

ENERGETICKÉ CENTRUM KOMPETENCE: VYBRANÉ VÝSLEDKY DRUHÉ FÁZE ŘEŠENÍ PROJEKTU

ENERGY PRODUCTION COMPETENCE CENTRE: SELECTED RESULTS OF THE SECOND STAGE OF THE PROJECT SOLVING

Pavel Polach^{a)}, Václav Černý^{b)} a Jaroslav Václavík^{a)}

^{a)} Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.

^{b)} Doosan Škoda Power s.r.o.

Abstrakt

V příspěvku jsou stručně uvedeny vybrané výsledky řešení projektu Centra kompetence „Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky“ dosažené v roce 2016. Řešení projektu bylo zahájeno v roce 2012, od roku 2016 pokračuje řešení projektu podle jeho aktualizované verze. Řešení projektu bude zakončeno v roce 2019. Hlavním cílem projektu je dlouhodobé zajištění bezpečných, spolehlivých a ekonomicky dostupných klasických tepelných a jaderných zdrojů elektrické energie.

The paper presents in brief selected results of the Competence Centre Project “Centre of research and experimental development of reliable energy production” achieved in 2016. The project solving started in 2012, since 2016 the project has been solved according to its actualised version. Project solution will finish at the end of 2019. The project main aim is a long-time provision of safe, reliable and economically feasible nuclear and conventional thermal sources of electric power.

1. Úvod

Hlavním cílem projektu „Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky“ [1], [2], [3], [4] (v rámci programu Centra kompetence Technologické agentury České republiky) je dlouhodobé zajištění bezpečných, spolehlivých a ekonomicky dostupných klasických tepelných a jaderných zdrojů elektrické energie. Aplikace výsledků výzkumu a vývoje nových technologií a materiálů přispěje ke zvýšení konkurenceschopnosti výrobců a provozovatelů energetických zařízení.

Řešitelskými pracovišti jsou Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. (příjemce projektu), ČEZ, a. s., Doosan Škoda Power s.r.o., Západočeská univerzita v Plzni, České vysoké učení technické v Praze, MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o., TES s.r.o. a ENERGOSERVIS, spol. s r.o. Chomutov. Řešení projektu probíhá v rámci tzv. pracovních balíčků [1], [2], [3], [4]. Jejich věcná náplň byla stanovena tak, aby jejich řešením byl splněn hlavní cíl projektu. Aktualizovaná odborná náplň jednotlivých pracovních balíčků, podle které je řešen projekt od roku 2016, byla prezentována na konferenci Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách v témže roce [4].

V roce 2016 mělo být (a bylo) dosaženo podle aktualizované verze řešení projektu celkem 14 výsledků (kromě souhrnné zprávy o řešení projektu):

1. ověření vhodných softwarových nástrojů pro výpočty statických a dynamických vlastností radiálních kluzných ložisek parních turbín,
2. vyvinutí algoritmů pro měřicí systém torzních vibrací turbín,
3. metodika stanovování stupně kumulativního poškození materiálů energetických zařízení a jejich zbytkové životnosti při současném působení creepového a únavového degračního procesu,
4. inovovaná metodika pro hodnocení únavové životnosti lopatek parních turbín,
5. metodika modelování vibrací perturovaných olopatkovaných disků,

6. metodika modelování vibrací rotorů generátorů opatřených Lafoonovými zářezy,
7. analýza tlakových polí a silových účinků proudící tekutiny na lopatky oběžného kola parní turbíny,
8. shrnutí výsledků optimalizace depozičních parametrů vybraných materiálů zároveň stříkaných povlaků určených pro vysokoteplotní aplikace,
9. shrnutí výsledků zkoušek lomové houževnatosti vybraných ocelí používaných pro výrobu komponent parních turbín,
10. metodika pravděpodobnostního hodnocení spolehlivosti a predikce životnosti parních turbín a dalších energetických zařízení,
11. metodika termovizního měření v systému prediktivní údržby energetických zařízení,
12. metodika měření spektrální emisivity povrchů materiálů energetických zařízení v oblasti pokojových teplot s použitím FTIR infračerveného spektrometru,
13. metodika zkoušení lopatek parních turbín pomocí vyvinutého stacionárního magnetizéru,
14. prototyp stacionárního magnetizéru pro kontrolu lopatek parních turbín s využitím bezdotykové kombinované magnetizace.

V tomto příspěvku jsou stručně uvedeny vybrané (v přehledu první dva) výsledky řešení projektu.

2. Ověření vhodných softwarových nástrojů pro výpočty statických a dynamických vlastností radiálních kluzných ložisek parních turbín

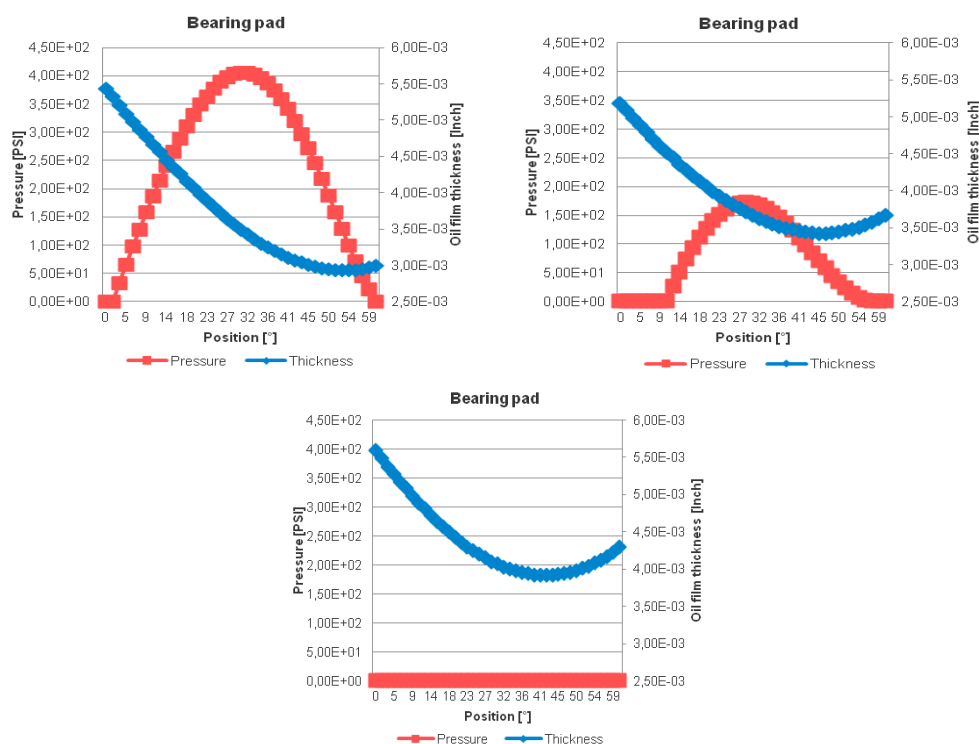
Ve většině turbosoustrojí dodávaných společností Doosan Škoda Power s.r.o. byla používána citrónová radiální kluzná ložiska. V současné době se v konstrukci turbosoustrojí používají převážně radiální kluzná ložiska s naklápěcími segmenty s různými počty a s různými pozicemi těchto segmentů. Důvodem je skutečnost, že segmentová ložiska mají v porovnání s citrónovými ložisky mnohem více volitelných geometrických parametrů, což lze s výhodou využít při optimalizaci dynamických vlastností rotorových soustav. Další pozitivní vlastností segmentových ložisek je nemožnost vzniku nestability olejového filmu, která je u ložisek citrónových častým jevem souvisejícím například se změnami rozměrů ložisek způsobených dlouhodobým provozem nebo s odlehčením ložisek vlivem deformace ložiskových podpor či základových desek strojů.

Pro rotory průmyslových parních turbín jsou obvykle používána segmentová ložiska s pěti segmenty v pozici „Load On Pad“ (LOP; tzn. ložisko má jeden segment uložený tak, že jeho osa má stejný směr jako zatížení), protože mají velmi dobré vlastnosti pro potlačení samobuzeného kmitání rotorů způsobeného vlivem proudění páry v ucpávkových partiích průtočných částí těchto strojů. Pro rotorové soustavy strojů větších výkonů, u kterých je nutná přítomnost zvedacího oleje v ložiskách, jsou obvykle používána segmentová ložiska se čtyřmi segmenty v pozici „Load Between Pads“ (LBP; tzn. vektor zatížení ložiska směřuje do mezery mezi dvěma segmenty). V případě identifikace rizika vzniku samobuzeného kmitání rotoru způsobeného prouděním páry v ucpávkových partiích průtočné části příslušného dílu parní turbíny jsou aplikována segmentová ložiska s pěti segmenty v pozici LBP. Segmentová ložiska s pěti segmenty mají pro potlačení touto příčinou vzniklého samobuzeného kmitání vhodnější vlastnosti než segmentová ložiska se čtyřmi segmenty v pozici LBP, protože jejich vlastnosti (tuhosti a útlumy olejového filmu) jsou v horizontálním a vertikálním směru rozdílné, což přispívá k lepší stabilitě rotorů. Tyto rozdíly jsou ještě větší u segmentových ložisek se čtyřmi segmenty v pozici LOP, která však nejsou výrobcí segmentových ložisek standardně dodávána vzhledem k riziku vzniku „flutteru“ horního segmentu. Největší rozdíly

mezi tuhostmi a útlumy v horizontálním a vertikálním směru mají segmentová ložiska se třemi segmenty v pozici LOP.

Byla provedena analýza možností a vhodnosti použití komerčně dostupných softwarových prostředků pro výpočty statických a dynamických charakteristik různých typů radiálních kluzných ložisek. Byly provedeny numerické testy softwarových nástrojů ALP3T, ROMAC, ARMD a TECHLAB (společnost Doosan Škoda Power s.r.o. využívá pro výpočetní analýzu vlastností kluzných ložisek softwarové prostředky ROMAC THPAD, ROMAC MAXBRG a TECHLAB [5]).

Všechny ověřované softwarové prostředky pro výpočty vlastností radiálních kluzných ložisek dávají relativně dobré výsledky a jsou schopny provádět standardní výpočetní analýzu těchto ložisek. Detailnější porovnání výsledků experimentů s výsledky výpočtů ukázalo, že nejvhodnějšími softwarovými nástroji pro výpočty statických a dynamických vlastností radiálních kluzných ložisek parních turbín jsou programy ALP3T a ROMAC. Programy ALP3T a ROMAC MAXBRG totiž umožňují velice podrobně modelovat mikrogeometrii ložiska včetně zohlednění provozních deformací jeho jednotlivých segmentů. Dále jsou schopny detailně stanovit energetickou bilanci odvodem tepla olejem i vedením tepla různými částmi ložiska. Umožňují provádět výpočty v oblasti laminárního i turbulentního proudění, uvažovat vliv kavitace, zahrnout vlivy kontaktních tuhostí, jevu „hladovění“ („starvation phenomenon“) a napětí oleje a podchytit různé další speciální efekty. Program ALP3T vykazuje poněkud přesnější výpočty rozložení teplotního pole. Modul TILTBR, jenž je součástí programu ARMD, umožňuje provádět výpočty segmentových ložisek s uvažováním zjednodušené energetické bilance, při které je uvažován odvod tepla pouze přivedeným olejem. Hlavní výhodou tohoto přístupu je rychlost výpočtů.



Obr. 1: Tangenciální profily tlakového pole a tloušťky olejového filmu na segmentu vypočítané softwarem ROMAC MAXBRG: a) bez „starvation“ jevu, b) při částečném „starvation“ jevu, c) s plně rozvinutým „starvation“ jevem (převzato z [5])

„Starvation phenomenon“ je jev, který může nastat u segmentových ložisek v případě, že tato ložiska mají nedostatečný přísun mazacího oleje. Tento jev je přisuzován jednotlivým segmentům ložiska, nikoliv celému ložisku. Na obr. 1 jsou uvedeny charakteristické

tangenciální profily tlakového pole a tloušťky olejového filmu na segmentu při různém stupni výskytu „starvation“ jevu. S narůstajícím vlivem tohoto jevu dochází k poklesu amplitudy tlakového pole a zároveň k posunu jeho počátku od náběžné hrany segmentu směrem k jeho odtokové hraně. Tloušťka olejového filmu naopak postupně narůstá. Přítomnost tohoto jevu na určitých segmentech ložiska může způsobit, že segmentové ložisko má v horizontálním směru tuhosti a útlumy olejového filmu blízké se k nule. Důsledkem této skutečnosti pak rotor osazený těmito ložisky je v horizontálním směru nestabilní a začne při zvyšování úhlové rychlosti rotace v tomto směru kmitat se subsynchronní frekvencí, jejíž hodnota i amplituda jsou závislé na úhlové rychlosti rotace rotoru. K tomuto jevu dochází například u ložisek s velkými radiálními vůlemi či obvodově dlouhými segmenty.

3. Vyvinutí algoritmů pro měřicí systém torzních vibrací turbín

Problematika torzních vibrací turbín a způsob jejich měření jsou podrobně popsány ve výzkumné zprávě [6]. V její teoretické části jsou analyzovány přístupy k diagnostice torzních vibrací a způsob zpracování dat v časové a ve frekvenční oblasti. V její praktické části jsou uvedeny použité algoritmy pro zpracování a vizualizaci dat a je v ní popsána implementace ukládání a zpracování dat pomocí těchto algoritmů.

Cyklické torzní namáhání rotoru, pokud dosahuje vysokých hodnot, může iniciovat vznik a šíření únavových trhlin. Torzní (smykové) namáhání rotoru může být vyvoláno dvěma způsoby. Prvním způsobem vyvolání torzního namáhání je krut přenášený přes vzduchovou mezeru z generátoru, který má statickou složku odpovídající přenášenému výkonu od turbíny do generátoru a dynamickou složku odpovídající násobkům frekvence sítě při vystavení generátoru přechodovým poruchám v síti. Druhou příčinou vyvolání torzních vibrací je odezva turbíny na toto buzení v jejích jednotlivých částech, jejíž složky odpovídající torzním vlastním frekvencím jednotlivých částí turbogenerátoru.

Torzní kmity rotoru, zejména při přechodových dějích, mohou budít vlastní kmity dalších komponent připojených k rotoru (především oběžných lopatek), které při vysoké úrovni napětí mohou být příčinou jejich poškození. Nejvíce náchylné k poškození jsou dlouhé oběžné lopatky nízkotlakých (NT) stupňů zejména v oblasti jejich uchycení do disků pomocí stromečkových závěsů.

Příčinou vzniku torzních kmitů mohou být následující události:

1. poruchy v elektrické síti (poruchy nebo zkraty, plánované nebo nouzové vypínání a spínání, kontinuální oscilace z důvodu nevyváženosti fází, vibrace způsobené elektronikou nebo občasně vibrace způsobené blízkým provozem oceláren),
2. chyby v zařízení připojeného ke svorkovnici generátoru,
3. provozní důvody (synchronizace generátoru do sítě při najíždění, odpojení od zátěže nebo ztráta synchronizace).

Torzní interakce mohou mít rezonanční nebo přechodový charakter. Přechodové interakce vznikají vlivem poruch v síti, výpadku a následného sepnutí. Vlivem elektromagnetických sil vznikne přechodový torzní ráz, který vybudí všechny přirozené tvary kmitu rotorové soustavy. Torzní odezva rotoru na přechodový děj se projevuje komplexní vlnou obsahující velké množství frekvenčních složek.

Únavové poškození komponent rotující části parní turbíny závisí na velikosti amplitudy smykového napětí. Počet cyklů do poškození lze odhadovat na základě únavové křivky. Nebezpečná je kontaktní únava, při které dochází ke kontaktu rotující části a statoru turbíny. Při existenci kontaktní únavy se mez únavy může snížit až o 70 % z původní hodnoty.

Poškození NT lopatek následkem torzních vibrací nastává zejména rezonanční odezvou od torzních módů, citlivých na vybuzení od negativní sekvence proudů indukovaných v generátoru při nevyváženosti proudů v jednotlivých fázích. Tyto proudy vyvolávají torzní

vibrace při dvojnásobku frekvence elektrické sítě. I když jsou oběžné lopatky obvykle naladěny tak, aby nevykazovaly rezonance v okolí harmonických otáčkové frekvence, frekvence torzní odezvy může být posunuta z důvodu vazby mezi torzními vibracemi rotoru a ohybovými módy lopatek. Pokud mají lopatky v lopatkové řadě ohybové rezonanční frekvence blízké dvojnásobku frekvence elektrické sítě a jejich vibrační módy se navážou na torzní vibrační módy rotoru generátoru a NT stupňů, může být výsledný navázaný mód rezonanční, který je frekvenčně vzdálený od přirozeného ohybového módu lopatek. Lopatky se účastní v torzním módu vibrací navzájem ve fázi. Tento skupinový pohyb se uskutečňuje buď ve fázi s pohybem rotoru na nižší frekvenci než je vibrační mód lopatek nebo v protifázi s pohybem rotoru na vyšší frekvenci než je frekvenční mód lopatek. Odtud vyplývá, že ohybové vibrace lopatek mohou mít příčinu i v proudění páry i v torzních vibracích turbogenerátoru. Vibrace způsobené prouděním páry mají následky podobné pro všechny řady lopatek. Torzní vibrace podporují pouze jednu nebo dvě řady lopatek daného rotoru bez toho, aniž by ovlivnily další, protože tvar kmitu určuje účast dané řady. Pokud tedy dojde k porušení lopatek pouze jedné řady a ostatní řady jsou neporušeny, bývá příčinou většinou torzní vibrační mód.

Oběžné lopatky jsou citlivé na porušení (jak již bylo uvedeno) v místě stromečkových závěsů a i v místě spojení lopatek do svazků. Trhliny se šíří, pokud trhlinka zvyšuje lokální napětí nebo snižuje únavovou pevnost v místě trhliny. Například v oblasti paty lopatky je dominantní statická složka napětí, vznikající odstředivou silou.

Na rozdíl od ohybových vibrací turbíny, které upozorňují na problematiku nevyváženosti nebo vyosení rotoru a narůstají během provozu, takže je monitorovací systém schopen sledovat a je možno dostatečně před destruktivním poškozením provést opatření k jejich potlačení, se torzní vibrace vyskytují náhle bez varování.

Přínosem monitorování torzních vibrací je schopnost sledovat akumulaci únavového poškození a schopnost stanovit, zda torzní přechodové děje dosahují takových špičkových hodnot, které jsou schopny způsobit únavové poškození. Dále poskytují personálu elektrárny informaci, že došlo k události, která může mít poškozující účinky, a že je potřeba provést opatření, aby nedošlo k nějakému následnému destruktivnímu poškození.

Klíčovým nástrojem pro přesný torzní monitorovací systém je torzní model turbogenerátoru, prostřednictvím kterého lze stanovit vnitřní napětí a napětí v místě koncentrátorů napětí na základě vstupního měření.

Torzní vibrace jsou nespojitě a většinou nesouvisí s provozem turbogenerátoru. Napětí spojené s torzními vibracemi je většinou přípustné, pokud frekvence vibrací nejsou blízké rezonanční frekvenci nebo pokud amplitudy vibrací nedosahují extrémních hodnot. Mechanismem poškození je většinou vysokocyklová únava akumulací poškozujících cyklů od přechodových dějů.

Monitorovaná data se zpracovávají v časové a ve frekvenční oblasti.

Předpokládá se, že torzní vibrace jsou určovány ze zákmitů krouticího momentu prostřednictvím zkosu rotoru (nebo smykového napětí) měřením na povrch rotoru nalepenými odporovými tenzometry. Torzní vibrace mohou být dále určovány ze zkrutu rotoru měřením rozdílu natočení ve dvou řezech. Třetím možným způsobem měření torzních vibrací je měření derivace úhlového vychylky rotoru v jednom místě (princip tachometru).

Ke zpracování torzních vibrací byl vytvořen vlastní program v systému MATLAB. Program je modifikován pro načítání hodinových záznamů, ukládaných z digitálních dat, přenášených po rozhraní ethernet. Program zpracovává data uložená z digitálního výstupu měřicí jednotky v hodinových souborech a z těchto dat vytváří denní reporty, obsahující základní statistiky z časové oblasti, amplitudová spektra a spektrogramy pro rozsah osy

frekvencí 0 až 200 Hz a 160 až 190 Hz (z důvodu vazby na rezonanční frekvence NT lopatek). Program dále „hlídá“ výskyt přechodových dějů na základě překročení střední hodnoty torzních vibrací o danou, předem nastavitelnou, mez.

Pro další zpracování a redukci naměřených dat bylo navrženo programové rozhraní v systému MATLAB:

1. data jsou segmentována do úseků po 10 sekundách (segment obsahuje při vzorkovací frekvenci 3 kHz 30 000 vzorků),
2. z každého segmentu je vyhodnocena jedna hodnota statistických parametrů: střední hodnota, maximum, minimum, RMS – standardní odchylka, šikmost, špičatost a kurtosis (získá se sedm redukovaných průběhů statistik),
3. z důvodu zachování plné informace o časovém průběhu je každou hodinu ukládán jeden neredukovaný průběh o délce 10 sekund,
4. při výskytu torzního přechodového děje je zachován neredukovaný celý děj,
5. z celodenního průběhu je počítán dvouparametrický histogram četnosti amplitud a středních hodnot metodou „rainflow“ a ukládán do textového souboru; každý den je připojována nová matice na konec souboru, ze kterého je možné vytvořit kumulativní matici za jakékoliv období,
6. pro celodenní soubory a pro nestandardní přechodové jevy je proveden výpočet spektrogramu,
7. pro data zpracovaná ve frekvenční oblasti je navrhován softwarový prostředek pro hledání amplitud určených frekvencí a jejich posun ve sledovaných pásmech.

Dalším cílem diagnostiky torzních vibrací je odhad poškození oběžných turbínových lopatek na základě trendů v amplitudovém spektru; tato diagnostika je zatím ve stádiu vývoje.

4. Závěr

V příspěvku je uveden výčet výsledků řešení projektu „Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky“ (v jeho rámci vznikl i tento příspěvek) dosažených v roce 2016 a dva z nich jsou stručně představeny (ověření vhodných softwarových nástrojů pro výpočty statických a dynamických vlastností radiálních kluzných ložisek parních turbín a vyvinutí algoritmů pro měřicí systém torzních vibrací turbín).

Na rok 2017 je plánováno dosažení 10 výsledků řešení projektu.

Literatura

- [1] (2012): *Přihláška projektu TE01020068 „Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky“ do programu Technologické agentury ČR na podporu rozvoje dlouhodobé spolupráce ve výzkumu, vývoji a inovacích mezi veřejným a soukromým sektorem „Centra kompetence“, doba řešení: 03/2012 – 12/2019.* Plzeň: Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.
- [2] (2015): *Přihláška projektu TE01020068 „Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky“ do programu Technologické agentury ČR na podporu dlouhodobé spolupráce ve výzkumu, vývoji a inovacích mezi veřejným a soukromým sektorem Centra kompetence, doba řešení: 01/2016 – 12/2019.* Plzeň: Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.
- [3] Polach, P. (2012): *Energetické centrum kompetence, sborník 7. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách.* Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni.
- [4] Polach, P. (2016): *Energetické centrum kompetence: nová fáze řešení projektu, sborník 11. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách.* Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni.
- [5] Černý, V. (2016): *SW prostředky pro výpočty vlastností radiálních kluzných ložisek, výzkumná zpráva VZTP-1114.* Plzeň: Doosan Škoda Power s.r.o.
- [6] Václavík, J. (2016): *Procedury pro diagnostiku torzních vibrací na rotoru turbogenerátoru, výzkumná zpráva VYZ-VZ-54/16/03,* Plzeň: Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.