o výkonu 1 MW s krátkými bandážovanými lopatkami. Cílem experimentů bylo především ověření schopnosti monitorovat lopatky v parním prostředí i za podmínek vlhké páry, která je přítomna na posledních kolech NT stupňů turbogenerátorů. Na 1 MW turbíně byl naměřen vývoj páry od velmi vlhké (po najetí turbíny) až po páru suchou (po zhruba hodině provozu).

Jako zdroj světla pro sondu byl použit polovodičový laser 532 nm s výkonem 250 mW na výstupu z optického vlákna laseru. Pro snímání intenzity odraženého světla byla použita fotodiody HFD3002. Lavinová fotodiody byla připojena na budící napětí 50V, které snížilo její dobu odezvy.

Snímač byl instalován ve statoru ve vzdálenosti 10 mm od bandáže lopatek (vývrt mezi voštinové ucpávky). Byly snímány mezery mezi bandážemi lopatek velikosti 0,5 mm. Na obrázku 3 jsou ukázány výsledky měření. V průběhu celého experimentu, kdy proudící pára obsahovala různé množství vodních kapek až po suchou páru, byly mezery mezi bandážemi plně detekovatelné. Míra vlhkosti páry se nevýznamnou měrou projevuje na úrovni odraženého světla od bandáží lopatek. Hrany lopatek a část signálu odpovídající mezeře mezi lopatkami je v tomto smyslu prouděním páry neovlivněna.

ZÁVĚR

Úloha bezkontaktního monitorování bandážovaných lopatek parních turbín je problematikou, která vyžaduje vývoj nových snímačů, elektroniky i metod vyhodnocení. Vzhledem k požadavkům, kterým je nutné v této úloze vyhovět, byl vyvinut optický vláknový snímač, jehož parametry dovolují použití i pro náročné prostředí ST a VT dílů parních turbín. Snímač byl testován na parní turbíně o výkonu 1 MW s cílem ověřit jeho funkčnost v prostředí vlhké páry odpovídající koncovým stupňům NT rotorů, tedy v prostředí, které



Obr. 3 – Experimentální ověření konstrukce snímače - měření bandáží lopatek v suché a mokré páře

by mohlo být pro laserový paprsek limitující. Výsledky ukazují, že míra vlhkosti páry a přítomnost vodních kapek v páře nijak významně neovlivňují detekci bandáží lopatek, resp. monitorování kmitání lopatek.

Vývoj optického snímače je prvním milníkem ve vývoji monitorovacího systému pro bandážované lopatky. Současně probíhá i vývoj pokročilé elektroniky (na bázi FPGA čipu), která umožňuje vysoké vzorkování signálu (100 MHz) s vysokou mírou předzpracování signálů před či po digitalizaci.

**Jindřich Liška,
Jaromír Strnad,
Eduard Janeček,
Katedra kybernetiky,
Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň**

Literatura

- [1] Zielinski, M., Ziller, G.: Noncontact vibration measurements on compressor rotor blades, Electronics and Measurement Technology Division. MTU München, A DaimlerChrysler Company, Dachauer Strasse 665, D-80995 München, Germany
- [2] Zielinski, M., Ziller, G.: Noncontact Blade Vibration Measurement System for Aero Engine Application. MTU Aero Engines GmbH Engine Control and Testing Division 80995 München, Germany
- [3] Chaplin, M.: Water Absorption Spectrum [online], London South Bank University [cit. 31. 8. 2012] <<http://www.lsbu.ac.uk/water/vibrat.html>>.
- [4] Beuseroy, P., Lengellé, R.: Nonintrusive turbomachine blade vibration measurement system. System Modelling and Dependability Group - FRE CNRS 2848, Charles Delaunay Institute, Université de Technologie de Troyes BP2060 10010 TROYES Cedex, France
- [4] Liška, J., Strnad, J., Janeček, E.: Bezkontaktní měření vibrací bandážovaných lopatek s využitím laserového snímače. Technická zpráva. ZČU Plzeň, 2011
- [5] Mark R., W., James W., R., Christopher E., H., Timothy J., B.: Testing of a Microwave Blade Tip Clearance Sensor at the NASA, Glenn Research Center, Glenn Research Center, Cleveland, Ohio
- [6] Kadoy, Y., Mase, M., Kaneko, Y., Umemura, S., Oda, T., Johnson, M.C.: Noncontact Vibrational Measurement Technology of Steam Turbine Blade. JSME International Journal, Vol. 38, No. 3, 1995
- [7] Strnad, J.: Metody bezkontaktního monitorování kmitání bandážovaných lopatek. Diplomová práce. ZČU Plzeň, 2011f

Contactless measurement of vibration of bandaged blades of steam turbines

This article deals with the contactless measurement and subsequent processing of vibration of bandaged blades on steam turbines. The BTT (blade tip timing) technology is based on measurement using sensors mounted along the perimeter of the stator above the rotor, used to measure blade tips. This technology analyses the time the blades pass the sensors and these data are used to evaluate the amplitudes and frequencies of vibration. The issue of measuring bandaged blades requires a specialized method of measurement and evaluation whose description is given in the article, including the results of blade monitoring in service.

Бесконтактное измерение вибрации бандажированных лопастей паровых турбин

Эта статья рассказывает о бесконтактном измерении и последующей обработке данных о вибрациях бандажированных лопастей паровых турбин. Техника БТТ (blade tip timing) основана на измерениях датчиков, которые намонтированы по цепи статора над ротором и измеряются ими кончики лопастей. Эта техника анализирует время прохождения лопастей вокруг сенсоров и из этих данных высчитываются амплитуды и частоты вибраций. Сложное измерение бандажированных лопастей требует применения специального способа измерения и оценки. Описание этого способа является предметом этой статьи, включая результаты мониторинга лопастей в процессе эксплуатации.