

PŘIHLÁŠKA VYNÁLEZU

Zveřejněná podle §31 zákona č. 527/1990 Sb.

(21) Číslo dokumentu:

2012-947

(13) Druh dokumentu: **A3**

(51) Int. Cl.:

F01D 21/04

(2006.01)

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLVÉHO
VLASTNICTVÍ

(22) Přihlášeno: **20.12.2012**

(40) Datum zveřejnění přihlášky vynálezu: **02.07.2014**
(Věstník č. 27/2014)

(71) Přihlašovatel:
Doosan Škoda Power s.r.o., Plzeň, CZ
Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň 3 - Jižní
Předměstí, CZ

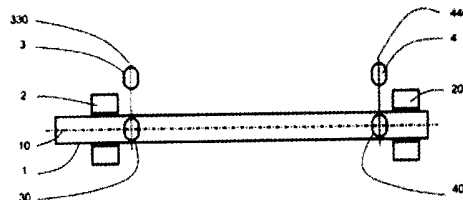
(72) Původce:
Ing. Václav Černý, Ph.D., Plzeň - Červený Hrádek,
CZ
Ing. Jindřich Liška, Ph.D., Plzeň, CZ

(74) Zástupce:
Ing. Dobroslav Musil, patentová kancelář, Ing.
Dobroslav Musil, Cejl 38, 602 00 Brno

vibrací ve spektru těchto signálů, na základě čehož se následně usuzuje na existenci kontaktu rotor-stator. V případě existence tohoto kontaktu se dále lokalizuje místo/místa turbíny, kde k němu dochází.

(54) Název přihlášky vynálezu:
**Způsob detekce a lokalizace částečného
kontaktu rotor-stator při provozu turbíny**

(57) Anotace:
Vynález se týká způsobu detekce a lokalizace částečného kontaktu rotor-stator při provozu turbíny, u kterého se rotor (1) turbíny snímá alespoň jedním párem snímačů (3, 30, 4, 40) rotorových vibrací umístěných v jedné měřicí rovině (330, 440) kolmé k ose rotoru (1) a alespoň jedním párem snímačů absolutních vibrací ložisek (2, 20). U tohoto způsobu se nejprve u synchronně digitalizovaných signálů snímačů (3, 30, 4, 40) rotorových vibrací vypočte aritmetický průměr jednotlivých harmonických pásem v úplném spektru ve frekvenční oblasti, čímž se převedou informace o subharmonických složkách a jejich násobcích v úplném spektru těchto signálů do frekvenčního pásma $-1X$ a $1X$ (kde X označuje otáčkovou frekvenci rotoru (1)). Zároveň se výpočtem mediánu odhadne úroveň šumu, kterým jsou zatížena jednotlivá frekvenční pásma úplného spektra, a která se od amplitud v jednotlivých frekvenčních pásmech úplného spektra signálů snímačů rotorových vibrací odečte. Tím se vytvoří normované akumulované úplné spektrum signálů snímačů rotorových vibrací, ve kterém se následně porovnává amplituda předem stanovené subharmonické složky/složek signálů rotorových vibrací s amplitudami frekvenčních složek v jejím/jejich okolí stanovenými Fourierovou transformací nebo aproximací Fourierovou řadou. Přitom se usuzuje na přítomnost sledované subharmonické složky signálů rotorových



Způsob detekce a lokalizace částečného kontaktu rotor-stator při provozu turbíny

Oblast techniky

- 5 Vynález se týká způsobu detekce a lokalizace částečného kontaktu rotor-stator při provozu turbíny, u kterého se rotor turbíny snímá alespoň jedním párem snímačů rotorových vibrací umístěným v jedné měřicí rovině kolmé k ose rotoru.

10 Dosavadní stav techniky

- Při provozu parních i plynových turbín může v některých situacích, např. během najiždění turbíny, kdy při překonávání vlastních frekvencí rotoru jsou jeho vibrace většinou nejvyšší, dojít k nežádoucímu kontaktu mezi rotorem a statorem („stator-rotor rub“ nebo „rubbing“). Během tohoto kontaktu se v první
- 15 fázi především obrušují ucpávky uložené mezi rotujícími a statickými částmi turbíny, v důsledku čehož se zvyšuje množství unikajícího média a snižuje účinnost turbíny. V případech, kdy není kontakt rotor-stator včas detekován a vhodným zásahem do provozu turbíny, např. změnou otáček při jejím nájezdu nebo doběhu, nebo změnou parametrů zvedacího oleje při jejím provozu na
- 20 natáčecím zařízení, odstraněn, může dojít k těžkému poškození rotoru i statoru, resp. celkové havárii turbíny se značnými ekonomickými škodami.

- Kontakt rotor-stator může být buď částečný, kdy se jedná o velmi krátký, avšak alespoň několikrát opakovaný kontakt mezi rotorem a statorem, nebo úplný, kdy se jedná o kontinuální nebo téměř kontinuální kontakt mezi rotorem a
- 25 statorem. Úplný kontakt rotor-stator je přitom vždy předcházen, alespoň na krátký okamžik, částečným kontaktem rotor-stator.

- V současné době je detekce částečného kontaktu rotor-stator založena zejména na offline analýze vibračních signálů, kdy obsluha zařízení sleduje v průběhu měření celkovou úroveň vibrací a také fázor první harmonické složky
- 30 otáčkové frekvence ve vibračních signálech. Pokud dojde ke skokové změně celkových vibrací nebo rotaci fázoru první harmonické složky s proměnnou

nebo periodicky se měnící amplitudou, je detekován kontakt rotor-stator, a po ukončení měření je provedena detailní analýza dat pro vyloučení možnosti falešně pozitivní detekce. Tento přístup tak není vhodný pro detekci kontaktu rotor-stator během reálného provozu turbíny, a je využitelný v podstatě pouze pro laboratorní či experimentální účely.

Další přístup k detekci částečného kontaktu rotor-stator je založen na tom, že kromě změny fázoru první harmonické složky vibračních signálů je tento kontakt doprovázen také vznikem subharmonických složek spektra, jejichž frekvence odpovídá četnosti nárazů rotoru na stator. Nevýhodou detekce kontaktu rotor-stator na základě sledování těchto subharmonických složek je však to, že frekvence některých z nich jsou velmi blízké frekvencím odpovídajícím projevům jiných závad - např. nestabilitě olejového filmu kluzného ložiska, apod., v důsledku čehož může dojít buď k falešně pozitivní detekci kontaktu rotor-stator, nebo naopak k chybnému vyhodnocení projevů tohoto kontaktu jako závady jiného typu.

Kromě toho jsou z patentové i nepatentové literatury dále známé také jiné způsoby pro detekci a/nebo lokalizaci částečného kontaktu rotor-stator založené na zcela odlišných principech.

Např. z EP 1533479 je známý způsob detekce kontaktu rotor-stator, u kterého se sledují provozní veličiny turbíny, jako např. teplota pláště, excentricita rotoru, tlak v kondenzátoru a zatížení generátoru. Příslušný algoritmus přitom vyhodnocuje samostatně změnu jednotlivých veličin, a pokud u některé z nich dojde k abnormální, resp. skokové, změně, je tato změna vyhodnocena jako průvodní jev kontaktu rotor-stator. Nevýhodou tohoto způsobu je, že skoková změna sledované veličiny může souviset i s jinými jevy nebo závadami, ke kterým během provozu turbíny dochází, takže existuje velmi vysoká pravděpodobnost falešně pozitivní detekce kontaktu rotor-stator. Vzhledem k dynamice sledovaných veličin a předpokládané citlivosti použitého algoritmu navíc nelze vyhodnocování změny těchto veličin a následnou detekci kontaktu rotor-stator považovat za dostatečně rychlý způsob reálně použitelný během provozu turbíny.

Z US 2008240902 je pak známý způsob detekce kontaktu rotor-stator, který spočívá ve sledování teploty statoru turbíny alespoň na části jeho obvodu,

příčemž případné lokální zvýšení teploty je přisouzeno tření mezi rotorem a statorem, a je vyhodnoceno jako přítomnost kontaktu rotor-stator. Dle umístění teplotního snímače, který zvýšení teploty zaznamenal, je navíc možné místo kontaktu na statoru hrubě lokalizovat. Nevýhodou tohoto postupu je, že ve chvíli, kdy je třením mezi rotorem a statorem vytvořeno dostatečně velké množství tepla, aby bylo tepelným snímačem zaznamenáno, může od jejich prvního kontaktu uplynout doba až v řádu minut, během které už může být rotor, stator a případně i další součásti turbíny značně poškozeny, a ohýbání rotoru již nelze zamezit jinak než odstavením stroje. Další nevýhodou je, že v případě závažnějšího kontaktu rotor-stator, ke kterému dochází po celém obvodu statoru nebo jeho větší části, je zvýšení teploty statoru zaznamenáno u většiny nebo u všech tepelných snímačů umístěných ve statoru v podstatě rovnoměrně, díky čemuž nemusí být vždy vyhodnoceno jako kontakt rotor-stator. Podstatnou nevýhodou je i to, že dodatečná instalace většího množství teplotních snímačů do tělesa statoru turbíny vyžaduje odstávku turbíny a poměrně značné investice.

Kromě toho je z US 20090003991 dále známý způsob detekce kontaktu rotor-stator, který spočívá v kontinuálním měření vzdálenosti lopatek rotoru od statoru a/nebo výšky lopatek rotoru. Nevýhodou tohoto způsobu je stejně jako v předcházejícím případě nutnost dodatečné instalace speciálních senzorů do statoru turbíny a s tím související zvýšení celkových nákladů. Měřením změny velikosti prostoru mezi lopatkou rotoru a lopatkovou ucpávkou ve statoru pak sice lze detekovat kontakt mezi lopatkou a statorem, avšak vzhledem k tomu, že vůle mezi lopatkou a statorem jsou větší než vůle mezi hřídelí a statorem, a ke kontaktu rotor-stator tak dochází primárně na hřídeli turbíny, reálná pravděpodobnost úspěšné a včasné detekce kontaktu rotor-stator tímto způsobem je jen velmi malá. Další nevýhodou je možnost falešně pozitivní detekce kontaktu rotor-stator při změně senzory snímaného rozměru, ke které však může dojít i z jiného důvodu, např. v důsledku excentricity rotoru, změnou rychlosti jeho rotace, apod.

Cílem vynálezu je odstranit nevýhody stavu techniky a navrhnout nový způsob detekce částečného kontaktu rotor-stator během provozu turbíny, který by odstranil nevýhody stavu techniky, a který by umožnil detekci kontaktu rotor-

stator v reálném čase, co nejdříve po jeho vzniku, a současně i jeho co nejpřesnější lokalizaci.

Podstata vynálezu

- 5 Cíle vynálezu se dosáhne způsobem detekce a lokalizace částečného kontaktu rotor-stator při provozu turbíny, u kterého se rotor turbíny snímá alespoň jedním párem snímačů rotorových vibrací umístěným v jedné měřicí rovině kolmé k ose rotoru a alespoň jedním párem snímačů absolutních vibrací ložisek. Podstata tohoto vynálezu přitom spočívá v tom, že u synchronně
- 10 digitalizovaných signálů snímačů rotorových vibrací se vypočte aritmetický průměr jednotlivých harmonických pásem v úplném spektru ve frekvenční oblasti, čímž se převedou informace o subharmonických složkách a jejich násobcích v úplném spektru těchto signálů do frekvenčního pásma $-1X$ až $1X$ (kde X označuje otáčkovou frekvenci rotoru), zároveň se výpočtem mediánu
- 15 odhadne úroveň šumu, kterým jsou zatížena jednotlivá frekvenční pásma úplného spektra, a který se od amplitud v jednotlivých frekvenčních pásmech úplného spektra signálů snímačů rotorových vibrací odečte, čímž se vytvoří normované akumulované úplné spektrum signálů snímačů rotorových vibrací, ve kterém se porovnává amplituda předem stanovené subharmonické
- 20 složky/složek signálů rotorových vibrací s amplitudami frekvenčních složek v jejím/jejich okolí stanovenými Fourierovou transformací nebo aproximací Fourierovou řadou. Vizuálním a/nebo automatickým vyhodnocením se přitom usuzuje na přítomnost sledované subharmonické složky signálů rotorových vibrací ve spektru těchto signálů, na základě čehož se následně usuzuje na
- 25 existenci kontaktu rotor-stator.

- V případě existence kontaktu rotor-stator se dále lokalizuje místo/místa turbíny, kde k tomuto kontaktu dochází. Při axiální lokalizaci se zpracují úseky signálů snímačů absolutních vibrací ložisek turbíny v okamžiku vzniku, resp. průběhu kontaktu rotor-stator, v časo-frekvenční oblasti, ve které se identifikují
- 30 širokopásmová amplitudová navýšení těchto signálů a následně se určí časy nárůstu amplitud signálů nad úroveň šumu, a ze znalosti těchto časů a jejich časových diferencí, rozmístění snímačů absolutních vibrací ložisek, rychlosti šíření rázu v materiálu rotoru/statoru se axiální lokalizací určí axiální poloha

místa/míst kontaktu rotor-stator, a srovnáním histogramu absolutních četností těchto míst s výkresem nebo osou turbíny se určí axiální poloha místa/míst, kde ke kontaktu rotor-stator skutečně dochází. Pro obvodovou lokalizaci kontaktu rotor-stator se amplitudová navýšení signálů snímačů absolutních vibrací ložisek zobrazí do orbity 1. harmonické složky otáčkové frekvence rotoru vytvořené ze signálů snímačů rotorových vibrací, čímž se určí úhlová poloha maxima amplitudových navýšení způsobených kontaktem rotor-stator, která odpovídá obvodové poloze místa/míst, kde dochází ke kontaktu rotor-stator.

Výhodné je přitom použití snímačů relativních rotorových vibrací, které jsou standardní součástí polní instrumentace turbín. Kromě nich nebo v kombinaci s nimi však lze použít i snímače absolutních rotorových vibrací.

Při vizuálním vyhodnocování se sleduje amplituda předem stanovené subharmonické složky/složek signálů rotorových vibrací v intervalu $1/9X$ až $1/2X$, která se porovnává s amplitudami frekvenčních složek v jejím/jejich okolí, přičemž se na přítomnost sledované subharmonické složky/složek ve spektru signálů snímačů rotorových vibrací a na existenci kontaktu rotor-stator usuzuje v případě, že amplituda této subharmonické složky/složek převyší amplitudy okolních frekvenčních složek.

Při automatickém vyhodnocování se s výhodou stanoví charakteristická veličina subharmonických složek s frekvencemi rovnými celočíselným podílům otáčkové frekvence rotoru, přičemž pokud ke kontaktu rotor-stator nedochází, nabývá hodnota této charakteristické veličiny pro danou subharmonickou složku hodnoty blízké 1, a pokud ke kontaktu rotor-stator dochází, nabývá hodnota charakteristické veličiny pro danou subharmonickou složku hodnotu převyšující 1.

V případě, že ke kontaktu rotor-stator nedochází, lze charakteristickou veličinu chápat jako veličinu náhodnou a aproximovat ji součtem její střední hodnoty μ a směrodatné odchylky σ vypočtených rekurzivním algoritmem. Na existenci kontaktu rotor-stator se pak usuzuje ze změny střední hodnoty μ a směrodatné odchylky σ .

Při axiální lokalizaci místa/míst kontaktu rotor-stator se úseky signálů snímačů absolutních vibrací ložisek turbíny v okamžiku vzniku, resp. průběhu

kontaktu rotor-stator, s výhodou zpracují vlnkovou transformací, ve které se jako bázová funkce použije Morletova vlnka.

Objasnění výkresů

- 5 Na obr. 1 je schematicky bez lopatek a dalších konstrukčních prvků znázorněn hřídel turbíny, na kterém je aplikován způsob detekce částečného kontaktu rotor-stator při provozu turbíny podle vynálezu, na obr. 2 příkladný úplný spektrogram signálů snímačů relativních rotorových vibrací uložených ve dvou různých měřicích rovinách, na obr. 3 příkladný průběh úplného spektra
- 10 vypočteného ze signálů snímačů relativních rotorových vibrací uložených v jedné z měřicích rovin, na obr. 4 příkladný spektrogram akumulovaného úplného spektra vypočteného ze signálů snímačů relativních rotorových vibrací v jedné z měřicích rovin, na obr. 5 průběh úplného spektra signálů snímačů relativních rotorových vibrací podle levé části obr. 2 v řádové oblasti, na obr. 6
- 15 srovnání průběhu úplného spektra signálů snímačů relativních rotorových vibrací podle obr. 5 s průběhem normovaného úplného spektra signálů snímačů relativních rotorových vibrací v řádové oblasti, na obr. 7 příkladný spektrogram normovaného akumulovaného úplného spektra vypočteného ze signálů snímačů relativních rotorových vibrací v jedné z měřicích rovin, na obr. 8
- 20 příkladný průběh charakteristických veličin pro subharmonické frekvence $1/2$ a $1/3$ otáčkové frekvence rotoru, na obr. 9 příkladný spektrogram spektra signálů snímačů absolutních vibrací ložiska turbíny v okamžiku kontaktu rotor-stator, na obr. 10 příkladný výkres turbíny s přeneseným histogramem absolutních četností kontaktu rotor-stator a na obr. 11 příkladná úhlová poloha maxima
- 25 amplitudových změn způsobených částečným kontaktem rotor-stator zobrazená do orbity 1. harmonické složky otáčkové frekvence rotoru turbíny.

Příklady uskutečnění vynálezu

- Způsob detekce částečného kontaktu rotor-stator při provozu turbíny a jeho následné lokalizace podle vynálezu bude popsán na příkladu turbíny
- 30 schematicky znázorněné na obr. 1. Rotor **1** turbíny je otočně uložen ve dvou radiálních ložiscích **2** a **20**, přičemž v blízkosti každého z nich je snímán dvojicí

snímačů 3, 30 a 4, 40 relativních rotorových vibrací. Každá dvojice je přitom uložena ve společné měřicí rovině 330 a 440 kolmé k ose 10 rotoru 1, ve stejné vzdálenosti od ní, a snímače 3, 30 a 4, 40 jsou v příslušné měřicí rovině 330, resp. 440 vzájemně posunuty, s výhodou o úhel 90°. Kromě toho jsou radiální

5 ložiska 2 a 20 turbíny snímána neznázorněnými snímači absolutních vibrací těchto ložisek. Všechny tyto snímače jsou běžnou součástí polní instrumentace turbín, takže způsob detekce částečného kontaktu rotor-stator a jeho lokalizace při provozu turbíny podle vynálezu nevyžaduje dodatečnou instalaci žádných speciálních součástí. Další jeho výhodou je, že umožňuje detekci kontaktu

10 rotor-stator online v reálném čase, v podstatě okamžitě po jeho vzniku.

Signály snímačů 3, 30, 4, 40 relativních rotorových vibrací lze v dalších variantách doplnit a/nebo nahradit signály neznázorněných snímačů absolutních rotorových vibrací, které však u stávajících instalovaných turbín nejsou standardně používány ve dvojicích, případně nejsou používány vůbec,

15 takže v takovém případě je nutné turbínu, resp. její stator těmito snímači osadit.

Pro další zpracování se využijí vždy signály alespoň jedné z dvojic snímačů 3, 30 a/nebo 4, 40 rotorových vibrací umístěných v jedné měřicí rovině 330, 440. Signály těchto snímačů 3, 30 a/nebo 4, 40 se přitom synchronně digitalizují neznázorněným známým A/D převodníkem/převodníky.

20 U takto vytvořených digitálních signálů snímačů 3, 30, 4, 40 rotorových vibrací se následně vyšetřuje přítomnost, resp. nepřítomnost subharmonických složek s frekvencí rovnou celočíselným podílům otáčkové frekvence rotoru 1 v jejich spektru, neboť tyto složky jsou zřejmým projevem částečného kontaktu rotor-stator. V případě přítomnosti takových složek se s výhodou dále sleduje

25 také jejich frekvence, která vypovídá o intenzitě kontaktu rotor-stator.

Základním způsobem detekce přítomnosti subharmonických složek signálů snímačů 3, 30, 4, 40 rotorových vibrací v jejich spektru je přitom sledování změn amplitud těchto složek v úplném spektru. Tyto amplitudy se přitom s výhodou stanoví Fourierovou transformací signálů snímačů 3, 30, 4, 40

30 rotorových vibrací nebo na základě aproximace těchto signálů Fourierovou řadou. Takto získané amplitudy se následně srovnávají s předem stanoveným prahem (viz charakteristická veličina dále), přičemž v případě, že ho překročí, usuzuje se na přítomnost částečného kontaktu rotor-stator.

Vzhledem k tomu, že částečný kontakt rotor-stator má obvykle proměnnou intenzitu, což se projevuje změnou frekvence subharmonických složek signálů snímačů 3, 30, 4, 40 rotorových vibrací např. z 1/3 a 2/3 otáčkové frekvence rotoru 1 (v daném příkladě je otáčková frekvence 8 Hz) na 1/2 otáčkové frekvence rotoru 1, což je zřejmé např. z pravé části obr. 2 (pro měřicí rovinu 330), zatímco jiné subharmonické složky signálů snímačů 3, 30, 4, 40 rotorových vibrací mají frekvenci např. v oblasti -3 až -4 násobku otáčkové frekvence rotoru 1 – viz levá strana obr. 2 (pro měřicí rovinu 440), je vhodné přenést informaci o subharmonických složkách v úplném spektru signálů snímačů 3, 30, 4, 40 rotorových vibrací z tohoto širokého frekvenčního pásma do užšího intervalu a sledovat jejich přítomnost, resp. chování v něm. Výhodný je například interval -1X až 1X (kde X označuje otáčkovou frekvenci rotoru 1), který umožňuje určit o jakou subharmonickou složku signálů snímačů 3, 30, 4, 40 rotorových vibrací vzhledem k otáčkové frekvenci rotoru 1 se jedná. Klíčovými složkami pro detekci kontaktu rotor-stator jsou přitom složky s frekvencí rovnající se celočíselným podílům otáčkové frekvence rotoru 1. Na obr. 3 je zobrazen příkladný průběh úplného spektra vypočteného ze signálů snímačů relativních rotorových vibrací v měřicí rovině 440, přičemž hodnoty amplitudového spektra jsou zobrazeny v decibelech. Svislými přerušovanými čarami je pak toto spektrum rozděleno do frekvenčních intervalů podle násobků otáčkové frekvence rotoru 1, přičemž, jak je patrné, subharmonické složky spektra a jejich násobky jsou obsaženy ve všech těchto frekvenčních intervalech. Konkrétně ve znázorněném příkladu provedení se přitom jedná o komponenty signálů s frekvencí rovnou 1/2X a jejím celočíselným násobkům (na obr. 3 označené hodnotami 1/2X až 7/2X). K přenesení informací o subharmonických složkách signálů do užšího frekvenčního intervalu se s výhodou použije metoda akumulovaného úplného spektra signálů.

Akumulované úplné spektrum signálů je přitom možno vyjádřit následujícím vztahem:

$$A_{af}(t, \pm\omega) = \frac{1}{N_a} \sum_{k=0}^{N_a-1} A_f(t, \pm\omega_k),$$

$$\omega_k = \langle k\omega_r(t), (k+1)\omega_r(t) \rangle,$$

kde $A_{af}(t, \pm\omega)$ je akumulované úplné spektrum v čase t , $A_f(t, \pm\omega)$ je úplné spektrum v čase t , $\omega_f(t)$ je otáčková frekvence rotoru 1 v čase t , a N_a počet intervalů, do kterých byla levá a pravá část úplného spektra rozdělena (obr. 3). N_a se přitom na základě dlouhodobých zkušeností s používanými snímači
5 zejména relativních rotorových vibrací a experimentálního ověření s výhodou volí v intervalu 5 až 10.

Výpočet akumulovaného úplného spektra tak spočívá ve výpočtu aritmetického průměru harmonických frekvenčních pásem signálů snímačů 3, 30, 4, 40 rotorových vibrací z úplného spektra ve frekvenční oblasti, a umožňuje
10 rozhodnout o vztahu subharmonických složek těchto signálů k otáčkové frekvenci rotoru 1. Jeho podstatou je odhalení násobků základních subharmonických složek signálů, které jsou sice identifikovatelné ve vyšších pásmech, ale v základním pásmu $0X$ až $\pm 1X$ je jejich identifikace ztížena nebo dokonce znemožněna přítomností provozního šumu.

15 Jak je zřejmé ze znázornění spektrogramu akumulovaného úplného spektra, který je pro měřicí rovinu 330 znázorněn na obr. 4, může během jeho výpočtu dojít k téměř úplné ztrátě informace o přítomnosti subharmonických složek signálů snímačů 3, 30, 4, 40 rotorových vibrací na vyšších frekvencích.

Na obr. 5 je pak vykreslen průběh úplného spektra vypočteného ze
20 signálů snímačů 3, 30 nebo 4, 40 rotorových vibrací, z jehož průběhu je patrné, že šum dosahuje v intervalu $-3X$ až $3X$ téměř totožné úrovně jako amplitudy násobků subharmonických složek signálů, takže v tomto pásmu nejsou vidět složky s frekvencí $1/2X$, $3/2X$ a $5/2X$ a viditelné jsou až složky s frekvencí od $7/2X$, resp. $-7/2X$, které již nejsou šumem překryty.

25 Pro snížení úrovně šumu v jednotlivých frekvenčních pásmech se úplné spektrum dále normuje. Přitom se výpočtem mediánu šumu (znázorněn přerušovanou čarou na obr. 5) pro jednotlivá frekvenční pásma úplného spektra odhadne úroveň šumu. Tento medián se následně od amplitud v jednotlivých frekvenčních pásmech úplného spektra odečte. Z porovnání úplného spektra
30 (světlejší dolní křivka na obr. 6) a normovaného úplného spektra, tj. úplného spektra s potlačeným šumem (horní křivka na obr. 6), je zřejmé, že úplné spektrum se normováním „narovnálo“ a jeho subharmonické složky více vynikly.

U způsobu detekce částečného kontaktu rotor-stator při provozu turbíny podle vynálezu se tedy nejprve úplné spektrum signálů snímačů 3, 30, 4, 40 rotorových vibrací v každém časovém okamžiku akumuluje, resp. průměruje ve frekvenční oblasti, a zároveň se normuje, resp. se od něj odečítá odhadnutá úroveň šumu v jednotlivých frekvenčních pásmech, čímž se vytvoří normované akumulované úplné spektrum signálů snímačů 3, 30, 4, 40 rotorových vibrací, jehož příkladný spektrogram pro měřicí rovinu 330 a pro snímače 3 a 30 rotorových vibrací je znázorněn na obr. 7. Z jeho průběhu je patrné, že při provozu turbíny docházelo k částečnému kontaktu rotor-stator – viz subharmonické složky s frekvencí $\pm 1/2X$, $\pm 1/3X$ a $\pm 2/3X$ přítomné ve spektrogramu.

Spektrogram normovaného akumulovaného úplného spektra se přitom v reálném čase vykresluje na monitor či displej, případně tiskne, přičemž obsluha zařízení sleduje amplitudu určité subharmonické složky/složek signálů rotorových vibrací (např. $1/9X$ až $1/2X$). Pokud amplituda této subharmonické složky/složek naroste, obsluha usuzuje na existenci kontaktu rotor-stator. V takovém případě obsluha provede kroky k potlačení tohoto kontaktu, nebo odstaví turbínu.

Tento postup diagnostiky lze dále automatizovat sledováním průběhu charakteristické veličiny subharmonických složek signálů snímačů 3, 30, 4, 40 rotorových vibrací s frekvencemi rovnými celočíselným podílům otáčkové frekvence rotoru 1 definované následovně:

$$\xi_{sf}(t) = \max \left[\frac{A_{caf}(t, -s_f)}{\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M A_{caf}(t, -\tilde{f}_k)}, \frac{A_{caf}(t, s_f)}{\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M A_{caf}(t, \tilde{f}_k)} \right]$$

kde $A_{caf}(t, \pm s_f)$ označuje amplitudu normovaného akumulovaného úplného spektra pro subharmonickou frekvenci s_f v čase t a $A_{caf}(t, \pm \tilde{f}_k)$ označuje amplitudu frekvenční linie v blízkém okolí této frekvence v čase t , M je celkový počet frekvenčních linií, které se použijí v průměrování, k je index součtu a $\tilde{f}_k$ je frekvenční linie, která se nachází v okolí subharmonické frekvence s_f .

Charakteristická veličina se přitom srovnává s předem zvolenou prahovou hodnotou, jejíž překročení je známkou přítomnosti částečného

kontaktu rotor-stator. Tato prahová hodnota se přitom vždy volí vyšší než 1 (typicky 2) a udává tak faktor, s jakým překračuje amplituda subharmonické složky signálů hladinu amplitud frekvenčních linií ve svém blízkém okolí. Pokud ke kontaktu rotor-stator nedochází a tedy subharmonická složka signálů rotorových vibrací a ani její násobky nejsou v signálech obsaženy, nabývá hodnota charakteristické veličiny pro danou subharmonickou složku hodnoty blízké 1. Přítomnost konkrétní subharmonické složky v signálech pak způsobí, že hodnota charakteristické veličiny bude hodnotu 1 a předem zvolenou prahovou hodnotu převyšovat.

10 Z průběhu charakteristické veličiny subharmonických složek signálu s frekvencemi rovnými celočíselným podílům otáčkové frekvence rotoru 1, na obr. 8, ve kterém je znázorněn průběh charakteristické veličiny pro frekvence $1/2X$ a $1/3X$, je zřejmá jejich velká fluktuace. V případě, že ke kontaktu rotor-stator nedochází, lze charakteristickou veličinu chápat jako veličinu náhodnou
15 popsanou svojí střední hodnotou a směrodatnou odchylkou. Průběh charakteristické veličiny pak lze aproximovat součtem její střední hodnoty a směrodatné odchylky, čímž se získá její horní obálka ve formě:

$$\xi_{sf}^{up}(t) = \mu(t) + \sigma(t),$$

kde $\mu(t)$ je střední hodnota charakteristické veličiny a $\sigma(t)$ je směrodatná
20 odchylka charakteristické veličiny.

Střední hodnota a směrodatná odchylka však musejí být vzhledem k nestacionaritě charakteristické veličiny, určeny rekurzivním algoritmem:

$$\mu(k) = \lambda \cdot \mu(k-1) + (1-\lambda) \cdot \xi_{sf}(k)$$

$$\sigma^2(k) = \lambda \cdot \sigma^2(k-1) + (1-\lambda) \cdot [\xi_{sf}(k) - \mu(k)]^2,$$

kde λ představuje faktor zapomínání a s ohledem na vzorkovací frekvenci signálu a zvolenou časovou konstantu t se volí nejčastěji v intervalu 0,9 až 0,9999, k je krok a s každým vzorkem signálu se tedy zvyšuje o 1.
25

Faktor zapomínání λ je možné vyjádřit vztahem

$$\lambda = 1 - \frac{1}{f_s \cdot t}$$

kde f_s je vzorkovací frekvence signálu a t je zvolená časová konstanta.

Tento algoritmus přitom současně slouží jako filtr, neboť v případě, kdy dochází ke kontaktu rotor-stator, se mění střední hodnota i směrodatná odchylka, což je patrné z obr. 8, resp. jeho spodní části, kde například v časovém rozmezí 1400 s - 1500 s došlo ke kontaktu rotor-stator.

Po pozitivní detekci kontaktu rotor-stator následuje jeho lokalizace, resp. určení místa/míst na stroji, kde k tomuto kontaktu došlo, resp. dochází. Pro axiální lokalizaci tohoto místa/míst se použijí signály neznázorněných snímačů absolutních vibrací ložisek 2, 20 turbíny (které jsou standardní součástí polní instrumentace turbín), přičemž úseky těchto signálů v okamžiku vzniku, resp. průběhu kontaktu rotor-stator, se zpracují v časo-frekvenční oblasti. Přitom se identifikují širokopásmová amplitudová navýšení (rázy) ve spektru těchto signálů a následně se podle jejich charakteru určí frekvenční pásmo, ve kterém jsou tyto rázy dostatečně zřejmé, a v tomto pásmu se dále zpracovávají (např. libovolné frekvenční pásmo mezi frekvencemi 0 Hz až 150 Hz či 250 Hz až 300 Hz ve spektrogramu na obr. 9). Pro zpracování signálů je možné použít libovolné časo-frekvenční zpracování, např. krátkodobou Fourierovu transformaci, avšak vzhledem k jejich nestacionaritě je výhodnější použít vlnkovou transformaci, při níž se jako básová funkce použije Morletova vlnka.

Po identifikaci širokopásmových amplitudových změn (rázů) následuje určení času příchodu těchto rázů k jednotlivým snímačům absolutních vibrací ložisek 2, 20 turbíny – tzv. paty rázu, což je určení okamžiků nárůstu amplitud signálu nad úroveň šumu. Znalost těchto pat rázů a jejich vzájemných časových diferencí pak umožňuje v kombinaci se znalostí rozmístění snímačů absolutních vibrací ložisek 2, 20 v turbíně a rychlosti šíření rázu v materiálu rotoru/statoru axiální lokalizaci místa/míst kontaktu rotor-stator. Při této lokalizaci se získá několik desítek až stovek výsledků ukazujících místa vzniku kontaktu v turbíně, přičemž tyto výsledky se zobrazí pomocí histogramu absolutních četností, u kterého je na ose x zavedena axiální vzdálenost snímačů absolutních vibrací ložisek 2, 20 v turbíně. Po jeho spojení s výkresem dané turbíny nebo její osou je pak zřejmá axiální poloha míst, ve kterých došlo ke kontaktu rotor-stator po

délce rotoru 1 turbíny, přičemž jsou jasně rozlišena místa s častým kontaktem od míst s pouze občasným případně falešným kontaktem - viz obr. 10.

Pro upřesnění lokalizace místa/míst, kde dochází ke kontaktu rotor-stator, lze dále ze získaných dat určit i jeho/jejich obvodovou polohu. Přitom se s využitím synchronně vzorkovaných signálů snímačů 3, 30 a 4, 40 rotorových vibrací a signálů neznázorněných snímačů absolutních vibrací ložisek, které jsou standardní součástí polní instrumentace turbín, identifikuje úhel natočení rotoru 1, kdy dochází ke kontaktu rotor-stator. Amplitudové změny (rázy) způsobené kontaktem rotor-stator se přitom zobrazí do orbity 1. harmonické složky otáčkové frekvence rotoru 1, čímž se určí úhlová poloha maxima těchto amplitudových změn, která současně představuje obvodovou polohu místa kontaktu rotor-stator – viz úsečka a na obr. 11.

PATENTOVÉ NÁROKY

1. Způsob detekce a lokalizace částečného kontaktu rotor-stator při provozu turbíny, u kterého se rotor (1) turbíny snímá alespoň jedním párem
5 snímačů (3, 30, 4, 40) rotorových vibrací umístěným v jedné měřicí rovině (330, 440) kolmé k ose rotoru (1) a alespoň jedním párem snímačů absolutních vibrací ložisek (2, 20), **vyznačující se tím, že** u synchronně digitalizovaných signálů snímačů (3, 30, 4, 40) rotorových vibrací se vypočte aritmetický průměr jejich harmonických pásem v úplném spektru ve frekvenční oblasti, čímž se
10 převedou informace o subharmonických složkách a jejich násobcích v úplném spektru těchto signálů do frekvenčního pásma $-1X$ až $1X$ (kde X označuje otáčkovou frekvenci rotoru (1)), zároveň se výpočtem mediánu odhadne úroveň šumu, kterým jsou zatížena jednotlivá frekvenční pásma úplného spektra, a která se od amplitud v jednotlivých frekvenčních pásmech úplného spektra
15 signálů snímačů rotorových vibrací odečte, přičemž se v takto vytvořeném normovaném akumulovaném úplném spektru signálů snímačů rotorových vibrací porovnává amplituda předem stanovené subharmonické složky/složek signálů rotorových vibrací s amplitudami frekvenčních složek v jejím/jejich okolí stanovenými Fourierovou transformací nebo aproximací Fourierovou řadou,
20 přičemž se vizuálním a/nebo automatickým vyhodnocením usuzuje na přítomnost sledované subharmonické složky signálů rotorových vibrací ve spektru těchto signálů, na základě čehož se následně usuzuje na existenci kontaktu rotor-stator, a v případě jeho existence se dále lokalizuje místo/místa turbíny, kde k tomuto kontaktu dochází, přičemž při axiální lokalizaci se zpracují
25 úseky signálů snímačů absolutních vibrací ložisek (2, 20) turbíny v okamžiku vzniku, resp. průběhu kontaktu rotor-stator, v časo-frekvenční oblasti, ve které se identifikují širokopásmová amplitudová navýšení těchto signálů a následně se určí časy nárůstu amplitud signálů nad úroveň šumu, a ze znalosti těchto časů a jejich časových diferencí, rozmístění snímačů absolutních vibrací ložisek
30 (2, 20), rychlosti šíření rázu v materiálu rotoru/statoru se axiální lokalizací určí axiální poloha místa/míst kontaktu rotor-stator, a srovnáním histogramu absolutních četností těchto míst s výkresem nebo osou turbíny se určí axiální poloha místa/míst, kde ke kontaktu rotor-stator skutečně dochází, a pro

obvodovou lokalizaci se amplitudová navýšení signálů snímačů absolutních vibrací ložisek zobrazí do orbity 1. harmonické složky otáčkové frekvence rotoru (1) vytvořené ze signálů snímačů (3, 30, 4, 40) rotorových vibrací, čímž se určí úhlová poloha maxima amplitudových navýšení způsobených kontaktem rotor-stator, která odpovídá obvodové poloze místa/míst, kde dochází ke kontaktu rotor-stator.

2. Způsob podle nároku 1, **vyznačující se tím, že** snímače (3, 30, 4, 40) rotorových vibrací jsou snímače relativních rotorových vibrací.

3. Způsob podle nároku 1 nebo 2, **vyznačující se tím, že** snímače (3, 30, 4, 40) rotorových vibrací jsou snímače absolutních rotorových vibrací.

4. Způsob podle libovolného z předcházejících nároků, **vyznačující se tím, že** při vizuálním vyhodnocování se sleduje amplituda předem stanovené subharmonické složky/složek signálů rotorových vibrací v intervalu $1/9X$ až $1/2X$, která se porovnává s amplitudami frekvenčních složek v jejím/jejich okolí, přičemž v případě, že amplituda této subharmonické složky/složek převyší amplitudy okolních frekvenčních složek, usuzuje se na přítomnost sledované subharmonické složky/složek ve spektru signálů snímačů rotorových vibrací, na základě čehož se usuzuje na existenci kontaktu rotor-stator.

5. Způsob podle libovolného z nároků 1 až 3, **vyznačující se tím, že** při automatickém vyhodnocování se stanoví charakteristická veličina subharmonických složek s frekvencemi rovnými celočíselným podílům otáčkové frekvence rotoru 1 definovaná vztahem

$$\xi_{sf}(t) = \max \left[\frac{A_{caf}(t, -s_f)}{\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M A_{caf}(t, -\tilde{f}_k)}, \frac{A_{caf}(t, s_f)}{\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M A_{caf}(t, \tilde{f}_k)} \right]$$

kde $A_{caf}(t, \pm s_f)$ označuje amplitudu normovaného akumulovaného spektra pro subharmonickou frekvenci s_f v čase t a $A_{caf}(t, \tilde{f}_k)$ označuje amplitudu frekvenční linie v blízkém okolí této frekvence, M je celkový počet frekvenčních linií, které se použijí k průměrování, k je index součtu a $\tilde{f}_k$ je hodnota frekvenční linie, která se nachází v okolí subharmonické frekvence s_f ,

přičemž pokud ke kontaktu rotor-stator nedochází a tedy subharmonická složka ani její násobky nejsou v signálech rotorových vibrací obsaženy, nabývá

hodnota charakteristické veličiny pro danou subharmonickou složku hodnoty blízké 1, a pokud ke kontaktu rotor-stator dochází a tedy subharmonická složka signálu a/nebo její násobky jsou v signálech rotorových vibrací obsaženy, nabývá hodnota charakteristické veličiny pro danou subharmonickou složku hodnotu převyšující 1.

6. Způsob podle nároku 5, **vyznačující se tím, že** průběh charakteristické veličiny se aproximuje součtem střední hodnoty μ a směrodatné odchylky σ vypočtených rekursivním algoritmem ve formě:

$$\mu(k) = \lambda \cdot \mu(k-1) + (1-\lambda) \cdot \xi_{sf}(k)$$

$$\sigma^2(k) = \lambda \cdot \sigma^2(k-1) + (1-\lambda) \cdot [\xi_{sf}(k) - \mu(k)]^2,$$

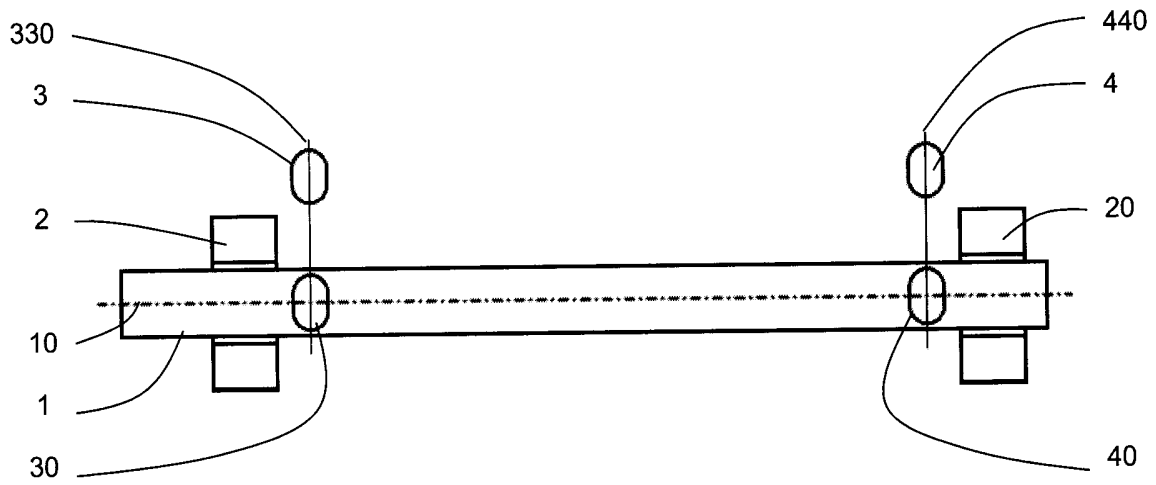
10 kde λ představuje faktor zapomínání a s ohledem na vzorkovací frekvenci signálu a zvolenou časovou konstantu t se volí nejčastěji v intervalu 0,9 až 0,9999, k je krok a s každým vzorkem signálu se tedy zvyšuje o 1,

přičemž ze změny střední hodnoty μ a směrodatné odchylky σ se usuzuje na existenci kontaktu rotor-stator.

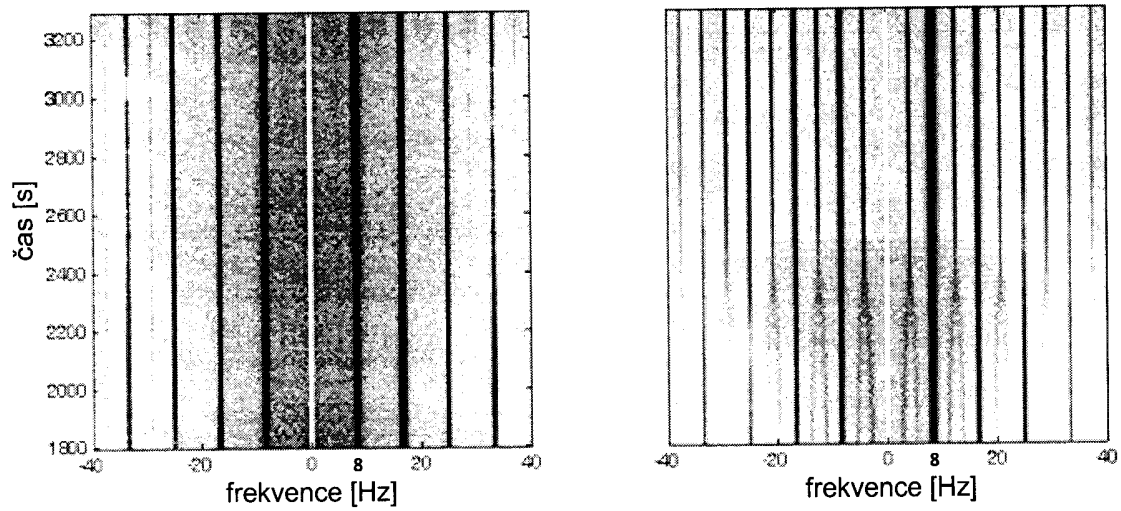
15 7. Způsob podle libovolného z předcházejících nároků, **vyznačující se tím, že** při axiální lokalizaci se zpracují úseky signálů snímačů absolutních vibrací ložisek (2, 20) turbíny v okamžiku vzniku, resp. průběhu kontaktu rotor-stator, vlnkovou transformací.

20 8. Způsob podle nároku 7, **vyznačující se tím, že** jako bazová funkce vlnkové transformace se použije Morletova vlnka.

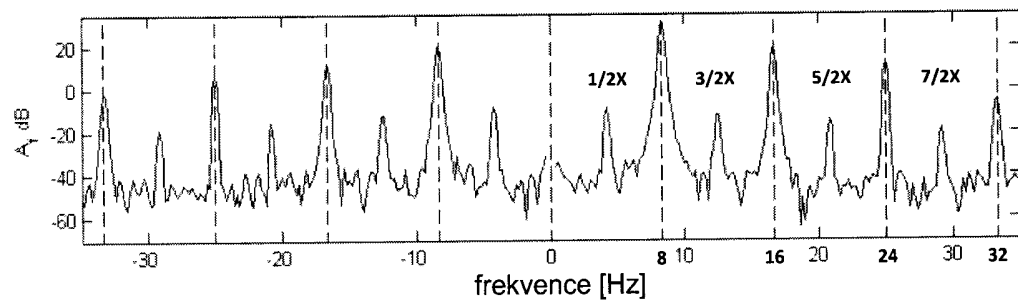
1/5



Obr. 1



Obr. 2

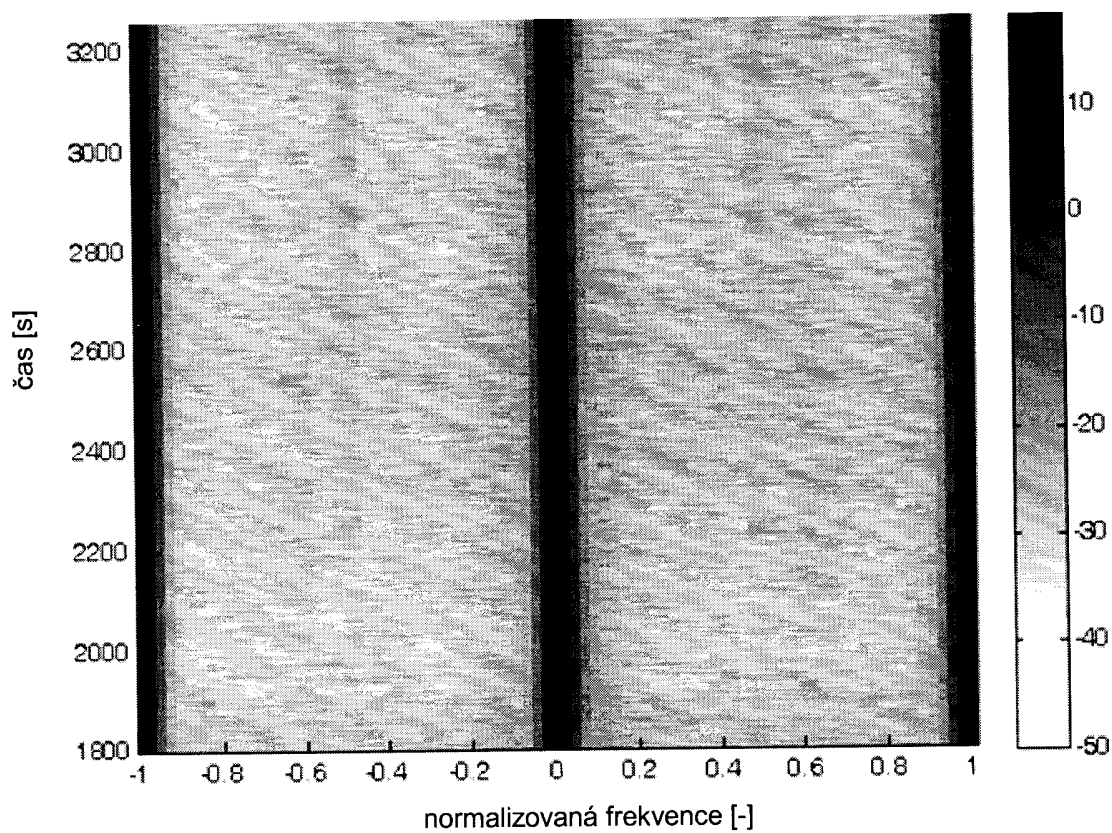


20.12.12

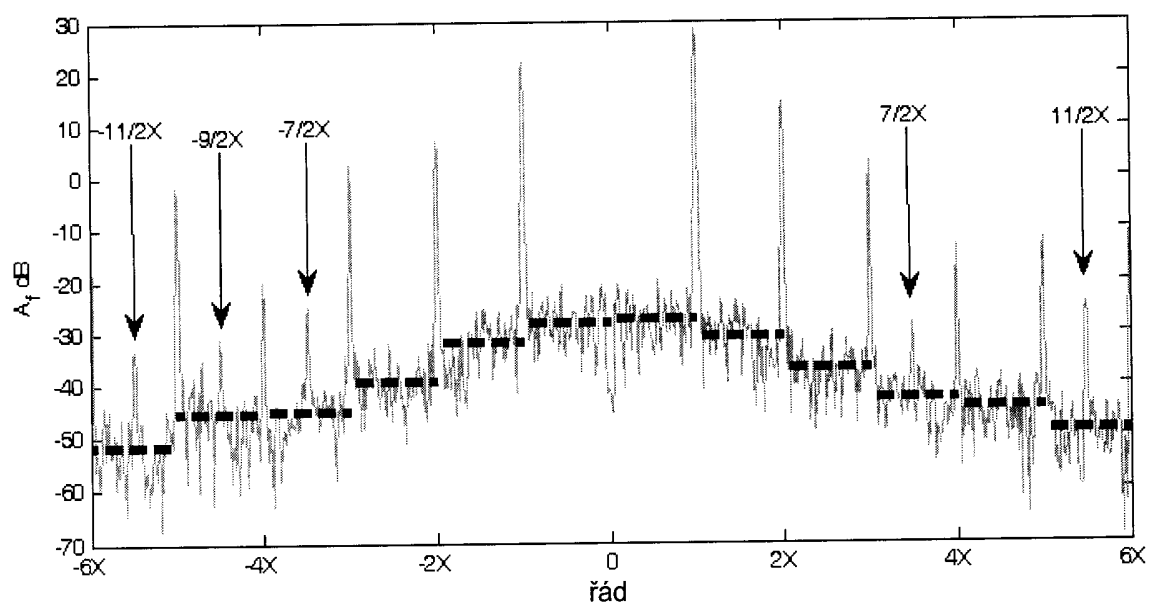
2012-047

2/5

Obr. 3

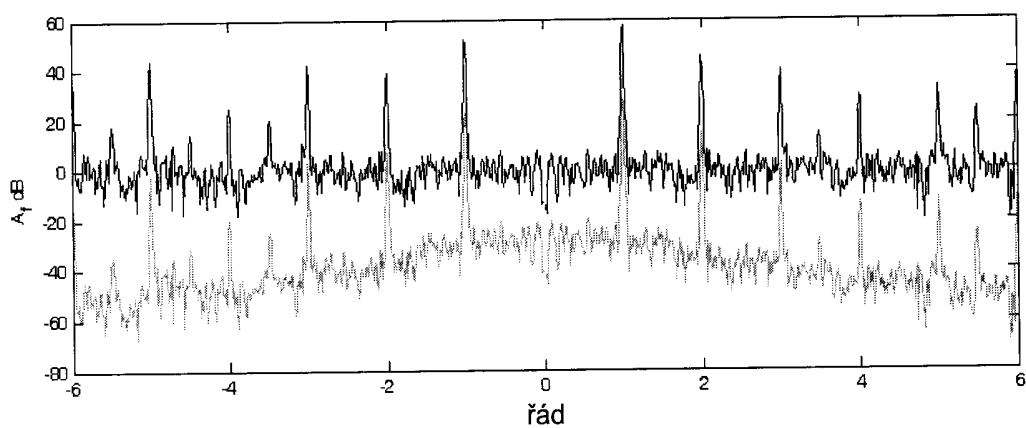


Obr. 4

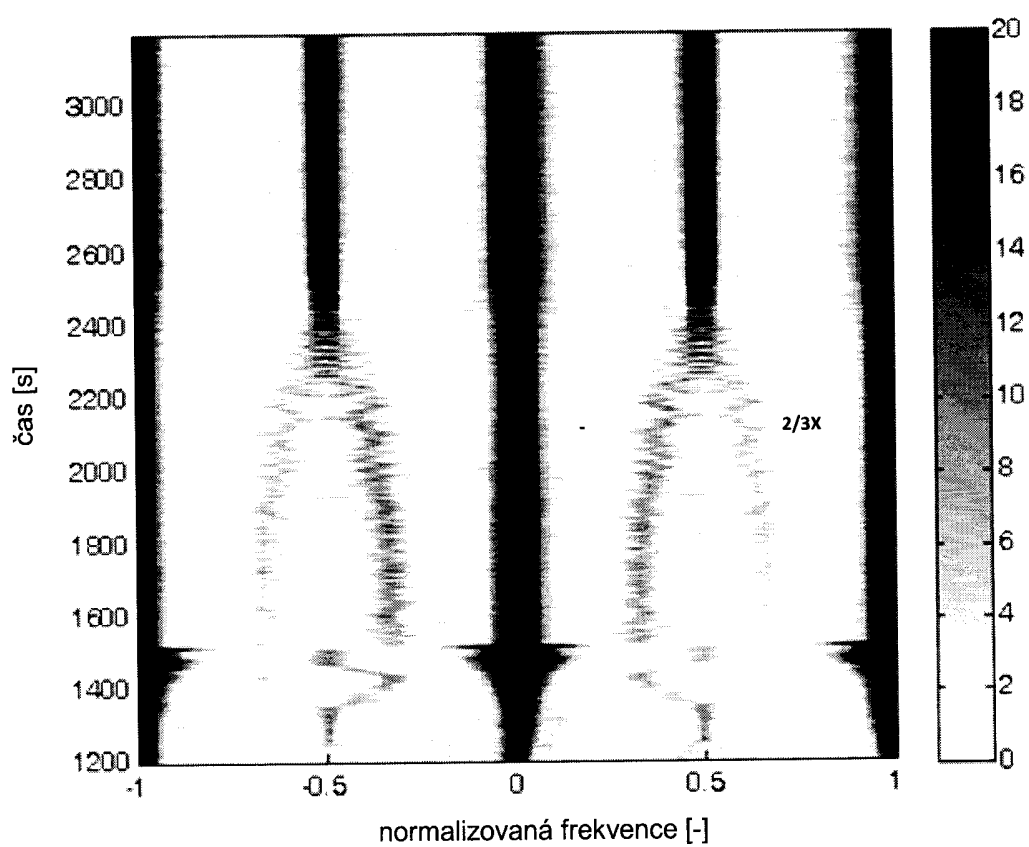


3/5

Obr. 5



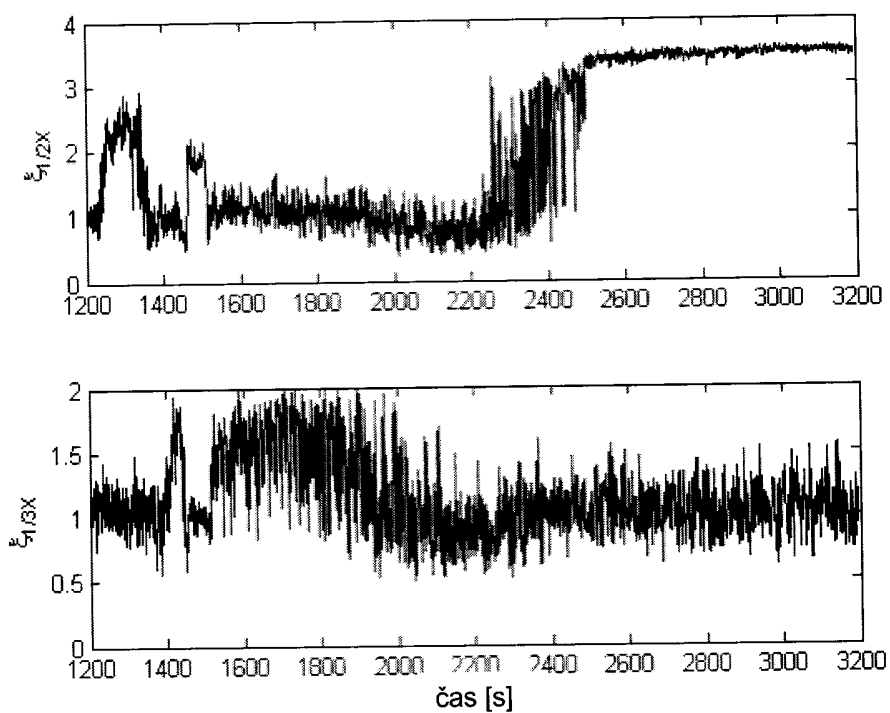
Obr. 6



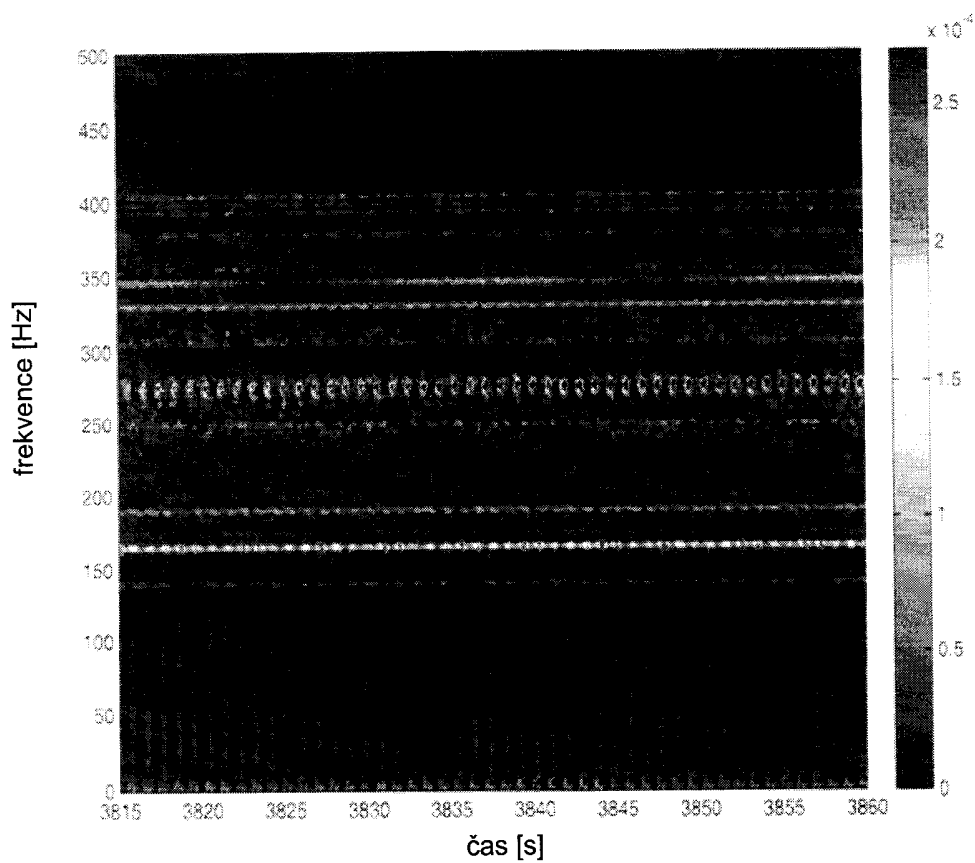
Obr. 7

20.10.12
2012-047

4/5



Obr. 8

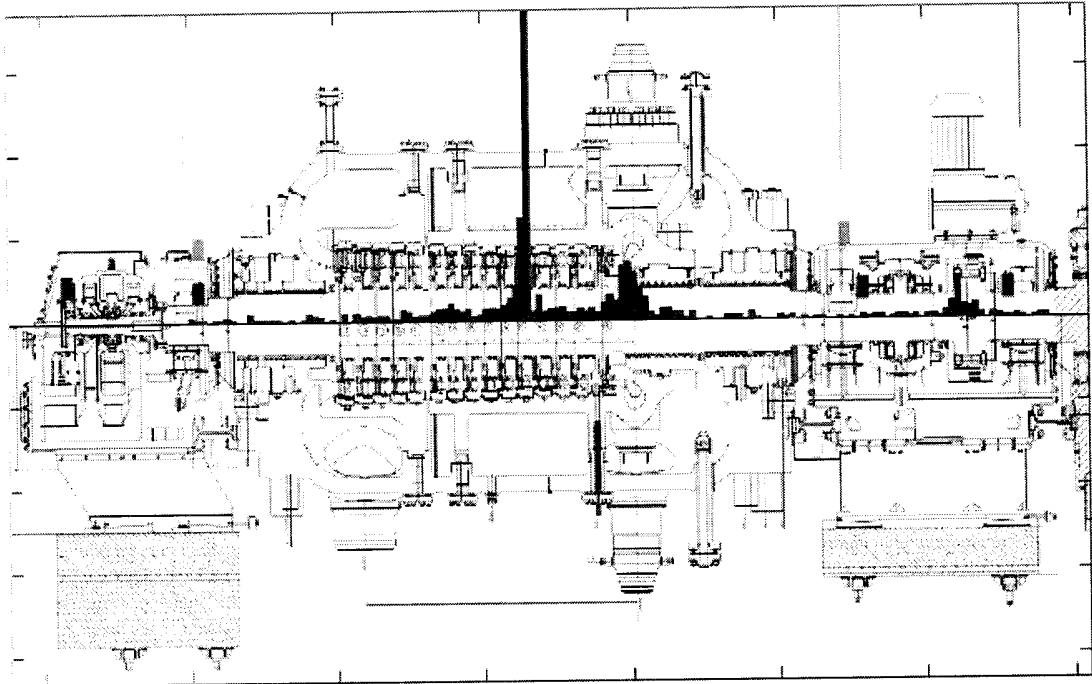


20.12.10

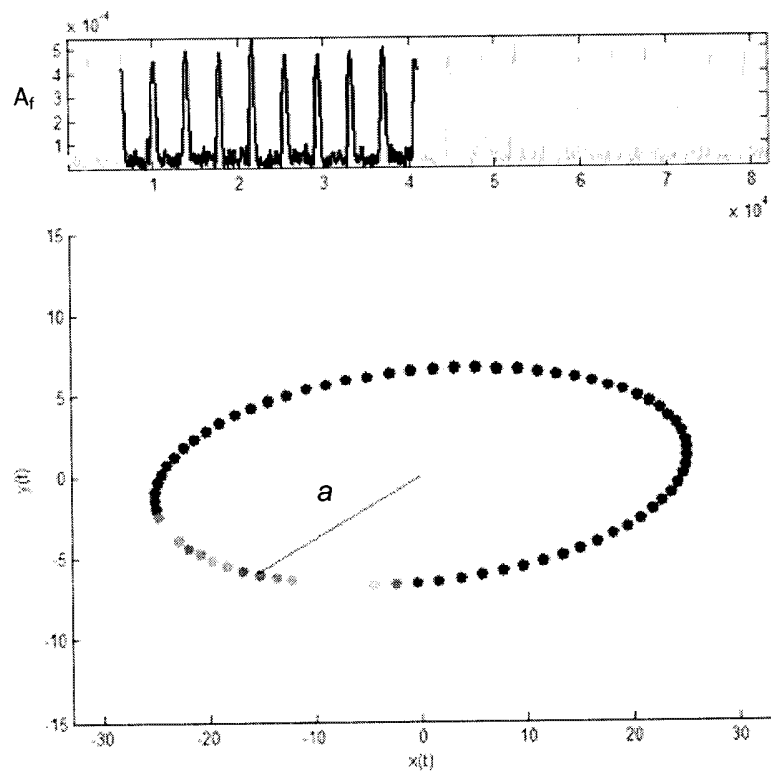
2012-047

5/5

Obr. 9



Obr. 10



Obr. 11