

**Západočeská univerzita v Plzni**

**Fakulta aplikovaných věd**

**Katedra kybernetiky**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**PLZEŇ 2012**

**ANTONÍN BOUBERLE**

zadání

## PROHLÁŠENÍ

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím odborné literatury a pramenů, jejichž úplný seznam je její součástí.

V Plzni dne 18. května 2012

.....  
*vlastnoruční podpis*

## **Poděkování**

Na tomto místě bych velice rád poděkoval panu Ing. Jindřichu Liškovi, Ph.D. a panu Ing. Janu Jaklovi za odborné vedení práce, odborné konzultace, připomínky, rady a v neposlední řadě za jejich velkou ochotu a trpělivost. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům a mé přítelkyni za podporu.

## **Anotace**

Stále rostoucí ekonomické a bezpečnostní požadavky donutily energetický průmysl ke zdokonalování zařízení pro výrobu elektrické energie. Tato bakalářská práce se podrobně zabývá problematikou lokalizace místa kontaktu rotující a stacionární části parní turbíny. Včasné odhalení místa kontaktu zabraňuje snižování účinnosti stroje. V práci je podrobně popsána analýza a způsob lokalizace místa kontaktu v datech získaných z rotorového stendu a z turbín používaných v provozu. Dále je zde popsán experiment včetně jeho vyhodnocení, který byl proveden na stojícím rotoru (bez rotace). Při analýze dat je v práci využíváno krátkodobé Fourierovy transformace.

## **Klíčová slova**

Rotor, parní turbína, rotorový stend, rubbing, vlnění, první harmonická frekvence, subharmonická složka, spektrogram.

## **Annotation**

The ever-growing economical and safety demands have forced the electric power industry to keep perfecting electric generating machines. This Bachelor's thesis takes a detailed look at localizing the contact (rubbing) area of the rotating and the stationary parts of steam turbine. Early detection of the contact area prevents a drop in efficiency. This work uses data from rotor stand and turbines used in everyday operation to offer a detailed analysis of the contact area as well as the way of its localization. The thesis includes a stationary rotor experiment (zero rotational speed) and its evaluation. Short time Fourier transform is used for the analysis of the data.

## **Keywords**

Rotor, steam turbine, rotor stand, rubbing, waves, first harmonic frequency, sub-harmonic frequency, spectrogram.

## Obsah

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1   | Úvod .....  | 9  |
| 2   | Parní turbína a rubbing .....   | 11 |
| 2.1 | Popis parní turbíny .....   | 11 |
| 2.2 | Rubbing .....   | 12 |
| 3   | Metody pro zpracování signálů .....   | 14 |
| 3.1 | Fourierova transformace.....  | 14 |
| 3.2 | Krátkodobá Fourierova transformace.....                                       | 15 |
| 4   | Experimentální lokalizace rázů na rotoru – Škoda Power.....                   | 17 |
| 4.1 | Popis a význam experimentu .....  | 17 |
| 4.2 | Šíření akustických vln v materiálech.....                                     | 17 |
| 4.3 | Porovnání analytických vln s experimentálními výsledky, odhad místa rázu..... | 20 |
| 5   | Analýza signálů získaných na rotorovém standu (rotor kit RK4) .....           | 25 |
| 5.1 | Popis rotorového standu RK4.....  | 25 |
| 5.2 | Rotor-kit RK4 bez ucpávky .....   | 26 |
| 5.3 | Rotor-kit RK4 s ucpávkou.....   | 27 |
| 5.4 | Rotor-kit RK4 - subharmonické složky kmitání.....                             | 30 |
| 5.5 | Lokalizace místa rázu na rotor-kitu RK4 .....                                 | 31 |
| 6   | Lokalizace rubbingu v provozu parních turbín – blok 80MW a 200MW .....        | 35 |
| 6.1 | Turbínový blok 80MW .....   | 35 |
| 6.2 | Turbínový blok 200 MW .....   | 39 |
| 7   | Závěr.....  | 44 |
|     | Literatura .....  | 46 |
|     | A. Rotor – Škoda Power .....  | 47 |
|     | B. Analýza signálů – turbínový blok 200 MW .....                              | 48 |

## Seznam obrázků

|   |    |
|---|----|
| obr. 2-1: Parní turbína (čerpáno z [5]).....                                      | 12 |
| obr. 3-1: Spektrogram signálu rázu pro odlišné délky okna.....                    | 16 |
| obr. 4-1: Disperzní křivka v časo-frekvenční rovině.....                          | 19 |
| obr. 4-2: Spektrogram signálu pro daný poklep.....                                | 20 |
| obr. 4-3: Experimentální křivka představující začátek vlnění.....                 | 21 |
| obr. 4-4: Analyticky vypočítané disperzní křivky pro různé vzdálenosti.....       | 22 |
| obr. 4-5: Analytická a experimentální křivka na frekvenčním pásmu 3 – 10 kHz..... | 23 |
| obr. 4-6: Experimentální křivka s velkými odchylkami od paty vlny.....            | 24 |
| obr. 5-1: Rotorový stand RK4.....   | 25 |
| obr. 5-2: Spektrogram signálu bez ucpávky.....                                    | 26 |
| obr. 5-3: Spektrogram signálu bez opakování.....                                  | 27 |
| obr. 5-4: Spektrogram signálu s ucpávkou.....                                     | 28 |
| obr. 5-5: Spektrogram signálu s viditelnou 1/2X složkou.....                      | 29 |
| obr. 5-6: Linie ze spektrogramu odpovídající frekvenci 1280 Hz.....               | 29 |
| obr. 5-7: Spektrogram signálu při rezonančních otáčkách.....                      | 30 |
| obr. 5-8: Maxima s frekvencí odpovídající 1/6X.....                               | 31 |
| obr. 5-9: Shodná frekvenční linie snímačů ve dvou měřicích rovinách.....          | 34 |
| obr. 5-10: Graf závislosti střední hodnoty a rozptylu na délce okna.....          | 34 |
| obr. 6-1: Přejít subharmonické frekvence 1/3X na 1/2X.....                        | 36 |
| obr. 6-2: Viditelné rázy s frekvencí 1/2X.....                                    | 36 |
| obr. 6-3: Projev subharmonické složky 1/2X na 2. a 3. rovině.....                 | 39 |
| obr. 6-4: Průběh Smax hodnoty a spektrogram signálu z absolutního snímače.....    | 40 |
| obr. 6-5: Detail události a linie tří rovin odpovídající frekvenci 276 Hz.....    | 41 |
| obr. 6-6: Schéma pro odvození rovnic místa kontaktu.....                          | 42 |
| obr. 6-7: Histogram vypočítaných vzdáleností a část schématu 200 MW turbíny.....  | 43 |
| obr. A-1: Experiment na rotoru bez otáček.....                                    | 47 |
| obr. A-2: Umístění snímačů na rotoru.....   | 47 |
| obr. B-1: Spektrogram signálu bez rázů.....                                       | 48 |
| obr. B-2: Spektrogram signálu s viditelnými rázy.....                             | 48 |

## Seznam symbolů a zkratek

|                |  |
|----------------|--|
| $IX$           | první harmonická frekvence                 |
| $A(\omega)$    | amplitudové spektrum                       |
| $c_p$          | fázová rychlost šíření zvuku               |
| $c_g$          | grupová rychlost šíření zvuku              |
| $c_L$          | podélná rychlost šíření akustického vlnění |
| $c_T$          | příčná rychlost šíření akustického vlnění  |
| $f$            | frekvence                                  |
| $h(t)$         | okénková funkce                            |
| $Hz$           | Hertz (jednotka frekvence)                 |
| $kHz$          | kilo-Hertz (jednotka frekvence)            |
| $l$            | vzdálenost místa kontaktu od 1. roviny     |
| $L_1$          | vzdálenost mezi 1. a 2. rovinou            |
| $L_2$          | vzdálenost mezi 2. a 3. rovinou            |
| $MW$           | mega-Watt (jednotka výkonu)                |
| $ot./min$      | otáček za minutu                           |
| $RK4$          | rotorový stend                             |
| $STFT$         | krátkodobá Fourierova transformace         |
| $t$            | čas  |
| $v$            | rychlost šíření vlnění                     |
| $x(t)$         | spojitý signál                             |
| $X(j\omega)$   | obraz Fourierovy signálu $x(t)$            |
| $X(\omega, t)$ | obraz krátkodobé Fourierovy transformace   |
| $\lambda$      | vlnová délka                               |
| $\kappa$       | vlnové číslo                               |
| $\Phi(\omega)$ | fázové spektrum                            |
| $\sigma_t$     | směrodatná odchylka času                   |
| $\sigma_f$     | směrodatná odchylka frekvence              |
| $\omega$       | úhlová frekvence                           |



## 1 Úvod

Není pochyb o tom, že dnešní společnost je plně závislá na elektrické energii. Stále rostoucí spotřeba elektrické energie donutila energetický průmysl k rozvoji a zdokonalování jeho částí. Jak je obecně známo, elektrická energie se získává z přírodních zdrojů, které mohou být obnovitelné či neobnovitelné. V této době se stále více hovoří o ubývání neobnovitelných přírodních zdrojů. Současný stav vývoje energetického průmyslu lze pomyslně rozdělit do dvou směrů. Prvním z nich je hledání způsobů, jak získávat elektrickou energii bez závislosti na vyčerpání zásob. Druhou tendencí je zvyšování účinnosti zařízení sloužící k výrobě elektrické energie, ať už z obnovitelných či neobnovitelných zdrojů. Důraz není kladen pouze na účinnost zařízení, ale také na životnost, spolehlivost a v neposlední řadě bezpečnost, přičemž na pozadí mohou stát především ekonomické, ale také ekologické důvody. Nemalou snahou je získávání co nejvíce informací o aktuálním stavu zařízení, které by vedly ke včasnému diagnostikování závady a zabránění tím vzniku škod.

V předcházejícím odstavci bylo zmíněno zařízení pro výrobu elektrické energie. V této práci bude tím zařízením myšlena parní turbína spolu s dalšími částmi. Jak [3] uvádí, v generátoru, kde přímo vzniká elektrická energie, je využíváno rotačního pohybu, který zajišťuje přehřátá vodní pára působící na lopatky parní turbíny. Lopatky jsou spojeny s hřídelí, a proto působením páry dochází k roztáčení rotoru. Parní turbínu lze rozdělit na hlavní tři části – vysokotlaká, středotlaká a nízkotlaká část. Odlišné délky lopatek souvisí s vlastnostmi páry v jednotlivých částech turbíny (viz následující kapitola). Aby zbytečně přehřátá vodní pára neunikala místy v turbíně, kde by nepůsobila na lopatky, jsou mezi rotující a stacionární částí umístěny ucpávky. Ucpávky tedy přispívají ke zvýšení účinnosti turbíny. Čím více bude prostor mezi rotující a stacionární částí vyplněn, tím vyšší bude účinnost turbíny. Ovšem na druhou stranu se tím bude zvyšovat riziko kontaktu rotoru a statoru, označovaném též slovem anglického původu - rubbing. Předmětem této práce je právě lokalizovat místo vzniklého kontaktu. To se obzvláště děje při otáčení rotoru s frekvencí blízkou se frekvencí vlastních kmitů, což může mít mimo jiné i za následek obroušování ucpávek a snižování jeho účinnosti. Hlavní příčinou vzniku kmitů na rotoru během otáčení je nevyváženost rotoru, která vzniká při výrobě a nelze ji bezzbytku odstranit.

V tomto odstavci je uveden současný stav detekce a lokalizace rubbingu. Jak je uvedeno v [3], detekce rubbingu je prováděna online sledováním celkových vibrací a také velikosti amplitudy a fáze frekvenční složky, která je označována jako první harmonická (1X). První harmonická frekvence je rovna frekvenci, s jakou dochází k otáčení rotoru. Jestliže dojde k výraznějším časovým změnám amplitudy a fáze, je potřeba pro detekci provést další offline analýzu signálu. Dalším doprovodným a v této práci využívaným projevem rubbingu je projev subharmonických složek signálu. Tento projev je například popsán a zobrazen na obrázcích v kapitole 5. Lokalizace rubbingu není doposud příliš probádanou a zcela vyřešenou problematikou. Do této doby nebyl vytvořen systém, který by online detekoval a zároveň lokalizoval místo vzniku rubbingu.

Práce je dále rozdělena na několik částí:

- popis parní turbíny a rubbingu
- popis časo-frekvenčních metod pro zpracování signálu
- popis experimentální lokalizace rázů na rotoru
- popis analýzy signálů získaných na rotorovém standu
- popis lokalizace rubbingu v provozu parních turbín
- závěr

Následující kapitola „Parní turbína a rubbing“ popisuje parní turbínu s ohledem na lokalizaci kontaktu rotor/stator. Dále je v této kapitole podrobněji popsán samotný rubbing a jeho typy. Další kapitola s názvem „Časo-frekvenční metody pro zpracování signálů“ se věnuje metodě, kterou jsou zaznamenané vibrační signály v této práci zpracovávány – krátkodobou Fourierovo transformací. Za touto kapitolou následuje „Experimentální lokalizace rázů na rotoru – Škoda Power“, ve které je popsán samotný experiment a analýza signálů spolu s výsledky. Cílem kapitoly je lokalizovat místo rázu porovnáním analyticky získaných křivek s křivkami získanými ze zaznamenaných dat a porovnat jednotlivé snímače, které byly během experimentu použity. V této kapitole je mimo jiné uvedeno základní rozdělení typů vln. V další kapitole s názvem „Analýza signálů získaných na rotorovém standu (rotor-kit RK4)“ je uveden popis, jakým způsobem byl zaznamenaný signál analyzován. Dále jsou uvedeny nové poznatky a souvislosti v dané problematice, které byly získány na rotor-kitu RK4. Nakonec je v této kapitole popsána lokalizace spolu s vyhodnocením úspěšnosti. Šestá kapitola s názvem „Lokalizace rubbingu v provozu parní turbíny“ přináší analýzu signálu a lokalizaci místa kontaktu rotor/stator na datech zaznamenaných v provozu na parních turbínách – elektrárny 80MW a 200MW. V této kapitole je na těchto datech aplikován teoretický aparát a poznatky, které byly získány v předcházejících částech práce, především na rotorovém standu. Zda-li vůbec půjde provést lokalizace a pokud ano, zda stejným způsobem jako na rotorovém standu, uvidíme v této kapitole. V poslední kapitole „Závěr“ je uvedeno zhodnocení výsledků. Dále jsou představeny možnosti, jakým směrem se lze zabírat dále v této práci.

Jak bylo již zmíněno, problematika lokalizace rubbingu není příliš probádanou oblastí. V současné době je jen několik příspěvků, které hovoří o dané problematice v provozu. Práce se tedy zaměřuje na získání nových poznatků, skutečností či hypotéz, především s využitím experimentů na rotorovém standu, a jejich porovnání s daty z provozu turbíny. Cílem práce je vytvořit algoritmus, který by s vysokou přesností dokázal lokalizovat místo kontaktu mezi rotorem a státorem.

## 2 Parní turbína a rubbing

Pro snazší pochopení problematiky kontaktu rotor-stator je v této kapitole zařazena část popisující samotnou parní turbínu. Hledisek, z jakých lze popisovat parní turbínu, je celá řada. Zde je uveden princip, na jakém parní turbína pracuje, dále jsou uvedeny ty konstrukční části turbíny, které souvisí s problematikou rubbingu. Dále je v této kapitole popsán samotný rubbing a jeho typy.

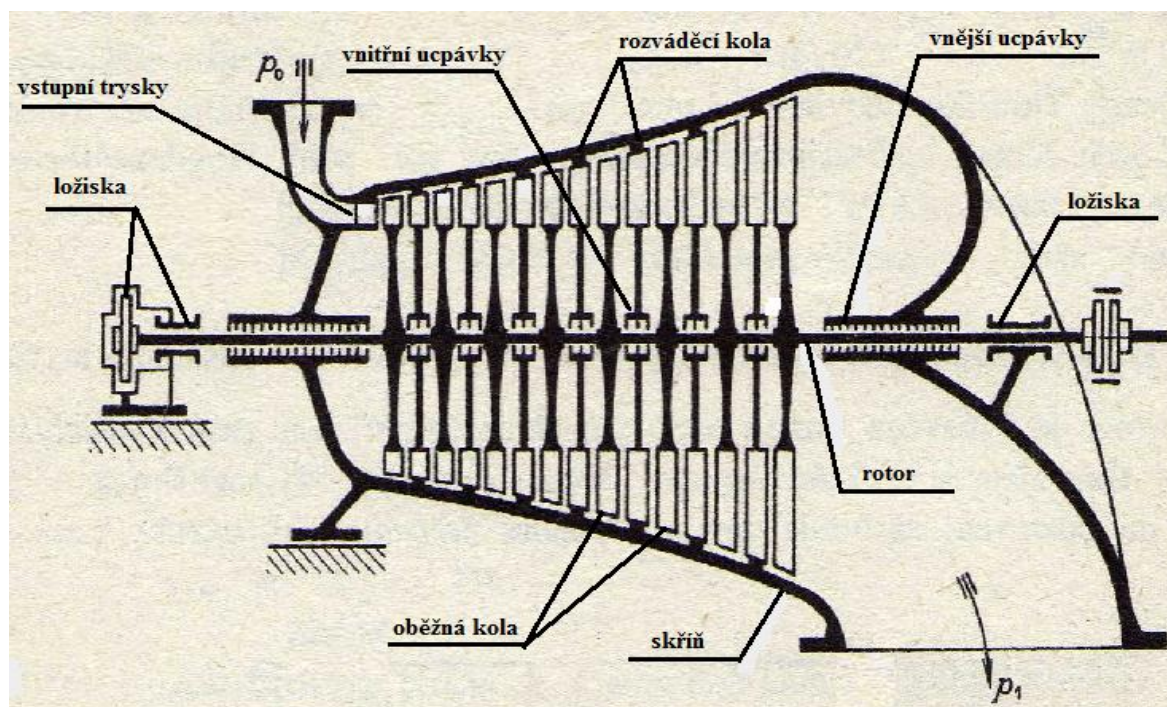
### 2.1 Popis parní turbíny

Tato část vychází z popisu parních turbín uvedeného v [5]. Parní turbína je rotační zařízení, kde hlavní princip spočívá v přeměně tepelné energie obsažené v přehřáté vodní páře na energii rotačního pohybu. Tento rotační pohyb je využíván především v generátoru, kde dochází ke vzniku elektrické energie. K nejdůležitějším částem parní turbíny patří rotor, rozváděcí ústrojí, skříň turbíny, ucpávky a ložiska. Zjednodušené schéma parní turbíny je na následujícím obrázku, viz obr. 2-1. Nejčastěji je rotor tvořen hřídelí a oběžnými koly. Může být tvořen i bubnem, který na koncích přechází v hřídel. Na oběžná kola (popř. na buben) jsou dále připevňovány oběžné lopatky. Lopatky jsou rozmístěny po celém obvodu oběžných kol. Lopatka je místem, kde především dochází k působení přehřáté páry. Následně je pak vlivem samotného tvaru a vzájemného rozmístění lopatek roztáčen rotor. Jak jednotlivé části rotoru, tak i celý rotor je vyvažován. Nevývažek rotoru vzniká při jeho výrobě. Může za určitých okolností docházet k vektorovému skládání síly od nevývažku s dalšími působícími silami. Například, při opakovaném kontaktu se stacionární částí dochází ke zvyšování teploty v místě kontaktu, čímž může dojít k průhybu rotoru, který je součtem ohybu od nevývažku s ohybem způsobeným nestejným prohřevem rotoru. V provozu parní turbíny běžně dochází k otáčení rotoru rychlostí 3000 ot./min. Ani po odstavení turbíny není rotor zcela v klidu, neboť by mohlo dojít vlivem vlastní tíhy k prohnutí. Proto je rotor v takovém případě provozován na natáčecím stroji. Rotory se mohou dělit na elastické a tuhé. Elastické se vyznačují tím, že kritické otáčky jsou nižší než otáčky provozní. U tuhých rotorů je tomu přesně naopak.

Hlavní částí rozváděcího ústrojí je kolo spolu s rozváděcími lopatkami. Rozváděcí lopatky určují směr proudění přehřáté páry, která působí na oběžné lopatky pod takovým úhlem, který zajišťuje co nejvyšší účinnost. Celé rozváděcí zařízení je součástí statoru – vnitřní části skříň. Skříň je poměrně namáhána a to vlivem vysokého přetlaku páry a také odlišnou teplotou skříň v různých částech. To souvisí s odlišnou teplotou páry, přičemž nejvyšších teplot dosahuje na vstupní části turbíny. Jedny z nejdůležitějších částí parní turbíny z pohledu lokalizace rubbingu jsou tzv. ucpávky. Ucpávky jsou součástí nerotující části a dělí se na vnitřní a vnější. Cílem ucpávek je eliminovat místa, kudy by mohla proudit pára bez využití. Vnější ucpávky jsou v místě výstupu hřídele ze skříň. Vnitřní ucpávky snižují vůli mezi oběžnými lopatkami a stacionární částí turbíny. Působením páry na ucpávku dojde k jejímu zahlcení a k následnému utěsnění. U turbín používaných v provozu je rotor usazen v tzv. kluzných ložiscích. Mazání ložisek je prováděno olejem pod tlakem.

V provozu parní turbíny nemá přehřátá pára ve všech místech stejné vlastnosti, především teplotu a tlak. Nejvyšších teplot a tlaků dosahuje při vstupu do turbíny. Tím, jak předává svoji energii rotoru, chladne a dochází ke snižování tlaku. Tato skutečnost je kompenzována zvětšující délkou oběžných lopatek. Proto je parní turbína dělena na vysokotlaký, středotlaký a nízkotlaký stupeň. Někdy bývá středotlaký a nízkotlaký stupeň

spojen dohromady v jeden díl. Ve vysokotlakém stupni je tedy délka oběžných lopatek menší oproti dalším stupňům, ve kterých je postupně zvětšována.



obr. 2-1: Parní turbína (čerpáno z [5])

## 2.2 Rubbing

Tato podkapitola vychází z publikací [2] a [3]. V problematice zabývající se rotujícími stroji je rubbingem označován jakýkoliv mechanický kontakt rotující a stacionární části. Český ekvivalent pro pojem rubbing je zadírávání. Samotný rubbing je velmi často až následným projevem některé poruchy na stroji. Za vznikem rubbingu mohou stát vibrace vzniklé závadou na stroji nebo nevyváženost rotoru. S existencí nevyváženosti na rotoru během otáčení je spojen vznik síly působící na rotor. Právě tato síla způsobí vychýlení rotoru od středu rotace, resp. osa rotoru není shodná s osou rotace. Přeroste – li vychýlení rotoru určitou mez, může dojít ke kontaktu se stacionární částí – nejčastěji s ucpávkou. Velmi často k rubbingu dochází při průjezdu otáček pásmem vlastní frekvence rotoru, kdy při těchto otáček je dosahováno největších vibrací, nebo po instalaci nových ucpávek do turbíny.

Důležitým pojmem v této problematice je tzv. precese. Precese představuje tvar křivky, po které geometrický střed rotoru obíhá během otáčení. Směr precese je vztažen ke směru otáčení rotoru. Precesi lze tedy rozdělit na tzv. dopřednou a zpětnou. U dopředné precese dochází k pohybu geometrického středu rotoru stejným směrem, jako je směr otáčení rotoru. U zpětné precese je tomu přesně naopak. Jednou z možností jak rozlišovat typy rubbingu je právě typ precese. Může tedy nastat rubbing s dopřednou precesí a rubbing se zpětnou precesí. Další dělení typů rubbingu vychází z délky doby kontaktu rotoru a statoru. Potom hovoříme buď o částečném nebo úplném rubbingu.

Při částečném rubbingu je rotor se statorem v kontaktu pouze na krátkou dobu, kdy dojde k nárazu rotující části do části stacionární. Tyto nárazy mohou nastávat periodicky. Během kontaktu rotoru a statoru působí na rotor třecí síla, která působí opačným směrem než je směr otáčení. Proto může nastat situace, že dojde ke změně precese a to z dopředné na

zpětnou. V této práci se budeme zabývat především částečným rubbingem, který je dobře detekovatelný na základě vzniku tzv. subharmonických frekvencí. Tyto frekvence souvisí s intenzitou a s frekvencí otáčení a platí, že jsou často rovny celočíselným podílům frekvence otáčení. Subharmonické frekvence jsou označovány jako  $1/2X$ ,  $1/3X$  apod. Například subharmonická frekvence  $1/2X$  představuje kontakt rotoru se státorem jednou za dvě otáčky rotoru. Při slabém rubbingu s nízkou intenzitou se vyskytují subharmonické složky  $1/6X$ ,  $1/5X$ ,  $1/4X$ ,  $1/3X$  a  $1/2X$ . Při silném rubbingu se vyskytuje ve frekvenčním spektru pouze složka  $1/2X$ .

Druhým typem rubbingu z pohledu doby kontaktu rotoru a statoru je rubbing úplný. Při úplném rubbingu dochází k neustálému kontaktu po delší dobu. Tento typ rubbingu nevzniká náhle. Nejprve dochází ke kontaktu částečnému a posléze může dojít k úplnému rubbingu. Úplný rubbing lze taktéž rozdělit na typ s dopřednou či zpětnou precesí, přičemž to, zda dojde ke zpětné precesi, závisí na velikosti třecí síly. Úplný rubbing se zpětnou precesí je velmi nebezpečný, neboť dochází k silnému obrousování stacionární i rotorové části, což nakonec může vést k destrukci celého zařízení. Tento typ rubbingu nelze z důvodu bezpečnosti provádět na turbínách v provozu. Ovšem podařilo se tento rubbing vyvolat na rotorovém stendu. Právě na rotorovém stendu bylo experimentálně dokázáno, že pokud dojde ke vzniku tohoto typu rubbingu, bude nadále jeho existence nezávislá na změně otáček rotoru. Vzniká samobuzené kmitání, kde frekvence samobuzení je zcela dominantní složkou zpětné precese i celého frekvenčního spektra. Projevem úplného (také i částečného) rubbingu je mimo jiné i změna tuhosti soustavy rotor/stator, přičemž dochází ke změně vlastní frekvence soustavy. Někteří autoři se touto problematikou zabývají právě z pohledu změny tuhosti.

Vstupem pro detekci a následnou lokalizaci jsou naměřená data, která byla snímána současně na různých částech turbíny (popř. rotorového stendu). V této práci byly použity především relativní snímače vibrací. Dále bude používán pojem rovina v souvislosti s umístěním snímače. Rovinnou je v této práci myšlen kolmý řez na rotor, ve kterém je umístěn jeden nebo dva snímače. Na turbíně v provozu byly roviny zvoleny následovně. U každé z částí turbíny (vysokotlaké, středotlaké a nízkotlaké) je jedna rovina umístěna před a druhá za danou částí. Na turbíně v provozu jsou v každé rovině umístěny dva snímače, jejichž osy svírají úhel  $90^\circ$ . Často bývá jeden snímač z dané roviny označován jako  $x$ , druhý jako  $y$ . My budeme pro lokalizaci využívat pouze jeden ze snímačů dané roviny. Informace z obou snímačů je například využívána při určování typu precese. Jednotlivé snímače nám tedy zaznamenávají informaci o chování rotoru v daných místech, čehož bude v této práci využíváno.

### 3 Metody pro zpracování signálů

Důležitou částí při řešení problému detekce či lokalizace rubbingu je určení, jakým způsobem bude zaznamenaný vibrační signál zpracováván. Jedna z možností se nabízí v podobě analýzy signálů v časově-amplitudové oblasti, čili závislost amplitudy měřených vibrací na čase. Při kontaktu rotor/stator sice dochází ke změnám (k nárůstu) amplitudy měřeného signálu, ale v důsledku přítomnosti šumu je (především pro lokalizaci) tento přístup nevhodný. Projev rubbingu není spojen pouze se změnou amplitudy v časové oblasti, ale také dochází k projevům v oblasti frekvenční, příkladem je vznik subharmonické složky kmitání. Rozložení měřeného vibračního signálu do frekvenční oblasti provádí Fourierova transformace. Rozklad spočívá v určení amplitud a fází jednotlivých částí vibračního signálu. Jak bude v této práci ukázáno, důležitou skutečností pro lokalizaci místa kontaktu je projev rubbingu ve frekvenční oblasti a zároveň je důležité znát i informaci o času příchodu napěťové vlny vzniklé kontaktem k jednotlivým snímačům, čímž se dostáváme k metodám pro zpracování signálů v časo-frekvenční rovině. V této práci bude použita metoda krátkodobé Fourierovy transformace, kterou lze použít i na nestacionární signály. Mezi metody pro zpracování signálů v časo-frekvenční oblasti dále patří například Wavelet transformace nebo Wigner-Villeova distribuce. Tato kapitola je věnována popisu Fourierovy transformace a její aplikaci - krátkodobé Fourierově transformaci.

#### 3.1 Fourierova transformace

Tato část kapitoly vychází především z popisu Fourierovy transformace uvedené v [3] a [4]. Fourierova transformace je účinným nástrojem pro dekompozici periodického signálu ve frekvenční rovině. Fourierovu transformaci lze definovat následujícím způsobem:

Fourierova transformace funkce  $x(t)$ , pro kterou platí:

- i  $x(t)$  je jednoznačná, po úsecích hladká funkce v každém konečném časovém intervalu
- ii  $x(t) = 0$  pro  $t < 0$

- iii  $x(t)$  je absolutně integrovatelná, čili platí vztah:  $\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt < \infty$ , je definována:

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt, \quad (3-1)$$

kde  $X(j\omega)$  je obraz a  $x(t)$  časový originál Fourierovy transformace. Zpětná Fourierova transformace je přechod z frekvenční do oblasti časové a je definována vztahem:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(j\omega)e^{j\omega t} d\omega. \quad (3-2)$$

Ze vztahu (3-1) je patrné, že dochází k rozkladu signálu prostřednictvím báze, kterou tvoří harmonické funkce (sin, cos). Po rozkladu je získáno tzv. spektrum signálu, ve kterém jsou vidět frekvence vyskytující se v původním signálu. Spektrum signálu lze pomyslně rozdělit na dvě symetrické části – na část s kladnými frekvencemi a na část se zápornými frekvencemi. U reálných systémů nemá cenu se zabývat zápornými frekvencemi, a proto je používána pouze polovina spektra. V úvodu kapitoly bylo řečeno, že dochází k rozkladu signálu na amplitudy a fáze částí signálů na jednotlivých frekvencích. Lze tedy získat amplitudové a fázové spektrum. Amplitudové spektrum je popsáno následujícím vztahem:

$$A(\omega) = 2|X(\omega)|. \quad (3-3)$$

Amplituda původního signálu je symetricky rozložena do obou částí spekter (kladné i záporné frekvence). Proto pokud bereme pouze polovinu spektra (jen kladné frekvence) je zobrazená amplituda poloviční oproti skutečné amplitudě. To vysvětluje násobení konstantou 2 v předcházejícím vztahu. Pro fázové spektrum platí:

$$\Phi(\omega) = \arctg\left(\frac{\text{Im}\{X(\omega)\}}{\text{Re}\{X(\omega)\}}\right). \quad (3-4)$$

V následující části je uvedena krátkodobá Fourierova transformace, která vychází z výše popsaného. V této práci není použita klasická Fourierova transformace z toho důvodu, že je potřeba znát i informaci v čase a také výše popsaná Fourierova transformace je použitelná pouze na ty signály, které jsou stacionární, což často nemusí být splněno.

### 3.2 Krátkodobá Fourierova transformace

Již v úvodu této kapitoly bylo zmíněno, že naměřené signály jsou v této práci zpracovávány jednou z časo-frekvenčních metod a to krátkodobou Fourierovo transformací. V literatuře je označována jako STFT (short time Fourier transform). Tato podkapitola vychází z popisu metody uvedené v [1] a [3]. Velkou předností této metody je použitelnost i na nestacionárních signálech. Základem je rozdělení signálu na krátké časové okamžiky, ve kterých je uvažováno, že daný signál je stacionární. To je realizováno pomocí okénkové funkce  $h(t)$ . Pro signál v čase  $t$  platí, že okénková funkce  $h(t)$  má v tomto čase střed, přičemž pro časy blízké  $t$  je signál shodný s původním signálem a pro časy vzdálené  $t$  je signál nulový (viz následující):

$$x(\tau)h(\tau - t) = \begin{cases} x(\tau) & \tau \cong t \\ 0 & \tau \neq t \end{cases}. \quad (3-5)$$

Nezapomeňme dodat, že okénkových funkcí  $h(t)$  je několik typů, přičemž my používáme tzv. Hanningovo okénko. Krátkodobou Fourierovu transformaci lze definovat následujícím vztahem:

$$X(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(\tau - t)e^{-j\omega\tau}d\tau. \quad (3-6)$$

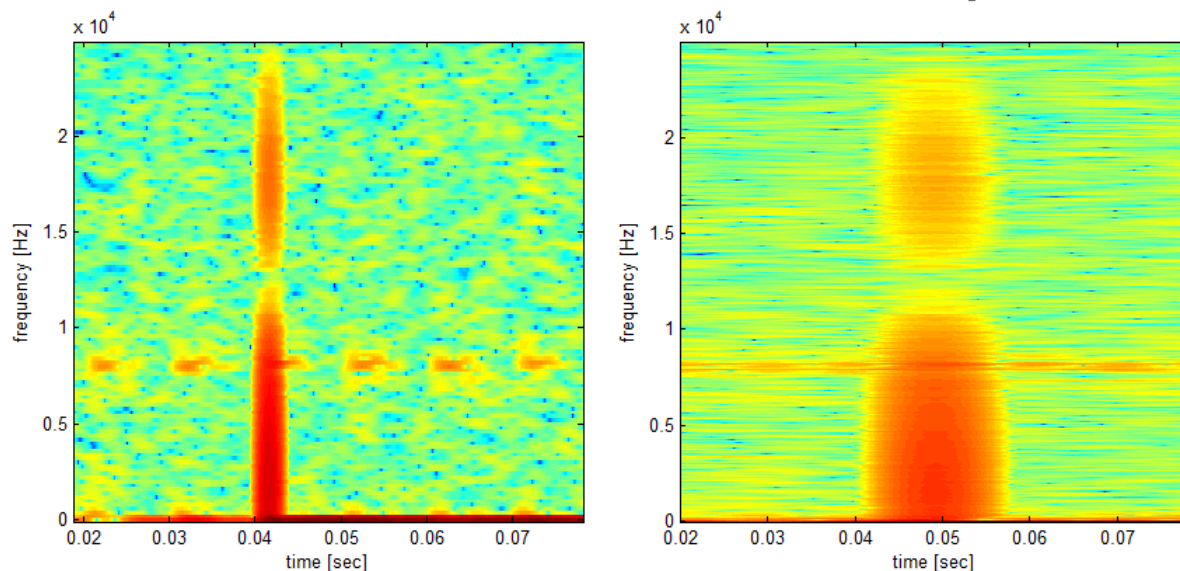
Tento vztah je velmi podobný vztahu (3-1), liší se pouze v okénkové funkci  $h(t)$ , kterou je vážen signál. Výsledkem vztahu (3-6) pro konkrétní čas  $t$  je spektrum, ve kterém je zobrazené frekvenční rozložení na okolí daného časového okamžiku  $t$ . Složením spekter pro všechny časy  $t$  získáme tzv. spektrogram. Jeden z parametrů metody je délka okénkové funkce. Právě délka okénkové funkce (dále jen délka okna) určuje, jaké bude rozlišení v časové a frekvenční oblasti ve spektrogramu. Při volbě delšího okna docílíme vyššího rozlišení ve frekvenční oblasti. Naopak při volbě kratšího okna získáme spektrogram, ve kterém bude vyšší rozlišení v oblasti časové. Většinou je zvolena taková délka okna, která je kompromisem mezi oběma rozlišeními. Ovšem v celé řadě úloh je upřednostňováno jedno z uvedených rozlišení oproti druhému. Například, jak bude později ukázáno, doprovodným jevem rubbingu je projev subharmonických složek. Bude tedy potřeba získat spektrogram s vysokým rozlišením ve frekvenční oblasti. Naopak při lokalizaci místa kontaktu budou hrát důležitou roli časy příchodů vlnění do jednotlivých snímačů, čímž je tedy potřeba získat spektrogram s vyšším rozlišením v oblasti časové.

Na následujícím obrázku (viz obr. 3-1) jsou zobrazeny spektrogramy signálu získané krátkodobou Fourierovou transformací pro dvě odlišné délky okna. Během zaznamenávání těchto dat byl uměle vytvořen kontakt - poklepem impulzním kladívkem (podrobněji viz 4. kapitola). Ráz (poklep) je viditelný na obou spektrogramech. Spektrogram vlevo byl získán pro délku okna 5 ms, rozlišení ve frekvenci je tedy 199.2 Hz. Pro druhý spektrogram byla zvolena délka okna 20 ms, potom tedy rozlišení ve frekvenci je 49.8 Hz. Jinak řečeno první spektrogram má vyšší rozlišení v oblasti časové oproti druhému. Naopak druhý spektrogram má vyšší rozlišení ve frekvenční oblasti než první. Oba spektrogramy byly získány stejným překrytím oken a to 99%. Jak je patrné na první pohled ráz ve spektrogramu vpravo je v časové oblasti více roztažený, což je způsobeno tím, že delší okno při posuvu bude danou událost zahrnovat déle než okno kratší. Na druhou stranu v pravém spektrogramu jsou lépe viditelné frekvence, na kterých se ráz neprojevil.

Nabízí se otázka, zda lze dosáhnout libovolného rozlišení v časové a zároveň i frekvenční oblasti. Odpověď na tuto otázku přináší tzv. Heisenberg-Gaborův princip neurčitosti, který je popsán v [1]. Tento princip lze definovat následujícím vztahem:

$$\sigma_t \sigma_f \geq \frac{1}{2}, \quad (3-7)$$

kde  $\sigma_t$  a  $\sigma_f$  jsou směrodatné odchylky veličin času a frekvence signálu. Čím bude vyšší rozlišení v oblasti časové, tím bude signál rozložen blíže ke své střední hodnotě v čase a směrodatná odchylka  $\sigma_t$  bude tím menší. Analogicky tomu je tak i s vyšším rozlišením v oblasti frekvenční. Ze vztahu (3-7) vyplývá, že nelze dosáhnout libovolně malých směrodatných odchylek  $\sigma_t$  a  $\sigma_f$  zároveň, což by představovalo dobré rozlišení jak v oblasti časové tak i frekvenční. Závěrem tedy je, že nelze dosáhnout dobrého rozlišení v obou oblastech současně.



obr. 3-1: Spektrogram signálu rázu pro odlišné délky okna



## 4 Experimentální lokalizace rázů na rotoru – Škoda Power

### 4.1 Popis a význam experimentu

Jedním z experimentů, které byly provedeny za účelem získání nových souvislostí a poznatků v problematice lokalizace rubbingu, je experiment na rotoru - Škoda Power. Cílem této kapitoly je popsat analýzu naměřených experimentálních dat z rotoru. Při tomto experimentu bylo získáno celkem 24 měření, kdy na rotoru byly umístěny různé typy snímačů zaznamenávající vibrační signál. Během měření 1-5 byl použit relativní snímač, laser a akcelerometr1 (zaznamenávající signál ve směru X, Y a Z). Od šestého měření dále byl k těmto snímačům přidán další akcelerometr (později označován jako akcelerometr2, zaznamenávající signál taktéž ve směru X, Y a Z). Experiment spočíval v postupném poklepávání impulzním kladívkem na rotor v různých vzdálenostech (které byly známy) od snímačů a na různých úhlech rotoru ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  a  $270^\circ$ ), přičemž během jednoho měření bylo poklepáno nejčastěji deseti úderů. V příloze A. je zobrazen rotor a umístění jednotlivých snímačů.

Cílem tohoto experimentu je ze získaných dat detekovat co nejpřesněji místo, kde došlo k rázu (poklepu impulzním kladívkem). Další snahou je nalézt souvislost analyticky vypočítaných disperzních křivek s křivkami získanými z dat zaznamenaných jednotlivými snímači. Je důležité zmínit skutečnost, že experiment byl prováděn na skutečném rotoru určeném po obrobení do provozu, ovšem jednalo se o situaci, kdy rotor byl v klidu, resp. nerotoval. Otázkou však zůstává, do jaké míry by byla naměřená data a následně jejich analýza ovlivněna rušivými veličinami spojenými s rotací a provozem turbíny.

Signály zaznamenané jednotlivými snímači byly zpracované jednou z časofrekvenčních metod – krátkodobou Fourierovou transformací. Dále pro určení analytických křivek bylo využíváno popisu tzv. disperzních křivek, které vyjadřují závislost rychlosti šíření vlnění na frekvenci. Pro určení křivky vyjadřující začátek vlnění zaznamenaný snímačem byla použita metoda pro určení paty akustické vlny. Tato křivka je později označována jako experimentální. Analýza jednotlivých částí zpracování signálů a jejich následné vyhodnocení je popsáno podrobněji dále.

### 4.2 Šíření akustických vln v materiálech

Pro lokalizaci místa rázu při experimentu je důležitou podmínkou znát, jakým způsobem dochází k šíření vlnění. Vycházíme z popisu šíření signálů v [1]. Po vzniku rázu dochází ke vzniku vlnění na povrchu materiálu. Vlnění na povrchu materiálu může být zaznamenané snímači (např. akcelerometrem, jako tomu je při experimentu na rotoru). Charakter signálu závisí na vzdálenosti od místa rázu. Doba náběhu signálu, který byl zaznamenan blíže místu rázu, je kratší oproti signálu zaznamenanému dále od úderu, jehož doba náběhu je delší a dochází ke snižování maximální amplitudy. Rychlost šíření vlnění závisí na typu vlnění, resp. na typu dominantní vlny. Základní rozdělení je uvedeno níže. Při šíření vlnění dochází ke ztrátám energie, kdy část energie vlnění se vyzáří v podobě akustické energie. Samozřejmě, že rychlost a útlum šíření závisí na materiálu, kterým se šíří vlnění. Dále následuje základní rozdělení typu vlnění.

- **Čistě podélné vlny** – U těchto vln dochází k pohybu pouze ve směru šíření a podmínkou vzniku a šíření tohoto vlnění je velikost vlnové délky, která musí být podstatně menší než rozměry tělesa. Po vzniku rázu se podélné vlnění šíří konstantní rychlostí, ovšem nikoliv rovnoběžně s povrchem materiálu. Nemají širší význam pro určování vlastností po vzniku rázu.
- **Kvazipodélné vlny** – Vlivem působení časově proměnné síly na koncích materiálu dochází k šíření vlnění rovnoběžně s povrchem. Při kvazipodélném vlnění se svírají a roztahují části materiálu a tak dochází k pohybům, které jsou kolmé k povrchu. Pohyby kolmé k povrchu materiálu lze zaznamenávat snímači (např. akcelerometr) umístěnými na povrchu. Rychlost šíření kvazipodélného vlnění je v oceli 5270 m/s.
- **Příčné vlny** – Jedná se o smykové vlny způsobené deformacemi materiálu. Rychlost šíření příčných vln v oceli je 3100 m/s. Podmínkou vzniku a šíření jsou rozměry tělesa, které musejí být mnohem větší než vlnová délka.
- **Ohybové vlny** – Při šíření ohybových vln dochází k nárazu kolmo k povrchu, což je velmi významná skutečnost pro detekci tohoto vlnění, neboť dochází k poměrně velkému vychýlení povrchu materiálu. Tyto vlny jsou mimo jiné specifické tím, že rychlost šíření závisí na frekvenci s tloušťky materiálu.
- **Lambovy (Rayleighovy) vlny** – Z výše uvedeného vyplývá, že pro detekování a snímání vlnění jsou nejvýznamnější kvazipodélné a ohybové vlny, neboť dochází k pohybům kolmým k povrchu, což může být zaznamenáno snímači. Pro označení kvazipodélných vln se používá výrazu symetrický mód povrchových vln a pro ohybové vlny asymetrický mód.

Při lokalizaci místa rázu se vychází ze znalosti typu zaznamenaného vlnění a jednou z nejpodstatnějších informací je rychlost šíření tohoto vlnění. Při experimentu na rotoru – Škoda Power a následné lokalizaci místa rázu bylo využíváno popisu výpočtu disperzních křivek Lambových vln (popsáno v následující části) uvedeného v [1]. Jak bude vidět i z výsledků experimentu, rychlost šíření vlnění je závislá na frekvenci. Tuto závislost představují disperzní křivky, které jsou dány řešením Rayleigh-Lambovyých frekvenčních rovnic. Popis disperzních křivek pro symetrický i asymetrický mód (pro desku šířky  $2h$ ) je:

$$\frac{\tan(qh)}{q} + \frac{p \tan(ph)4\kappa^2}{(q^2 - \kappa^2)^2} = 0 \quad \dots \text{ pro symetrický mód,} \quad (4-1)$$

$$q \tan(qh) + \frac{\tan(ph)(q^2 - \kappa^2)^2}{4p\kappa^2} = 0 \quad \dots \text{ pro asymetrický mód,} \quad (4-2)$$

kde  $p$  a  $q$  jsou proměnné vyjádřené jako:

$$p^2 = \left(\frac{\omega}{c_L}\right)^2 - \kappa^2, \quad q^2 = \left(\frac{\omega}{c_T}\right)^2 - \kappa^2. \quad (4-3), (4-4)$$

Rychlosti  $c_L$  a  $c_T$  jsou závislé na typu materiálu a tloušťce desky.

Pro vlnové číslo  $\kappa$  platí vztah:

$$\kappa = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (4-5)$$

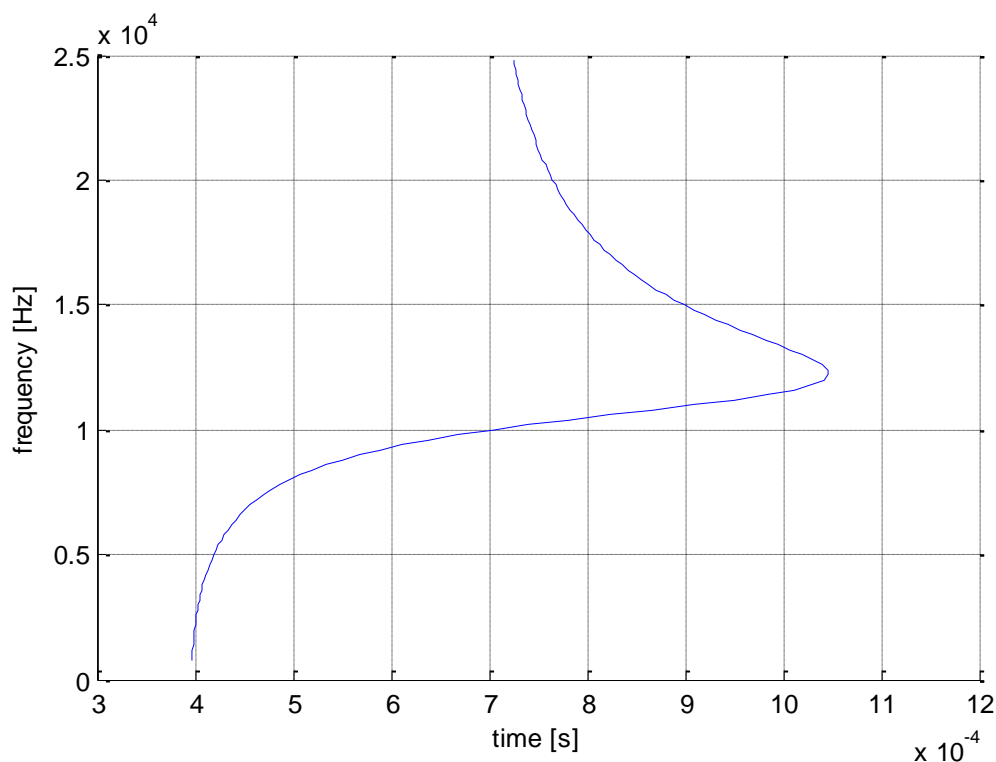
kde  $\lambda$  je vlnová délka signálu. V této problematice rozlišujeme dvě rychlosti – fázovou a grupovou. Fázová rychlost módů je brána jako rychlost šíření jednotlivých vln, není tedy ovlivněna šířením ostatních vln. Vztah popisující fázovou rychlost je následující:

$$c_p = \frac{\omega}{2\pi} \lambda = \frac{\omega}{\kappa}. \quad (4-6)$$

Ve skutečnosti dochází v materiálech k šíření modulovaného vlnění, resp. jednotlivé vlny jsou ovlivňovány i jinými. Potom rychlost takového vlnění je označována jako grupová rychlost a je definována:

$$c_g = \frac{d\omega}{d\kappa}. \quad (4-7)$$

Pro určení místa rázu na rotoru při tomto experimentu bylo využíváno analytického popisu grupové rychlosti závislé na frekvenci. Protože při analýze zaznamenaného signálu využíváme časo-frekvenční zpracování, je závislost grupové rychlosti na frekvenci převedena právě do časo-frekvenční roviny. Závislost grupové rychlosti na frekvenci v časo-frekvenční rovině je zobrazena na následujícím obrázku, kde čas vzniku šíření vlnění byl zvolen 0 s a vzdálenost byla 2 metry (viz obr. 4-1). Zobrazená křivka je v dalších částech kapitoly označována jako analytická a je postupně napočítávána pro různé vzdálenosti. Konkrétní využití této křivky při lokalizaci je popsáno v následující podkapitole.

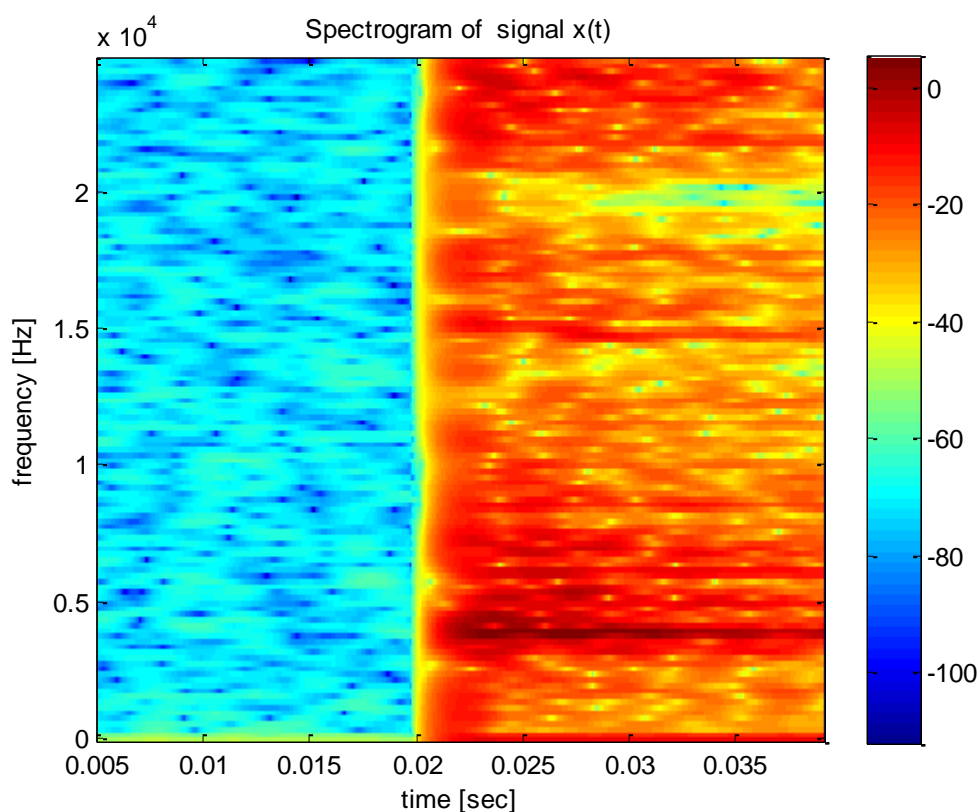


obr. 4-1: Disperzní křivka v časo-frekvenční rovině

### 4.3 Porovnání analytických vln s experimentálními výsledky, odhad místa rázu

V této podkapitole je vysvětleno, jakým způsobem byla naměřená data jednotlivými snímači analyzována, přičemž výsledkem pro daný poklep bylo co nejpřesnější určení vzdálenosti místa rázu od snímačů. Významnou informací pro vyhodnocení výsledků experimentu je přesná znalost místa, kde došlo k poklepu (rázu).

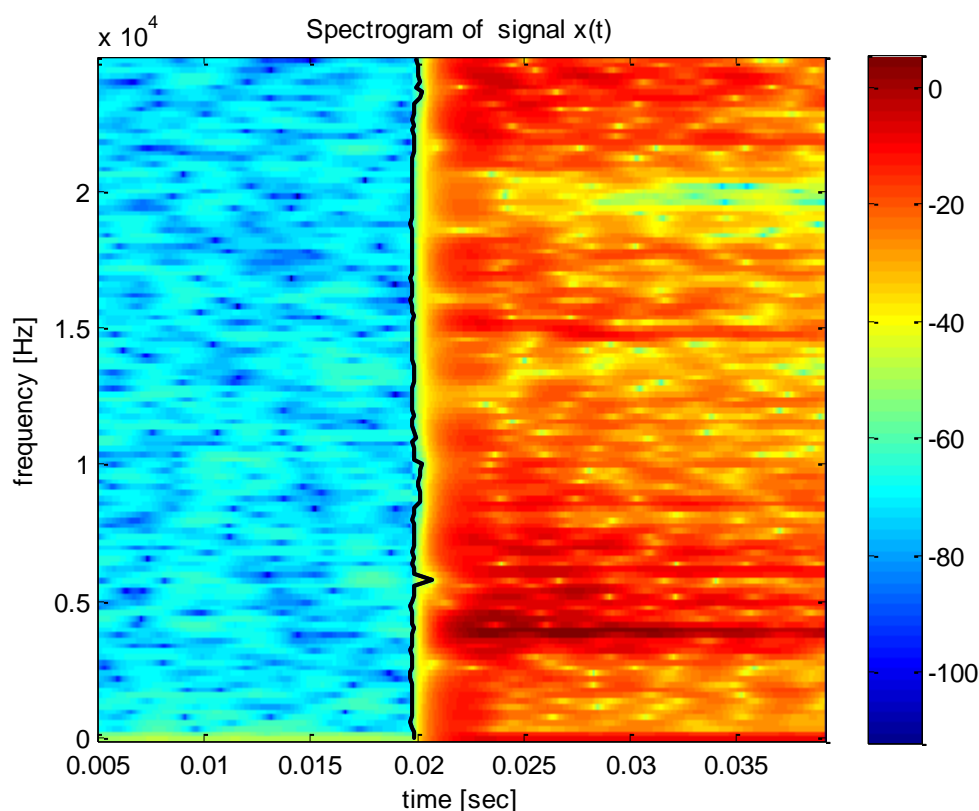
Jak bylo již zmíněno, zaznamenané signály byly zpracované pomocí krátkodobé Fourierovy transformace. Výsledkem je následující spektrogram signálu představující úder impulzním kladívkem zaznamenaným jedním z uvedených snímačů, viz obr. 4-2. Na jednotlivých frekvencích ve spektrogramu dojde od určitého časového okamžiku k výraznému zvýšení amplitudy, což představuje okamžik dospění vlnění ke snímači. Tento okamžik je dále označován jako pata akustické vlny. Ve spektrogramu je viditelné, že okamžik dospění vlnění ke snímači se na jednotlivých frekvencích liší. To souvisí se skutečností, že rychlost šíření vlnění je závislá na frekvenci - má disperzní charakter.



obr. 4-2: Spektrogram signálu pro daný poklep

V této problematice byla vyvinuta celá řada metod pro určení vzniku akustických událostí ve zpracovávaném signálu. Při tomto experimentu bylo pro přesné určení okamžiku, kdy došlo k výraznému zvýšení amplitudy na jednotlivých frekvencích, využito metody založené na dvou po sobě následujících systematicky pohybujících se oknech o určité délce  $N$ . Vycházíme z popisu metody, která je uvedena v [1]. Cílem této metody je detekovat lokální nárůst amplitudy signálu, kde poměr vlastností těchto dvou oken vyjadřuje změnu (nárůst) amplitudy. Vlastnosti jednotlivých oken jsou vyjádřeny jako střední hodnoty amplitudy. Změna amplitudy pro  $k$ -tý vzorek (odpovídající určitému časovému okamžiku) je vyjádřena poměrem středních hodnot druhého okna od vzorku  $k$  do vzorku  $k+N-1$  a prvního okna zahrnujícího vzorky od  $k-N$  do  $k$ .

Uvažujme situaci, že v časovém okamžiku odpovídající  $k$ -tému vzorku signálu dojde k výraznému nárůstu amplitudy. Pak podíl pro  $k$ -tý vzorek bude nabývat svého lokálního maxima. Ze spektrogramu (na obr. 4-2) je patrné, že signál před příchodem akustické události je relativně časově neměnný. Uvědomme si také, že amplituda po příchodu akustické události má poměrně pomalé odeznívání oproti amplitudě při příchodu akustické události, při které dochází k rychlému nárůstu. Z uvedených poznatků platí, že vhodnou délkou okna  $N$  lze docílit situace, že lokální maximum bude i zároveň maximem globálním. V našem případě při určování paty akustické vlny bylo použito délky okna  $N = 40$ , přičemž zaznamenaný signál byl vzorkovaný frekvencí 50 kHz. Realizací výše popsané metody na část signálu, zobrazeném na předcházejícím spektrogramu (obr. 4-2), získáme křivku představující začátek vlnění na jednotlivých frekvencích, viz obr. 4-3. Tato křivka je dále označována jako experimentální.

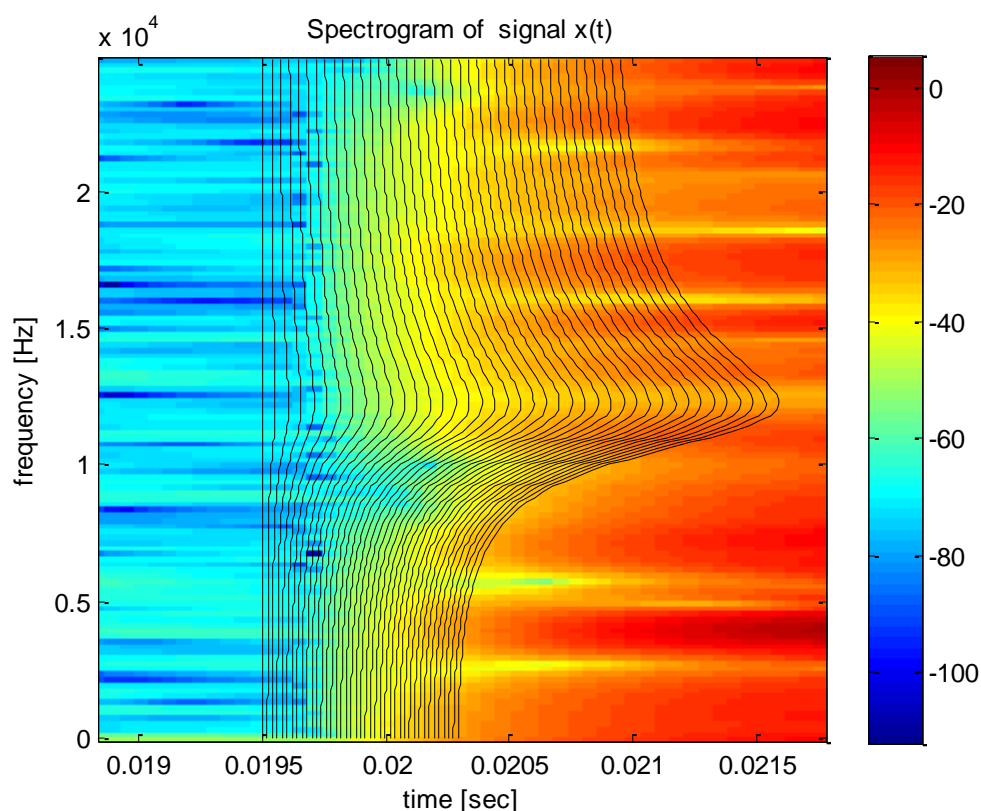


obr. 4-3: Experimentální křivka představující začátek vlnění

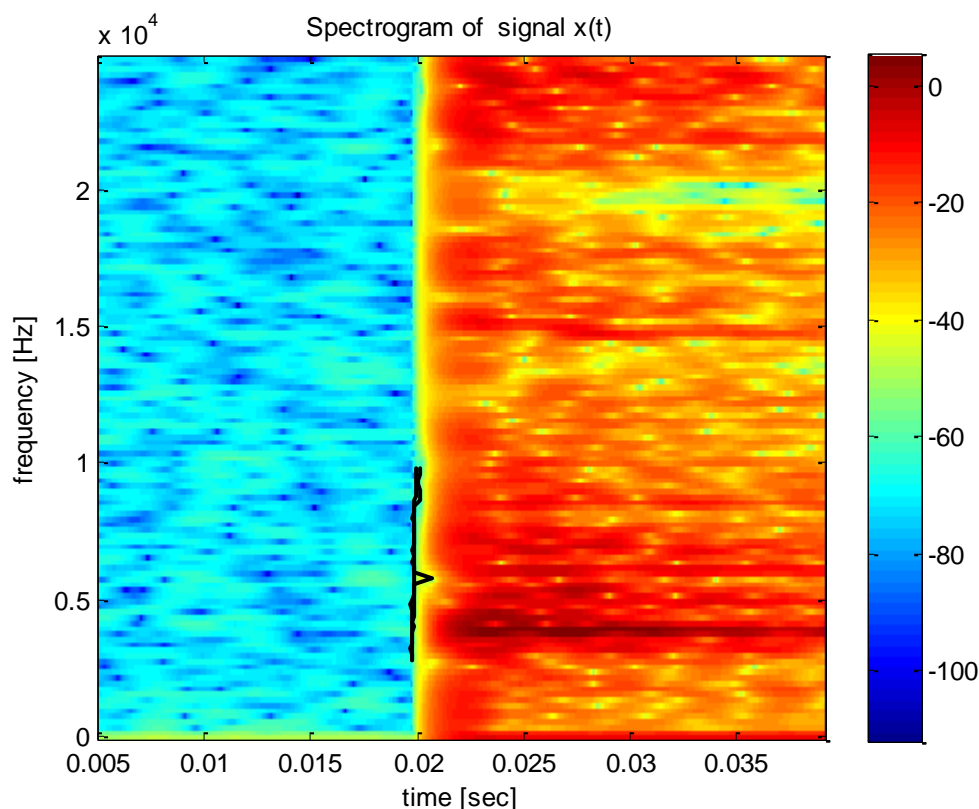
Základní princip lokalizace místa rázu (poklepu) tohoto experimentu byl založen na porovnání křivky získané experimentálním způsobem (viz obr. 4-3) a křivky vypočítané analyticky, přičemž cílem bylo získat souvislosti mezi porovnávanými křivkami. Způsob získání experimentální křivky byl vysvětlen v předcházejícím odstavci. Analyticky získané křivky jsou již zmiňované disperzní křivky Lambových (Rayleighových) vln, které byly podrobně popsány v článku 4.2. Analytické křivky byly postupně napočítávány pro různou vzdálenost místa rázu, od 0 do 4 metrů s krokem 1 cm. V následujícím spektrogramu jsou zobrazeny vypočítané disperzní křivky pro různé vzdálenosti místa rázu, viz obr. 4-4. Z tvaru křivek lze opět pozorovat, že rychlost šíření vlnění závisí na frekvenci, přičemž nejvyšší rychlost je kolem frekvence 12 kHz.

Analyticky vypočítané disperzní křivky byly postupně porovnávány s experimentální křivkou. Úkolem lokalizace bylo vybrat tu analyticky vypočítanou křivku, pro kterou platilo,

že odchylka od experimentálně získané křivky byla minimální. Odchylka byla stanovena jako součet absolutních hodnot z rozdílu jednotlivých bodů křivek. Odhadovaná vzdálenost místa rázu od snímačů je právě vzdálenost, pro kterou byla vypočítána analytická křivka, jejíž odchylka od experimentální křivky byla minimální. V ideálním případě by se experimentální a analytická křivka shodovaly a odhadovaná vzdálenost (tj. vzdálenost, pro kterou byla analytická křivka vypočítána) by se shodovala se skutečnou vzdáleností místa rázu od snímačů. Porovnávání křivek analytické a experimentální bylo prováděno jak na celém frekvenčním pásmu spektrogramu, tak i na zúženém frekvenčním pásmu (3-10 kHz). Porovnávání křivek na kratším frekvenčním intervalu bylo zvoleno v důsledku snahy získání přesnějších výsledků lokalizace, neboť se obě křivky na tomto intervalu nejvíce shodovali, viz obr. 4-5.



obr. 4-4: Analyticky vypočítané disperzní křivky pro různé vzdálenosti

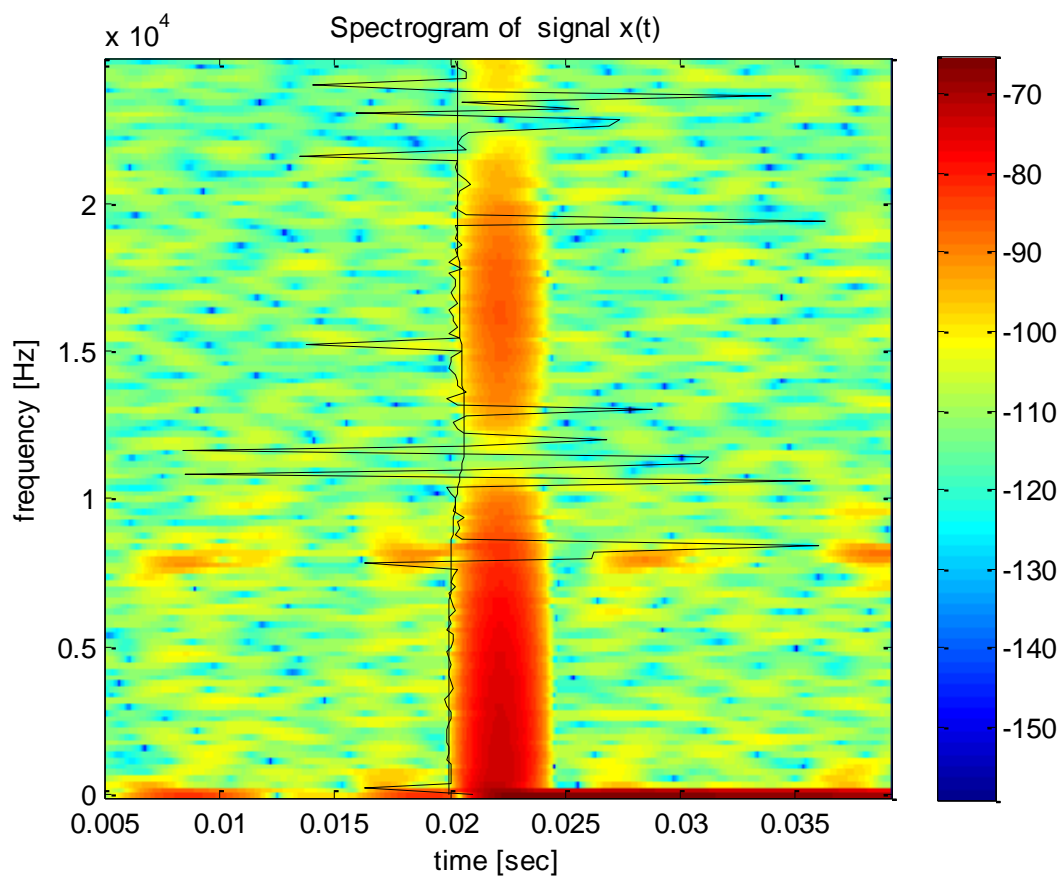


obr. 4-5: Analytická a experimentální křivka na frekvenčním pásmu 3 – 10 kHz

Během zpracování dat bylo snahou jednotlivé části analýzy optimalizovat. Jednou z optimalizací bylo porovnávání křivek jen na zúženém frekvenčním pásmu (3-10 kHz a 17-25 kHz). Další snahou, jak dosáhnout lepších výsledků, bylo upravování křivky získané experimentálním způsobem pomocí metody, která spočívala ve vyhlazování této křivky, resp. zbavení křivky velkých odchylek od paty vlny. Tento problém je znázorněn na následujícím obrázku, ve kterém jsou na některých frekvencích patrné velké odchylky experimentální křivky od skutečné paty vlny, viz obr. 4-6. Tyto odchylky byly způsobené především horší kvalitou zaznamenaného signálu. Metoda vyhlazující některé části experimentální křivky na některých datech pracovala úspěšně, ovšem na jiných zvyšovala chybu lokalizace. Metoda byla také vyzkoušena jak na celém, tak i na zúženém frekvenčním pásmu.

Na konci zpracování dat každého měření byl vygenerován textový soubor, ve kterém byly shrnuty střední hodnoty odhadované vzdálenosti a rozptyl pro jednotlivé snímače. Přesnost lokalizace místa rázu se u jednotlivých měření a snímačů velmi lišila. V některých případech bylo dosahováno přesnosti v desítkách či dokonce v jednotkách centimetrů, ovšem v jiných případech až ve stovkách centimetrů. Dále také rozptyl jednotlivých výsledků byl velký.

V úvodním odstavci této kapitoly byly uvedeny snímače, které byly použity pro zaznamenání vibračního signálu – laser, relativní snímač, akcelerometr. Důvodem, proč bylo použito více typů snímačů, bylo získání informace, který typ snímače při takovémto zpracování zaznamenaných dat bude dosahovat lepších výsledků. Závěrem je, že nejlepších výsledků z použitých snímačů dosahuje akcelerometr a to ve směru X a Y.

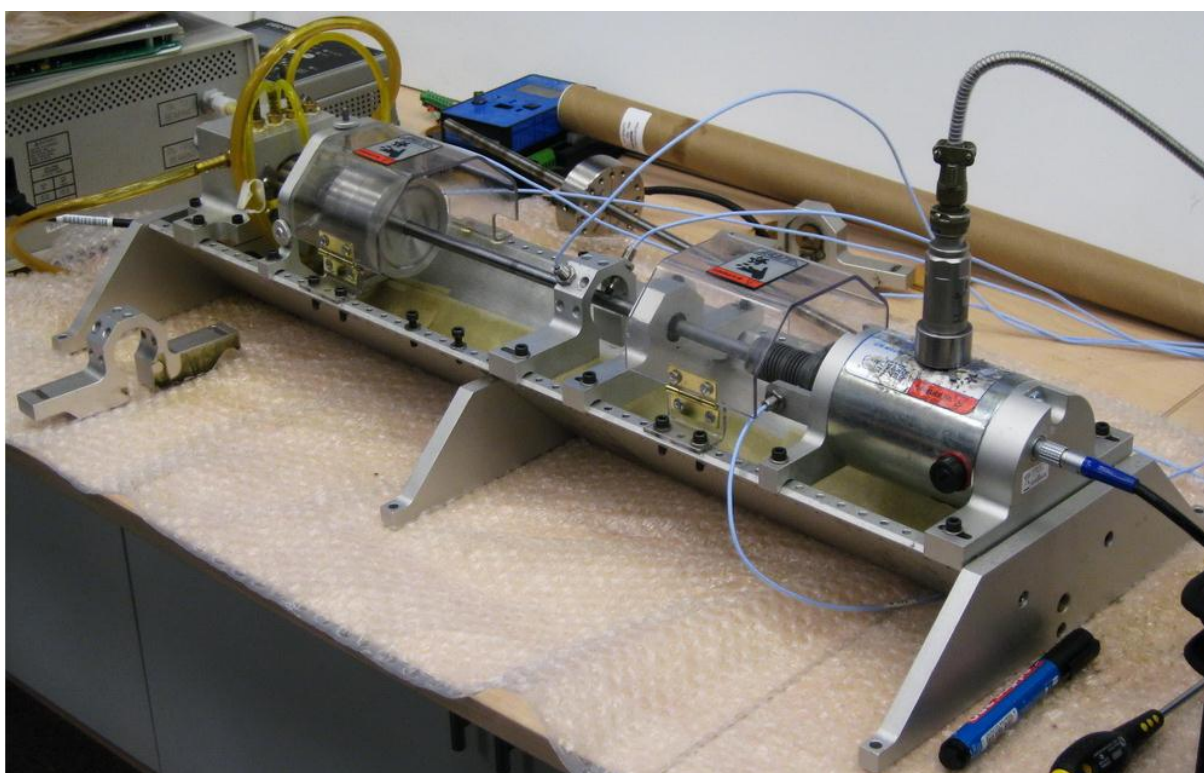


obr. 4-6: Experimentální křivka s velkými odchylkami od paty vlny



## 5 Analýza signálů získaných na rotorovém standu (rotor kit RK4)

V této části se budeme zabývat zpracováním signálů, které byly naměřeny relativním snímačem vibrací na rotorovém standu, označovaném jako rotor-kit RK4. Tento stand umožňuje ve zmenšeném měřítku modelovat chování rotoru při proměnných otáčkách. Zařízení bylo doplněno o teflonovou ucpávku tak, aby bylo možné vyvolat částečný nebo úplný rubbing (tedy tření mezi rotorem a statorem - ucpávkou). Velkou výhodou takového modelu je znalost místa, kde dochází ke kontaktu rotující části a části stacionární. Poznatky, získané zpracováním signálu na tomto experimentální standu, mají velký význam pro další analýzu signálů získaných z provozu turbíny. Rotorový stand RK4 je zobrazen na obr. 5-1.



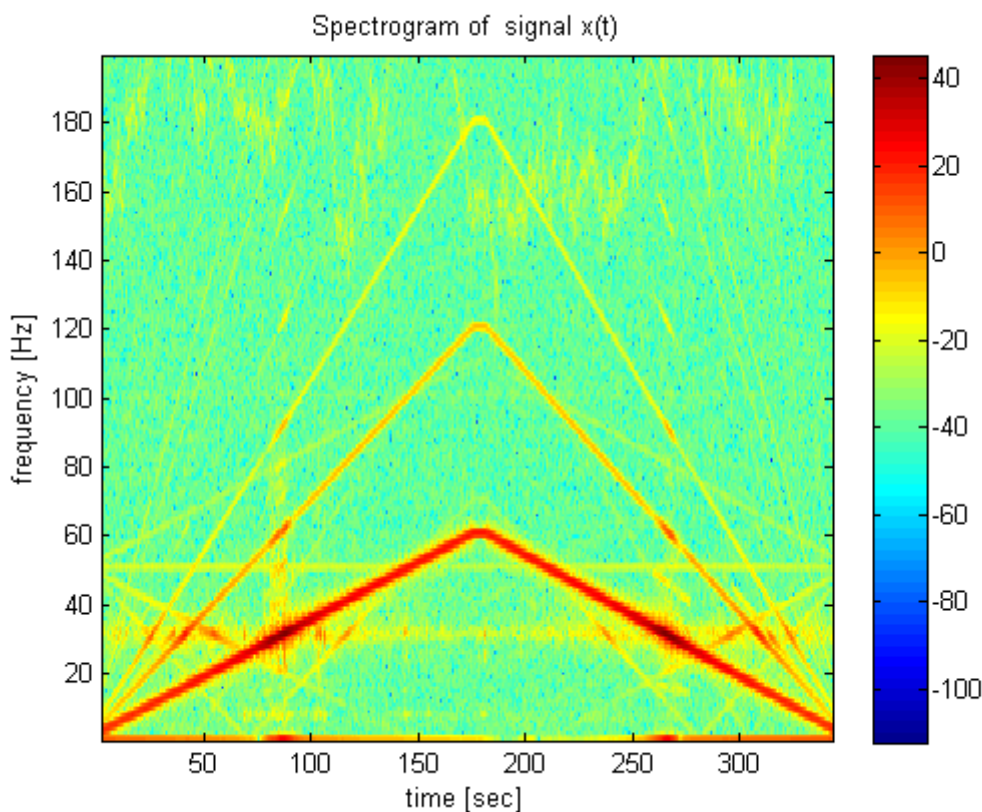
obr. 5-1: Rotorový stand RK4

### 5.1 Popis rotorového standu RK4

Popis rotorového standu je uveden v [2]. Tento experimentální stand byl vyroben firmou Bently Nevada a jeho hlavní částí je hřídel o délce 56 cm a průměru 1 cm. Tato hřídel je umístěna ve dvou kluzných ložiscích a je poháněna motorem, který může dosáhnout až 10000 otáček za minutu. Na hřídel lze upevnit kotouč obsahující otvory, do kterých lze vkládat závaží. Tím lze měnit nevyváženost rotoru – resp. rotor vyvážit. Otvory jsou po obvodu kotouče od sebe rozmístěné po  $5^\circ$  a samotná hmotnost kotouče je 0.8 kg. Stacionární část, do které během rubbingu naráží rotující hřídel s kotoučem, je teflonová ucpávka vyrobená pro potřeby vyvolání rubbingu na rotorovém standu. Při experimentech byly pro snímání vibrací hřídele použity již zmiňované relativní snímače vibrací. V dalších částech kapitoly se budeme zabývat zpracováním signálů získaných převážně při částečném rubbingu.

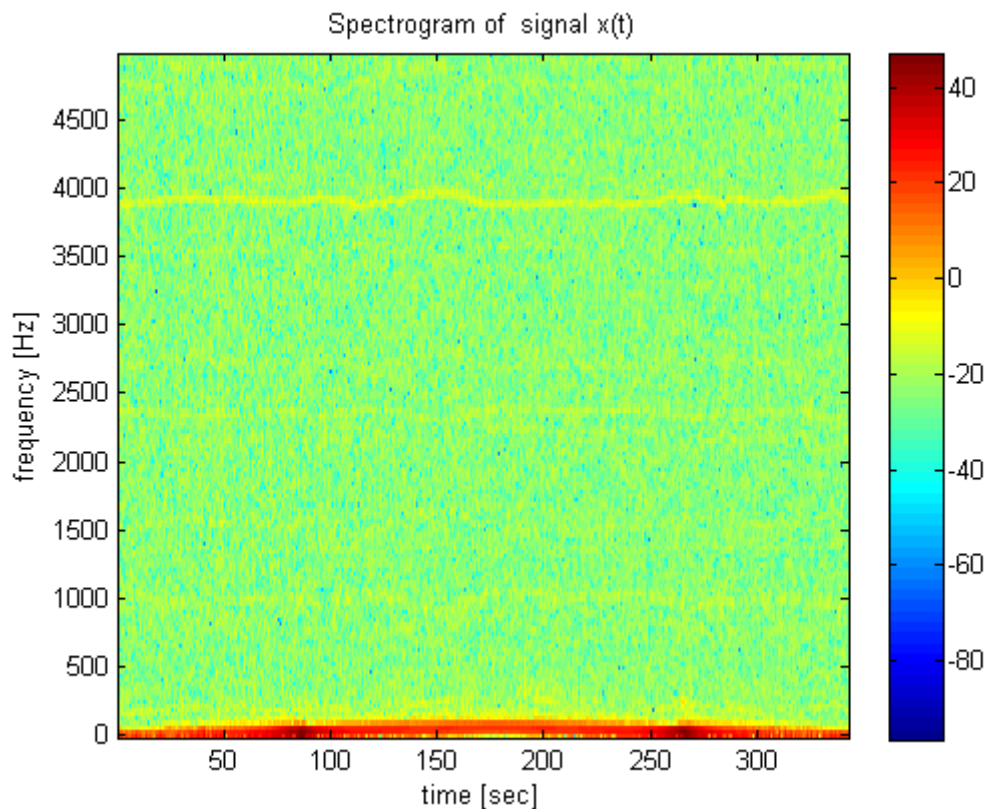
## 5.2 Rotor-kit RK4 bez ucpávky

Tato podkapitola popisuje analýzu signálu, který byl zaznamenán během experimentu na rotor-kitu, kdy nebyla vložena teflonová ucpávka. Jedná se tedy o běžný provoz rotorového standu, při kterém nedochází ke kontaktu se statorem a tomu odpovídá i charakter měřeného signálu. Jednalo se o situaci, kdy se postupně zvyšovaly otáčky rotoru od nuly až na hodnotu 3750 ot./min (62.5 Hz). Dále pak byl měřen dojezd, kdy otáčky v opačném trendu klesaly opět na nulu. Celý experiment trval 353 sekund. Průběh experimentu je viditelný ze spektrogramu na následujícím obrázku.



obr. 5-2: Spektrogram signálu bez ucpávky

Je zřejmé, že při tomto experimentu nedocházelo ke kontaktu mezi rotorem a stacionární částí. Vysvětlení, proč se vůbec zabýváme analýzou signálu, u kterého víme, že rubbing nenastal, je následující. Snažíme se potvrdit hypotézu, že v tomto zpracovávaném signálu (spektrogramu) nelze pozorovat opakující se děje - rázy. Je důležité ověřit, že opakované rázy v signálu (ve spektrogramu) úzce souvisí s částečným rubbingem, nikoliv s jinými fenomény jakým je například způsob modulace signálu snímačem vibrací či projev jiné rušivé veličiny. Výsledkem zpracování tohoto signálu je následující spektrogram na obr. 5-3, ve kterém se neobjevují žádné opakující se jevy.

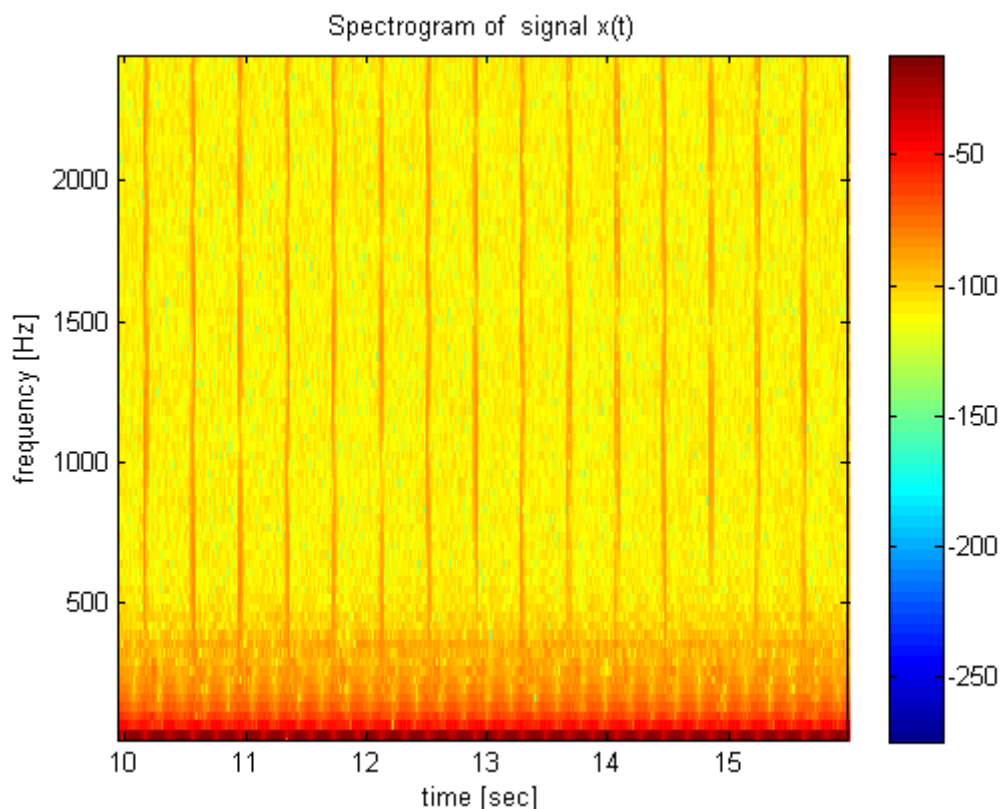


obr. 5-3: Spektrogram signálu bez opakování

Lze tedy předpokládat, že případné opakující se rázy ve zpracovávaných signálech, souvisí s částečným rubbingem. Tento poznatek je dobře viditelný na obrázcích v následující podkapitole, kde již docházelo k částečnému kontaktu (rubbingu na ucpávce).

### 5.3 Rotor-kit RK4 s ucpávkou

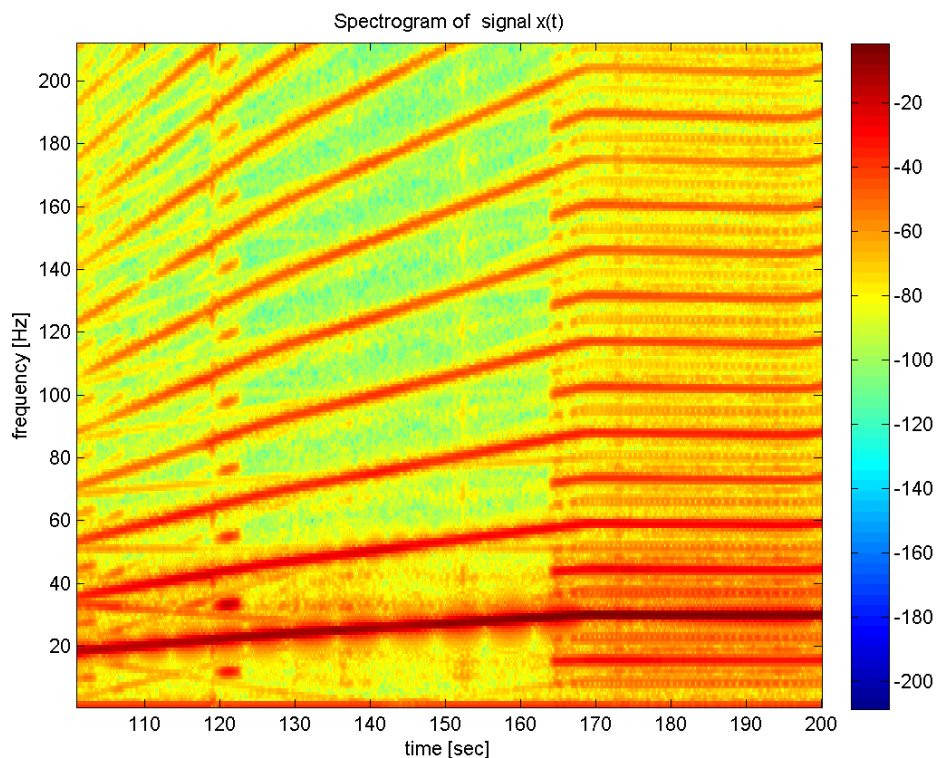
V této části jsou zpracována data získaná na rotorovém standu s ucpávkou. Výsledkem zpracování těchto dat je spektrogram na obr. 5-4.



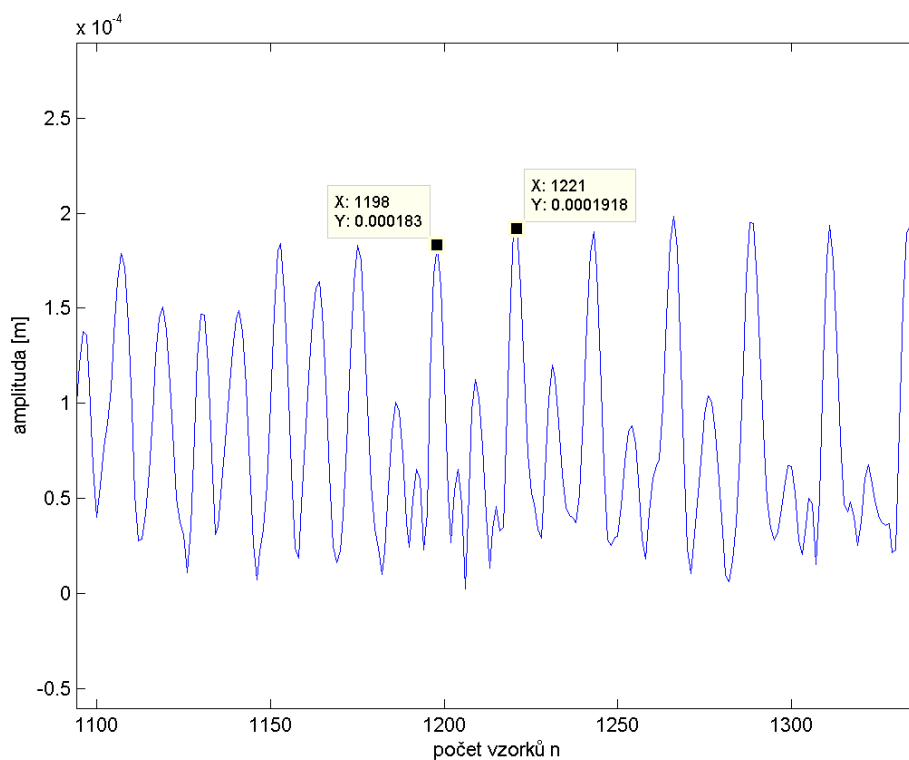
obr. 5-4: Spektrogram signálu s ucpávkou

V tomto spektrogramu jsou dobře viditelná opakování (svislé čáry), která představují kontakt mezi rotorem a statorem. Frekvence těchto opakování je shodná s frekvencí otáčení rotoru (tzv. první harmonická frekvence, označována jako  $1X$ ). Jakmile se začnou projevovat i další frekvence ve spektrogramu (např.  $1/2X$ ), frekvence těchto opakování se změní na tutéž hodnotu. Při frekvenci opakování  $1/2X$  dochází ke kontaktu mezi rotorem a statorem jednou za dvě otáčky. Nyní tedy podrobněji rozebereme část signálu, ve kterém se projevují i jiné frekvence, v tomto případě  $1/2X$ . Ve spektrogramu na obr. 5-5 je vidět projev  $1/2X$  složky kolem 120. sekundy a následně pak 164. sekundy. Zaměříme se jen na časový okamžik kolem 164. sekundy, kde  $1/2X$  frekvence nabývala hodnoty přibližně 14.3 Hz. Dále budeme zkoumat, zda se také  $1/2X$  složka projevuje na jednotlivých frekvencích spektrogramu, tzv. frekvenčních liniích. Zobrazená linie představuje časový průběh amplitudy konkrétní frekvence spektrogramu, resp. pásmo frekvence. Na obr. 5-6 je zobrazena konkrétní linie ze spektrogramu (odpovídající pásmu frekvence okolo 1280 Hz). V tomto obrázku osa x představuje počet vzorků signálu, osa y amplitudu. Velikost frekvence, s jakou časový průběh nabývá svých maxim (viz obr. 5-6), se přibližně od vzorku 1200 změní. Skutečný čas, který odpovídá 1200. vzorku, je právě 164. sekunda. Maxima, která jsou za 164. sekundou (1200. vzorkem), jsou od sebe přibližně vzdálené 22.6 vzorku. Protože byl spektrogram napočítán pro délku okna 3200 vzorků a překryv oken 90%, odpovídá 1 vzorek ve skutečnosti 320 vzorkům původního signálu. Potom tedy, vzdálenost maxim není 22.6, ale 7232 vzorků. Vydělíme-li počet vzorků vzorkovací frekvencí, v našem případě 102400 Hz, dostaneme časovou vzdálenost mezi jednotlivými maximy. Převrácená hodnota časového okamžiku je frekvence, s jakou časový průběh nabývá svých maxim. Takto spočítaná frekvence (z obr. 5-6) je přibližně 14.2 Hz, což se téměř shoduje s  $1/2X$  frekvencí ze spektrogramu (na obr. 5-5) v okolí 164. sekundy. Z toho plyne, že projeví-li se jiné frekvenční složky ve spektrogramu

(např.  $1/2X$ ), projeví se i na časových průbězích amplitud některých frekvencí (linií) spektrogramu.



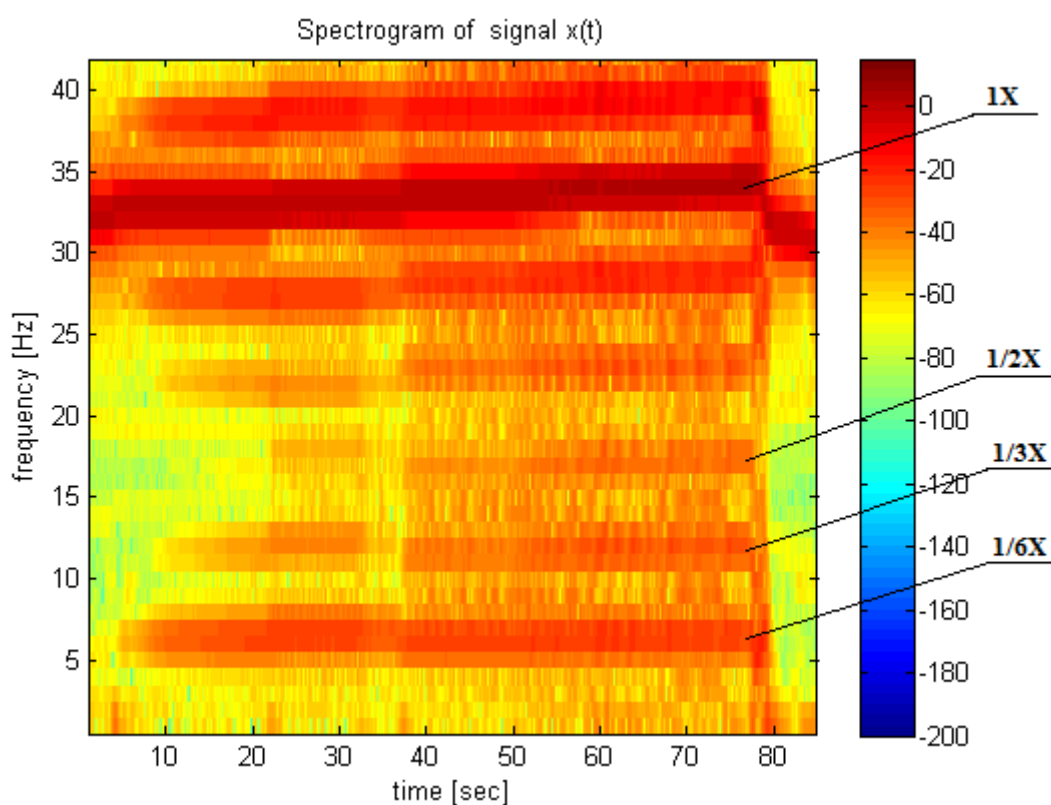
obr. 5-5: Spektrogram signálu s viditelnou  $1/2X$  složkou



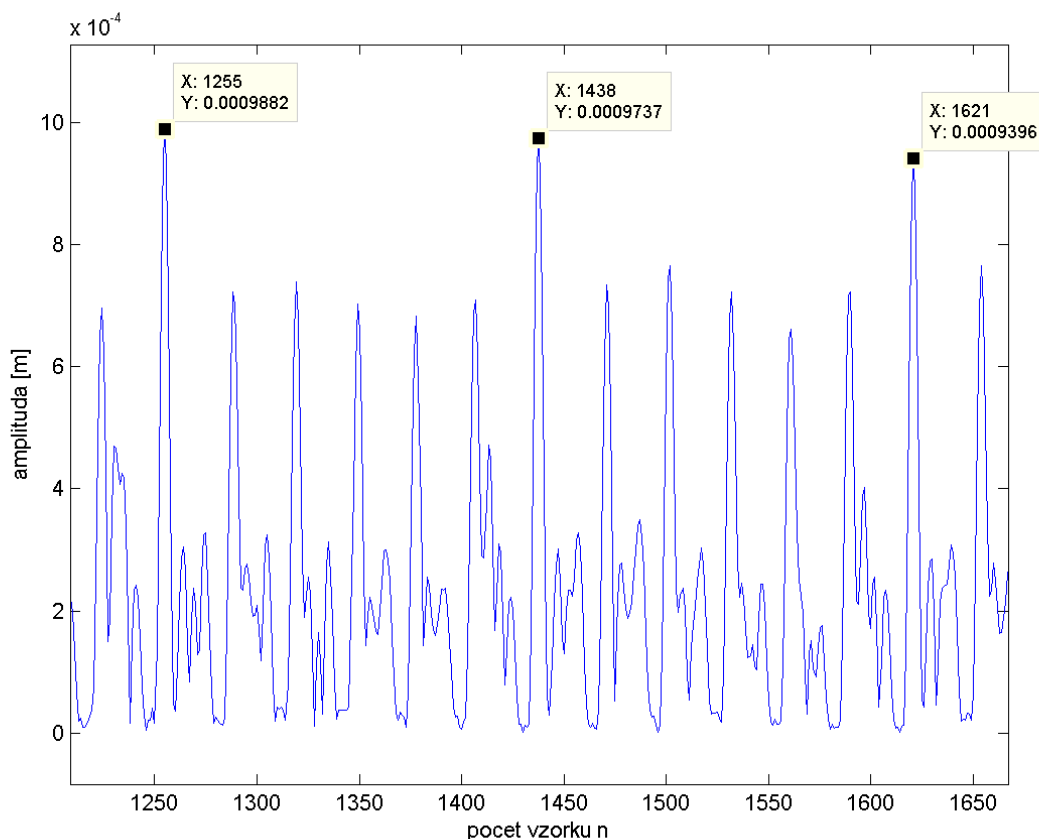
obr. 5-6: Linie ze spektrogramu odpovídající frekvenci 1280 Hz

#### 5.4 Rotor-kit RK4 - subharmonické složky kmitání

Při měření signálu na rotorovém stendu s ucpávkou byla také získána data, při kterých se podařilo vygenerovat rubbing s jinými subharmonickými kmity než  $1/2X$ . Experiment trval 85 vteřin a frekvence otáčení rotoru byla přibližně 33 Hz (1980 ot./min). Vygenerované subharmonické složky jsou zobrazeny na následujícím obrázku (viz obr. 5-7). Kromě první harmonické frekvence  $1X$  se ve spektrogramu objevují další frekvenční složky, a to  $1/2X$ ,  $1/3X$  a  $1/6X$ . V minulé podkapitole bylo ukázáno, že projeví-li se  $1/2X$  ve spektrogramu, projeví se i na časových průbězích amplitud některých liniích spektrogramu. Nyní by nás tedy zajímalo, zda-li se také některá subharmonická složka viditelná ve spektrogramu (na obr. 5-7) projeví na některých frekvenčních liniích. Odpověď na tuto otázku přináší obr. 5-8, ve kterém je zobrazena konkrétní linie ze spektrogramu (odpovídající frekvenci přibližně 4,5 kHz). Jestliže spočteme z tohoto obrázku frekvenci maxim (označených černými body) analogickým způsobem jako v předcházející podkapitole, získáme frekvenci, která odpovídá subharmonické složce  $1/6X$  ze spektrogramu (na obr. 5-7). Frekvence ostatních maxim (jejichž hodnota je alespoň  $6 \cdot 10^{-4}$  m) je rovna první harmonické frekvenci. Lze tedy usuzovat, že se projeví na určitých liniích ta subharmonická složka (spolu s  $1X$ ), která je ve spektrogramu nejvíce viditelná.



obr. 5-7: Spektrogram signálu při rezonančních otáčkách



obr. 5-8: Maxima s frekvencí odpovídající 1/6X

### 5.5 Lokalizace místa rázu na rotor-kitu RK4

V této kapitole jsme se doposud zabývali analýzou signálů získaných z rotorového stendu, ve kterých se objevoval i neobjevoval rubbing. V těchto signálech jsme hledali souvislosti a nová fakta, které bychom mohli využít pro pozdější lokalizaci místa kontaktu rotor/stator. Právě v této části kapitoly je podrobně popsán způsob lokalizace místa rázu. Dále je uvedeno jakých poznatků či hypotéz je využito a vyhodnocení úspěšnosti lokalizace. Důležitou informací pro určení úspěšnosti lokalizace popsanou níže je znalost umístění teflonové ucpávky, do které rotor během otáčení naráží. Pro tuto lokalizaci byla naměřena skupina dat, kde vibrační signál byl zaznamenáván tzv. ve dvou rovinách. Jednalo se o situaci, kde při modelování částečného rubbingu na rotorovém stendu bylo využito dvou snímačů. Snímače byly umístěny na hřídeli ve vzdálenosti 23 cm od sebe a ležely na stejné přímce, která byla rovnoběžná s osou hřídele. Mezi snímače byla vložena teflonová ucpávka 15 resp. 8 cm od prvního resp. druhého snímače. První resp. druhý snímač je dále označován jako snímač *ch02* resp. snímač *ch03*. Byly opět použity relativní snímače vibrací a zaznamenaný signál byl vzorkovaný 102400 Hz. Úkolem bylo navrhnout způsob, jakým lze ze zaznamenaných dat obou snímačů určit správné místo kontaktu rotor/stator.

Vibrační signál zaznamenaný během experimentu je zpracováván opět pomocí krátkodobé Fourierovy transformace. Pokud docházelo ke kontaktu stacionární a rotující části během otáčení, z předcházejících částí kapitoly víme, že ve spektrogramu (s dostatečně dlouhým oknem) dojde k projevům některých subharmonických složek (1/2X, 1/3X, apod.).

V našem případě je od 24 sekundy dobře viditelná  $1/2X$  složka (jako např. na obr. 5-5), proto se zaměříme na tuto část signálu. Při použití Fourierovy transformace s kratším oknem (např. 800 vzorků) na část signálu okolo 24 sekundy získáme spektrogram, ve kterém jsou dobře viditelné opakující se děje – rázy (podobně jako na obr. 5-4). Frekvence těchto opakování je přibližně 10.5 Hz, což je shodné s frekvencí  $1/2X$  složky. V kapitole 5.3 byla ve spektrogramu viditelná  $1/2X$  složka, což dále vedlo k projevům i v některých dalších frekvenčních pásmech – liniích. Proto se dále podíváme na konkrétní frekvenční pásmo spektrogramu (získaného Fourier. trans. s délkou okna 3200 vzorků) okolo frekvence 1280 Hz, na kterém byl projev  $1/2X$  pozorovatelný.

Na následujícím obrázku (obr. 5-9) je tedy zobrazena linie spektrogramu obou snímačů umístěných ve dvou rovinách. Frekvence maxim signálu na obrázku (spočtená analogickým způsobem jako v článku 5.3) je shodná s frekvencí  $1/2X$ , čili přibližně 10.5 Hz. Z toho vyplývá, že na této konkrétní linii došlo k projevům rubbingu. Velmi důležitou skutečností pro lokalizaci místa kontaktu, patrnou na obr. 5-9, je odlišnost v časových okamžicích, ve kterých obě vlnění dosahují svého maxima. Respektive vlnění, vyvolané kontaktem hřídel/ucpávka, dospěje do snímače *ch03* dříve než do snímače *ch02*. Tento poznatek z obr. 5-9 se shoduje s fyzikální podstatou, neboť podle popsané konfigurace snímačů a ucpávky plyne, že snímač *ch03* byl při zaznamenávání signálu blíže k místu kontaktu hřídel/ucpávka. Potom tedy časová diference okamžiků, v jakých dospělo vlnění do jednotlivých snímačů, určuje místo kontaktu rotor/stator (spolu s rychlostí šíření vlnění). Pro co nejpřesnější lokalizaci místa kontaktu, je potřeba znát co nejpřesněji časovou rozdílnost okamžiků příchodu vlnění k jednotlivým snímačům. Proto byla Fourierova transformace upravena tak, aby posuv okna o určité délce byl pouze jeden vzorek. Dalším způsobem jak docílit vyšší přesnosti v čase je zmenšení délky okna při Fourierovi transformaci. Ovšem pokud dojde ke zmenšování délky okna, signál (zobrazený na obr. 5-9) se začne stávat hůře přehledným, resp. začne se ztrácet jednoznačnost o maximech (zhoršení rozlišení ve frekvenci vlivem Heisenberg-Gaborova principu neurčitosti). V našem případě při vzorkovací frekvenci 102400 Hz jsme pro určení snímače, do kterého dospělo vlnění dříve či později, volili délku okna 3200 vzorků. Ovšem při samotné lokalizaci (určování časových diferencí) jsme používali kratší délku okna - 600 vzorků.

Pro určení místa rázu je potřeba znát nejen časový rozdíl příchodu vlny k jednotlivým snímačům, ale také typ a s ním spojenou rychlost šíření vlnění. Rozdíl časových okamžiků, kdy vlnění dospělo do prvního a druhého snímače, je poměrně velký (v řádech jednotek milisekund). Rozdíl vzdáleností místa rázu od prvního a druhého snímače je 7 cm. Z těchto dvou skutečností předpokládáme, že vlnění zaznamenané oběma snímači není povrchové, neboť rychlost povrchového vlnění v oceli je v řádech tisíců m/s. Při součinu velkého časového okamžiku a velké rychlosti nelze získat poměrně malou, ale správnou hodnotu místa rázu, která je v tomto případě 7cm. Naši hypotézou je, že zaznamenané vlnění je ohybové, jehož rychlost šíření  $v$  je dána vztahem:

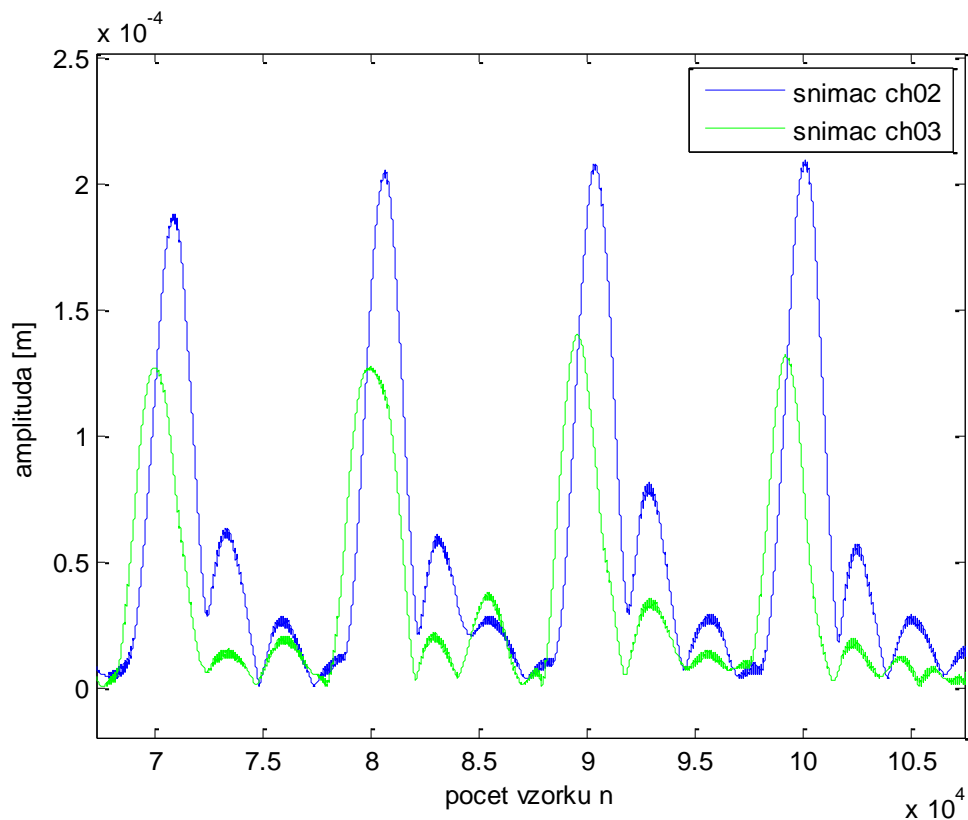
$$v = \lambda \cdot f , \quad (5-1)$$

kde  $\lambda$  je vlnová délka a  $f$  je frekvence. Vlnová délka  $\lambda$  ohybové vlny je stanovena jako dvojnásobek délky hřídele (v případě uchycení hřídele na jejích koncích), tedy 1.12 m. Velikost frekvence  $f$  je rovna frekvenci s jakou nabývá signál na obr. 5-9 (např. snímač *ch02*) svých maxim, čili 10.5 Hz. Potom dostáváme, že rychlost šíření vlnění je 11.76 m/s.

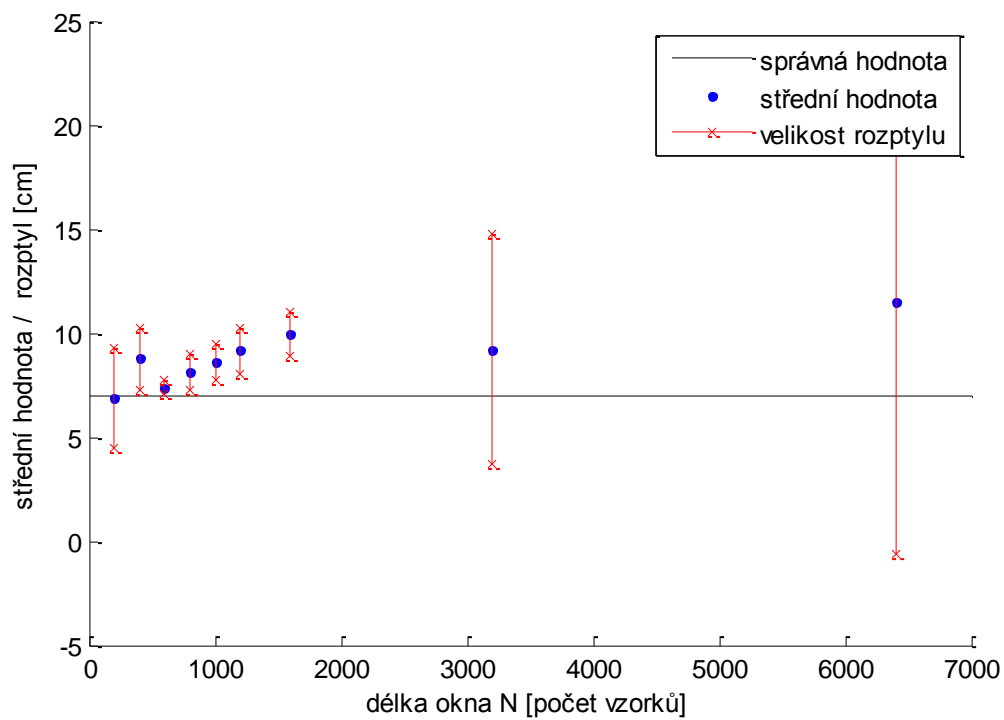


Součinem známé rychlosti šíření vlnění a známého časového rozdílu okamžiků, kdy vlnění dospělo do prvního a druhého snímače, získáme rozdíl vzdáleností, kterou vlnění urazilo z místa rázu k prvnímu a druhému snímači. Z tohoto rozdílu vzdáleností, vzdálenosti mezi snímači a informací, do kterého snímače dospělo vlnění dříve či později, lze určit místo kontaktu rotor/stator. Určování rozdílu vzdáleností, kterou vlnění urazí z místa rázu ke snímačům, není prováděno pouze na jedné dvojici maxim prvního a druhého snímače, ale v důsledku získání co nejpřesnějších výsledků je prováděno na více dvojicích. Získáme tak více výsledků, přičemž o přesnosti a kvalitě získaných výsledků vypovídá střední hodnota a rozptyl, které jsou následně spočteny. Bylo již zmíněno, že přesnější lokalizaci místa kontaktu rotor/stator získáme, pokud snížíme délku okna při Fourierově transformaci (vyšší přesnost v čase), ovšem zaplatíme tím za horší přehlednost signálu. Proto bylo na stejných datech lokalizováno místo rázu postupně s odlišnou délkou okna. Pro každou délku okna byla ze získaného souboru výsledků určena střední hodnota a rozptyl odhadovaného rozdílu vzdáleností (správná hodnota je 7 cm), které byly zaneseny do grafu (viz. obr. 5-10). Z grafu je patrné, že při volbě příliš dlouhého a naopak příliš krátkého okna bude rozptyl výsledků velký. Při lokalizaci na rotorovém standu bylo dosaženo nejpřesnějších výsledků s délkou okna 600 vzorků (při vzorkovací frekvenci 102400 Hz), viz obr. 5-10, kde střední hodnota rozdílu vzdáleností byla 7.40 cm s poměrně nízkým rozptylem 0.65 cm.

Po analýze signálů získaných na rotorovém standu jsme celkem přesně dokázali lokalizovat místo kontaktu hřídel/ucpávka. Následující kapitola je věnována problematice rubbingu na datech získaných v provozu parních turbín. Zda půjde výše popsáním či jiným způsobem lokalizovat místo rázu na turbíně se přesvědčíme níže. Ovšem chtěl bych zmínit skutečnost, že signál získaný z provozu turbíny je vzorkovaný podstatně nižší vzorkovací frekvencí, nejčastěji 4096 Hz. Proto také byla lokalizace místa kontaktu na rotor – kitu RK4 provedena výše popsáním způsobem na signálu, který byl upraven, aby odpovídal vzorkovací frekvenci 4096 Hz. Z původního signálu se vzorkovací frekvencí 102400 Hz byl vybrán každý 25. vzorek, čímž jsme se dostali na vzorkovací frekvenci 4096 Hz. Kvalita převzorkovaného signálu se snížila a místo kontaktu bylo lokalizováno s větší chybou, ovšem důležitou skutečností je, že projev rubbingu byl viditelný i na signálech se vzorkovací frekvencí používanou v provozu parní turbíny.



obr. 5-9: Shodná frekvenční linie snímačů ve dvou měřicích rovinách



obr. 5-10: Graf závislosti střední hodnoty a rozptylu na délce okna

## 6 Lokalizace rubbingu v provozu parních turbín – blok 80MW a 200MW

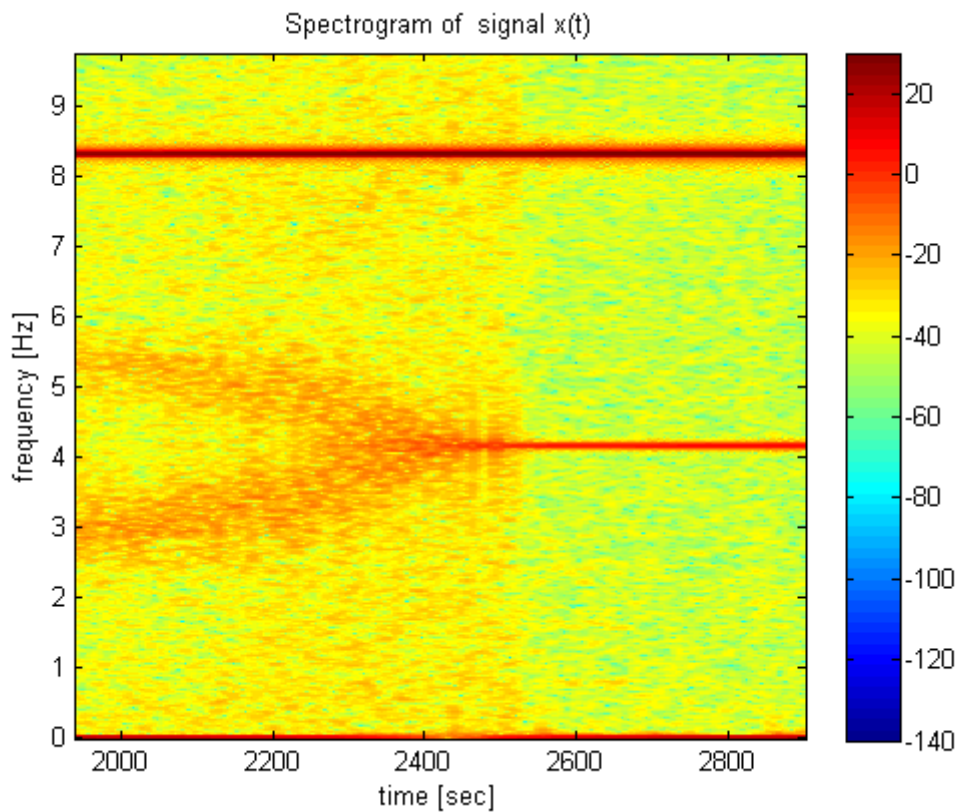
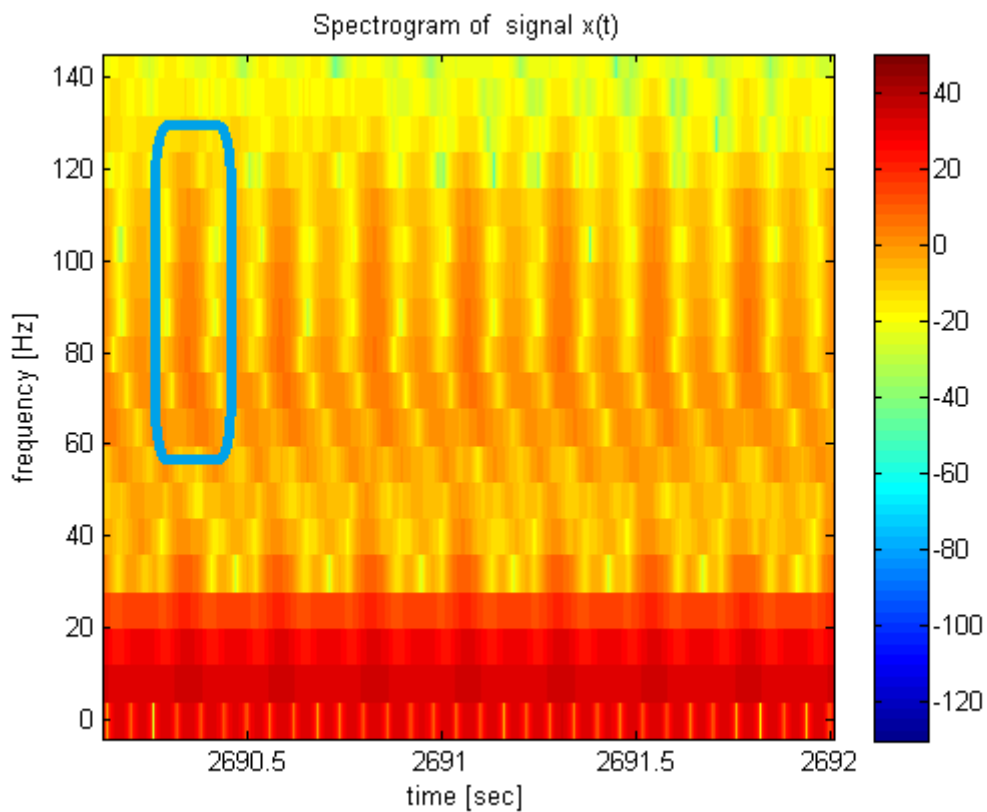
V předcházející kapitole byl popsán přístup, kterým bylo na rotorovém stendu přesně lokalizováno místo kontaktu hřídel/ucpávka. Cílem této kapitoly je vyzkoušet navržený přístup na reálném systému, kterým je parní turbína, a dále pak získat nové poznatky v dané problematice. Analyzovaná data popisovaná v této kapitole pochází z měření na dvou parních turbínách používaných v provozu. Jeden typ dat pochází z dánské elektrárny - blok 80MW, druhý typ dat pochází z české elektrárny - blok 200MW. Lokalizace místa rubbingu na turbínách v provozu je velice komplikovaným úkolem (oproti situaci na rotorovém stendu) z důvodu několika skutečností. První z nich je snížená vzorkovací frekvence na 4096 Hz. Další nežádoucí složkou přispívající ke složitosti lokalizace je přítomnost provozního šumu. Může také dojít k zaznamenání některých událostí připomínající existenci rubbingu, ovšem tyto události vůbec nemusí souviset s kontaktem rotoru a statoru. Nejprve se podíváme na analýzu dat z turbíny 80MW.

### 6.1 Turbínový blok 80MW

Data, která jsou v této části analyzována, byla naměřena v roce 2009. Při měření byly použity opět relativní snímače vibrací. Vibrační signál byl zaznamenáván celkem v pěti rovinách. Rovina 1 resp. 2 byla zvolena před resp. za vysokotlakým dílem. Dále pak snímače v rovině 3 resp. 4 byly umístěny před resp. za částí, která představovala spojení středotlakého a nízkotlakého dílu dohromady. Poslední rovina, ve které bylo měřeno, byla umístěna před generátorem. Přesné vzdálenosti mezi jednotlivými rovinami nejsou známy, ovšem lze říci, že vzdálenost mezi rovinou 1 a 2 resp. 3 a 4 je podstatně větší než vzdálenost mezi rovinou 2 a 3 resp. 4 a 5. Během měření docházelo k projevům částečného rubbingu – ke vzniku subharmonických složek  $1/2X$ ,  $1/3X$  a  $1/6X$ . Tato naměřená data jsou velice cenná, neboť se jednalo o silný částečný rubbing, který trval poměrně dlouho.

Nejprve se podíváme na situaci, kdy během najíždění stroje na provozní otáčky (3000 ot/min) došlo ke vzniku velkých vibrací. Z tohoto důvodu byl stroj odstaven na frekvenci otáčení 500 ot/min. Právě při těchto otáčkách (500 ot/min) došlo k projevům částečného rubbingu, což je viditelné na následujícím obrázku (viz obr. 6-1). Na obr. 6-1 je zobrazen spektrogram vzniklý krátkodobou Fourierovou transformací s délkou okna 40 vteřin, kde je dobře viditelný plynulý přechod subharmonické frekvence  $1/3X$  na frekvenci  $1/2X$  (vidlice v pásmu od 2 do 6 Hz). Tento jev je viditelný i na celočíselných násobcích jednotlivých frekvencí, na kterých je přechod zobrazen. Změna subharmonické frekvence z  $1/3X$  na frekvenci  $1/2X$  vypovídá o zvyšující se intenzitě rubbingu. Jak je patrné ze spektrogramu (na obr. 6-1), obzvláště projev frekvence  $1/2X$  je velice silný, a proto bude nejprve analyzována tato část signálu.

Na obr. 6-2 je tedy zobrazen spektrogram části signálu (ze třetí roviny), ve kterém se na obr. 6-1 projevila subharmonická složka  $1/2X$ . Spektrogram byl získán Fourierovou transformací s délkou okna 512 vzorků (osmina vteřiny). V tomto spektrogramu jsou dobře viditelné opakující se děje – rázy. Jeden z těchto rázů je ohraničen modrým rámečkem. Frekvence těchto opakování je právě rovna frekvenci  $1/2X$ , čili 4.17 Hz. To lze odečíst i ze spektrogramu (na obr. 6-2), neboť v rozmezí jedné vteřiny dojde přibližně ke čtyřem opakováním, přičemž první harmonická frekvence je 8.33 Hz (viz obr. 6-1).

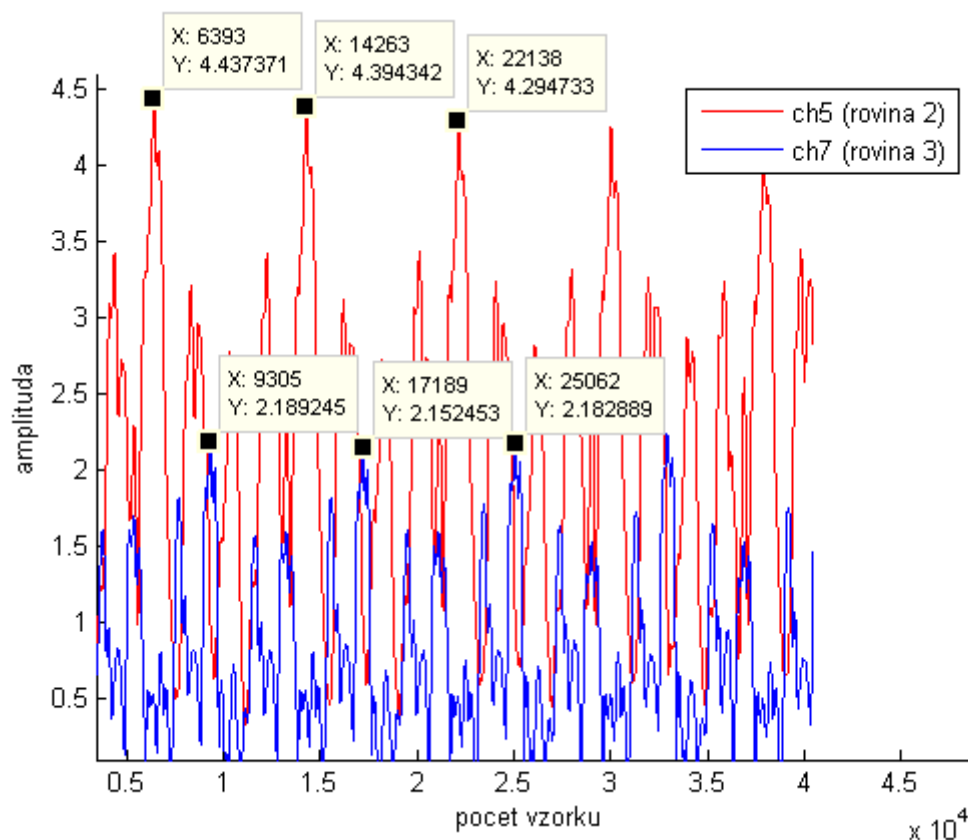
obr. 6-1: Přechod subharmonické frekvence  $1/3X$  na  $1/2X$ obr. 6-2: Viditelné rázy s frekvencí  $1/2X$

Všimněme si, že mezi jednotlivými rázy (s frekvencí  $1/2X$ ) jsou slabě viditelné další rázy. Kdybychom uvažovali slabě i silně viditelné rázy dohromady, zjistili bychom, že frekvence těchto opakování je shodná s první harmonickou frekvencí otáčení stroje.

V předcházející kapitole při lokalizaci místa kontaktu hřídel/ucpávka na rotorovém stendu, bylo využíváno projevů subharmonických složek na některých frekvenčních pásmech - liniích. I v tomto případě byly nalezeny projevy  $1/2X$  na některých frekvenčních pásmech a to v signálech zaznamenaných snímači v rovině 2, 3 a 4. Opět předpokládáme, že při kontaktu rotující a stacionární části, dochází k šíření nějakého typu vlnění od místa kontaktu k jednotlivým snímačům v rovinách. Proto nás dále zajímají okamžiky resp. časové difference příchodu vlny k jednotlivým snímačům v analyzovaném signálu. Při určování časových rozdílů na jednotlivých frekvenčních pásmech (liniích) zpracovaného signálu, jehož spektrogram je na obr. 6-2, bylo zjištěno, že časové rozdíly v různých rovinách se na jednotlivých frekvenčních liniích liší. Ovšem my bychom předpokládali, že projevy vlnění budou na shodných frekvenčních pásmech jednotlivých snímačů stejné. Respektive jsme předpokládali, že pokud bude nějaký časový rozdíl dospění vlnění do dvou snímačů na nějaké linii, pak také bude tento časový rozdíl shodný i na jiných liniích, na kterých se dané vlnění projeví. Domníváme se, že tento fakt částečně vzniká na základě způsobu, kterým pracuje krátkodobá Fourierova transformace a to následovně. Jedním z parametrů transformace je délka okna. Při této transformaci dochází k průměrování hodnot (amplitud vlnění) v tomto okně. Proto při volbě delšího okna může nastat situace, že skutečné maximum signálu, které dosahovalo svého maxima v určitém čase, bude vlivem průměrování v daném okně posunuto do jiného časového okamžiku. Dále k tomu může přispívat i šum, který se vyskytuje v zaznamenaném signálu. Připomeňme, že analyzovaný signál na obr. 6-2 byl zpracován Fourierovou transformací s délkou okna 512 vzorků (osmina vteřiny). Z výše popsaného důvodu byl tedy tento signál zpracován pro délku okna 256 vzorků (vyšší přesnost v časové oblasti). Problém odlišnosti časových diferencí na jednotlivých frekvenčních liniích byl tímto částečně odstraněn. Ve spektrogramu získaném Fourierovou transformací s délkou okna 256 vzorků bylo nalezeno několik frekvenčních linií, na kterých se přibližně shodovali časové rozdíly dospění vlnění do jednotlivých snímačů. Tyto frekvenční linie zahrnují pásmo frekvence přibližně od 80 do 127 Hz, což je také frekvenční oblast, ve které se objevují rázy na obr. 6-2. Projevy subharmonické frekvence  $1/2X$  nejsou viditelné pouze na tomto frekvenčním pásmu (80-127 Hz), ovšem pouze na tomto frekvenčním pásmu jsou shodně viditelné pro snímače v rovině 2, 3 a 4. Pokud bychom například určovali čas konkrétního maxima daného snímače na zmiňovaném frekvenčním pásmu (od 80 do 127 Hz), zjistili bychom, že tyto časy na jednotlivých liniích frekvenčního pásma se mohou nepatrně lišit. Proto pro větší zpřesnění byly amplitudy v jednotlivých časových okamžicích na liniích zahrnujících pásmo frekvence od 80 do 127 Hz sečteny. Z tohoto výsledku lze určit posloupnost rovin, do kterých se postupně dostalo vlnění od místa kontaktu. Nejprve vlnění dospělo ke snímačům v rovině 3, poté v rovině 4 a naposled v rovině 2. Časový rozdíl, kdy vlnění dospělo do roviny 3 a 4 je přibližně 10 vzorků (při vzorkovací frek. 4096). Dále pak časový rozdíl mezi rovinou 4 a 2 je přibližně 450 vzorků. Jak bylo již na začátku kapitoly uvedeno, vzdálenost mezi rovinou 2 a 3 je podstatně menší, než vzdálenost mezi rovinou 3 a 4. Z toho vyplývá jediná možnost kontaktu, která mohla nastat. Ke kontaktu muselo dojít mezi rovinou 3 a 4 zhruba uprostřed (blíže k rovině 3), tedy v části turbíny představující středotlaký a nízkotlaký díl dohromady. Bohužel nebyly získány konkrétní vzdálenosti mezi jednotlivými rovinami, tudíž nelze u dat z 80MW bloku přesně lokalizovat místo kontaktu.

V předcházejícím odstavci byla analyzována ta část signálu, ve které byl ve spektrogramu na obr. 6-1 viditelný projev subharmonické složky  $1/2X$ . Dále se v tomto spektrogramu objevila frekvenční složka  $1/3X$ , která v porovnání s  $1/2X$  představovala slabší typ částečného rubbingu. Subharmonická frekvence  $1/3X$  se projevila v signálech zaznamenaných snímači ve druhé a třetí rovině a společně pouze na jedné linii představující frekvenční pásmo od 16 do 32 Hz. Vlnění, které se šířilo od místa kontaktu, dospělo nejprve do roviny 3, přičemž časový rozdíl příchodu vlnění do snímačů je přibližně 615 vzorků (při vzorkovací frekvenci 4096). Nabízí se tedy dvě možnosti místa kontaktu. První z nich je, že ke kontaktu došlo ve středotlaké a nízkotlaké části a to podstatně blíže k rovině 3, neboť na rovině 4 žádný projev rubbingu nebyl zaznamenán. Druhou možností je, že ke kontaktu došlo mezi rovinou 2 a 3. V následujícím odstavci bude ukázána analýza signálu s projevem subharmonických složek, jejichž frekvence nabývání maxim je velice nízká a časové rozdíly příchodu vlny ke snímačům se pohybují v řádech tisíců vzorků (při vzorkovací frekvenci 4096). Doposud jsme se pohybovali v řádech desítek či stovek vzorků. Lze tedy usuzovat, že rychlost šíření vlnění je závislá na frekvenci, s jakou nabývá svých maxim. Takto byla také stanovena rychlost šíření vlnění i v předcházející kapitole. Pokud bychom uvažovali lineární závislost rychlosti šíření a frekvence, ze situace v předcházejícím odstavci zjistíme, že počet vzorků šíření vlnění od roviny 3 do roviny 2 (při rychlosti šíření frek. složky  $1/3X$ ) by musel být přibližně 690. Neboť poměr frekvencí, s jakou nabývají frekvenční složky  $1/2X$  a  $1/3X$  svých maxim, je 1.5 a z předcházejícího odstavce víme, že počet vzorků šíření vlnění od roviny 3 do roviny 2 je 460. Součinem 1.5 a 460 dostáváme počet vzorků 690. Z tohoto důvodu se domníváme, že ke kontaktu došlo mezi druhou a třetí rovinou, blíže k rovině 3. Z poměru vzorků 615 a 690 lze přesně lokalizovat místo kontaktu.

Doposud v této kapitole byla prováděna analýza signálů naměřených na turbíně s frekvencí otáčení 500 ot/min (8.33 Hz). Byla také naměřena data, kdy turbína byla na natáčecím stroji (dále jen natáčedlo). Jedná se o režim, kdy turbína neprodukuje elektrickou energii a otáčí se pouze frekvencí 64 ot/min (1.07 Hz). Tento režim je pokaždé navozován po odstavení turbíny z důvodu zabránění prohnutí rotoru vlastní tíhou. V těchto datech byl na některých rovinách při použití Fourier. trans. s délkou okna 40 s viditelný silný projev subharmonické frekvence  $1/2X$  (0.53 Hz). Dále pak signály z jednotlivých rovin byly zpracované pro délku okna osminy vteřiny. Nejprve došlo k projevům na druhé a třetí rovině. Na následujícím obrázku (viz obr. 6-3) je na frekvenčním pásmu 8 – 16 Hz zobrazena amplituda v čase obou rovin. Všimněme si, že časové rozdíly dospění vlnění ke snímačům v rovině 2 a 3 se pohybují v řádech tisíců vzorků (při vzorkovací frek. 4096). Jak bylo již v předcházejícím odstavci zmíněno, rychlost šíření vlnění pravděpodobně souvisí s frekvencí, s jakou dochází k nabývání maxim respektive, s jakou dochází ke kontaktu. Pokud bude frekvence nižší, pak rychlost šíření bude také nižší a dojde ke zvětšení časových rozdílů příchodu vlny na jednotlivých snímačích. Ze situace na obr. 6-3 je vidět, že vlnění nejprve dospěje do snímače v rovině 2 a poté až v rovině 3, přičemž časový rozdíl je přibližně 2920 vzorků. Z analýzy dat s projevem  $1/2X$  při otáčkové frekvenci 8.33 Hz (viz výše) víme, že počet vzorků odpovídající šíření vlnění od roviny 2 do roviny 3 je přibližně 460 vzorků. Poměr frekvencí subharmonických složek  $1/2X$  při otáčkové frekvenci 8.33 Hz a v této situaci z natáčedla je 7.81. Pokud opět předpokládáme lineární závislost mezi frekvencí a rychlostí šíření, dostaneme po vynásobení hodnot 7.81 a 460 počet vzorků odpovídající šíření vlnění od roviny 2 k rovině 3 (v této situaci z natáčedla) a to 3594. Z toho vyplývá jediná možnost místa kontaktu. Ke kontaktu muselo docházet mezi rovinou 2 a 3 (blíže ke snímači v rovině 2) a z poměru vzorků 2920 a 3594 lze (spolu se znalostí vzdálenosti mezi rovinami) přesně specifikovat místo tohoto kontaktu.



obr. 6-3: Projev subharmonické složky. 1/2X na 2. a 3. rovině

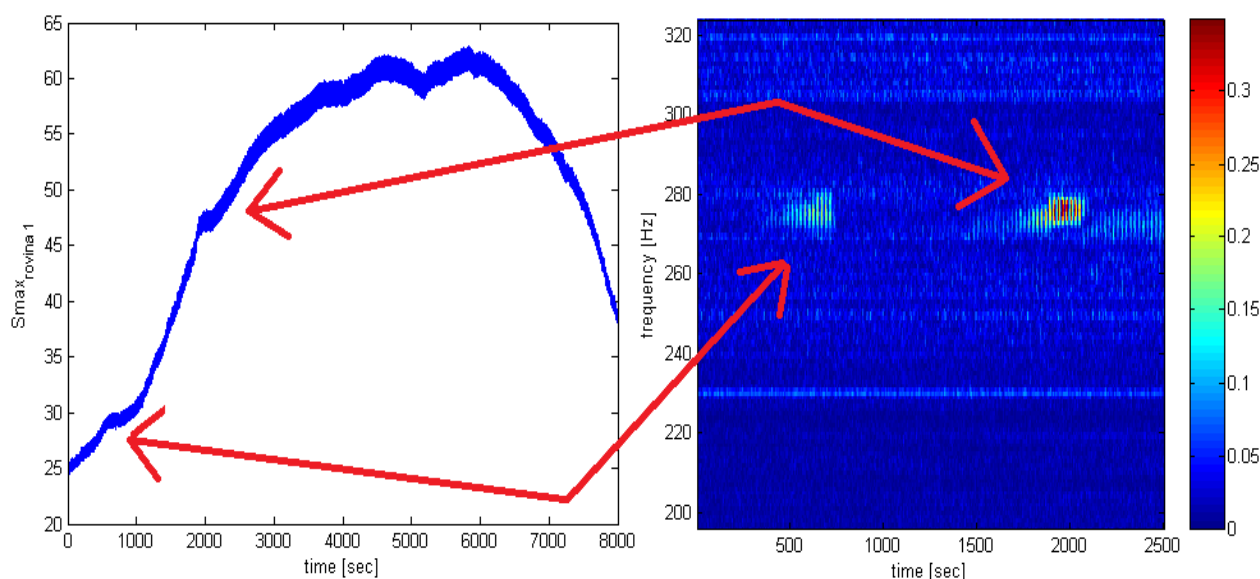
Při sledování projevů subharmonické složky 1/2X dále v čase (na frekvenčním pásmu 8 – 16 Hz) jednotlivých rovin bylo zjištěno následující. Od jistého časového intervalu dojde postupnému odeznění složky 1/2X na třetí rovině a zároveň ke vzniku subharmonické složky 1/2X na rovině první. Současně pak na druhé rovině dojde k nárůstu (vybuzení) jiných maxim než v situaci v předcházejícím odstavci a to opět s frekvencí 1/2X. Tedy od určitého časového intervalu dojde k projevům 1/2X na první a druhé rovině, kde tyto projevy jsou podobné jako na obr. 6-3. Domníváme se, že od tohoto časového intervalu dochází ke změně místa kontaktu než v předcházející situaci. Nejprve dospěje vlnění ke snímači v první rovině a následně pak ve druhé, kde časový rozdíl je přibližně 3690 vzorků (vzorkovací frekvence 4096). Z toho vyplývá jediná možnost místa kontaktu, ke kterému muselo docházet mezi první a druhou rovinou (blíže k rovině 1). V datech získaných z natáčedla dochází ke střídání situace popsané v tomto a předcházejícím odstavci. Domníváme se tedy, že postupně dochází ke střídání dvou míst kontaktu, přičemž k této změně dochází zhruba třikrát za 100 vteřin.

## 6.2 Turbinový blok 200 MW

Druhý soubor dat, který byl získán pro řešení problematiky lokalizace kontaktu v provozu, pochází z elektrárny v České republice – blok 200 MW. Tato data byla naměřena na turbíně jak při provozních otáčkách, tak i v situaci, kdy turbína byla na natáčedle. Při provozních otáčkách (50 Hz) nebyl v datech zaznamenán žádný projev rubbingu. Ovšem v situaci, kdy turbína byla na natáčedle (1.06 Hz), již ke kontaktu docházelo. Místo tohoto kontaktu se podařilo lokalizovat, a jak bude v této podkapitole ukázáno, bylo k tomu využíváno i jiných poznatků než doposud, což vypovídá o různorodosti této problematiky. Měřicí oblasti byly na turbíně rozděleny celkem do 6 rovin. Roviny byly rozmístěné podobným způsobem jako

v předcházející situaci – turbínový blok 80 MW. Kolem každého stupně turbíny (vysokotlaký, středotlaký, nízkotlaký) byly situovány dvě měřicí roviny (přední a zadní část každého dílu). V každé rovině byly instalovány dva relativní snímače vibrací (pod úhlem  $90^\circ$ ) a jeden snímač absolutní. Absolutní snímač byl umístěn na skřini turbíny, na rozdíl od snímačů relativních, které byly umístěny u rotoru. Velkou výhodou oproti předcházející situaci (blok 80 MW) je znalost vzdáleností mezi jednotlivými rovinami.

Po odstavení turbíny z provozních otáček na natáčedlo došlo po několika hodinách k velkému ohnutí rotoru. Tento jev nastal dvakrát v rozmezí několika dnů. Samotné ohnutí rotoru trvalo opět několik hodin, než se rotor opět vyrovnal. Při druhém z těchto ohybů rotoru byly pozorovány na druhé a třetí rovině slabé projevy subharmonických složek a to  $1/3X$  a  $1/2X$ . Z předešlých kapitol víme, že tyto projevy souvisí s kontaktem rotující a stacionární části. Otázkou však zůstává, zda ke kontaktu nedocházelo vlivem samotného ohnutí nebo naopak, zda kontakt nebyl příčinou nestejnomyšerného zahřívání rotoru, což vedlo k jeho ohýbání. Jak bude dále ukázáno, ke kontaktu pravděpodobně docházelo ještě před ohnutím rotoru. Bylo již zmíněno, že projevy subharmonických složek viditelných na relativních snímačích druhé a třetí roviny byly poměrně slabé. Z tohoto důvodu a z důvodu projevu pouze na dvou rovinách nebylo možné lokalizovat místo kontaktu. Při další analýze dat z relativních snímačů nebyly nalezeny jiné události, které by souvisely s kontaktem. Proto byla dále provedena analýza dat z absolutních snímačů. V těchto datech se podařilo objevit rázy, které jsou s největší pravděpodobností kontaktem vyvolány. Tyto události byly nejvíce viditelné na prvních třech rovinách. Na následujícím obrázku (viz obr. 6-4) je zobrazen průběh veličiny  $S_{max}$  v čase (vlevo) a spektrogram části signálu z akcelerometru (vpravo), přičemž oba pochází z první roviny.

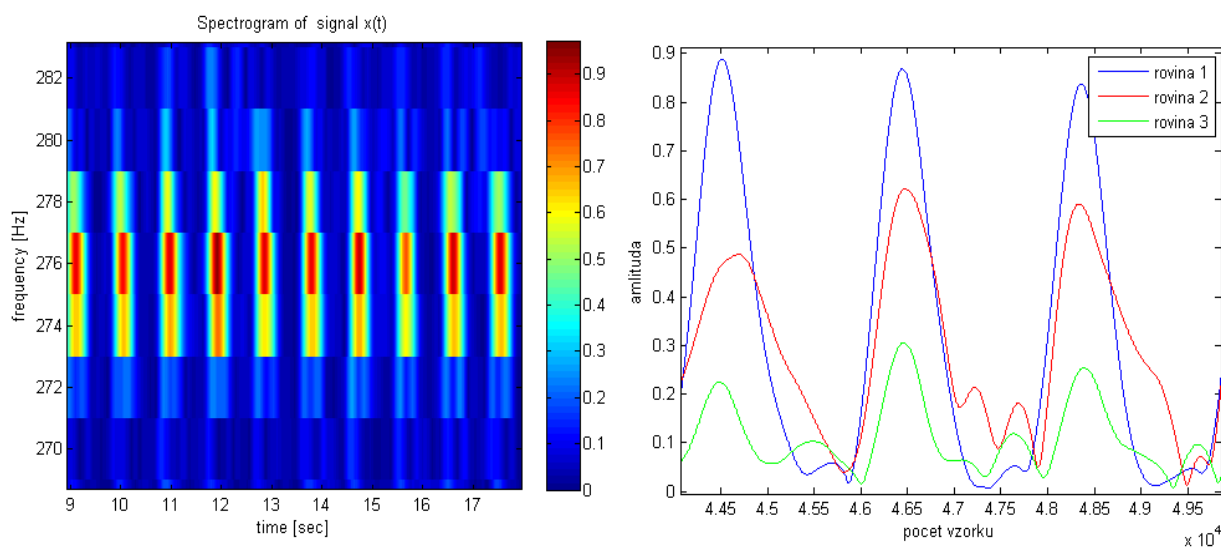


obr. 6-4: Průběh  $S_{max}$  hodnoty a spektrogram signálu z absolutního snímače

Veličina  $S_{max}$  popisuje chování rotoru, respektive vyjadřuje ohyb rotoru v daném místě (rovině). Čím větší je hodnota  $S_{max}$ , tím větší je ohyb rotoru. Tato veličina se získá jako součet kvadrátů signálů z relativních snímačů  $x$  a  $y$  pod odmocninou, přičemž podmínkou je, aby snímače  $x$  a  $y$  byly pod úhlem  $90^\circ$ . Absolutní snímače měřily rychlost. Pro určení zrychlení bylo potřeba signál z absolutních snímačů nejprve derivovat. Poté pro získání spektrogramu na obr. 6-4 (vpravo) bylo opět použito krátkodobé Fourierovy transformace. Porovnejme průběh  $S_{max}$  hodnoty s událostmi viditelnými ve spektrogramu absolutního

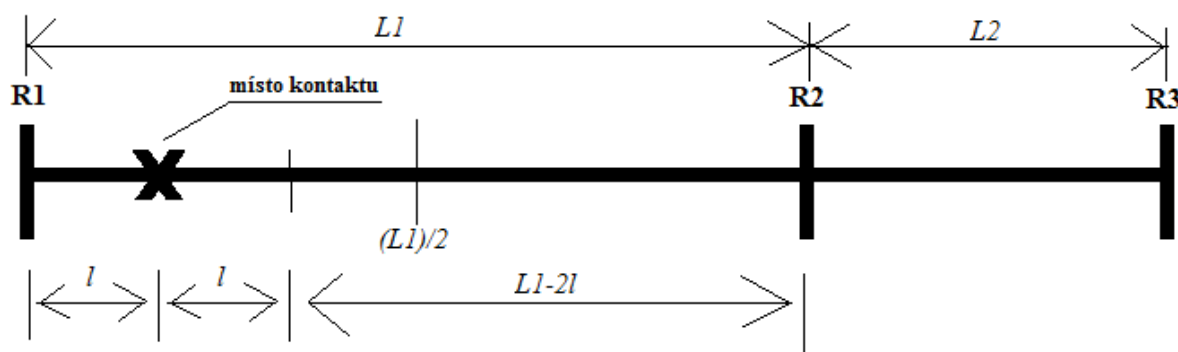


snímače na obr. 6-4. První událost je ve spektrogramu viditelná přibližně v rozmezí 500 - 750 sekund, druhá 1850 – 2100 sekund. Všimněme si, že přibližně po 750. a 2100. vteřině, čili po viditelných událostech, dojde k výraznému zvýšení  $S_{max}$  hodnoty - ke zvýšení ohybu rotoru. Lze tedy předpokládat, že viditelné události skutečně souvisí s kontaktem, při kterém nejprve docházelo k nerovnoměrnému zahřívání rotoru a tím pak k jeho následnému ohýbání. Jednotlivé události s rostoucím časem jsou více viditelné (než ve spektrogramu na obr. 6-4), z čehož usuzujeme (spolu s průběhem  $S_{max}$  hodnoty), že při větším ohybu rotoru dochází k silnějšímu kontaktu. Na následujícím obrázku (viz obr. 6-5) je vlevo zobrazen detail události. Tato událost je viditelná na frekvenčním pásmu od 272 do 280 Hz, přičemž nejvyšší intenzity dosahuje na frekvenci 276 Hz. Vpravo na obr. 6-5 je zobrazena frekvenční linie odpovídající právě frekvenci 276 Hz z prvních tří rovin. Ve spektrogramu na obr. 6-5 (detail události) jsou dobře viditelné opakující se děje – rázy. K těmto rázům dochází přibližně jednou za vteřinu, což je shodné s frekvencí otáčení rotoru. Tedy ke kontaktu dochází jednou za otáčku. Doposud jsme se ale zabývali situacemi, při kterých docházelo ke kontaktu jednou za dvě či více otáček. Odpověď na otázku, proč jsme tedy neprováděli lokalizaci při kontaktu jednou za otáčku již dříve, je následující. Předtím jsme nebyli schopni rozlišit, zda projevy skutečně souvisí s kontaktem či pouze se samotným otáčením rotoru. Dále pak příloze B. je zobrazen spektrogram signálu s viditelnými rázy a bez rázů. Na obr. 6-5 vpravo je z průběhu amplitud vidět, že k největším projevům dochází na první a druhé rovině. Při lokalizaci dříve, byly za časy příchodu vlnění do jednotlivých rovin stanoveny okamžiky, ve kterých vlnění dosahovalo svého maxima. Porovnejme ale maxima z první a druhé roviny na obr. 6-5. Při prvním rázu je čas maxima z první roviny menší než z druhé. Při druhém rázu jsou časy přibližně stejné. A při posledním rázu se dokonce zdá, že čas maxima první roviny je větší než z druhé. Z tohoto důvodu nebylo možné pro získání časů dospění vlnění do rovin brát maxima jednotlivých rázů. Při této lokalizaci byly jednotlivé časy stanoveny následujícím způsobem. Nejprve byl signál představující frekvenční linii 276 Hz (z dané roviny) vydělen nejvyšší hodnotou, která se v tomto signále vyskytovala. Tímto jsme zajistili, že jednotlivá maxima v signále nebudou vyšší než 1. Další varianta zpracování spočívala ve vydělení části signálu představující pouze jeden ráz svým maximem, čili potom každý ráz dosahoval hodnoty 1. Ovšem výsledek lokalizace místa kontaktu se výrazně nezměnil. Dále byla stanovena nízká hodnota, kterou vlnění při nabývání svého maxima (daného rázu) protulo. Právě čas, ve kterém vlnění bylo rovno zvolené hodnotě, je brán jako počátek dospění vlnění k danému snímači. V tomto případě byla hodnota zvolena 0.2. Dříve bylo již zmíněno, že



obr. 6-5: Detail události a linie tří rovin odpovídající frekvenci 276 Hz

doba náběhu signálu ze snímače blíže k místu kontaktu je kratší, oproti situaci, kdy ke kontaktu došlo dále od snímače. Z tohoto důvodu stanovením co nejnížší možné hodnoty, které jednotlivé rázy při nabývání svých maxim dosahují (0.2), získáme přesnější lokalizaci místa kontaktu. Časy dospění vlnění do jednotlivých rovin získané výše popsaným způsobem jsou dále využívány pro výpočet místa kontaktu. Označme si časy příchodu vlnění do první, druhé a třetí roviny jako  $t_1$ ,  $t_2$  a  $t_3$ . Na základě časů  $t_1$ ,  $t_2$  a  $t_3$  lze možnosti místa kontaktu rozdělit celkem do pěti případů, ke kterým lze stanovit vztahy pro výpočet. Odvození vztahu pro první případ si ukážeme následovně (s využitím obr. 6-6).



obr. 6-6: Schéma pro odvození rovnic místa kontaktu

Vzdálenost  $L_1$  resp.  $L_2$  je vzdálenost mezi první a druhou resp. druhou a třetí rovinou. Necht' jednotlivé časy příchodu vlnění do snímačů jsou  $t_1 < t_2 < t_3$ . Potom pro místo kontaktu  $l$  musí platit:  $l \in (0, \frac{L_1}{2})$ . Rychlost šíření vlnění mezi druhou a třetí rovinou lze stanovit následujícím způsobem:

$$v_2 = \frac{L_2}{t_3 - t_2}. \quad (6-1)$$

Dále platí:

$$L_1 - 2l = v_1 \cdot (t_2 - t_1). \quad (6-2)$$

Pokud bychom předpokládali, že rychlost šíření vlnění je mezi jednotlivými rovinami stejná, potom  $v_1 = v_2$ . Po dosazení vztahu (6-1) do (6-2) dostáváme vztah pro výpočet místa kontaktu pro tento případ:

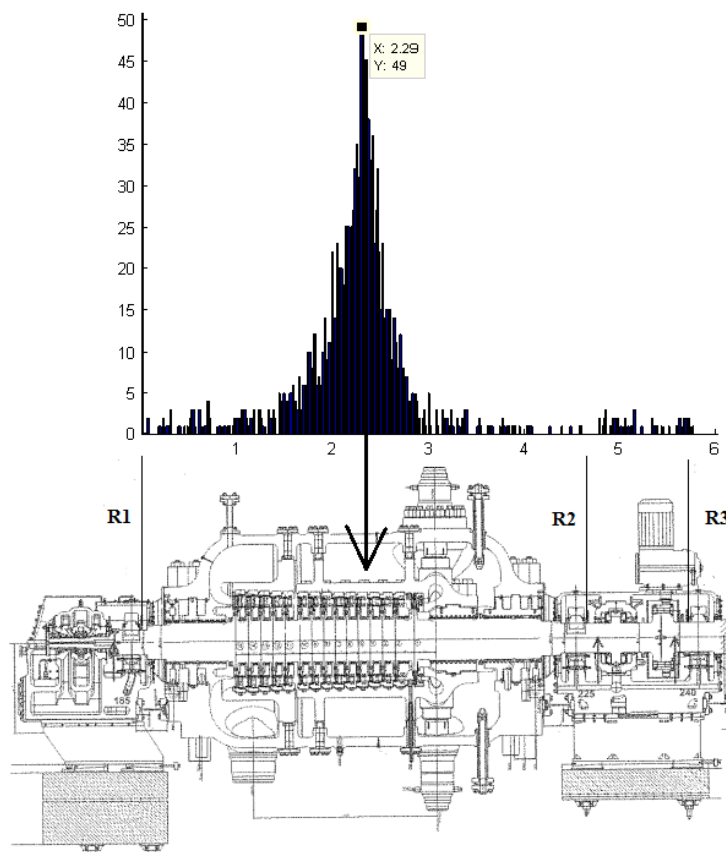
$$l = \frac{1}{2} [L_1 - L_2 \left( \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_2} \right)]. \quad (6-3)$$

Analogickým způsobem lze odvodit zbylé vztahy pro ostatní možnosti místa kontaktu. Pro shrnutí jsou dále uvedeny (včetně již odvozeného).

- $t_1 < t_2 < t_3$ ,  $l = \frac{1}{2} [L_1 - L_2 \left( \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_2} \right)]$ , kde  $l \in (0, \frac{L_1}{2})$
- $t_2 < t_1 < t_3$ ,  $l = \frac{1}{2} [L_1 + L_2 \left( \frac{t_1 - t_2}{t_3 - t_2} \right)]$ , kde  $l \in (\frac{L_1}{2}, \frac{L_1 + L_2}{2})$
- $t_3 < t_2 < t_1$ ,  $l = L_1 + \frac{1}{2} [L_2 + L_1 \left( \frac{t_2 - t_3}{t_1 - t_2} \right)]$ , kde  $l \in (L_1 + \frac{L_2}{2}, L_1 + L_2)$

- $t_2 < t_3 < t_1$ ,  $l = \frac{1}{2}[L_1 - L_2(\frac{t_1 - t_2}{t_3 - t_2})]$ , kde  $l \in (\frac{L_1 + L_2}{2}, L_1)$
- $t_2 < t_3 < t_1$ ,  $l = L_1 + \frac{1}{2}[L_2 - L_1(\frac{t_3 - t_2}{t_1 - t_2})]$ , kde  $l \in (L_1, L_1 + \frac{L_2}{2})$

Z velikostí časů  $t_1$ ,  $t_2$  a  $t_3$  lze rozhodnout, o jaký z uvedených případů místa kontaktu se jedná (kromě posledních dvou). Ke každé z možností se váže vztah, pomocí něhož a časů  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  lze vypočítat přesné místo kontaktu. Podmínkou však je, aby vypočítaná vzdálenost náležela do daného intervalu příslušné možnosti. Pokud nastane situace  $t_2 < t_3 < t_1$ , nelze přímo rozhodnout, zda se jedná o předposlední či poslední uvedený případ. Proto je nejprve vypočítána vzdálenost pro jeden z těchto případů, a pokud nevyhovuje danému intervalu, je počítána pro případ druhý. Důležitá podmínka, která musí být splněna ještě před určováním, o jaký z pěti případů se jedná, je následující. Maximum časů  $t_1$  a  $t_2$  musí být větší než absolutní hodnota z rozdílů časů  $t_3$  a  $t_2$ . Tato podmínka připouští pouze ty situace rázů, u kterých je brána v úvahu skutečnost, že vzdálenost mezi první a druhou rovinou je podstatně větší než mezi druhou a třetí. Pro situace rázů, které nelze zařadit do žádné z uvedených možností (např.  $t_1 < t_3 < t_2$ ) nebo nesplňují předcházející podmínku, nejsou vzdálenosti počítány. Celkem byl zpracován signál dlouhý přes 2500 vteřin, ve kterém byly počítány vzdálenosti pro více jak 1400 rázů. Z vypočítaných vzdáleností byl získán histogram, jehož tvar se blíží normálnímu rozdělení. Jak je z následujícího obrázku zřejmé (viz obr. 6-7), ke kontaktu s největší pravděpodobností docházelo 229 cm od první roviny, tedy v části vysokotlakého dílu turbíny.



obr. 6-7: Histogram vypočítaných vzdáleností a část schématu 200 MW turbíny

## 7 Závěr

Rubbingem je označován jev, při kterém dochází ke kontaktu rotující a stacionární části stroje – parní turbíny. Tento jev často bývá až druhořadým projevem jiné poruchy, při které dochází k nárůstu vibrací a k následnému kontaktu. Ve druhé kapitole byly popsány základní části parní turbíny z hlediska této problematiky. Bylo zde uvedeno, že nejproblematičtějšími částmi turbíny z pohledu kontaktu jsou vnitřní ucpávky a rotující olopatkovaný disk. Dále byl v této kapitole podrobně popsán rubbing včetně jeho typů. Projev rubbingu je spojen jak se změnou amplitudy v časové oblasti, tak dochází k projevům i v oblasti frekvenční. Z tohoto důvodu bylo v této práci pro analýzu zaznamenaných signálů využíváno jedné z časofrekvenčních metod a to krátkodobé Fourierovy transformace, která byla podrobně popsána ve třetí kapitole.

V následující čtvrté kapitole byla uvedena lokalizace místa kontaktu při experimentu, který spočíval v poklepu impulzním kladívkem na nerotující rotor. Lokalizace při tomto experimentu byla založena na porovnávání křivek získaných analytickým způsobem s křivkami získanými ze zaznamenaných dat. Přesnost lokalizace se pro některá měření a snímače pohybovala v desítkách či dokonce v jednotkách centimetrů, ovšem v jiných případech byla odchylka velká - v řádech stovek centimetrů. Také rozptyl jednotlivých výsledků byl velký. Způsob této lokalizace je pro použití na datech získaných z provozu či z rotorového stendu nepoužitelný. Jednak proto, že události související s poklepem byly vybuzené téměř na celém frekvenčním pásmu spektrogramu, k čemuž u dat získaných z provozu nedochází. Dále také tato metoda je založena na předpokladu, že projevy v analyzovaném signále souvisejí s povrchovým vlněním šířící se od místa kontaktu, jehož rychlost šíření je v řádu 1000 m/s. Ovšem při lokalizaci místa kontaktu u rotorového stendu či u dat získaných z 80 MW turbíny se jedná pravděpodobně o jiný typ vlnění a to s podstatně nižší rychlostí, neboť časové rozdíly dospění vlnění k jednotlivým snímačům jsou větší než čekávané.

Předmětem páté kapitoly byla lokalizace místa kontaktu na rotorovém stendu (rotor-kit RK4), kdy byl několikrát vyvolán kontakt teflonové ucpávky s rotující hřídelí. Při analýze dat naměřených na rotor-kitu byly získány cenné poznatky, které byly dále využívány při řešení této problematiky u turbín používaných v provozu. Při lokalizaci místa kontaktu bylo využíváno projevu subharmonické složky  $1/2X$ . Jak je známo, existence subharmonických složek v signálu souvisí s rubbingem. Protože při měření na rotor-kitu byly relativní snímače umístěny pouze na dvou měřicích místech – ve dvou rovinách, musela být dále pro určení přesného místa kontaktu stanovena rychlost šíření vlnění. Zda-li způsob stanovení rychlosti uvedený v této kapitole platí obecně či pouze u tohoto případu, nelze říci. Ovšem za předpokladu, že dochází k měření a k projevům souvisejících s kontaktem alespoň na třech měřicích rovinách, lze provést lokalizaci s vyloučením rychlosti. U rotorového stendu pomocí stanovené rychlosti a časových rozdílů dospění vlnění k oběma snímačům se podařilo poměrně přesně lokalizovat místo kontaktu – umístění teflonové ucpávky. Střední hodnota výsledků odhadovaných vzdáleností vyšla 7.40 cm a rozptyl 0.65 cm, přičemž správný výsledek byl 7 cm.

Šestá kapitola byla věnována lokalizaci místa kontaktu v provozu parních turbín. Data byla získána z 80 MW a 200 MW turbíny. Stanovení typu a hlavně rychlosti šíření vlnění je velice obtížné. Proto při lokalizaci místa kontaktu v těchto datech bylo využíváno skutečnosti,

že měření bylo prováděno ve více rovinách. Jak bylo již zmíněno v předcházejícím odstavci, pokud dojde k projevům souvisejících s kontaktem alespoň na třech rovinách, potom lze určit místo kontaktu bez stanovení typu a hlavně rychlosti šíření vlnění. Nejprve jsme se v této kapitole zabývali analýzou dat z 80 MW turbíny. V těchto datech naměřených relativními snímači byly silně viditelné subharmonické složky  $1/2X$  a  $1/3X$ . Nejprve byla rozebrána situace, kdy došlo k projevům  $1/2X$  na druhé, třetí a čtvrté rovině. Z této situace vyplynulo, že kontaktu muselo docházet mezi třetí a čtvrtou rovinou, čili v místě společného středotlakého a nízkotlakého dílu. Pro přesné určení místa kontaktu bylo potřeba znát vzdálenosti mezi jednotlivými rovinami, které ovšem nebyly získány. Dále byly objeveny další situace s projevy subharmonických složek. Tyto projevy byly bohužel vždy viditelné pouze na dvou rovinách. Ovšem z předcházející situace, kdy došlo k projevům  $1/2X$  na rovině 2, 3 a 4, spolu s předpokladem lineární závislosti rychlosti šíření a frekvence, s jakou vlnění nabývá svých maxim, by bylo možné (spolu s informací o vzdálenostech mezi jednotlivými rovinami) přesně lokalizovat místo kontaktu. Ve druhé části šesté kapitoly jsme se věnovali lokalizaci místa kontaktu na 200 MW turbíně. Zadavatel úkolu chtěl objasnit situaci, při které došlo po sjezdu z provozních otáček k velkému ohnutí rotoru a ke vzniku rubbingu. Velkou výhodou pro lokalizaci oproti předcházejícím situacím (rotor-kit, turbínový blok 80 MW) bylo umístění kromě dvou relativních snímačů v každé rovině jednoho snímače absolutního. V signálech zaznamenaných absolutními snímači z první, druhé a třetí roviny byly objeveny rázy související s kontaktem. Jelikož byla také získána informace o vzdálenostech mezi jednotlivými rovinami, bylo možné lokalizovat pravděpodobné místo kontaktu. Na základě velikostí časů příchodu vlnění ke snímačům byly stanoveny možnosti místa kontaktu včetně vztahů pro přesný výpočet. Z vypočítaných vzdáleností jednotlivých rázů byl získán histogram. Výsledkem je, že ke kontaktu s největší pravděpodobností docházelo 229 cm od prvního snímače, tedy v oblasti vysokotlakého dílu turbíny.

Do budoucna by bylo dobré stanovit ideální vzorkovací frekvenci, s jakou by diagnostické zařízení v případě podezření na rubbing ukládalo data. S touto vzorkovací frekvencí by nemělo docházet ke ztrátě potřebné informace pro lokalizaci, ale zároveň by měla být co nejnižší vzhledem k paměťové náročnosti. Dále bychom měli určit, zda rázy viditelné na absolutních snímačích (blok 200 MW) souvisí s nějakými projevy na snímačích relativních, neboť při zaznamenávání dat je častěji využíváno právě snímačů relativních. V této době, kdy je tato práce dokončována, byla získána další data z jiného bloku elektrárny. V těchto a v jiných datech bychom měli hledat další poznatky související s rubbingem, pomocí nichž a dosavadních znalostí bychom byly schopni navrhnout algoritmus pro automatickou lokalizaci místa kontaktu.

## Literatura

- [1] Liška J.: Časo-frekvenční metody lokalizace volných částí v diagnostice energetických zařízení, Plzeň, 2008
- [2] Liška J., Jakl J., Janeček E.: Rubbing na parních turbínách a metody jeho detekce, Plzeň, 2010
- [3] Jakl J.: Metody zpracování signálů a detekce kontaktu rotor-stator v diagnostice parních turbín, Plzeň, 2011
- [4] Melichar J.: Lineární systémy 1, Plzeň 2010
- [5] Skopal V., Adámek J., Hofírek M.: Stavba a provoz strojů IV, Praha, 1982
- [6] Muszynska, A.: Rotordynamics. Taylor&Francis, London, 2005
- [7] Flandrin, P.: Time-Frequency/Time-Scale Analysis. Academic Press, London, 1999
- [8] Peng, Z.K., Chu, F.L., Tse, P.W.: Detection of the rubbing – caused impacts for rotor – stator fault diagnosis using reassigned scalogram. Mechanical Systems and Signal Processing 19, p. 391-409, 2005
- [9] Jakl, J., Liška, J., Janeček, E.: Návrh metod pro automatickou detekci částečného rubbingu, prototyp diagnostického systému. Výzkumná zpráva ZČU, Plzeň, 2011

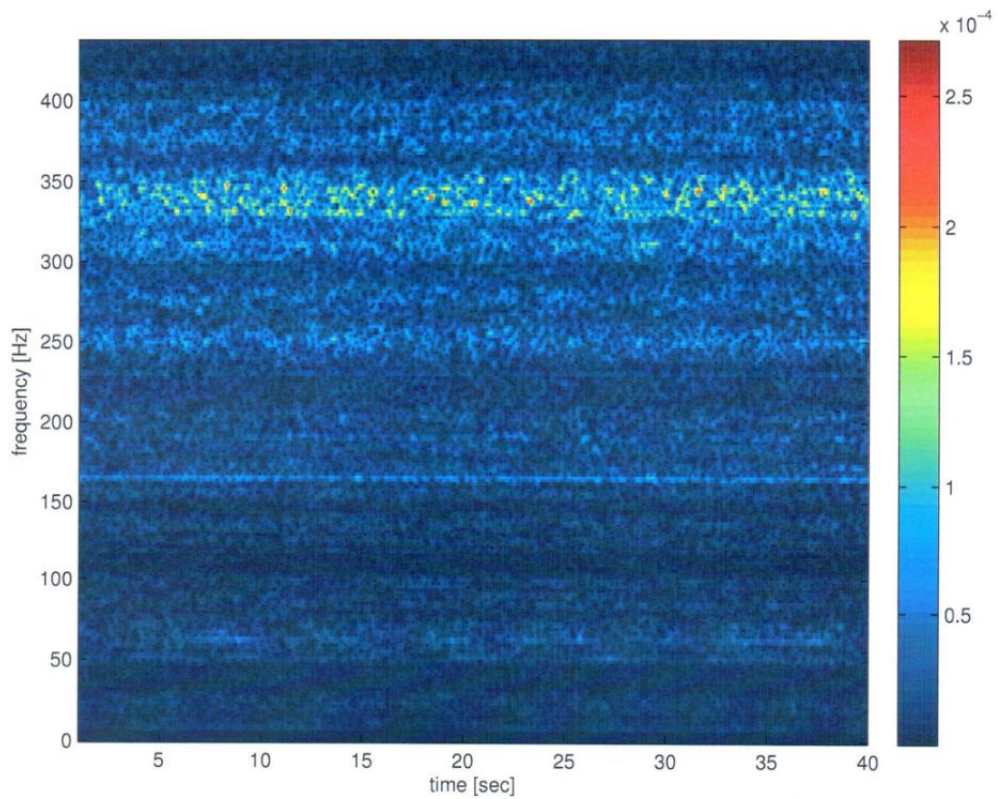
## A. Rotor – Škoda Power



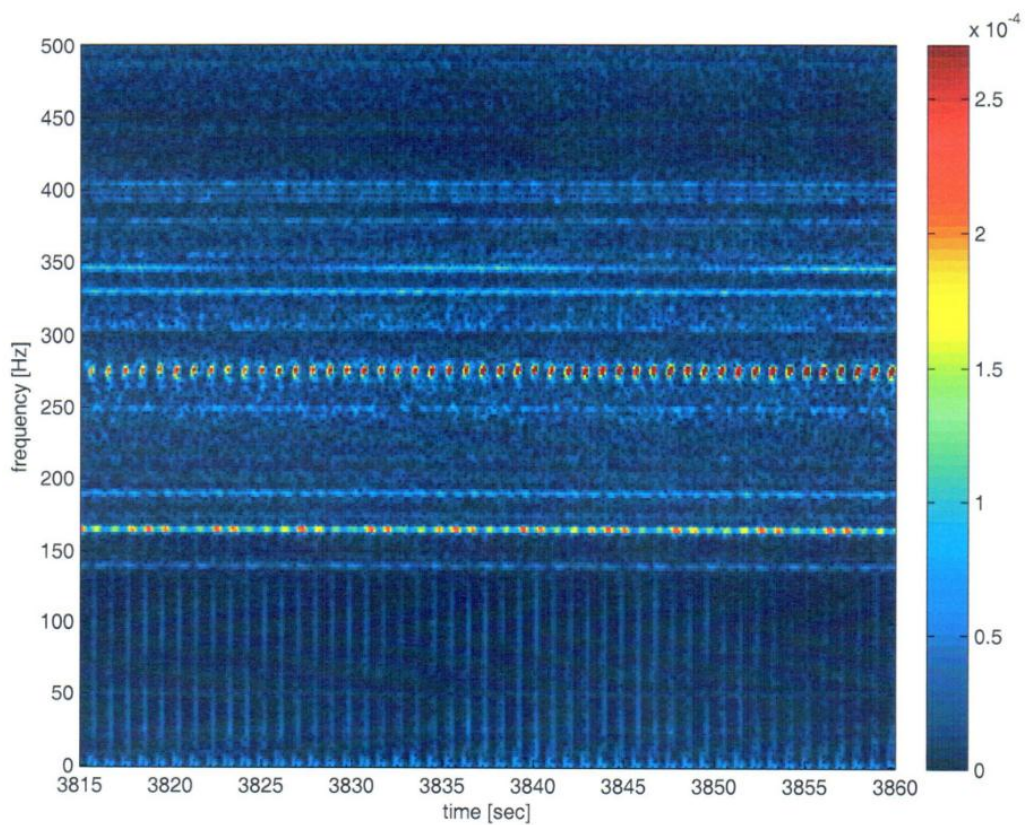
obr. A-1: Experiment na rotoru bez otáček



obr. A-2: Umístění snímačů na rotoru

**B. Analýza signálů – turbínový blok 200 MW**

obr. B-1: Spektrogram signálu bez rázů



obr. B-2: Spektrogram signálu s viditelnými rázy