

Sledování únavové životnosti lopatek parních turbín

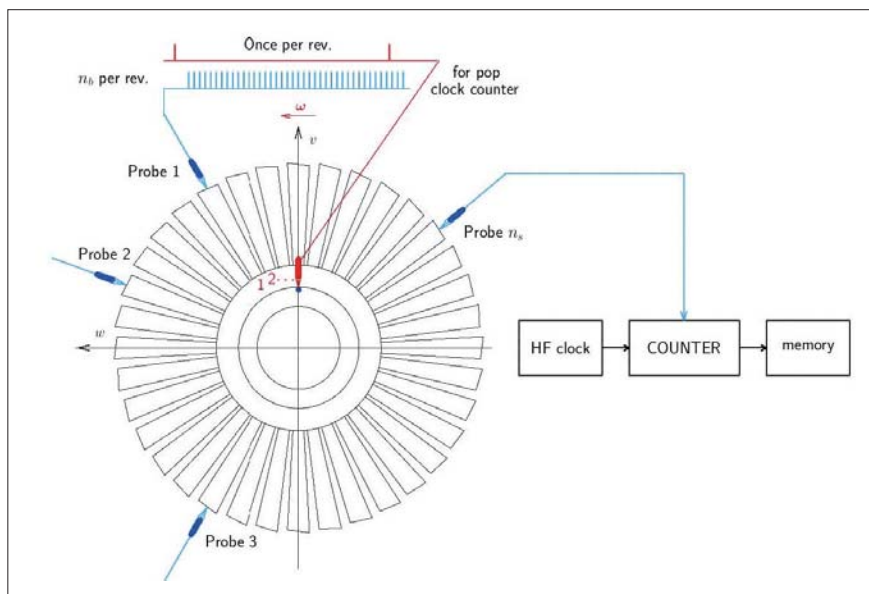
Vývoj nových velkých turbín přináší nejen zvýšení účinnosti, ale i problémy, k nimž patří i únavové poškození oběžných lopatek zejména posledních stupňů. Pro sledování tohoto problému se zavádí měření kmitání všech lopatek vybraných stupňů metodou označovanou jako BTT (Blade Tip Timing) založenou na přesném měření časů průchodů špiček lopatek kolem čidel umístěných ve statoru stroje. Touto metodou lze zjišťovat úroveň vibrací jednotlivých lopatek měřeného oběžného kola a jejich rezonanční frekvence. Ve VZÚ Plzeň s.r.o. se vyvinulo zařízení RFLB (Residual Fatigue Life of Blades) realizující postup, na jehož základě se výstupní data z BTT zpracovávají až do životností jednotlivých lopatek měřeného oběžného kola.

ÚVOD

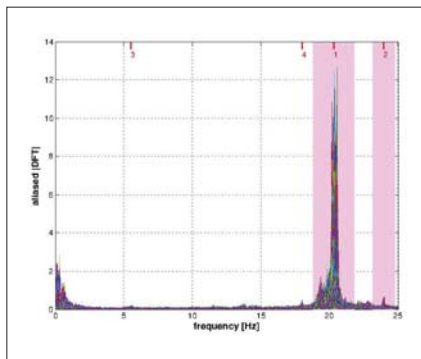
Oběžné lopatky posledních stupňů parních turbín pracují v nadzvukovém režimu proudění v agresivním prostředí mokré páry. S ohledem na jejich délku, hmotnost i napětové poměry od odstředivých sil, přenášeného výkonu a vibrací patří oběžné lopatky k nejhroženějším částem turbín. Každá neplánovaná odstávka stroje pro poruchu lopatkování je spojena s extrémními finančními ztrátami, ať už za nevyrobenou elektrinu, nebo za penále za nedodanou nasmlouvanou energii. Výrobci turbosoustrojí vybavují proto některé stroje zařízeními pro monitorování vibrací oběžných lopatek. Ona zařízení, označovaná jako BTT (Blade Tip Timing), jsou založena na měření pohybu špiček lopatek na vybraných stupních.

Zařízení BTT odečítá z paměti stavy čítačů v okamžicích průchodů špiček kmitajících lopatek za rotace kolem senzorů upevněných ve statoru stroje, tj. časová data a ta ukládá do datových souborů, ze kterých následně vyhodnocuje frekvence, útlumy a amplitudy kmitání (viz obr. 1). Tyto informace jsou pochopitelně velmi cenné jak pro výrobce, tak i pro provoz elektrárny, protože jimi lze zjišťovat vliv provozních parametrů na úroveň kmitání lopatek. Bohužel nemohou však nic říci o okamžitém stavu lopatkování, který se dá zčásti odhalit až pečlivou fyzickou kontrolou při plánované odstávce a rozebraném stroji.

Nové zařízení RFLB (Residual Fatigue Life of Blades) je nezávislou nadstavbou systémů BTT, která poskytuje operátorovi cenné informace o okamžitých změnách i o poškození lopatek měřeného kola v daném okamžiku. Zařízení se připojuje přes běžnou lokální síť k úložišti výstupních souborů z BTT a ty dále zpracovává a kumuluje do informací o současném stavu poškození každé lopatky na měřeném oběžném kole. V případě nutnosti varuje obsluhu o blízkosti vyčerpání zbytkové únavové životnosti konkrétních lopatek. To umožňuje včas plánovat dobu odstávky pro otevírání turbínových těles pro výměnu významně poškozených lopatek za nové, objednávat přiměřený počet náhradních lopatek pro výměnu a identifikovat výkonové oblasti provozu stroje s velkým dopadem na únavová poškození, jímž je účelné se vyhnout. To vše vede k úspornému režimu provozu i údržby extrémně drahých zařízení, jakými turbosoustrojí v klasických a jaderných elektrárnách jsou. V současnosti je jedno zařízení RFLB nainstalováno v jaderné elektrárně Temelín na turbosoustrojí TG2.



Obr. 1 – Princip funkce systémů BTT



Obr. 2 – Moduly zkeslených Fourierových spekter 90 lopatek předposledního kola parní turbíny

Systém RFLB pracuje v interaktivním režimu s operátorem. Pokud zjistí, že jsou v úložišti dosud nezpracované soubory, začne je automaticky zpracovávat. Soubory s chybami systém odmítne a přikročí ke zpracování dalšího souboru. O všech zpracováních vytváří protokol, ve kterém je buď uveden důvod odmítnutí, nebo výsledné přírůstky poškození. Zpracování probíhá v následujících etapách:

PŘÍPRAVA ZPRACOVÁNÍ

Příprava zpracování souborů systémem RFLB konkrétního měření má dvě etapy:

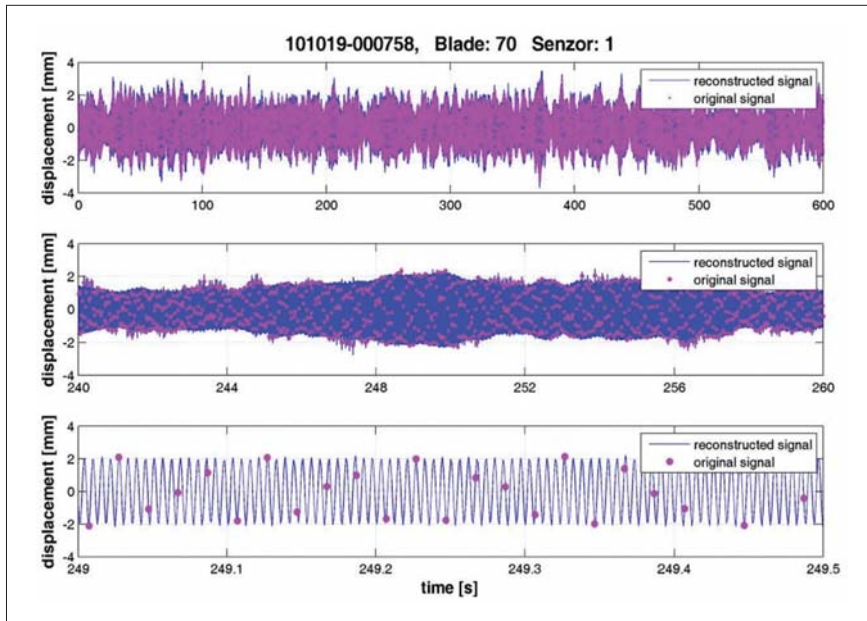
Etapa 1. Realizuje se v dostatečném odstupu od zahájení měření a jeho zpracování, a to obvykle na pracovišti vybaveném pro dynamické analýzy pružných těles. Je neodmyslitelnou částí celého měření. V ní se realizuje za pomoci

komerčního programu ANSYS a vlastních marker detailní modální analýza olopatkováného disku, který bude měřen systémem BTT, a následně jeho výstupy zpracovány zařízením RFLB. Výsledkem modální analýzy jsou vlastní frekvence, frekvenční přenosy jednotkových obvodových výchylek špiček lopatek do kritických míst, v nichž lze očekávat vznik trhlin, a v nich napětové tenzory, které se následně využijí v etapě 2 při vlastním zpracovávání zaznamenaných souborů.

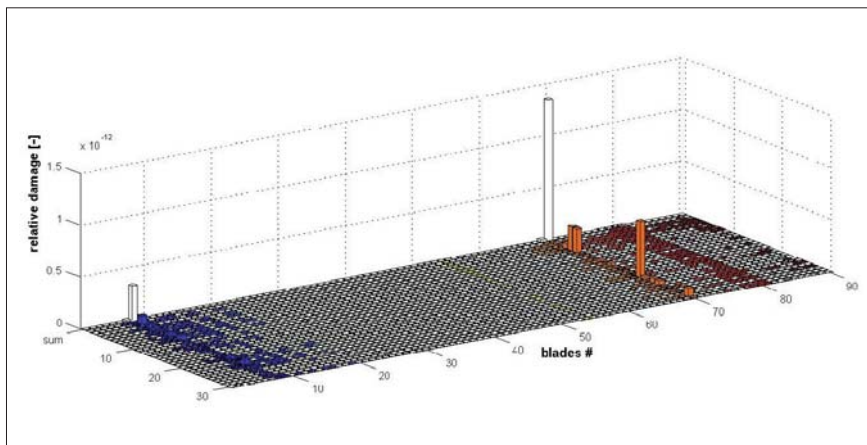
Etapa 2. Realizuje se již v elektrárně, nejlépe před zahájením vlastního měření. V samém počátku běhu zařízení RFLB se musí zadat základní informace o úloze, a to jednak pomocí souboru s výsledky etapy 1, numerické modální analýzy MKP modelu lopatky s eventuálními vazbami, jednak ručně z klávesnice řídicími proměnnými, které budou ovládat šíři zpracování všech následujících měření, a to až do doby nového startu systému. Jimi lze operativně ovládat např. grafické výstupy operací nebo jejich ukládání do souborů.

ČTENÍ SOUBORŮ

Po skončení druhé etapy přípravy zpracování je systém RFLB připraven zpracovávat data vygenerovaná systémem BTT. To nastane v okamžiku, kdy systém RFLB nalezne v úložišti souborů alespoň jeden datový soubor z BTT. Při více souborech v úložišti je systém RFLB začne zpracovávat od nejstaršího, a protože je dostatečně rychlý, dojde v jistém čase



Obr. 3 – Diagramy průběhů vzorkovaného a rekonstruovaného signálu pohybu špičky 70. lopatky zaznamenaného 1. senzorem aparatury BTT
a) celé měření (10 minut),
b) výseč měření (20 vteřin),
c) úsek v trvání 0,5 vteřiny. Zde poloha měřených vzorků na rekonstruovaných liniích svědčí o správnosti postupu rekonstrukce.



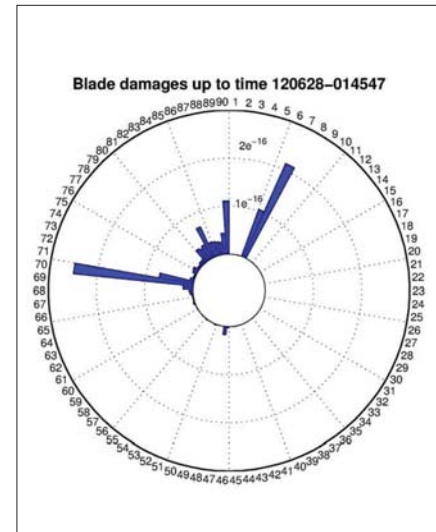
Obr. 4 – Relativní poškození všech 90 lopatek vyvolané 10 minutovým provozem rozděleným na 30 dvacetivteřinových úseků. V první řádce označené „sum“ je celkové poškození vzniklé za 600 vteřin. Z přírůstků poškození v čase u 70. lopatky je patrna silná nelineární závislost poškození na mohutnosti vibrací (srovnej s obr. 3)

ke stavu, že musí čekat, až systém BTT dodá další soubor. Jakmile se objeví, vstupní modul přečte binární soubory dat, vybere z nich potřebné informace o časech průchodů referenční značky a špiček všech lopatek kolem senzorů. Z časových řad průchodů odstraní trendy, nestacionarity ve střední hodnotě a přeplnění čítecích registrů. Pokud směrodatná odchylka některé z časových řad překročí přijatelnou míru, je příslušný senzor odmítnut z dalšího zpracování pro pravděpodobnou chybu v měření. Pak se ve všech zbylých řadách podrobí diskretní Fourierově transformaci, jíž se získají jejich zkreslená Fourierova spektra (obr. 2). Ke zkreslení dochází vždy, není-li vzorkovací frekvence vyšší než dvojnásobek příslušné frekvence. To je i případ lopatek, které jsou vzorkovány otáčkovou frekvencí, zatímco jejich vlastní frekvence jsou vyšší.

REKONSTRUKCE SIGNÁLŮ

Vzorky z časových řad výchylek špiček lopatek jsou velmi řídké, takže nemohou být přímo použity k výpočtu poškození. Protože únavové poškození je závislé na extrémech poškozujícího napětí, je zapotřebí pro odhady poškození skutečné průběhy procesů rekonstruovat. Podle Shannonova-Kotelnikova kritéria to pro řídké vzorkované signály nejde. My tuto překážku obejeme využitím znalostí o vlastních frekvencích lopatek za rotace stanovené předem modální MKP analýzou a tenzometrickým měřením v Campbellově stroji.

Na základě znalosti, jak vznikala zkreslená rezonanční pásma, můžeme je přesunout do rekonstruovaných diskretních Fourierových spekter a ta potom s využitím inverzní diskretní Fourierovy transformace převést na



Obr. 5 – Aktuální poškození nakumulované za celou dobu provozu

rekonstruované signály pohybu špiček lopatek, jak byly zaznamenány jednotlivými senzory (obr. 3). Ukazuje se, že rekonstruované signály jsou, stejně jako jejich vzorky, značně nestacionární. To vede k závěru, že využití metod odhadů únavového poškození z histogramů vzorků vede ke značně nepřesným odhadům a že použitý postup je optimální.

ODHADY POŠKOZENÍ

Pro odhady přírůstků poškození z daného měření se pro každou lopatku a kritické místo nejdříve konstruuje časové řady tzv. poškozujícího napětí stanoveného z tenzorů napjatosti v kritických místech určených předem při modální analýze lopatky. Špičky těchto řad se dekomponují metodou označovanou jako „stěkáni deště“ na série plných (uzavřených) cyklů a půlcyklů a na ně se aplikuje některá z hypotéz únavového poškození, v našem případě hypotéza Palmgrenova-Minerova (viz obr. 4). Tyto přírůstky poškození za jednotlivá měření se kumulují postupně, takže v každém okamžiku je k dispozici aktuální poškození každé lopatky (obr. 4).

Kromě toho se sledují i průvodní jevy poškození, jako jsou poklesy rezonančních frekvencí jednotlivých lopatek. Po dosažení kritické hodnoty poškození, anebo poklesu některé rezonanční frekvence se vydá varování pro obsluhu, která může zahájit další kroky. Každý den vystoupí polární diagram zobrazující globálně nakumulované poškození všech lopatek na měřeném kole (obr. 5). Operátor může kdykoliv ve vhodný okamžik přerušit automatický běh zpracování a vrátit se k libovolnému datovému souboru s požadavkem na detailnější zpracování, pokud to považuje za účelné. Měření může mezitím pokračovat bez přerušení, jen nově vznikající soubory se ukládají do úložiště BTT nezávisle na stavu řešení v systému RFLB. Po skončení práce operátora systém pokračuje ve zpracování měření v automatickém režimu od místa přerušení.

ZÁVĚRY

Zařízení RFLB je od poloviny roku 2015 ve zkušebním provozu v jaderné elektrárně Temelín. S ohledem na možnost sledování růstu poškození a to i do oblasti gigahertzové únavy umožní dosáhnout značných úspor v provozu stroje, které mohou vzniknout jak z přejíždění pásem výkonů s velkým poškozujičím účinkem na lopatkování, tak i z možnosti odmítnutí demontáže některých turbínových těles při malých poškozeních lopatek. Naproti tomu může zabránit havárii lopatek po prodělané mimořádné události, pokud

RFLB zjistí, že poškození dosáhlo již stupně, kdy není možno stroj bez velkého rizika dále využívat.

Zavedení systému RFLB do běžného provozu v místech vybavených systémem BTT zajistí podstatně větší spolehlivost celého turbosoustrojí, případně sníží nutnost otevírání stroje, vydá varování při rychle rostoucí kumulaci poškození a umožní lepší plánování oprav a zásob náhradních lopatek.

LITERATURA

[1] Balda, M., Červená, O. (2015): Experimental

Stress Analysis 2015. Český Krumlov, Czech Republic. CTU in Prague, Faculty of Civil Engineering, Department of Mechanics. ISBN 978-80-01-05734-6

Poděkování

Autoři systému RFLB by chtěli vyjádřit poděkování TAČR za přidělení projektu Centra kompetence a vedení VZÚ Plzeň za vytvoření podmínek pro jeho úspěšné řešení.

Miroslav Balda, Olga Červená,
Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.

Monitoring of fatigue lives of steam turbine blades

A development of new big turbines brings not only an increase of efficiency, but also problems to which belong also fatigue damages of blades, namely in last stages. Measurements of all blade vibrations at selected wheels are introduced by the method denoted as BTT Blade Tip Timing, which is based on an accurate measurement of times, when blade tips are passing sensors built in the machine stator. It enables to detect vibration levels and resonant frequencies of particular blades on the measured wheel. The equipment RFLB – Residual Fatigue Life of Blades, developed at VZÚ Plzeň, implements a procedure of processing output data coming from BTT up to fatigue lives of particular measured wheel blades.

Мониторинг срока эксплуатации и усталости лопастей паровых турбин

Дальнейшее усовершенствование новых больших турбин приносит не только повышение эффективности, но и проблемы, связанные с сокращением срока эксплуатации и усталостных повреждений вращающихся лопастей, особенно последних ступеней. Для наблюдения за этим явлением вводится измерение колебаний всех лопастей выбранных ступеней при помощи метода, называемого BTT (Blade Tip Timing), основанного на точном измерении времени прохода концов лопасти возле датчиков, размещенных в статоре. При помощи этого метода можно определять вибрацию отдельных лопастей наблюдаемого вращающегося колеса и их резонансные частоты. В исследовательском институте VZÚ Plzeň s.r.o. было разработано оборудование RFLB (Residual Fatigue Life of Blades), применяющее метод, на основе которого полученные с датчиков BTT показания обрабатываются вплоть до окончания срока эксплуатации отдельных лопастей контролируемого вращающегося колеса.

8. mezinárodní odborná konference

Waste to Energy 2016 Energetické využití odpadu

31. 3. - 1. 4. 2016, Clarion Congress Hotel Prague



w2e.afpconference.com

Organizátor:

AFPoweragency