

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta aplikovaných věd

Katedra kybernetiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

PLZEŇ 2014

ANTONÍN BOUBERLE

zadání

PROHLÁŠENÍ

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

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

V Plzni dne 16. května 2014

.....
vlastnoruční podpis

Poděkování

Na tomto místě bych velice rád poděkoval Ing. Jindřichu Liškovi, Ph.D. za výborné vedení práce, odborné konzultace a provedené korekce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Janu Jaklovi za cenné rady, připomínky a za jeho pomoc při návrhu metod. Zároveň pak oběma bych velice rád poděkoval za jejich osobní přístup, ochotu a trpělivost. Velké poděkování patří také mé přítelkyni a mým rodičům za podporu v celém studiu.

Autor

Anotace

Diplomová práce se podrobně zabývá problematikou lokalizace místa kontaktu rotující a stacionární části parní turbíny. Jedná se o velmi nežádoucí jev, který je označován termínem rubbing. Nejprve je provedena analýza získaných signálů z rotorového stendu a návrh metody pro lokalizaci místa kontaktu hřídel/ucpávka. Získané poznatky z experimentů spolu s navrženou metodou jsou dále použity pro lokalizaci rubbingu v provozu parních turbín. V práci je využíváno metod pro zpracování signálů.

Klíčová slova

Parní turbína, rotor, stator, rotorový stand RK4, hřídel, ucpávka, rubbing, místo kontaktu, lokalizace, vibrační signál, počátek vzruchu.

Annotation

The thesis deals in detail with the problem of localizing the contact area of the rotating and stationary parts of steam turbine. This is a very undesirable phenomenon that is called rubbing. In the first part of the thesis there is an analysis of the signals obtained from the rotor stand and the method for the shaft/seal contact localization is proposed. In the next part the knowledge from experiments on the rotor stand together with proposed method are used to localize rubbing in operation of steam turbines. Methods for signal processing are used in this thesis.

Keywords

Steam turbine, rotor, stator, rotor stand RK4, shaft, shaft seal, rubbing, contact point, localization, vibration signal, impulse initiation.

Obsah

1	Úvod	10
2	Parní turbína a rubbing	12
3	Současný stav problematiky a lineární lokalizace	15
3.1	Současný stav detekce a lokalizace rubbingu	15
3.2	Lineární lokalizace	18
4	Metody pro zpracování signálů	21
4.1	Zpracování signálů v časové oblasti	21
4.1.1	Rekurzivní výpočet k -tého centrálního momentu	21
4.1.2	Výpočet okamžité amplitudy signálu	23
4.1.3	Teagerova energie signálu	24
4.2	Zpracování signálů ve frekvenční oblasti	25
4.2.1	Fourierova transformace	25
4.2.2	Sinc filtr	26
4.3	Zpracování signálů v časo-frekvenční oblasti	28
4.3.1	Krátkodobá Fourierova transformace	28
4.3.2	Gaborova transformace	29
4.3.3	Výpočet k -hodnoty z amplitudového spektrogramu	30
4.4	Určení počátku vzruchu	31
4.4.1	Metoda klouzavých oken	32
5	Experimenty na rotorovém standu (rotor-kit RK4)	34
5.1	Rotorový stand RK4	34
5.2	Kontakt vyvolaný kovovým nástrojem	36
5.3	Kontakt pomocí teflonové ucpávky	37
5.4	Kontakt pomocí kovové ucpávky	38
5.5	Měření tvaru kmitu rotoru	39
6	Analýza signálů získaných z rotorového standu a návrh metody pro lokalizaci	41
6.1	Analýza dat z experimentů s kovovým klíčem	41
6.2	Analýza dat a lokalizace místa kontaktu hřídel/teflonová ucpávka	50
6.3	Lokalizace místa kontaktu hřídel/kovová ucpávka	64
6.4	Provozní tvar kmitu rotoru	73
7	Lokalizace rubbingu v provozu parních turbín	78
8	Závěr	91
	Literatura	93

Seznam obrázků

obr. 3-1: Charakteristická veličiny $1/2X$ a její modifikace (převzato z [3]).....	16
obr. 3-2: Signál akustické emise a průběh vyhlazené RMS hodnoty (převzato z [1])	17
obr. 3-3: Časový posuv dvou vyhlazených RMS hodnot (převzato z [1])	18
obr. 3-4: Lineární lokalizace při měření ve dvou rovinách	19
obr. 3-5: Lineární lokalizace při měření ve třech rovinách	19
obr. 4-1: Průběh odhadované variance $\mu_2(t)$ a časový signálu $x(t)$	22
obr. 4-2: Průběh obálky signálu a signál $x(t)$	24
obr. 4-3: Průběh Teagerovy energie (diskrétní verze) a signál $x(t)$	25
obr. 4-4: Sinc funkce a její Fourierův obraz.....	27
obr. 4-5: Frekvenční spektrum původního a filtrovaného signálu za použití sinc filtru	28
obr. 4-6: Signál $x(t)$, amplitudový spektrogram a průběh k -hodnoty	31
obr. 4-7: Signál rázu a průběhy veličin získané pomocí klouzavých oken	33
obr. 5-1: Rotorový stend RK4	34
obr. 5-2: Používané ucpávky na rotor-stend RK4 při experimentech	35
obr. 5-3: Možné tvary kmitu rotoru a umístění snímačů	39
obr. 5-4: Rotorový stend při měření provozního tvaru kmitu hřídele	40
obr. 6-1: Amplitudy naměřených rázů, kontakt na středu hřídele při 2000 ot./min	41
obr. 6-2: Časové signály a histogram, kontakt na středu hřídele při 0 a 2000 ot./min	42
obr. 6-3: Spektrogram rázu, kontakt na středu hřídele při 0 ot./min	43
obr. 6-4: Časové signály a histogram, kontakt na hřídeli bez disku při 0 ot./min	44
obr. 6-5: Časové signály a histogram, kontakt na hřídeli bez disku při 2000 ot./min	45
obr. 6-6: Časové signály a histogram, kontakt na hřídeli s diskem při 0 ot./min	46
obr. 6-7: Časové signály a histogram, kontakt na hřídeli s diskem při 2000 ot./min	46
obr. 6-8: Spektrogram rázu, nerotující hřídel bez disku	47
obr. 6-9: Spektrogram rázu, hřídel s diskem při 2000 ot./min	48
obr. 6-10: Spektrogram rázu, kontakt 18 cm od <i>ch06</i> , hřídel bez disku při 0 ot./min.....	49
obr. 6-11: Spektrogram rázu, kontakt 12 cm od <i>ch06</i> , hřídel bez disku při 0 ot./min.....	49
obr. 6-12: Spektrogram rázu, kontakt 18 cm od <i>ch06</i> , hřídel bez disku při 2000 ot./min.....	49
obr. 6-13: Časový signál a spektrogram pro kontakt s teflonovou ucpávkou	51
obr. 6-14: Schéma návrhu metody pro automatickou lokalizaci místa rubbingu.....	51
obr. 6-15: Detekované počátky rázu, kontakt hřídel/teflonová ucpávka.....	52
obr. 6-16: Histogram vypočítaných vzdáleností, ucpávka 19,2 resp. 17,7 cm.....	54
obr. 6-17: Histogram vypočítaných vzdáleností, ucpávka 16,2 resp. 14,7 cm.....	54
obr. 6-18: Histogram vypočítaných rychlostí, ucpávka 19,2 resp. 17,7 cm.....	55
obr. 6-19: Histogram vypočítaných rychlostí, ucpávka 16,2 resp. 14,7 cm.....	55
obr. 6-20: Časové signály a histogram vypočítaných vzdáleností pro $\tau = 0,5$ ms.....	56
obr. 6-21: Časové signály a histogram vypočítaných vzdáleností pro $\tau = 0,1$ ms.....	57
obr. 6-22: Lokalizace místa rubbingu při změně časové konstanty τ pro 14,7 cm	57
obr. 6-23: Vývoj lokalizace při různé frekvenci otáčení hřídele, kontakt 19,2 cm	59
obr. 6-24: Vývoj lokalizace při různé frekvenci otáčení hřídele, kontakt 16,2 cm	59
obr. 6-25: Časové signály amplitudově nevýrazného rázu.....	60
obr. 6-26: Histogram vzdáleností, kontakt 19,2 cm při 2260, 2400, 2500, 2700 ot./min.....	61
obr. 6-27: Histogram vzdáleností, kontakt 17,7 cm při 2200, 2300, 2400, 2500 ot./min.....	61
obr. 6-28: Histogram vzdáleností, kontakt 16,2 cm při 2400, 2505, 2700 ot./min	61
obr. 6-29: Histogram vzdáleností, kontakt 14,7 cm při 2300, 2340, 2400 ot./min	61
obr. 6-30: Histogram vzdáleností, kontakt 13,2 cm při 2340, 2400 ot./min.....	62
obr. 6-31: Histogram vzdáleností, kontakt 11,7 cm při 2320 ot./min.....	62
obr. 6-32: Histogram vzdáleností, kontakt 8,7 cm při 2200 ot./min.....	62

obr. 6-33: Histogram vzdáleností, kontakt 7,2 cm při 2200 ot./min.....	62
obr. 6-34: Porovnání výsledků metod, ucpávka ve vzdálenosti 17,7 cm	63
obr. 6-35: Porovnání výsledků metod, ucpávka ve vzdálenosti 16,2 cm	63
obr. 6-36: Časový signál a spektrogram rázů hřídel/kovová ucpávka.....	64
obr. 6-37: Detekované počátky rázu, rubbing s kovovou ucpávkou 20,5 cm od <i>ch17</i>	65
obr. 6-38: Detekované počátky rázu, rubbing s kovovou ucpávkou 12,9 cm od <i>ch17</i>	65
obr. 6-39: Detekované počátky rázu, rubbing s kovovou ucpávkou 5,4 cm od <i>ch17</i>	66
obr. 6-40: Jednotlivé rychlosti šíření vzruchů, kontakt hřídel/kovová ucpávka.....	67
obr. 6-41: Jednotlivé rychlosti šíření vzruchů při použité vzdálenosti $L + \Delta L$	68
obr. 6-42: Lokalizace místa rubbingu při umístění kovové ucpávky 5,4cm	69
obr. 6-43: Lokalizace místa rubbingu při umístění kovové ucpávky 12,9cm	70
obr. 6-44: Lokalizace místa rubbingu při umístění kovové ucpávky 20,5cm	70
obr. 6-45: Lokalizace místa rubbingu při umístění kovové ucpávky 8,5cm	71
obr. 6-46: Lokalizace místa rubbingu při umístění kovové ucpávky 16,1cm	71
obr. 6-47: Detekované počátky rázu pro přesnou a méně přesnou lokalizaci	72
obr. 6-48: Detekované počátky rázu v případě chybné lokalizace	72
obr. 6-49: Pravděpodobný efekt třetího ložiska.....	73
obr. 6-50: Tvar kmitu rotující hřídele bez kontaktu	74
obr. 6-51: Tvar hřídele při kontaktu s teflonovou ucpávkou.....	75
obr. 6-52: Ohyb hřídele při kontaktu s teflonovou ucpávkou.....	76
obr. 6-53: Změna provozního tvaru kmitu hřídele při poklepu kovovým klíčem	76
obr. 6-54: Online lokalizace místa rubbingu hřídel/ucpávka (převzato z [12]).....	77
obr. 7-1: Rozdělení části turbíny pro jednotlivé případy místa kontaktu	79
obr. 7-2: Spektrogram signálu z absolutního snímače vibrací (1. rovina).....	80
obr. 7-3: Projev nadbandážového kontaktu	81
obr. 7-4: Projev hřídelového kontaktu	81
obr. 7-5: Průběh ohybu rotoru a existence hřídelového kontaktu.....	82
obr. 7-6: Nadbandážový a hřídelový rubbing v odlišných časových okamžicích	83
obr. 7-7: Lokalizace nadbandážového kontaktu v časové oblasti	84
obr. 7-8: Průměrná amplituda spektrogramu pro frekvenční pásmo 274 – 280 Hz	85
obr. 7-9: Lokalizace nadbandážového kontaktu v časo-frekvenční oblasti.....	86
obr. 7-10: Lokalizace nadbandážového kontaktu pomocí 1., 2. a 4. roviny.....	87
obr. 7-11: Lokalizace hřídelového rubbingu	87
obr. 7-12: Důsledky nadbandážového rubbingu po ohledání turbíny	88
obr. 7-13: Lokalizace nadbandážového rubbingu v časové oblasti (17. 3. 2012)	89
obr. 7-14: Lokalizace nadbandážového rubbingu v časo-frekvenční oblasti (17. 3. 2012).....	90
obr. 7-15: Lokalizace hřídelového rubbingu (17. 3. 2012).....	90

Seznam symbolů a zkratek

1X	první harmonická frekvence
$a(t)$	okamžitá amplituda signálu
f_0	frekvence, kolem které má být filtrováno
f_c	šířka pásma filtru (polovina)
f_i	i-tá frekvenční linie amplitudového spektrogramu
f_s	vzorkovací frekvence
$F(\omega)$	Fourierův obraz časové funkce
$F^A(\omega)$	amplitudové spektrum
$F(\omega, t)$	obraz spojitě krátkodobé Fourierovy transformace
$F_G(\omega, t)$	obraz spojitě Gaborovy transformace
\mathcal{F}	operátor Fourierovy transformace
\mathcal{F}^{-1}	operátor zpětné Fourierovy transformace
$g(t)$ resp. $g(i)$	spojitá resp. diskrétní veličina získaná metodou klouzavých oken
$h(t)$	sinc funkce
$H[x(t)]$	Hilbertova transformace signálu $x(t)$
i	i-tý vzorkovaný okamžik
ix resp. iy	počátek vzruchu v signále x resp. y (ve vzorkách)
j	komplexní proměnná
$k(i)$	průměrná amplituda v určitém frekvenčním pásmu, k -hodnota
l	vzdálenost místa kontaktu vzhledem k určité měřicí rovině
L	vzdálenost mezi dvěma měřicími rovinami
N	délka okénkové funkce (ve vzorkách)
P	Cauchyho hlavní hodnota
R_i	i-tá měřicí rovina
RAMS	diagnostický a měřicí systém (Rub Advanced Monitoring System)
RK4	rotorový stend
$S_{max}(i)$	(diskrétní) S_{max} veličina
t	čas
t_i	detekovaný počátek vzruchu na i-té měřicí rovině
T_s	vzorkovací perioda
v	rychlost šíření vzruchů
$w(t)$	okénková funkce
$w_G(t)$	Gaussova okénková funkce
$x(t)$ resp. $x(i)$	spojitý resp. diskrétní signál
$\bar{x}(i)$	odhad střední hodnoty signálu v i-tém vzorkovaném okamžiku
$x_i(t)$	imaginární složka analytického (komplexního) signálu
$x_r(t)$	reálná složka analytického (komplexního) signálu
$x_{filt}(t)$	filtrovaný signál
$X(f)$	Fourierův obraz signálu $x(t)$
$X(i, j)$	hodnota amplitudového spektrogramu v čase i na frekvenční linii j
$y(t)$ resp. $y(i)$	spojitý resp. diskrétní signál
$z(t)$	analytický (komplexní) signál
λ	koeficient zapomínání
μ	střední hodnota signálu
$\mu_k(i)$	odhad k -tého centrálního momentu v i-tém vzorkovaném okamžiku
σ	směrodatná odchylka signálu
σ_f resp. σ_t	směrodatná odchylka frekvence resp. času
τ	časová konstanta filtru
$\psi_s[x(t)]$ resp. $\psi_d[x(i)]$	spojitý resp. diskrétní Teagerův energetický operátor
ω	úhlová frekvence
ΔL	změna vzdálenosti mezi měřicími rovinami
Δt	rozdíl časových okamžiků

1 Úvod

Moderní společnost je bez jakékoliv pochyby zcela závislá na elektrické energii. Spotřeba elektrické energie neustále stoupá. Navíc čím dál častěji je rozebírána problematika ubývání neobnovitelných zdrojů. Jednou z možností, jak ušetřit nejen zdroje elektrické energie (neobnovitelné i obnovitelné), ale také finanční prostředky v energetickém průmyslu, je zdokonalování a vývoj nových zařízení pro její výrobu. Cílem tedy je vytvářet zařízení, jejichž účinnost, životnost, spolehlivost a bezpečnost bude stále vyšší. Současný trend v této problematice dále spěje k monitorování jednotlivých zařízení, neboť včasná detekce počínající závady na stroji může ušetřit nemalé finanční prostředky. Například každá neplánovaná odstávka parní turbíny spolu s její opravou je spojena s velkými finančními náklady.

Tato práce je věnována jedné z problematik týkající se právě zmíněných parních turbín. Parní turbína je zařízení pro přeměnu tepelné energie obsažené v přehřáté vodní páře na energii rotačního pohybu, která je dále využívána pro výrobu elektrické energie. Celá rotorová soustava je roztáčena působením přehřáté páry na oběžné lopatky. Aby byla zajištěna co nejvyšší účinnost stroje, jsou do míst, kterými by mohla unikat pára bez jakéhokoliv využití, instalovány tzv. ucpávky. Tendencí je snižovat vůli mezi rotorovou a statorovou částí právě prostřednictvím ucpávek. To ovšem s sebou nese větší riziko vzniku kontaktu rotor/stator. K tomu může například dojít vlivem rotorových vibrací, které jsou způsobeny nevyváhou rotoru či jeho ohybem. Po překročení stanovené vůle mezi rotorovou a stacionární částí pak nastává zmíněný kontakt. Jakýkoliv kontakt rotoru a statoru je označován termínem rubbing. Ačkoliv k tomu termínu existuje i český ekvivalent – zadírání, je ve většině případů používáno právě slovo anglického původu. Příčiny vzniku rubbingu mohou být různé, podrobněji budou však rozebrány v následující kapitole. Při rubbingu může docházet k poměrně slabému kontaktu, který může sám odeznít. Například po instalaci nových ucpávek může dojít při přechodu oblastmi vlastních frekvencí k obrušování těchto statorových částí, což může vést k následnému ukončení kontaktu. Pochopitelně, že obrušování ucpávek přispívá ke snížení účinnosti stroje. Rubbing může ovšem také představovat velmi nebezpečný typ kontaktu, při kterém dochází k výraznému poškození statorových i rotorových částí, dokonce může dojít k destrukci celého zařízení. Jakákoliv existence rubbingu je tedy při provozu parních turbín velmi nežádoucím jevem.

Tato práce se zabývá problematikou rubbingu z pohledu lokalizace, která je spolu s úlohou detekce kontaktu rotor/stator řešena na Katedře kybernetiky Západočeské univerzity v Plzni ve spolupráci s průmyslovým partnerem Doosan Škoda Power s.r.o. Cílem této práce je na základě experimentů na rotorovém standu RK4 a následné analýze získaných dat navrhnout metodu (popř. metody), která by s vysokou přesností lokalizovala místo vzniklého rubbingu. Rotorový stand RK4 je experimentální zařízení, na kterém lze pozorovat resp. modelovat chování rotoru v případě rubbingu, který je realizovaný prostřednictvím ucpávek. Velkou výhodou pro návrh metody je přesná znalost místa vzniklého kontaktu. Získané poznatky z experimentů na rotorovém standu spolu s navrženou metodou by měly být dále použity pro lokalizaci rubbingu v provozu parních turbín. Vstupem pro lokalizaci jsou tedy vibrační signály měřené v určitých místech turbíny popř. standu (v tzv. rovinách). K dispozici jsou jak snímače měřící relativní vibrace rotoru, tak i snímače pro měření absolutních vibrací statoru. V této práci se tedy budeme zabývat zpracováním signálů a to jak v časové, frekvenční tak i časo-frekvenční oblasti. Právě některé turbíny, na kterých bylo prováděno

měření, se s problémem rubbingu setkávaly. Dále poznamenejme, že není příliš autorů, kteří by se problematikou lokalizace kontaktu rotor/stator zabývaly, zvláště pak na reálných strojích v provozu. Proto jakékoliv nové poznatky, které budou získány, budou velmi cennými.

Celá práce je koncipována do několika kapitol. Následující kapitola se věnuje základnímu popisu parních turbín. Mimo jiné jsou popsány části, které se mohou podílet na kontaktu rotor/stator. Dále je zde popsán samotný rubbing, jeho typy a příčiny jeho vzniku. Ve třetí kapitole je uveden současný stav problematiky detekce a lokalizace rubbingu. V této části je zmíněn jeden z mála článků zabývajících se lokalizací rubbingu na reálných turbínách prostřednictvím měření akustické emise. Ačkoliv v této práci není akustická emise využívána, základní princip je v obou případech stejný - tzv. princip lineární lokalizace, který je v této části taktéž popsán. Za třetí kapitolou pak následuje popis metod, které byly při analýze získaných dat a návrhu metody pro lokalizaci využívány. Jednotlivé metody jsou rozděleny do oblastí, ve kterých jsou zpracovávány měřené signály, tedy do oblasti časové, frekvenční a časo-frekvenční. Popisem jednotlivých experimentů realizovaných na rotorovém standu RK4 se zabývá pátá kapitola. Nejprve se jedná o experimenty, které mají odpovědět na základní otázku, zda je vůbec možné na relativně krátké hřídeli provádět lokalizaci kontaktu. Další experimenty pak spočívaly v samotné realizaci rubbingu s teflonovou a dále pak i kovovou ucpávkou při proměnných otáčkách, které byly postupně umísťovány na různá místa podél rotoru. Nakonec jsou uvedeny experimenty cílené na popis chování hřídele při vzniku rubbingu – měření provozního tvaru kmitu rotoru. V šesté kapitole je tedy pro teflonovou i kovovou ucpávku provedena analýza získaných signálů z předešlých experimentů vedoucí na návrh metody pro lokalizaci. Výsledky získané lokalizace pro příslušnou ucpávku jsou taktéž dokumentovány v této kapitole. Konec šesté kapitoly pak patří analýze dat z měření provozního tvaru kmitu rotoru. Lokalizace rubbingu v datech naměřených na parních turbínách v provozu je předmětem sedmé kapitoly. V této kapitole je využíváno získaných poznatků spolu s navrženou metodou z předchozí části práce. Cílem kapitoly je v získaných datech nalézt případné projevy kontaktu rotor/stator a provést jejich lokalizaci. V závěru je uvedeno zhodnocení získaných výsledků a celé práce.

2 Parní turbína a rubbing

V této kapitole je popsán samotný rubbing, jeho typy a příčiny jeho vzniku. Uvedme nejprve základní princip parní turbíny spolu s jejími hlavními částmi. Dodejme, že parní turbína je z hlediska své konstrukce velmi obsáhlým zařízením. Podrobněji je tato problematika rozebrána například v [18], [19]. Hlavním cílem parní turbíny je přeměna tepelné energie na energii rotačního pohybu a to prostřednictvím přehřáté vodní páry. Samotná elektrická energie pak vniká pomocí získaného rotačního pohybu v generátoru. Jednou z hlavních částí turbíny je rotor, který je buď tvořen hřídelí s oběžnými koly, nebo bubnem přecházející na koncích v hřídel. Na oběžná kola či buben jsou usazovány oběžné lopatky. Právě působením přehřáté vodní páry na oběžné lopatky dochází k roztáčení celé rotorové soustavy. Dále dodejme, že lopatky jsou velmi namáhány. Aby nedocházelo k nepřipustným kmitům jednotlivých lopatek, jsou používány výztužné prvky. Mezi nejpoužívanější patří tzv. bandáže, které jsou mimo jiné umístovány nad oběžné lopatky. Právě tyto komponenty rotorové soustavy mohou být při vzniklém rubbingu v kontaktu se statorovou částí (viz kapitola 7). Jednou z možných příčin vzniku rubbingu může být nárůst rotorových vibrací, ke kterému může dojít vlivem nevyváženosti rotoru. Nevývažek vzniká při výrobě a pro eliminaci jeho vlivu jsou jak jednotlivé části, tak i celý rotor vyvažovány. Celá rotorová soustava je uložena do ložisek umístěných v ložiskových stojanech. Používají se především kluzná ložiska, která jsou mazaná a chlazená olejem pod tlakem.

Další částí turbíny je tzv. rozváděcí ústrojí. Rozváděcí ústrojí je součástí vnitřní části statoru a je tvořeno rozváděcími lopatkami. Rozváděcí lopatky zajišťují správnou rychlost a směr (výstupní úhel) přehřáté páry, která působí na oběhové lopatky tak, aby byla dosažena co nejvyšší účinnost stroje. Z hlediska rubbingu, který se podařilo v datech z provozu parních turbín identifikovat (viz kapitola 7), uvedme další dvě části statoru. První z nich jsou tzv. brzdičky (angl. swirl brakes), které jsou umístovány nad oběžná kola. Hřebenovitý tvar těchto komponent má za cíl především potlačovat cirkulační proudění páry nad jednotlivými koly, které by mohlo způsobovat samobuzené kmitání lopatek. Druhé ze zmiňovaných částí jsou tzv. ucpávky. Úkolem ucpávek je eliminovat místa, kterými by proudila pára podél rotoru nebo nad špičkami lopatek. Ve většině případů se používají ucpávky bezdotykové, u kterých dojde v případě působení páry k jejímu zahlcení a následnému utěsnění. Ucpávky se především dělí na vnitřní a vnější. Vnější ucpávky jsou instalovány u výstupu hřídele ze skříně turbíny. Vnitřní ucpávky mají za úkol snižovat vůli mezi rotorovou a statorovou částí. Pochopitelně čím menší bude vůle, tím vyšší bude účinnost stroje. Na druhou stranu se ovšem také bude zvyšovat riziko vzniku rubbingu. Právě po instalaci nových ucpávek často k rubbingu dochází. Turbíny, na kterých bylo v této práci prováděno měření, se skládají celkem z tří typů stupňů – vysokotlaký, středotlaký a nízkotlaký. Předáváním své energie rotorové soustavě pára postupně chladne a ztrácí svůj tlak. Tento fakt je vyrovnáván zvětšováním délek oběžných lopatek. Proto ve vysokotlakém dílu, kde pára dosahuje nejvyšší teploty a tlaku, jsou oběžné lopatky kratší oproti zbylým stupňům. V souvislosti s tímto zmiňme další možnou příčinu vzniku rubbingu. Vlivem odlišné teploty a tlaku v různých částech turbíny dochází k velkému namáhání celé skříně. Po její deformaci může opět dojít ke zmenšení vůle mezi rotorovou a statorovou částí a tedy i ke vzniku rubbingu.

Termínem rubbing je označován jakýkoliv mechanický kontakt rotorové a statorové části stroje. Český ekvivalent pro tento pojem je zadíraní. O problematice rubbingu, jeho typech a příčin vzniku je například pojednáno v publikacích [3], [7], [11]. Ke vzniku rubbingu dochází, pokud je překročena vymezená vůle mezi rotorem a státorem. Jak bylo již zmíněno, to může být důsledkem teplotní deformace skříně (statoru) nebo důsledkem rotorových vibrací, které mohou být způsobeny nevyvážeností rotoru (nevývažek) nebo jeho ohnutím. K ohybu rotoru může docházet vlivem nestejněmorné teploty v různých místech rotoru. Tedy ohyb rotoru může být i následkem rubbingu, kdy vlivem tření právě dochází k nestejněmornému zahřívání v určitém místě. Nevývažek nebo ohyb rotoru způsobují při rotaci vznik síly, která působí na rotor. Právě tato síla vychyluje rotorovou část od středu rotace, tedy osa rotoru není shodná s osou rotace, čímž dochází ke zmenšení vůle mezi rotorem a státorem. Dále dodejme, že rubbing může samovolně odeznít a to po obroušení některých částí stroje – nejčastěji ucpávek, což pochopitelně vede ke snížení účinnosti stroje.

Rubbing lze dělit podle tzv. precese nebo podle délky doby trvání kontaktu rotor/stator. Precesí je myšlen tvar křivky, po které se pohybuje geometrický střed rotoru během rotace. Směr precese je určen v závislosti na směru otáčení rotoru. Jestliže se geometrický střed rotoru pohybuje ve stejném směru, jako je směr otáčení rotoru, pak hovoříme o precesi dopředné. Naopak u zpětné precese dochází k pohybu geometrického středu rotoru opačným směrem, než je směr otáčení rotoru. Typ rubbingu lze tedy rozlišovat podle směru precese a to na rubbing s dopřednou popř. zpětnou precesí.

Podle délky doby trvání kontaktu rotor/stator lze dále rubbing rozlišovat na částečný a úplný. Při částečném rubbingu dochází ke kontaktu na velmi krátkou dobu. V případě kontaktu rotoru a statoru působí na rotor třecí síla. Její velikost je závislá na velikosti normálové síly a na materiálových vlastnostech (koeficient tření). Třecí síla pochopitelně působí proti směru otáčení rotoru. Při částečném kontaktu může tedy dojít i ke změně precese. Dále poznamenejme, že částečný rubbing často vzniká periodicky, při kterém může docházet ke kontaktu několikrát v rámci jedné otáčky rotoru. Ke kontaktu ovšem spíše dochází jednou za otáčku popř. jednou za několik otáček. V posledním z uvedených případů jsou pak ve spektru ze snímačů měřící relativní rotorové vibrace viditelné tzv. subharmonické frekvence, které jsou rovny celočíselným podílům otáčkové frekvence. Ve spektru jsou ovšem patrné jak tyto subharmonické složky, tak i jejich celočíselné násobky. Například při kontaktu jednou za dvě otáčky bude ve spektru patrná frekvence $1/2X$ (kde X je otáčková frekvence) a její celočíselné násobky. Ke kontaktu mezi rotorem a státorem může obecně docházet k -krát za n otáček. Pokud bude mezi jednotlivými kontakty stejná perioda, pak se ve spektru bude vyskytovat frekvence k/nX spolu s jejími celočíselnými násobky. Jestliže ale mezi kontakty bude různá perioda, pak spektrum bude obsahovat frekvenci $1/nX$ a její celočíselné násobky. Podstatné ovšem je, že subharmonické frekvence představují jeden z indikátorů vzniku částečného rubbingu. Obecně lze říci, že v případě slabšího kontaktu vznikají nižší subharmonické frekvence ($1/3X$, $1/4X$,...) spolu s celočíselnými násobky. V případě silnějšího kontaktu pak vzniká frekvence $1/2X$ a její celočíselné násobky. Tato práce byla zaměřena na lokalizaci právě částečného rubbingu, který předchází rubbing úplný.

Druhým ze zmiňovaných typů rubbingu z pohledu doby trvání kontaktu rotor/stator je rubbing úplný. V případě úplného rubbingu dochází k nepřetržitému kontaktu mezi rotorovou a statorovou částí. Jak bylo již zmíněno, tento typ kontaktu je pokaždé předcházen částečným rubbingem. Jestliže v případě tohoto typu kontaktu dochází ke vzniku velké třecí síly působící na rotor, může dojít ke změně dopředné precese na zpětnou. Lze tedy dále rozlišovat úplný rubbing s dopřednou a zpětnou precesí. Právě úplný rubbing se zpětnou precesí je nejhorší

forma rubbingu, při kterém dochází k výraznému obrušování rotorových a statorových částí popř. může dojít k destrukci celého zařízení. Při tomto kontaktu vzniká samobuzené kmitání s nově vzniklou vlastní frekvencí, která je zcela dominantní. Další existence vzniklého úplného rubbingu se zpětnou precesí je prakticky nezávislá na buzení rotoru. Dodejme, že úplný rubbing se zpětnou precesí se podařilo opakovaně vyvolat na rotorovém standu, přičemž byla experimentálně ověřena zmiňovaná nezávislost na buzení hřídele.

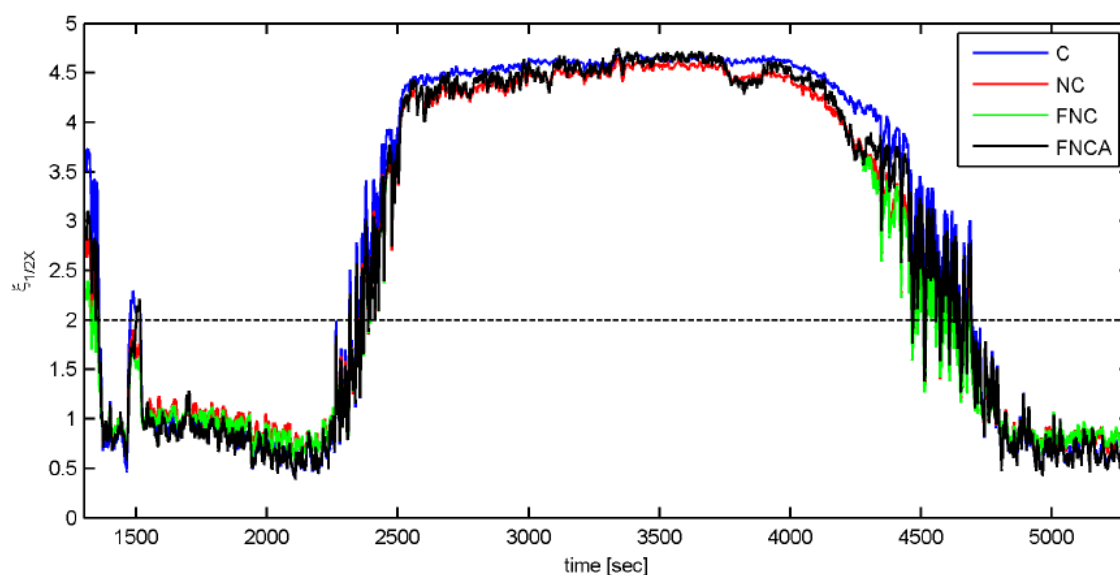
3 Současný stav problematiky a lineární lokalizace

3.1 Současný stav detekce a lokalizace rubbingu

Současný stav problematiky detekce a lokalizace rubbingu uvedený v této části práce vychází z publikace [3]. Jak autor uvádí, v současné době velkým požadavkem při provozu turbíny je možnost online monitorování jejího stavu. Doposud je to realizováno pomocí měření chování v určitých místech turbíny a následné zpracování a vyhodnocování naměřených signálů. Nejčastěji dochází k měření relativních vibrací rotoru, absolutních vibrací ložiskových pouzder rotoru či měření fázové značky nebo excentricity rotoru. Z naměřených signálů dochází v diagnostickém systému k výpočtu řady veličin (S_{max} veličiny, frekvenční spektra pomocí rychlé Fourierovy transformace, amplituda a fáze první harmonické...), které jsou dále vizualizovány na obrazovku pro online monitorování operátorem. Rubbing může být například detekován z celkových vibrací stroje či pozorováním amplitudy a fáze první harmonické frekvence (1X), což je frekvence otáčení rotoru. Výpočet amplitudy a fáze z relativních rotorových vibrací je realizován estimační metodou nejmenších čtverců. Například výrazná (skoková) změna může být indikátorem pro detekci rubbingu. Dalším velmi užitečným ukazatelem hovořícím o existenci částečného rubbingu je projev subharmonických frekvencí, které jsou dány celočíselným podílem první otáčkové frekvence. Při podezření vzniku kontaktu mezi rotorem a státorem je potřeba dále provést podrobnější (offline) analýzu vibračních dat. Pro tuto analýzu je ovšem nutné mít naměřené vibrační signály (s dostatečnou vzorkovací frekvencí) před vznikem, v průběhu a po skončení stavu podezřelého z rubbingu. Samozřejmě pro analýzu vibračních dat by bylo dobré mít data naměřena s co největší možnou vzorkovací frekvencí, ovšem proti tomu silně vystupují nároky na uchování takového množství dat. Vibrační data mohou být přímo ukládána diagnostickým zařízením nebo se dále používají speciální měřicí systémy. Společnosti a jejich produkty zabývající se touto problematikou jsou například měřicí systémy PULSE od firmy Brüel & Kjaer, systém OROS nebo systém ANDRE od firmy Bently Nevada. Cenově levnější alternativy mohou být použity jako jednotky pro zpracování signálů ve spojení s PC. Bylo by dobré zmínit, že doposud nebyl vyvinut žádný diagnostický systém do takové fáze, který by byl schopen provádět spolehlivou online detekci a lokalizaci rubbingu v provozu turbín.

V současné době není příliš českých ani zahraničních autorů, kteří by se implicitně zabývali problematikou detekce a především lokalizace rubbingu. Existuje pouze malá hrstka v praxi použitelných metod pro lokalizaci místa kontaktu rotor/stator, stejně tak naměřená data z provozních turbín, obsahující nějaký projev kontaktu, jsou velmi vzácná a cenná. Většina článků se problematikou rubbingu zabývá z důvodu demonstrování nějaké metody pro zpracování signálu, nepřináší tedy komplexní pohled na řešení problematiky online detekce a lokalizace rubbingu. Jednou z mála publikací zabývající se touto problematikou je právě [3]. Jedna z kapitol se zabývá návrhem metod pro automatickou detekci částečného rubbingu vycházejícího ze sledování výskytu subharmonických komponent v signálech relativních rotorových vibrací. Subharmonické složky souvisí s periodicky opakujícím se nárazem rotující hřídele do statorové části. Autor se zabývá sledováním vzniku subharmonických složek, tedy detekování rubbingu, na základě tzv. kumulativního úplného spektra. Ve své podstatě jde o průměrování dílčích částí úplného spektra rozděleného podle násobků první harmonické frekvence. Díky tomuto nástroji lze sledovat vznik subharmonických komponent z širokého frekvenčního pásma a rozhodnout tak o vzniku rubbingu. Dále jsou v této části diskutovány dva problémy spojené s „prostým“ kumulativním

spektrům a následně je navrženo jejich řešení. První problém vzniká při přítomnosti nízkofrekvenčního šumu, ve kterém subharmonické složky mohou být „utopeny“. Problém lze odstranit, buď pomocí tzv. mediánového filtru nebo využitím tzv. úplného kepstra. Výsledkem je pak tzv. normované kumulativní úplné spektrum. Druhý problém při použití samotného kumulativního úplného spektra je následující. Některé frekvenční komponenty signálu, které nesouvisejí s rubbingem, mohou po kumulaci vytvářet nesprávný dojem existence subharmonických složek. Tento problém byl opět odstraněn pomocí kepstrální analýzy. Výsledkem je tzv. filtrované kumulativní spektrum, které může být také navíc normováno. Tyto popsané nástroje byly v práci [3] ukázány jako vhodné nástroje pro offline analýzu částečného rubbingu. Autor navíc v této kapitole přináší metodu pro automatickou detekci částečného rubbingu v podobě tzv. charakteristických veličin. Charakteristické veličiny se získávají jako podíl amplitudy kumulativního úplného spektra zvolené subharmonické frekvence a střední hodnoty amplitud v jejím okolí. Jedná se vlastně o zautomatizovaný přístup, který provádí operátor při pozorování subharmonických komponent v kumulativním úplném spektrogramu. Pro online algoritmus jsou charakteristické veličiny nahrazeny odhadem jejich středních hodnot realizované například rekurzivní metodou nejmenších čtverců s exponenciálním zapomináním. Kumulované úplné spektrum, ze kterého jsou získávány charakteristické veličiny, může být také normované či filtrované. V případě překročení stanoveného thresholdu charakteristickou veličinou, je detekován částečný kontakt s frekvencí, pro jakou byla charakteristická veličina získána ($1/2X$, $1/3X$...). Na obr. 3-1 je zobrazen průběh charakteristické veličiny $1/2X$ (získán z kumulativního úplného spektra) spolu s jejími modifikacemi (z normovaného kumulativního úplného spektra, z filtrovaného a normovaného kumulativního úplného spektra...). Přibližně v časovém intervalu 2400 – 4500 vteřin je viditelné překročení stanoveného thresholdu, tedy detekování částečného rubbingu.



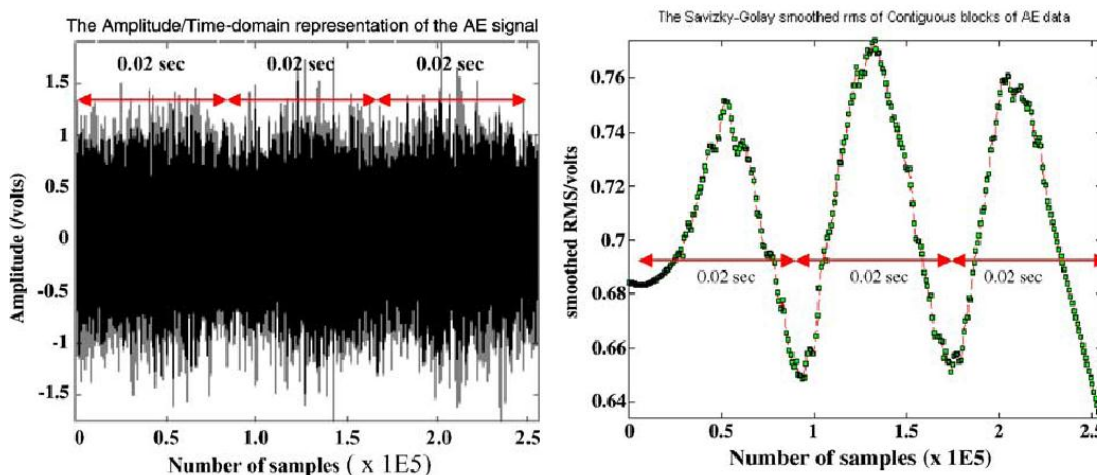
obr. 3-1: Charakteristická veličiny $1/2X$ a její modifikace (převzato z [3])

Další z článků zabývající se problematikou detekce rubbingu je článek [5]. Autoři se zabývali detekováním částečného rubbingu na simulovaných a experimentálních datech, které byly získány z experimentálního stendu. Kontakt byl realizován pomocí disku připevněného k rotující hřídeli a kovového šroubu, který byl připevněn k rámu představující stator. Autoři pro detekci kontaktu požívali časo-frekvenční zobrazení v podobě Waveletové transformace, jejímž výsledkem byl tzv. přepočtený škálogram, se kterým původně přišli P. Flandrin a F. Auger. V porovnání s klasickým škálogramem, přepočtený škálogram obsahuje méně šumu a představuje lepší časo-frekvenční zobrazení respektive užitečná informace (např. projev

kontaktu) je více koncentrovaná než u klasického škálogramu. Výsledkem bylo, že se v přepočteném škálogramu neobjevovaly jen subharmonické frekvence, ale také komponenty buzené kontaktem rotujícího disku a šroubu.

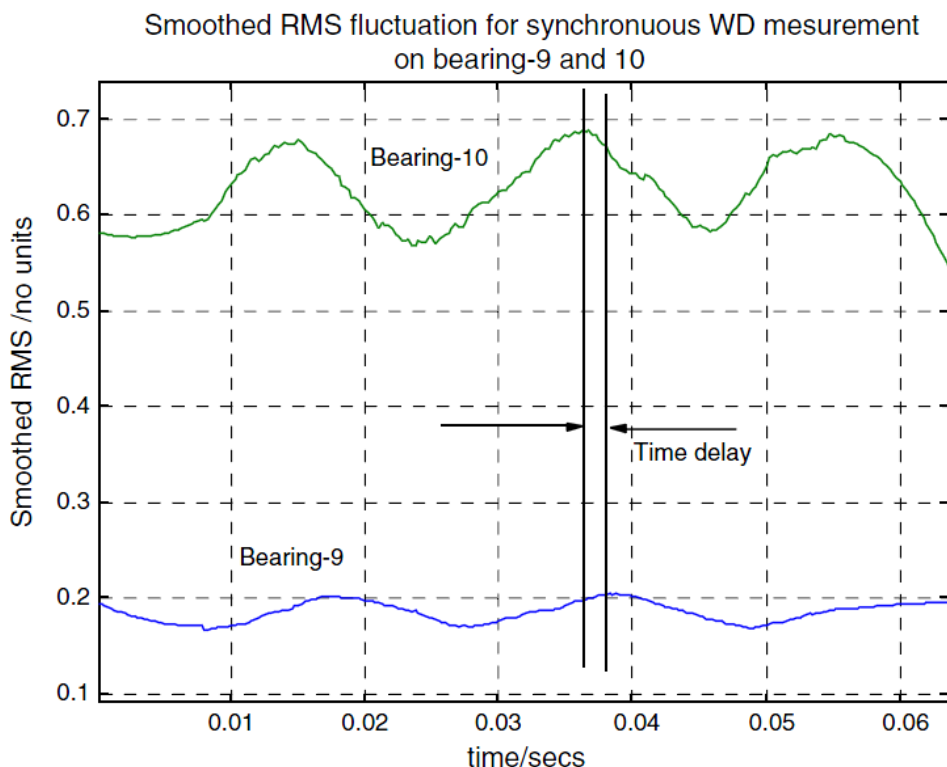
Jeden z mála článků, zabývajících se přímo lokalizací rubbingu a to nejen na experimentální stěně, ale také na strojích používaných v provozu, je článek [1]. Autoři tohoto článku se zabývali lokalizací úplného rubbingu, kdy ke kontaktu docházelo po celou dobu otáčky. Využívali k tomu měření akustické emise na skříních ložisek rotoru. Autoři vyšli ze závěru [2], který označil jako vhodný indikátor pro detekci rubbingu amplitudovou modulací naměřené akustické emise. V první fázi nejprve provedli laboratorní experiment na stěně pomocí repliky části ucpávky používané v turbínách. Na rotující hřídel o maximální rychlosti 2500 ot./min bylo možné repliku ucpávky přitlačit silou v rozmezí 46 až 141 N. Z naměřené akustické emise ve frekvenčním pásmu 100 kHz - 1,2 MHz dospěli k výsledkům, že celokruhový rubbing se skutečně projevuje amplitudovou modulací naměřených signálů.

Ve druhé fázi autoři článku prováděli řadu měření na provozních turbínách. Naměřená data z každého snímače umístěného na skříní ložiska byla nejprve filtrována horní propustí s prahovou hodnotou 100 kHz. Dále pak byla získána obálka signálu (např. pomocí Hilbertovy transformace), na kterou byl použit Savitzky-Golay vyhlazovací filtr pro získání průběhu vyhlazené RMS hodnoty. Při jednom měření a následném zpracování dat na 500 MW turbíně byl na dvou ložiskách ohraničující nízkotlaký díl detekován téměř harmonický průběh vyhlazené RMS hodnoty – tedy vznik úplného rubbingu. Na obr. 3-2 vlevo je zobrazen naměřený signál ze snímače umístěného na ložisku, vpravo pak získaný průběh vyhlazené RMS hodnoty s téměř harmonickým charakterem.



obr. 3-2: Signál akustické emise a průběh vyhlazené RMS hodnoty (převzato z [1])

Dále pak z průběhů vyhlazených RMS hodnot získaných měření na dvou sousedních ložiskách, ve kterých se projevil téměř harmonický charakter, je patrný časový posuv (viz obr. 3-3). Z těchto průběhů byla následně určena střední doba časového posuvu. Dále pak autoři pro odhad místa kontaktu použili lineární lokalizaci (bude vysvětleno dále) s uvažovanou rychlostí šíření vlnění 3000 m/s, přičemž je konstatováno, že právě rychlost představuje největší neznámou závislou na řadě faktorů. Na závěr by bylo dobré zmínit, že odhadovaná vzdálenost místa vzniku úplného rubbingu byla po pozdější kontrole plánované odstávky potvrzena.

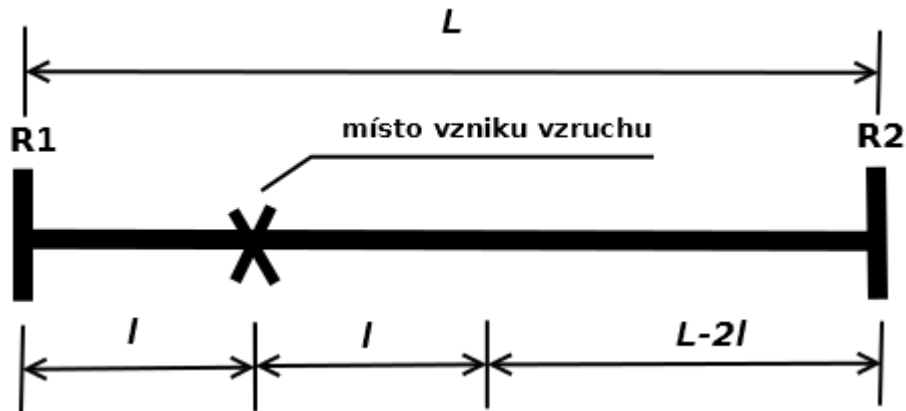


obr. 3-3: Časový posuv dvou vyhlazených RMS hodnot (převzato z [1])

V této práci se vychází z podobného přístupu jako v článku [1]. Tedy také jsou na určitých místech turbíny či rotorového stendu v tzv. rovinách umístěny snímače měřící chování v daném místě a dále se opět vychází pro výpočet místa kontaktu z principu lineární lokalizace. Nicméně měření jednotlivými snímači je realizováno s podstatně menší vzorkovací frekvencí, než tomu je u akustické emise. Ovšem lze lokalizovat místo kontaktu v signálech (např. i s menší vzorkovací frekvencí), ve kterých se daný kontakt projeví, nicméně odlišná bude rychlost šíření daného projevu. Při experimentech na rotorovém stendu bylo také zjištěno, že stanovení rychlosti šíření je bez pochyby silně závislé na metodě, kterou byl daný signál zpracován pro její získání. To je v souladu s následujícím tvrzením, které je uvedené v [3]. Každou metodu pro zpracování signálu lze uvažovat jako filtr s nějakou dynamikou. Potom konvolucí zpracovávaného (vstupního) signálu a impulzní odezvy filtru dochází k vyhlazování zpracovávaného signálu a ovlivňování tak výsledné rychlosti (snížení rychlosti).

3.2 Lineární lokalizace

Tato část vychází z obdobné kapitoly uvedené v [3] a [8]. Jak bylo již zmíněno, lokalizace místa vzniku vzruchu způsobeného kontaktem rotor/stator je v této práci založena právě na principu lineární lokalizace. Hlavním předpokladem je konstantní rychlost šíření vzruchu po přímce na obě strany od místa vzniku. Dále předpokládáme, že zdroj vzruchu (kontakt rotoru a statoru) leží mezi dvěma místy, ve kterých je měřeno (tzv. roviny). Potom lze spolu se znalostí rychlosti šíření vzruchu v daném materiálu, vzdálenosti měřících míst a jednotlivých časů dospění vzruchu k jednotlivým měřícím místům určit vzdálenost místa vzniku vzruchu vzhledem k nějaké měřící rovině. Samozřejmě stanovení dospění vzruchu k měřícímu místu je subjektivní nebo je závislé na použité metodě (při automatizaci). Pro odvození vztahu pro výpočet místa vzniku vzruchu vzhledem k rovině R_1 vyjděme z následujícího obrázku, viz obr. 3-4.



obr. 3-4: Lineární lokalizace při měření ve dvou rovinách

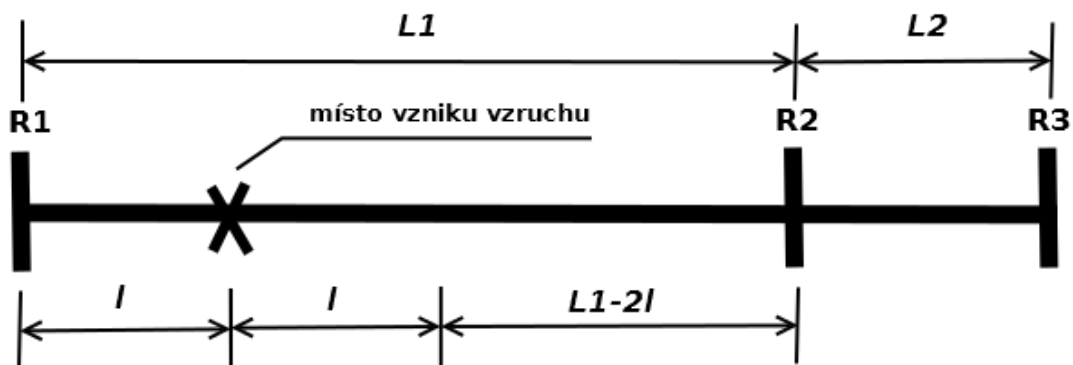
Vzdálenost L představuje vzdálenost mezi rovinou R_1 a R_2 , dále pak l je vzdálenost místa vzniku vzruchu od roviny R_1 . Čas t_1 resp. t_2 je čas příchodu vzruchu ke snímači v rovině R_1 resp. R_2 , přičemž podle obr. 3-4 platí: $t_1 < t_2$. Potom tedy z obr. 3-4 a známého vztahu, kdy je dráha rovna součinu rychlosti a času, lze napsat následující rovnici:

$$L - 2l = v \cdot \Delta t \quad (3.1)$$

kde $\Delta t = t_2 - t_1$. Úpravou rovnice (3.1) je získán výsledný vztah pro výpočet místa vzniku vzruchu vzhledem k rovině R_1 :

$$l = \frac{L - v \cdot \Delta t}{2} = \frac{L - v \cdot (t_2 - t_1)}{2} \quad (3.2)$$

Velmi výhodná situace nastává v případě, že je měřeno ve více rovinách než v předchozím případě, přičemž samozřejmě je uvažován předpoklad detekování časového počátku dospění vzruchu u všech snímačů. Pak lze v této situaci určit vztah pro výpočet místa vzniku vzruchu (vzhledem ke zvolenému měřicímu místu) s vyloučením rychlosti v . Opět je předpokládáno konstantní šíření vzruchu. Odvození vztahu je analogické s odvozením v [4]. Situace pro případ měření ve třech rovinách (R_1, R_2 a R_3) je zobrazena na obr. 3-5.



obr. 3-5: Lineární lokalizace při měření ve třech rovinách

Časy dospění vlnění k jednotlivým snímačům v rovinách R_1, R_2, R_3 jsou t_1, t_2, t_3 , přičemž podle uvažované situace na obr. 3-5 platí: $t_1 < t_2 < t_3$. Potom tedy pro vypočítanou vzdálenost místa vzniku vzruchu l vzhledem k rovině R_1 musí platit: $l \in (0, \frac{L_1}{2})$. Vzdálenost L_1

resp. L_2 je vzdálenost mezi rovinou R_1 a R_2 resp. R_2 a R_3 . Stanovením rychlosti mezi druhou a třetí rovinou následujícím způsobem:

$$v = \frac{L_2}{t_3 - t_2} \quad (3.3)$$

a dosazením (3.3) do rovnice (3.2) dostaneme výsledný vztah pro výpočet místa vzniku vzruchu vzhledem k rovině R_1 s vyloučením rychlosti v :

$$l = \frac{1}{2} \left(L_1 - L_2 \left(\frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_2} \right) \right) \quad (3.4)$$

Analogickým způsobem lze odvodit další vztahy pro jiné uvažované polohy místa vzniku vzruchu (bude ukázáno později).

Na závěr této části by bylo dobré zmínit následující skutečnost uvedenou v [3]. Při lokalizaci v této práci je předpokládáno lineárního šíření vzruchů. Ve skutečnosti se ovšem vzruchy mohou šířit nelineárně a skutečná přenosová cesta může být mnohem složitější a neznámá nebo přenosových cest může být více a tím může zavádět do měřených signálů další nežádoucí složky ovlivňující celkový výsledek. Přesto lze použít princip lineární lokalizace ovšem spolu se statistickým přístupem, kdy je potřeba zpracovat dostatečné množství zkoumaných událostí. Výsledek potom tedy je jakousi aproximací exaktního výsledku.

4 Metody pro zpracování signálů

Prvním krokem při analýze dat popř. návrhu metody pro detekci či lokalizaci rubbingu je stanovení, jakým způsobem bude získaný navzorkovaný signál zpracován. V této kapitole jsou popsány některé metody, které byly při řešení této problematiky použity. Popis metod je rozdělen do základních oblastí a to na oblast časovou, frekvenční a časo-frekvenční. V časové oblasti je věnována pozornost návrhu metod pro zpracování signálu obsahujícího amplitudově výrazné rázy. Cílem metod v této části je vhodně charakterizovat počátek rázu. V podkapitole zabývající se frekvenčním zpracováním signálu je věnováno metodě pro získání informace o frekvenčním zastoupení složek v naměřeném signále pomocí známe Fourierovy transformace. Vlivem rubbingu dochází ke změně frekvenčního zastoupení jednotlivých složek signálu, což má význam především pro detekci. Navíc je v této podkapitole ukázáno, jak lze vhodně filtrovat naměřený signál, čehož je využíváno i při samotné lokalizaci. V případě, že signál obsahuje rázy pocházející od kontaktu rotoru a statoru, které nejsou amplitudově výrazné či jsou silně ovlivněny šumem, je vhodné signál zpracovat některou z časo-frekvenčních metod. V této podkapitole je popsána metoda krátkodobé Fourierovy transformace a její speciální případ v podobě Gaborovy transformace. Dále je pak tato část věnována metodě pro získání veličiny charakterizující počátek události, podobně jako v případě amplitudově výrazných rázů a jejich zpracování v oblasti časové. Na závěr této kapitoly je ukázána metoda pro automatickou detekci počátku rázu získaného z časového signálu či jiné veličiny. Detekce počátku rázu je základním kamenem návrhu metod pro lokalizaci rubbingu.

4.1 Zpracování signálů v časové oblasti

V případě amplitudově výrazných rázů lze provést lokalizaci přímo z časově-amplitudové reprezentace signálu. V této části jsou tedy popsány některé veličiny získané z časových signálů, které vhodným způsobem charakterizují události související s rubbingem (především výrazná změna amplitudy signálu). Úkolem metod pro získání těchto veličin je především zvýraznění amplitud částí signálu související s kontaktem a zároveň potlačení zbylých částí.

4.1.1 Rekurzivní výpočet k -tého centrálního momentu

Tato metoda vychází z popisu uvedeného v [3]. Jestliže naměřený signál obsahuje rázy pocházející od kontaktu a úkolem je navrhnout metodu pro lokalizaci částečného rubbingu vycházející z časové oblasti, pak dalším krokem je zpracování časového signálu tak, aby změna signálu související s kontaktem byla co nejvýraznější a zároveň části signálu bez kontaktu byly co nejvíce potlačeny. Například při kontaktu rotující hřídele s ucpávkou na rotorovém stendu (viz dále) dochází v naměřených signálech z absolutních snímačů k namodulování šumu (souvisejícího s rotací hřídele) na první harmonickou frekvenci (frekvence otáčení hřídele) a zároveň v určitých okamžicích dochází k výraznému vybuzení signálu, které souvisí s kontaktem hřídel/ucpávka. Pro lokalizaci by tedy bylo vhodné namodulovaný šum potlačit a zároveň výraznou změnu signálu pocházející od kontaktu zachovat. Jednou možností jak toho docílit je odhad průběhu k -tého centrálního momentu z průběhu časového signálu. Z důvodu použitelnosti při online lokalizaci a z důvodu nestacionarity signálu je potřeba použít pro odhad k -tého centrálního momentu některý z rekurzivních algoritmů. V této práci byla použita rekurzivní metoda nejmenších čtverců s exponenciálním zapomínáním. Potom tedy lze rekurzi pro výpočet odhadu k -tého centrálního momentu zapsat následujícím způsobem:

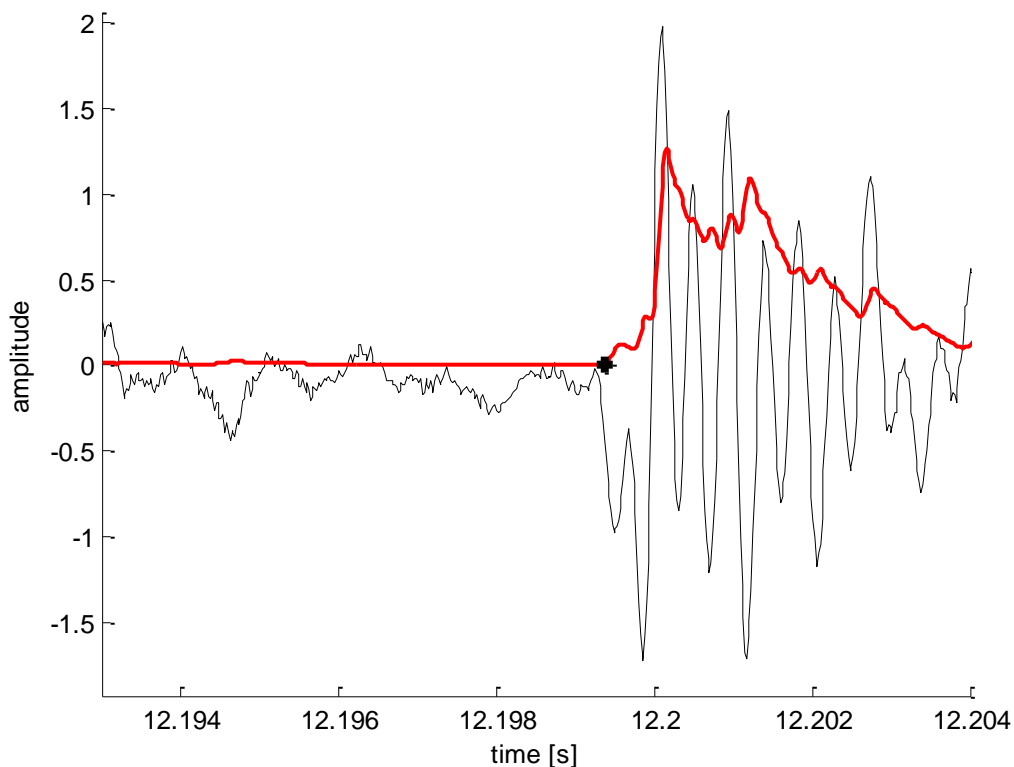
$$\mu_k(i) = \lambda\mu_k(i-1) + (1-\lambda)[x(i) - \bar{x}(i)]^k \quad (4.1)$$

$$\bar{x}(i) = \lambda\bar{x}(i-1) + (1-\lambda)x(i) \quad (4.2)$$

kde $\mu_k(i)$ je odhad k -tého centrálního momentu pro i -tý vzorkovaný okamžik, $\bar{x}(i)$ je odhad střední hodnoty pro i -tý vzorek, $x(i)$ je naměřený signál pro i -tý vzorek, λ je koeficient zapomínání. Při použití metody dochází k filtraci původního signálu. Jak bude signál filtrován, záleží na volbě koeficientu zapomínání λ , přičemž vztah mezi časovou konstantou filtru τ a koeficientem zapomínání λ je následující.

$$\lambda = 1 - \frac{T_s}{\tau} \quad (4.3)$$

kde T_s je vzorkovací perioda. Čím větší bude časová konstanta τ , tím více bude výsledný průběh k -tého centrálního momentu vyhlazený. Potom krátké a rychlé změny v původním signále budou více potlačeny, ovšem nárůst veličiny z důvodu rázu bude pomalejší – tedy počátek rázu bude detekován s větším časovým zpožděním. Nejčastěji bude v této práci počítán rekurzivní odhad druhého a čtvrtého centrálního momentu, tj. rozptyl a špičatost signálu.



obr. 4-1: Průběh odhadované variance $\mu_2(t)$ a časový signálu $x(t)$

Na obr. 4-1 je zobrazen časový průběh signálu obsahující ráz (černě) a průběh rekurzivního odhadu variance (červeně). Jak je patrné z obr. 4-1 výraznější změna (nárůst) odhadu variance nastává ve velmi podobném okamžiku, jako vznikl ráz (přibližně mezi časovým okamžikem 12,198 - 12,2 sec). Černým bodem je pak zobrazen počátek nárůstu

odhadu variance, který byl získán pomocí metody popsané v části 4.4.1. Z obr. 4-1 je tedy zřejmé, že rekurzivní odhad variance (popř. jiných centrálních momentů) pomocí vztahů (4.1) a (4.2) lze považovat za vhodnou metodu pro zpracování časového signálu, pokud jsou rázy dostatečně vybuzeny.

4.1.2 Výpočet okamžité amplitudy signálu

Jednou z dalších veličin, která vhodně charakterizuje časový signál s rázy, které jsou opět dostatečně vybuzeny, je metoda založená na výpočtu okamžité amplitudy signálu. Okamžitá amplituda je označována jako obálka signálu. Tato část vychází z publikace [13] a především pak z [8], ve které je pomocí komplexního signálu získávána okamžitá amplituda a fáze v každém časovém okamžiku. Dále pak okamžitá fáze je využívána pro získání okamžité frekvence signálu, ovšem podmínkou je monokomponentnost signálu, tedy signál musí obsahovat jen jednu frekvenční složku, přičemž reálné signály jsou často tvořeny celým spektrem frekvencí. V této práci je využíváno jen získané okamžité amplitudy signálu, pro kterou není potřeba, aby reálný signál byl monokomponentní. Přestože naměřené signály mají reálný charakter, je potřeba pro získání okamžité amplitudy signálu definovat signál komplexní, označovaný také jako analytický, který lze matematicky zapsat následujícím způsobem:

$$z(t) = x_r(t) + jx_i(t) \quad (4.4)$$

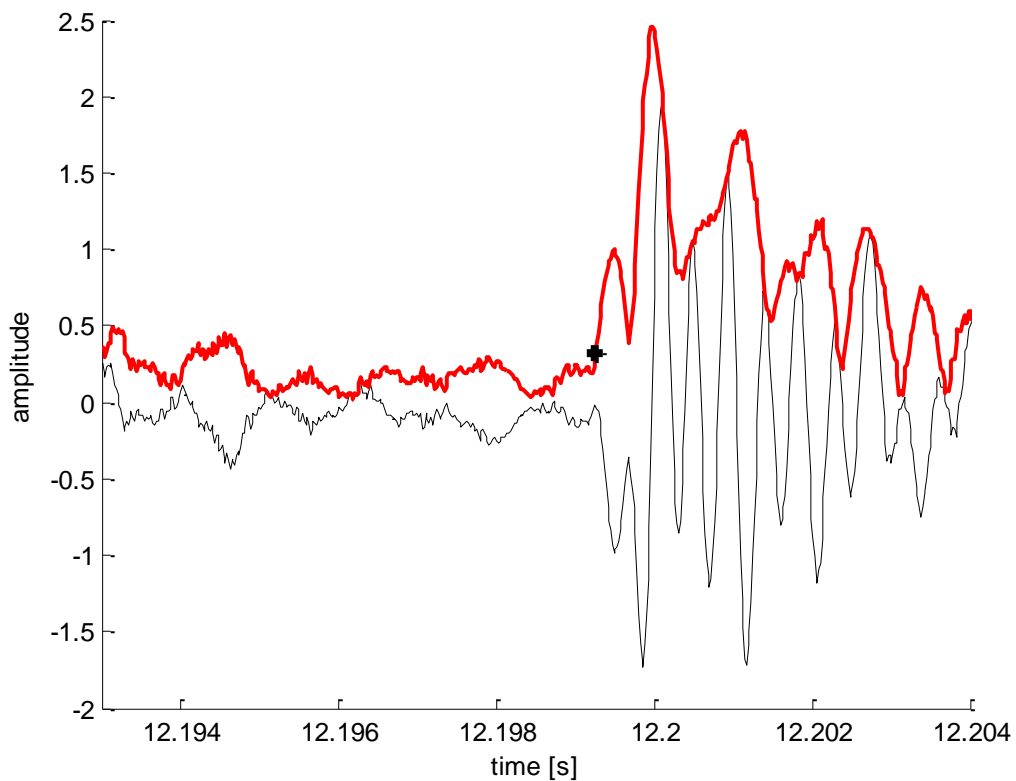
kde reálná složka $x_r(t)$ analytického signálu $z(t)$ je tvořena naměřeným („reálným“) signálem $x(t)$. V případě znalosti imaginární složky $x_i(t)$ analytického signálu $z(t)$ by mohla být vypočítána okamžitá amplituda (obálka) $a(t)$ pomocí následujícího vztahu:

$$a(t) = |z(t)| = \sqrt{x_r^2(t) + x_i^2(t)} \quad (4.5)$$

Jednou z možností jak určit imaginární složku $x_i(t)$ analytického signálu $z(t)$ je pomocí Hilbertovy transformace, která je definována:

$$H[x_r(t)] = H[x(t)] = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{(t - \tau)} d\tau \quad (4.6)$$

kde $x(t)$ libovolný časový signál a P je tzv. Cauchyho hlavní hodnota. Na obr. 4-2 je zobrazen průběh časového signálu $x(t)$ (černě) a průběh okamžité amplitudy (červeně) získaný výše popsaný způsobem. Z obr. 4-2 je opět patrné, že v blízkém okamžiku vzniku rázu dochází zároveň k nárůstu získané veličiny v podobě okamžité amplitudy. Černým křížkem je pak vyznačen bod počátku nárůstu obálky, který byl získán stejným způsobem jako v předchozím případě rekurzivního odhadu variance (viz 4.4.1), který lze považovat za počátek rázu. Vzhledem k tomu, že nemáme informaci o přesném počátku rázu, nelze tedy přesnosti jednotlivých metod mezi sebou porovnávat v absolutním měřítku.

obr. 4-2: Průběh obálky signálu a signál $x(t)$

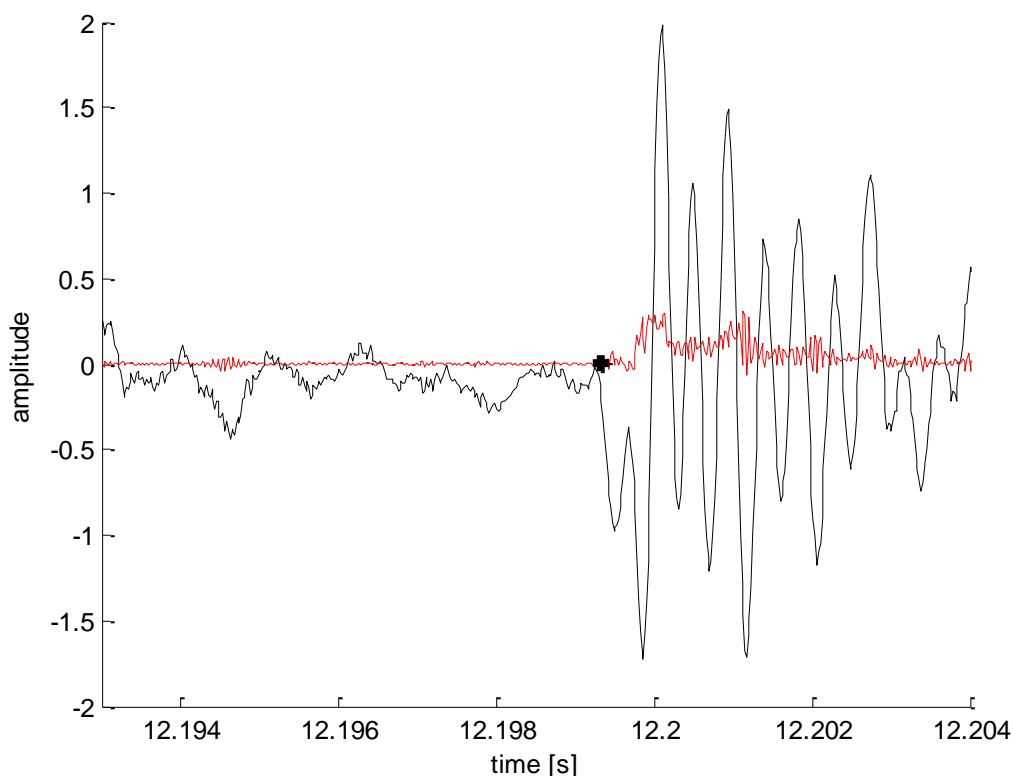
4.1.3 Teagerova energie signálu

Další veličinou, kterou lze získat z časového signálu a byla pro lokalizaci rubbingu využívána podobně jako veličiny popsané v 4.1.1 a 4.1.2, je tzv. Teagerova energie. Použití Teagerovy energie v této práci vychází z článku [10]. Autoři článku navázali na předchozí práci H. M. Teagera, ve kterých byly mimo jiné analyzovány řečové signály z hlediska energie potřebné k jejich generování. Autoři článku [10] využili tzv. nelineární energetický operátor pro odhad okamžité amplitudy a frekvence u amplitudově a frekvenčně modulovaných signálů. Pomocí energetického operátoru, označovaném jako Teagerův popř. Teager-Kaiserův, lze získat průběh okamžité energie signálu. Tato veličina bude dále označována jako Teagerova energie. Teagerovu energii resp. Teagerův energetický operátor lze definovat pro spojitou i diskretní verzi následujícím způsobem:

$$\psi_s[x(t)] = \left(\frac{dx(t)}{dt}\right)^2 - x(t)\left(\frac{d^2x(t)}{dt^2}\right) \quad (4.7)$$

$$\psi_a[x(i)] = x^2(i) - x(i+1)x(i-1) \quad (4.8)$$

kde $x(t)$ resp. $x(i)$ je signál v čase t resp. ve vzorkovaném okamžiku i . V této práci byla vyzkoušena jak diskretní verze, tak také aproximace spojitě Teagerovy energie, přičemž výsledky v obou případech byly téměř totožné.



obr. 4-3: Průběh Teagerovy energie (diskrétní verze) a signál $x(t)$

Na obr. 4-3 je zobrazen časový signál $x(t)$ obsahující ráz (černě) a průběh diskretní verze Teagerovy energie (červeně) získaný pomocí vztahu (4.8). Z obr. 4-3 je zřejmé, že opět dochází k nárůstu Teagerovy energie v podobném (popř. stejném) časovém okamžiku, jako je počátek rázu. Před vznikem rázu téměř nedochází k žádnému výraznějšímu nárůstu Teagerovy energie a její hodnota je velmi blízká nule, což je velmi pozitivní pro detekci počátku nárůstu veličiny pomocí metody, jejíž princip je popsán v části 4.4.1. Počátek nárůstu Teagerovy energie získaný touto metodou je na obr. 4-3 zobrazen černým bodem.

4.2 Zpracování signálů ve frekvenční oblasti

Další oblastí, ve které je možné naměřený signál zpracovat, je oblast frekvenční. Vznik rubbingu může být doprovázen změnou frekvenčního zastoupení jednotlivých složek signálu, např. vznik subharmonických frekvencí, což má význam především pro detekci. Pro získání spektra, zobrazující frekvenční zastoupení složek v naměřeném signále, byla v této práci použita známá Fourierova transformace. Fourierova transformace provádí rozklad naměřeného signálu na amplitudy a fáze složek signálu na jednotlivých frekvencích prostřednictvím báze harmonických funkcí. Další úlohou prováděnou ve frekvenční oblasti byla úloha filtrace signálu, tj. oddělení určitého frekvenčního pásma od ostatních frekvencí. K filtraci byl v této práci používán tzv. sinc filtr.

4.2.1 Fourierova transformace

Základní metodou pro frekvenční analýzu signálů je Fourierova transformace. Tato část vychází z publikací [3], [4], [13], [14]. Časový signál, který je periodický, lze pomocí Fourierovy řady převést do oblasti frekvenční. Limitním vyjádřením nekonečné periody lze

z Fourierovy řady odvodit Fourierovu transformaci. Fourierovu transformaci lze matematiky vyjádřit následujícím způsobem:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (4.9)$$

kde $F(\omega)$ je Fourierův obraz časové funkce $x(t)$. Postačující podmínka existence Fourierovy transformace $F(\omega)$ je podmínka na absolutní integrovatelnost $x(t)$, tedy musí platit následující:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)| dt < \infty \quad (4.10)$$

Pro opačné vyjádření funkce, tj. z oblasti frekvenční do oblasti časové, je definována inverzní Fourierova transformace:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (4.11)$$

Z definice Fourierovy transformace plyne (viz rovnice (4.9)), že dochází k porovnávání časové funkce $x(t)$ s bází tvořenou harmonickými funkcemi. Výsledkem této transformace je tzv. spektrum, které popisuje frekvenční zastoupení jednotlivých komponent v původním signále. Výsledné spektrum zahrnuje jak kladné, tak i záporné frekvence. Ze vztahu (4.9) je dále zřejmé, že Fourierův obraz $F(\omega)$ je funkce komplexní proměnné, platí tedy:

$$F(\omega) = |F(\omega)|e^{j \arg F(\omega)} \quad (4.12)$$

O spektru tedy hovoříme buď jako amplitudovém nebo fázovém. V této práci bylo využíváno především amplitudového spektra, které lze vyjádřit následujícím vztahem:

$$F^A(\omega) = 2|F(\omega)| \quad (4.13)$$

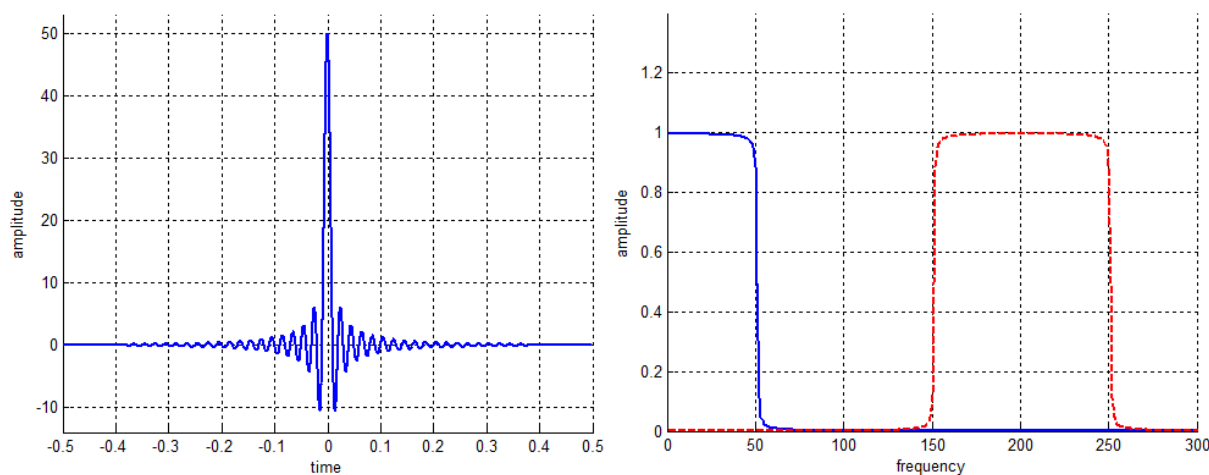
Dodejme, že amplituda původního signálu je rozdělena do obou polovin spektra stejně (kladné i záporné frekvence). Proto v případě uvažování spektra pouze s kladnými frekvencemi je potřeba pro zachování amplitudy původního signálu násobit faktorem 2. Příklad amplitudového spektra je dokumentován na obr. 4-5. Poznamenejme, že v této práci byla využívána disktrétní (DFT) respektive rychlá (FFT) Fourierova transformace.

4.2.2 Sinc filtr

Jednou ze základních úloh zpracování signálů je oddělení užitečného frekvenčního pásma od ostatních frekvencí popř. odfiltrování některých nežádoucích frekvenčních složek signálu. V této práci byl k těmto dílčím úlohám používán speciální typ filtru, tzv. sinc filtr, uvedený například v [9]. K filtraci dochází pomocí konvoluce vstupního signálu a tzv. sinc funkce. Sinc funkce může být definována následujícím způsobem:

$$h(t) = \frac{\sin(2\pi f_c t)}{2\pi t} \quad (4.14)$$

kde $t \in \langle -\tau, \tau \rangle$, f_c je polovina šířky pásma filtru od frekvence f_0 , kolem které má být filtrováno. Zároveň je potřeba, aby obraz Fourierovy transformace sinc funkce neměl v okolí frekvence změny propustnosti/nepropustnosti oscilující charakter. Toho lze například docílit vážením sinc funkce $h(t)$ pomocí okénkové funkce, tak aby výsledná sinc funkce byla v krajních bodech (tj. $-\tau, \tau$) nulová. Vhodné okénkové funkce jsou například typu Blackman či Bartlett. Na obr. 4-4 vlevo je příklad sinc funkce (převážené okénkovou funkcí), v pravé části modře je pak její Fourierův obraz. Konkrétně v tomto případě by konvolucí vstupního signálu a této sinc funkce došlo k filtraci signálu obsahující frekvenční složky od 0 – 50 Hz.

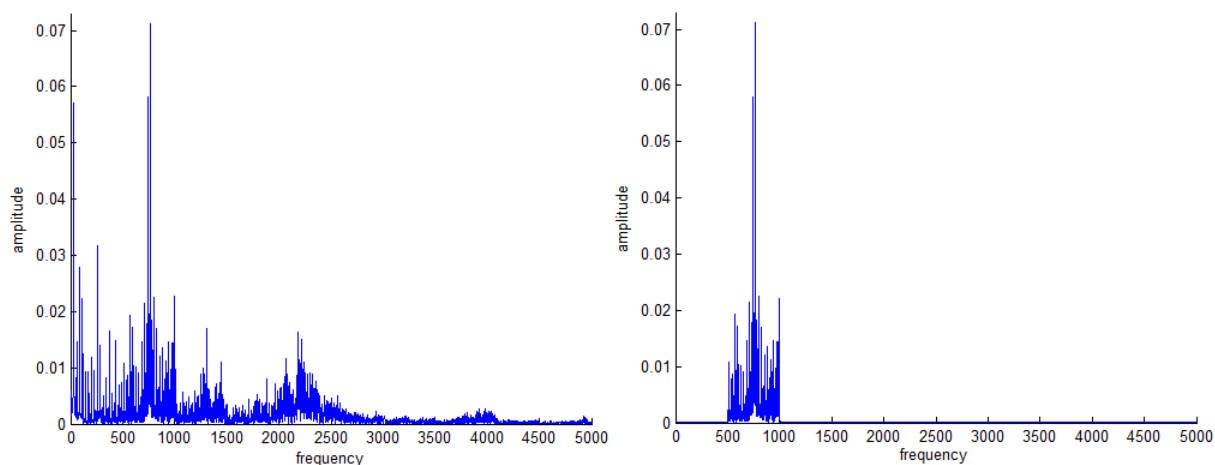


obr. 4-4: Sinc funkce a její Fourierův obraz

Aby mohlo být filtrováno kolem libovolně zvolené frekvence f_0 (s šířkou filtru $2f_c$), je potřeba střed Fourierova obrazu sinc funkce ve frekvenční oblasti posunout do příslušné frekvence f_0 , tak jak je naznačeno v pravé části obr. 4-4 červeně. Posun frekvenčního spektra (libovolně) časové funkce lze provést vynásobením funkce komplexní proměnné $\cos(j 2\pi f_0 t)$. Jak bylo již zmíněno, pro filtraci signálu je potřeba provést konvoluci vstupního signálu s příslušnou sinc funkcí. Elegantní výpočet lze provést pomocí známé skutečnosti, kdy konvoluce vstupního signálu a sinc funkce v časové oblasti je rovna součinu jejich Fourierových obrazů v oblasti frekvenční, tedy platí následující:

$$x_{filt}(t) = x(t) * \bar{h}(t) = \mathcal{F}^{-1}\{X(f) \cdot \bar{H}(f)\} \quad (4.15)$$

kde $x(t)$ resp. $X(f)$ je vstupní signál resp. jeho Fourierův obraz, $\bar{h}(t)$ resp. $\bar{H}(f)$ je sinc funkce vynásobená funkcí komplexní proměnné $\cos(j 2\pi f_0 t)$ resp. její Fourierův obraz, \mathcal{F}^{-1} je operátor zpětné Fourierovy transformace a $x_{filt}(t)$ je výsledný filtrovaný signál. Příklad filtrace signálu sinc filtrem je na následujícím obrázku. Na obr. 4-5 vlevo je zobrazeno frekvenční spektrum původního signálu od 0 – 5 kHz. Dále pak v pravé části obr. 4-5 je frekvenční spektrum filtrovaného signálu za použití sinc filtru. Frekvence f_0 , kolem které bylo filtrováno, byla zvolena 750 Hz, šířka poloviny filtru f_c 250 Hz.



obr. 4-5: Frekvenční spektrum původního a filtrovaného signálu za použití sinc filtru

4.3 Zpracování signálů v časo-frekvenční oblasti

Další oblastí, ve které je možné naměřený signál reprezentovat, je oblast časo-frekvenční. Jak bylo ukázáno v části 4.1, v případě, kdy změna amplitudy související s kontaktem je výrazná, lze pomocí výše popsaných nástrojů provádět lokalizaci místa kontaktu přímo z časově-amplitudové reprezentace. Tato situace je například v případě experimentů na rotorovém stendu (bude ukázáno dále). V situaci, kdy změna amplitudy není tak výrazná a navíc svojí rolí sehrává silný (provozní) šum, je pro lokalizaci místa kontaktu vhodná právě časo-frekvenční reprezentace. Například při lokalizaci místa rubbingu při provozu turbíny nejsou v časových signálech viditelné rázy (jako v případě rotor-stendu), ale projevy kontaktu jsou viditelné spíše jako navýšení amplitudy v úzkém frekvenčním pásmu pozorovaném právě pomocí časo-frekvenčního zobrazení (viz dále). Jednou z metod pro získání časo-frekvenčního zobrazení je tzv. metoda krátkodobé Fourierovy transformace, která aplikuje Fourierovu transformaci na krátké části měřeného signálu. Speciálním případem krátkodobé Fourierovy transformace je pak tzv. Gaborova transformace. Metody jsou vhodné i pro nestacionární signály.

4.3.1 Krátkodobá Fourierova transformace

Krátkodobá Fourierova transformace je popsána například v publikacích [4], [8], [15], [16]. Při vzniku rubbingu dochází ke změnám frekvenčního spektra měřeného signálu, tj. k vybuzení některých frekvenčních složek. Pro lokalizaci kontaktu je ovšem potřeba znát přesný časový okamžik, kdy k rubbingu (tedy i ke změnám frekvenčních složek signálu) dochází. Tímto se dostáváme od zpracování signálů v oblasti pouze frekvenční do oblasti časo-frekvenční. Navíc v měřených signálech často tedy dochází ke změnám parametrů jednotlivých komponent (vznik rubbingu). Vibrační signály nemusí být tudíž stacionární, což je základní předpoklad pro užití Fourierovy transformace. Jednou z nejpoužívanějších metod v časo-frekvenční rovině je právě krátkodobá Fourierova transformace, označovaná jako STFT – Short Time Fourier Transform. Metoda krátkodobé Fourierovy transformace aplikuje klasickou Fourierovu transformaci na dostatečně krátké úseky signálu, ve kterých je předpokládána stacionarita. To je realizováno vážením původního signálu prostřednictvím okénkové funkce $w(t)$. Okénkových funkcí je celá řada. Často je však používáno například okno typu Hanning. Krátkodobou Fourierovu transformaci lze matematicky zapsat následujícím způsobem:

$$F(\omega, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)w(\tau - t)e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (4.16)$$

Předchozí vztah (4.16) je podobný vztahu (4.9). Rozdíl je v okénkové funkci $w(t)$, pomocí níž je výše popsaným způsobem vážen původní signál. Je tedy zřejmé, že pro určitý úsek signálu v blízkém okolí časového okamžiku t je získáno spektrum, tedy frekvenční zastoupení jednotlivých složek. Výsledkem celkového zobrazení jednotlivých spekter pro všechny časové okamžiky t je tzv. spektrogram. Ve spektrogramu je tedy zachycen časový vývoj jednotlivých frekvenčních složek měřeného signálu. Dále poznamenejme, že délka okénkové funkce (délka okna) má zásadní vliv na rozlišení v časové a frekvenční oblasti výsledného spektrogramu. V případě kratší okénkové funkce má spektrogram vyšší rozlišení v časové oblasti, ovšem nižší rozlišení v oblasti frekvenční. Naopak při volbě větší délky okna bude mít spektrogram vysoké rozlišení ve frekvenční oblasti, nízké pak v časové oblasti. Obecně je volena taková délka okénkové funkce, která představuje jistý kompromis mezi rozlišením v čase a ve frekvenci. Nicméně často je zapotřebí získat výrazněji vyšší rozlišení v jedné z uvedených oblastí oproti druhému. Například pro sledování vývoje otáčkové frekvence nebo pro pozorování přítomnosti subharmonických frekvencí či k určení frekvencí, na kterých se rubbing projevuje, je nezbytnost mít vysoké rozlišení ve frekvenci. Naopak pro určení počátku projevu rubbingu ve spektrogramu je potřeba mít dobré rozlišení v čase. Vychází tedy otázka, zda je vůbec možné dosáhnout libovolně vysokého rozlišení v časové a frekvenční oblasti zároveň. Odpověď na tuto otázku představuje Heisenberg-Gaborův princip neurčitosti, [8], [17]. Pokud je signál dobře lokalizovatelný v časové rovině, pak je rozložen blízko své střední hodnoty v čase. Potom je tedy malá směrodatná odchylka veličiny času σ_t . Totéž platí analogicky i pro frekvenční oblast, kdy dobrá lokalizovatelnost v této oblasti představuje rozložení blízko střední hodnoty frekvence. Směrodatná odchylka veličiny frekvence σ_f je tedy malá. Pro dobrou určitelnost resp. dobré rozlišení v čase a frekvenci zároveň musí opět platit, že součin $\sigma_t\sigma_f$ je malý. Heisenberg-Gaborův princip neurčitosti stanovuje pro součin následující nerovnost:

$$\sigma_t\sigma_f \geq \frac{1}{2} \quad (4.17)$$

Je zřejmé, že pokud bude vysoké rozlišení v jedné z uvedených oblastí, musí být o to horší rozlišení ve druhé oblasti, aby stále platila nerovnost (4.17). Závěrem tedy je, že nelze docílit libovolně vysokého rozlišení jak v čase, tak i frekvenci zároveň.

4.3.2 Gaborova transformace

V této práci byla pro získání časo-frekvenční reprezentace signálu v podobě amplitudového spektrogramu používána především aproximace spojitě Gaborovy transformace, vycházející z popisu uvedeného v [3]. Rozlišení v časové a frekvenční oblasti je závislé na použité délce a typu okénkové funkce, ve které předpokládáme stacionaritu signálu. Jak bylo již zmíněno, podle Heisenberg-Gaborova principu neurčitosti nelze dosáhnout libovolně přesného rozlišení v časové i frekvenční oblasti zároveň. Nejlepší kompromis lze ovšem získat při použití právě Gaborovy transformace, kdy z nerovnosti (4.17) se stává rovnost, tedy $\sigma_t\sigma_f = \frac{1}{2}$. Gaborova transformace používá při vážení signálu Gaussovu funkci a lze ji analogicky zapsat jako v případě (spojitě) krátkodobé Fourierovy transformace (viz (4.16)), kde okénková funkce $w(t)$ je zmiňovaná Gaussova funkce. Proto je také Gaborova transformace považována za speciální případ krátkodobé Fourierovy transformace. Gaborovu transformaci $F_G(\omega, t)$ lze matematicky zapsat následujícím způsobem:

$$F_G(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) e^{-\frac{(\tau-t)^2}{\sigma^2}} e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (4.18)$$

kde $e^{-\frac{(\tau-t)^2}{\sigma^2}}$ je Gaussova funkce. Pomocí parametru σ lze ovlivňovat délku okénkové funkce, tedy rozlišení v časové resp. frekvenční oblasti. Při volbě vyššího σ bude rozlišení ve frekvenční oblasti vyšší a zároveň v časové oblasti nižší. V případě nižšího σ bude situace opačná. Vytknutím znaménka mínus v závorce první exponenciály rovnice (4.18) dostaneme:

$$F_G(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) e^{-\frac{(t-\tau)^2}{\sigma^2}} e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (4.19)$$

což lze dále zapsat pomocí konvoluce následujícím způsobem:

$$F_G(\omega, t) = w_G(t) * [x(t)e^{-j\omega t}] = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}[w_G(t)].\mathcal{F}[x(t)e^{-j\omega t}]\} \quad (4.20)$$

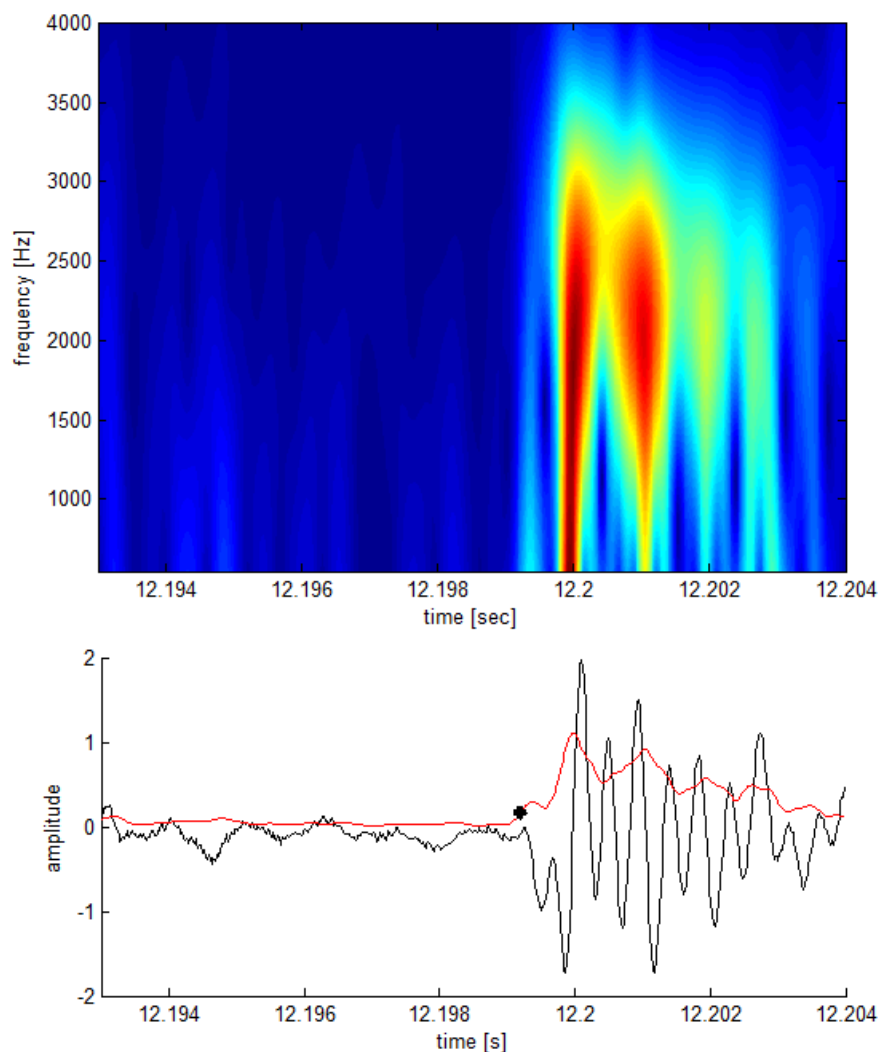
kde $w_G(t)$ je Gaussova funkce, \mathcal{F} resp. \mathcal{F}^{-1} je operátor Fourierovy resp. zpětné Fourierovy transformace. Jak bylo již zmíněno, v této práci byla používána především aproximace spojité Gaborovy transformace (popsané předchozím způsobem), která byla počítána právě pomocí konvoluce, viz (4.20).

4.3.3 Výpočet k -hodnoty z amplitudového spektrogramu

V části 4.1 byly popsány některé metody pro získání veličin, jejichž nárůst představuje počátek rázu. Použití těchto veličin je ovšem možné pouze na rázy s výraznou amplitudou. Jak bylo již zmíněno, amplitudově slabé projevy kontaktu, navíc často za přítomnosti výrazného šumu, je možné sledovat v amplitudovém spektrogramu, který dobře zachycuje nestacionární jevy a lze ho získat některou z časo-frekvenčních metod pro zpracování signálů (krátkodobá Fourierova transformace, Gaborova transformace). Jednou z možností, jak získat veličinu z časo-frekvenční reprezentace, která by zachycovala počátek události (podobně jako veličiny popsané v podkapitole 4.1), je výpočet tzv. k -hodnoty. V této práci je k -hodnota počítána jako součet amplitudy jednotlivých frekvenčních linií určitého frekvenčního pásma podělený počtem linií. Necht' je dán amplitudový spektrogram získaný například aproximací spojité Gaborovy transformace. Potom lze k -hodnotu pro i -tý vzorkovaný okamžik vypočítat podle následujícího vztahu:

$$k(i) = \frac{\sum_{j=f_1}^{f_2} X(i, j)}{(f_2 - f_1)} \quad (4.21)$$

kde i je i -tý vzorkovaný okamžik, $j = f_1, \dots, f_2$ jsou jednotlivé frekvenční linie amplitudového spektrogramu určující frekvenční pásmo, přes které je k -hodnota počítána, rozdíl $(f_2 - f_1)$ představuje počet frekvenčních linií a $X(i, j)$ je hodnota amplitudového spektrogramu v čase i na frekvenční linii j . Z rovnice (4.21) je tedy zřejmé, že k -hodnota v čase i představuje průměrnou amplitudu spektrogramu v určitém frekvenčním pásmu.



obr. 4-6: Signál $x(t)$, amplitudový spektrogram a průběh k -hodnoty

Na obr. 4-6 je zobrazen časový signál rázu (černě) a jeho amplitudový spektrogram získaný aproximací spojitě Gaborovy transformace pro frekvenční pásmo 0 – 4 kHz. Dále je na obr. 4-6 je zobrazen průběh k -hodnoty (červeně) vypočítaný výše popsáním způsobem. Jedná se o stejný úsek časového signálu, na kterém byly demonstrovány metody v části 4.1. Spektrogram byl spočítán pro vyšší rozlišení v čase (nižší tedy ve frekvenci). Z obr. 4-6 je patrné, že v okamžiku vzniku rázu opět dojde k nárůstu k -hodnoty. Počátek nárůstu veličiny byl opět detekován metodou 4.4.1, který je na obrázku vyznačen černým bodem.

4.4 Určení počátku vzruchu

Pro návrh metody pro automatickou lokalizaci místa částečného rubbingu je potřeba mít k dispozici vhodný nástroj, který by byl schopen detekovat časové okamžiky příchodu vzruchu k jednotlivým snímačům, ať již například přímo z časových signálů či z veličin popsaných v části 4.1 a 4.3. Jeden z nejjednodušších způsobů je tzv. thresholding. Tato metoda detekuje počátek vzruchu, jestliže amplituda signálu popř. veličiny překročí stanovený práh. Nevýhodou je potřeba stanovení příslušné meze. Navíc v případě odlišné amplitudy jednotlivých signálů resp. veličin je potřeba stanovit mez pro každý signál resp. veličinu. Vhodnější způsob přináší ovšem následující metoda.

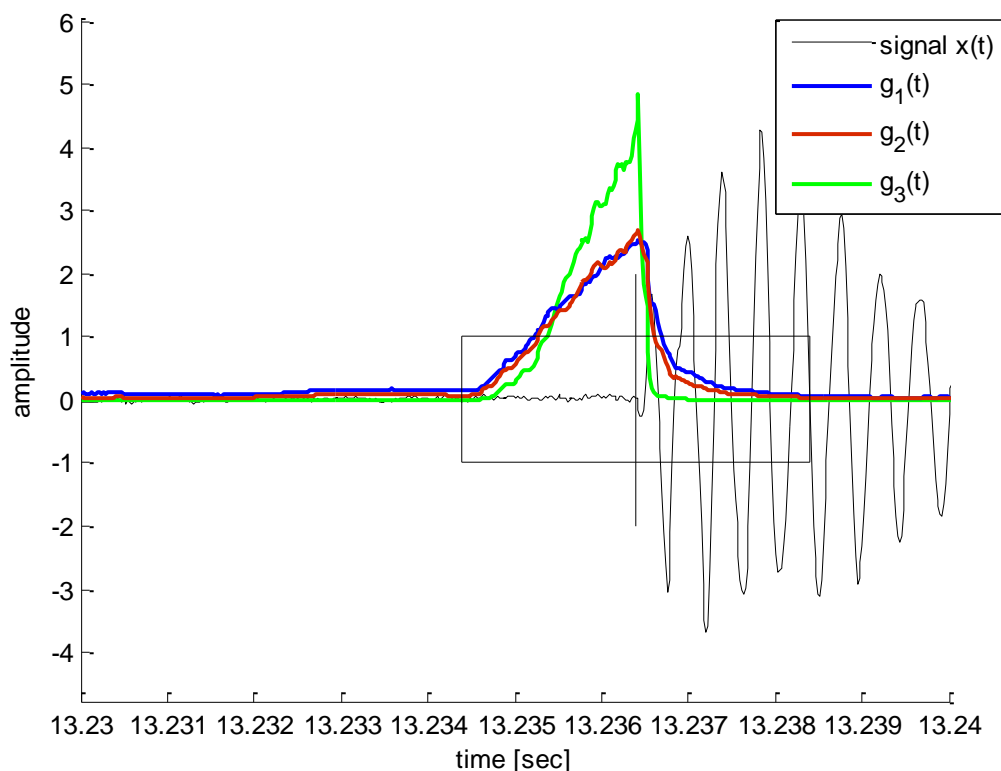
4.4.1 Metoda klouzavých oken

V této práci je pro detekci počátků vzruchů především využíváno metody založené na porovnávání vlastností signálu ve dvou po sobě následujících systematicky pohybujících se klouzavých oknech určité délky N . Tato metoda vychází z popisu uvedený v [8], kde byla využívána pro určení času příchodu akustické vlny na příslušný senzor, přičemž tento okamžik byl označován jako pata akustické vlny. V každém okně délky N je spočítána příslušná veličina charakterizující signál v daném okně. Podílem získaných veličin lze sledovat lokální změnu signálu pro daný časový okamžik. Necht' například chceme sledovat lokální změnu signálu x pro i -tý vzorek (příslušný určitému časovému okamžiku). Potom lokální změna signálu pro i -tý vzorek je charakterizována hodnotou veličiny $g(i)$, která je dána podílem okna od vzorku i do vzorku $i+N-1$ a okna mezi vzorky $i-N$ až $i-1$. Porovnáním signálu s podobnými vlastnostmi v obou oknech (např. stejná úroveň šumu apod.) nedojde k výraznějšímu nárůstu veličiny $g(i)$. Ovšem v případě změny signálu v okně mezi vzorky i až $i+N-1$ (např. nárůst amplitudy v důsledku rázu) dojde k výraznému navýšení veličiny $g(i)$. Je tedy zřejmé, že při příchodu rázu (v čase i) bude veličina $g(i)$ nabývat svého lokálního maxima, které bude při vhodně zvolené délce oken N zároveň maximem globálním. V případě příchodu rázu dochází především k nárůstu amplitudy, proto veličiny charakterizující vlastnosti signálu v daném okně byly nejčastěji počítány podle vztahů (4.22) - (4.24). Podle vztahu (4.22) je v daném okně počítán součet absolutních hodnot diferencí vzorků. Další variantou je střední hodnota získaná z absolutní hodnoty signálu resp. součet absolutních hodnot vzorků, viz (4.23). Podle vztahu (4.24) je pak počítán součet absolutních hodnot vzorků z ustředněného signálu, který je dále přenásobený směrodatnou odchylkou hodnot signálu v daném okně (σ_1, σ_2). Ustřednění je prováděno v prvním i druhém okně pomocí střední hodnoty signálu prvního okna (μ_1).

$$g_1(i) = \frac{\sum_{j=i}^{i+N-1} |x(j) - x(j-1)|}{\sum_{j=i-N}^{i-1} |x(j) - x(j-1)|} \quad (4.22)$$

$$g_2(i) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{j=i}^{i+N-1} |x(j)|}{\frac{1}{N} \sum_{j=i-N}^{i-1} |x(j)|} = \frac{\sum_{j=i}^{i+N-1} |x(j)|}{\sum_{j=i-N}^{i-1} |x(j)|} \quad (4.23)$$

$$g_3(i) = \frac{\sum_{j=i}^{i+N-1} |x(j) - \mu_1| * \sigma_2}{\sum_{j=i-N}^{i-1} |x(j) - \mu_1| * \sigma_1} \quad (4.24)$$



obr. 4-7: Signál rázu a průběhy veličin získané pomocí klouzavých oken

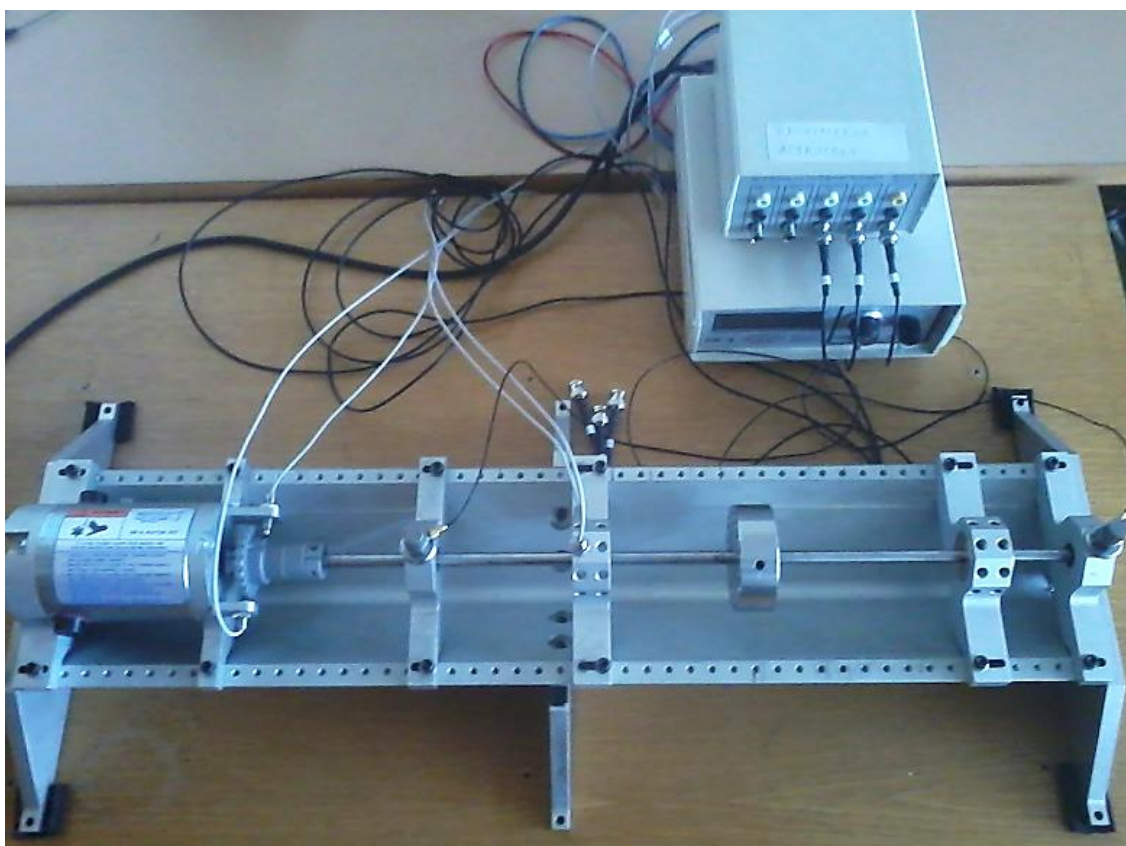
Na obr. 4-7 je zobrazen průběh časového signálu rázu, který byl realizován poklepem kovového klíče na rotující hřídel rotorového stendu (viz kapitola 5). Aplikací výše popsané metody dvou klouzavých oken s matematickými operacemi podle vztahů (4.22) - (4.24) byly získány průběhy veličin $g_1(t)$ - $g_3(t)$ zobrazené také na obr. 4-7. Ze získaných průběhů veličin $g_1(t)$ - $g_3(t)$ je zřejmé, že maxima přibližně odpovídají počátku rázu. Všechny tři funkce detekují počátek rázu pro tento případ ve stejném okamžiku. Délka okna byla zvolena 100 vzorků při vzorkovací frekvenci 51200 Hz, tedy přibližně 2 ms. Metoda dvou klouzavých oken nemusí být aplikována jen na časové průběhy měřených signálů, ale tak jak bylo již ukázáno, lze ji použít především na průběhy veličin popsanych v části 4.1 a 4.3 nebo také na průběhy signálů určitých frekvenčních liniích spektrogramu získaný některou z časofrekvenčních metod apod.

5 Experimenty na rotorovém standu (rotor-kit RK4)

Značná část výzkumu problematiky rubbingu byla věnována experimentům na rotorovém standu rotor-kit RK4. Cílem experimentů bylo získat nové poznatky o chování rotující hřídele při kontaktu se statorovou částí, projevech kontaktu v signále, rychlostech šíření vzruchu případně získání informace o typu vlnění, ze kterých měla být nakonec navržena výsledná metoda pro automatickou lokalizaci místa kontaktu a to nejen na rotorovém standu, ale také na parních turbínách v provozu. Velkou výhodou je beze sporu znalost přesného místa kontaktu hřídel/ucpávka při experimentech. Právě tato kapitola popisuje jednotlivé experimenty realizované na rotorovém standu. Na úvod této kapitoly bude nejprve popsán samotný rotorový stand.

5.1 Rotorový stand RK4

Popis rotorového standu rotor-kit RK4, na kterém byly realizované jednotlivé experimenty, vyháží především z [6] a [7]. Tento experimentální stand, umožňující ve zmenšené podobě modelovat chování rotoru při různých otáčkách, ať již při částečném či úplném rubbingu nebo v situaci bez kontaktu, byl vyroben společností Bently Nevada. Experimentální zařízení lze rozdělit na tři základní části a to na samotný rotorový stand, konektorovou jednotku pro připojení snímačů a jednotku pro regulaci otáček na požadovanou hodnotu. Zařízení, na kterém byly realizované jednotlivé experimenty, je na obr. 5-1.



obr. 5-1: Rotorový stand RK4

Uživatel volí rychlost otáčení hřídele (ot./min) a rychlost přechodového děje při změně požadované hodnoty otáčení. Zároveň je aktuální rychlost otáčení zobrazována na displeji. Samotný rotorový stend má délku resp. šířku resp. výšku 79 cm resp. 34 cm resp. 16,5 cm a hmotnost 14,5 kg. Hlavní část rotor-stendu tvoří hřídel o délce 56 cm a průměrem 10 mm. Hřídel je usazena do dvou mosazných kluzných ložisek, jejichž umístění lze libovolně měnit. V našem případě při experimentech byla ložiska od sebe vzdálená 46 cm, a současně na nich byly dále umístěné snímače měřící rychlost absolutních vibrací. Jeden konec hřídele je spojen pomocí pružného členu umožňující mírný axiální pohyb s motorem o výkonu 75 W. S hřídelí je možno otáčet v rozmezí 0 – 10000 ot./min. Pružný člen má především za úkol nepřenášet do motoru vibrace vzniklé na hřídeli. Zároveň část pružného členu tvoří ozubené kolo pro měření úhlového natočení pro regulaci otáček a značku pro měření počtu otáček. Na libovolnou pozici hřídele lze umístit disk s otvory rozmístěnými po celém obvodu po 5°, do nichž lze vkládat závaží o různé hmotnosti. Pomocí vešroubovaného závaží na určitých pozicích disku lze rotující hřídel buď vyvážit či úmyslně rozvážit, například pro vyvolání kontaktu. Průměr resp. šířka disku, představující hmotu hřídele, má 7 cm resp. 2,5 cm v průměru resp. poloměru a hmotnost je 0,8 kg. Po obou stranách podél osy hřídele jsou na konstrukci otvory se závity pro přišroubování dalších komponent (stojan pro snímače relativních vibrací, ucpávku) a to na libovolnou pozici. Součástí experimentálního zařízení jsou také relativní snímače vibrací na bázi vířivých proudů *Spare 3300 NSv Probe*. Tyto snímače lze použít pro měření relativních rotorových vibrací nebo pro měření počtu otáček či úhlového natočení. Pro realizaci kontaktu je ke stendu dodáván mosazný šroub, který se vkládá do stojanu umístěného na konstrukci. Při použití mosazného šroubu pro vznik rubbingu přímo vnucujeme kmitu hřídele obvodovou pozici, kde má ke kontaktu dojít. Navíc nelze provést experimenty pro vznik úplného rubbingu. Z těchto důvodů (především pro přirozenější kontakt rotorové a statorové části) bylo vyrobeno několik ucpávek z různých materiálů (teflon, měď, mosaz) a šířek (3 cm a 0,4 cm). Ucpávku na rotor-stendu tvoří válec, v jehož středu je vysoustružen otvor s průměrem o trochu větším, než je průměr samotné hřídele a to 10,5 mm. Válec lze vložit do stojanu, který lze připevnit na libovolnou pozici ke konstrukci stendu (viz obr. 5-1) a libovolně tím tak měnit místo kontaktu hřídel/ ucpávka. Na obr. 5-2 jsou zobrazeny ucpávky používané při experimentech. Na obr. 5-2 jsou zleva následující ucpávky: měděná - 3 cm, měděná - 0,4 cm, teflonová - 3 cm.



obr. 5-2: Používané ucpávky na rotor-stendu RK4 při experimentech

5.2 Kontakt vyvolaný kovovým nástrojem

Finálním výstupem výzkumu problematiky lokalizace částečného rubbingu na rotorovém stendu by měla být metoda, která by automaticky lokalizovala místo vzniku kontaktu hřídel/ucpávka ideálně při proměnných otáčkách, s čímž také souvisí typ částečného kontaktu (1/2X, 1/3X atd.). Jelikož zpočátku nebyla známa žádná informace o typu šíření vzruchu vyvolaného kontaktem, respektive zda vůbec bude možné daný kontakt detekovat v naměřených signálech a především, zda vůbec bude možné na necelé půlmetrové hřídeli detekovat nějaké časové zpoždění (časový posuv) příchodu vzruchu do jednotlivých snímačů (viz. 3.2 princip lineární lokalizace) v závislosti na místě kontaktu, bylo nejprve přistoupeno k níže uvedeným experimentům. Další otázkou bylo, zda případné časové zpoždění (posuv) příchodu vzruchu k oběma snímačům není způsobené diskem pro vkládání závaží, který leží v přenosové cestě k jednomu ze snímačů. V takovém to případě by časové zpoždění bylo stále stejné bez závislosti na místě kontaktu, tedy nebylo by možné navrhnout žádnou metodu pro lokalizaci. Proto byl disk z hřídele stendu odšroubován. Tyto experimenty byly provedeny 12. 8. 2013. Při měření byly použity dva absolutní snímače vibrací, které byly umístěny na ložiskových stojanech ve vzdálenosti 45,9 cm od sebe a připevněné pomocí speciálního vosku dodávaného k těmto snímačům. Absolutní snímače vibrací, označované jako *ch06* a *ch07*, měřily rychlost vibrací v *in/s* s citlivostí: 100 mV na *in/s*. Měření bylo prováděno systémem RAMS (Rub Advanced Monitoring System) s vzorkovací frekvencí 51200 Hz. Dále byl rotorový stend RK4 přišroubován ke stolu a navíc byly pod kontaktní plochu stendu a stolu umístěny gumové tlumič podložky. Na samotnou hřídel bez rotace bylo v určité vzdálenosti vztážené k jednomu ze snímačů poklepáno kovovým imbusovým klíčem. Pro každou vzdálenost bylo poklepáno v řádu desítek rázů přibližně s frekvencí dvou rázů za vteřinu. Postupně byly experimenty realizované pro vzdálenosti v rozmezí 18 – 8 cm s krokem 2 cm vzhledem k snímači *ch06* umístěného vpravo od středu hřídele mezi snímači a dále pro vzdálenosti 18 – 12 cm s krokem 2 cm vzhledem k snímači *ch07* umístěného vlevo od středu hřídele mezi snímači. Dále bude střed vzdálenosti snímačů ztotožňován se středem hřídele, ačkoli se nejedná o geometrický střed hřídele. Bylo také měřeno pro situaci, kdy byl kontakt realizovaný na středu hřídele, tedy vzdálenost od místa kontaktu k oběma snímačům byla stejná. Navíc pro ověření získání stejných vibračních signálů pro oba snímače byl experiment s kontaktem na středu hřídele opakován s úmyslnou záměnou snímačů *ch06* a *ch07*, ačkoliv se jednalo o stejný typ snímačů. Všechna tato měření, prováděná na stojící hřídeli, byla dále opakována pro rotující hřídel nejprve při konstantních otáčkách 1000 ot./min a poté při 2000 ot./min (pro vybraná měření dále při 3000 ot./min). Změna klidového stavu na stav rotace hřídele je beze sporu spojena s buzením nových frekvenčních složek spektra a šumu v signále, které mají zásadní vliv na určování počátku dospění vzruchu ke snímači, tedy i vliv na celkový výsledek lokalizace.

Druhým souborem dat, který byl také naměřen 12. 8. 2013, jsou experimenty prováděné na hřídeli s diskem pro vkládání závaží. Samozřejmě pro budoucí realizaci kontaktu rotující hřídele s ucpávkou bude přítomnost disku s nevyvázkem na hřídeli nezbytná. V případě rotující hřídele s diskem bude pravděpodobně v naměřených signálech větší šum než v případě samotné hřídele. Dalším důvodem těchto experimentů bylo sledování změny signálu naměřeného snímačem, který má v přenosové cestě disk, respektive zda bude událost (poklep kovovým klíčem) na daném snímači detekovatelná a zda bude v signálech taktéž detekovatelný časový posuv v závislosti na místě poklepu. Zda například při kontaktu na hřídeli nebude docházet vlivem disku k odrazům, interferenci a podobným jevům vedoucí k výraznému ovlivňování měřených signálů, které by znemožnily návrh lokalizační metody. Podmínky při měření zůstaly stejné jako v případě samotné hřídele, tedy vzdálenost snímačů absolutních vibrací byla 45,9 cm, bylo měřeno pomocí systému RAMS se vzorkovací frekvencí 51200 Hz a kontakt byl opět realizován poklepem pomocí kovového klíče. Disk byl

umístěn na střed hřídele, přičemž hřídel byla experimentálně vyvážena závažím o hmotnosti 1,2g na pozici 270° a cíleně rozvážena závažím 0,4g na pozici 292,5°. Opět bylo pro každou vzdálenost poklepáno v řádu desítek rázů a to nejprve na nerotující hřídel a poté při konstantních otáčkách 1000 ot./min a 2000 ot./min. Měření byla realizovaná pro vzdálenosti 18 – 8 cm s krokem 2 cm vzhledem k snímači *ch06* umístěného vpravo od středu hřídele – tedy vpravo od disku, dále pak pro vzdálenosti 18 – 12 cm s krokem 2 cm vzhledem k snímači *ch07* umístěného vlevo od disku. Opět pro ověření získání stejných vibračních signálů pro oba snímače byl experiment pro dvě vzdálenosti opakován s úmyslnou záměnou snímačů *ch06* a *ch07*. Nakonec byl kontakt realizován na středu disku umístěného na středu hřídele při 0 resp. 1000 resp. 2000 ot./min, tedy vzdálenost k oběma snímačům od místa kontaktu byla stejná.

Analýza naměřených signálů získaných při experimentech s poklepem kovovým klíčem, bude ukázána v následující kapitole. Zda se vůbec projeví v naměřených signálech na tak krátké hřídeli časový posuv příchodu vzruchu k jednotlivým snímačům, bude předmětem právě této kapitoly. Dále budou ukázány projevy poklepů v signálech, nepůjde tedy implicitně přímo o lokalizaci, ať již například z důvodu menšího počtu rázů (viz. 3.2) apod.

5.3 Kontakt pomocí teflonové ucpávky

Jak již bylo zmíněno, jednotlivé experimenty na rotorovém standu spolu s následnou analýzou získaných dat měly vést k návrhu metod pro automatickou lokalizaci místa, kde dochází ke kontaktu rotující hřídele se statorovou částí. Statorová část realizující částečný rubbing měla být původně v podobě mosazného šroubu. Ovšem z následujících důvodů byla pro realizaci kontaktu vyrobena teflonová ucpávka (viz. obr. 5-2 vpravo). Především přirozenější kontakt rotující hřídele se statorovou částí nastává v případě ucpávky než v případě mosazného šroubu, kdy ucpávka určuje celokruhově přímo obvodovou pozici, kde může ke kontaktu dojít – tedy z důvodu větší podobnosti se vznikem rubbingu v reálných turbínách. Dalším důvodem byla možnost vyvolání úplného rubbingu, který by se s použitím mosazného šroubu jen těžko realizoval. Teflonová ucpávka je válec výšky 3 cm s uprostřed vysoustruženým otvorem, jehož průměr je jen o trochu větší než je průměr hřídele standu. Při rotaci vyvážené hřídele ke kontaktu s ucpávkou běžně nedochází, ovšem nevyvážek o určité hmotnosti vešroubovaný do disku způsobí vychýlení rotující hřídele, což může vést k požadovanému kontaktu. Teflonová ucpávka upevněná ve stojanu byla postupně při experimentech umístována na různé pozice podél hřídele (tj. různé vzdálenosti od snímačů) a to pomocí otvorů se závity na konstrukci standu. Poté byl při různých otáčkách buzen kontakt. Při experimentech bylo získáno velké množství naměřených dat a to především pomocí snímačů absolutních vibrací umístěných opět na ložiskových stojanech. Jeden ze souborů dat, naměřený 6. – 7. 6 2013, představoval experimenty, při kterých se vzdálenost teflonové ucpávky vztažená k jednomu ze snímačů měnila v rozmezí 19,2 až 7,2 cm s krokem 1,5 cm. Při měření byly použity dva snímače relativních vibrací – *ch02*, *ch03* a dva snímače absolutních vibrací – *ch04*, *ch05*, přičemž umístění ucpávky bylo vždy vztaženo k bližšímu snímači *ch04*. Nejprve byla hřídel experimentálně vyvážena na pozici 275° závažím o hmotnosti 1,2g a následně uměle rozvážena na pozici 292,5° závažím 0,4g. Data byla naměřena pomocí měřicích karet platformy PXI se vzorkovací frekvencí 100000 Hz. Pro každou vzdálenost bylo naměřeno několik časových úseků, při kterých byla frekvence otáčení konstantní, a docházelo při ní ke kontaktu hřídele s ucpávkou.

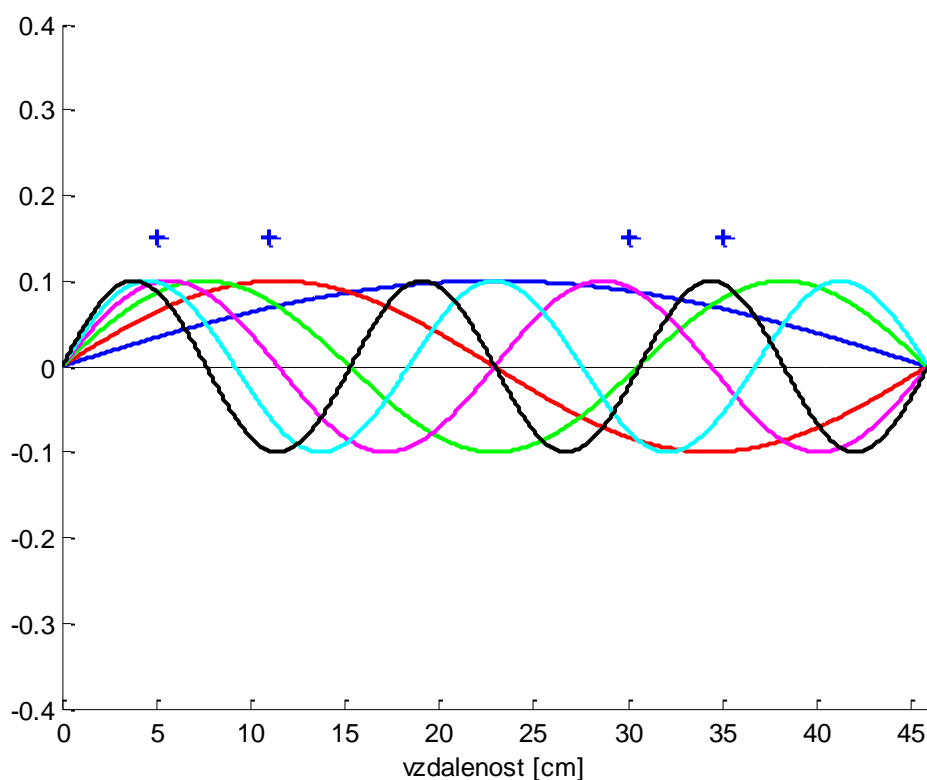
Další soubory dat získané při experimentech s teflonovou ucpávkou byly nejčastěji měřeny pouze pro vzdálenosti v rozmezí 19,2 – 14,7 cm, neboť při jednotlivých experimentech došlo k postupnému obroušení teflonové ucpávky, což vedlo k nemožnosti vybudování kontaktu i pro situaci, kdy byla ucpávka výrazněji vzdálená od disku s nevývažkem – tedy výrazněji blízká k jednomu ze snímačů. Tato skutečnost je ovšem spojena s požadavkem na přesnost navržených metod rozlišit změnu pozice ucpávky o 1,5 cm, což je ovšem na tak krátké hřídeli velmi složitý problém, uvědomíme-li si navíc, že šířka ucpávky je 3 cm. Tato data byla nejčastěji měřena pomocí systému RAMS se vzorkovací frekvencí 51200 Hz. Při analýze naměřených dat (viz dále) bylo zjištěno, že navržené metody pro lokalizaci místa kontaktu mohou být citlivé na změnu vstupního signálu. Ke změně signálu může dojít například při změně frekvence otáčení hřídele (nemusí být nutně spojeno se změnou typu kontaktu), a proto byly naměřeny experimenty i pro různé frekvence otáčení.

5.4 Kontakt pomocí kovové ucpávky

Snahou při experimentech na rotorovém standu je, aby modelová situace kontaktu mezi hřídelí a ucpávkou co nejvíce odpovídala situaci vzniku rubbingu v reálných turbínách. Proto byly vyrobeny tři kovové ucpávky, tak aby docházelo při rubbingu na rotor-standu ke kontaktu kov – kov, jako k tomu dochází při rubbingu v provozních turbínách. Beze sporu další výhodou je větší odolnost vůči obroušení (oproti ucpávce z teflonu), tedy lze opakovaně provádět i experimenty s ucpávkou umístěnou dále od středu hřídele s diskem, kde je výkmit hřídele menší – tedy výrazněji blíže k jednomu ze snímačů. Není tedy kritické, aby lokalizační metoda rozlišovala změnu polohy ucpávky v řádu 1,5 cm, ale cílem experimentů s kovovou ucpávkou je návrh metody, která by byla schopna rozlišit výraznější změny polohy ucpávky, například pozice v blízkosti ložiska, disku umístěného na středu hřídele či uprostřed mezi těmito pozicemi. Aby nedošlo k poškození hřídele standu při kontaktu s ucpávkou, byly ucpávky vyrobeny z materiálů s tvrdostí nižší, než je tvrdost ocele, ze které je hřídel vyrobena. Vyrobeny tedy byly dvě měděné a jedna mosazná. Všechny tři kovové ucpávky byly široké 3 cm. Ovšem pro přesnější informaci o místě kontaktu hřídel/ucpávka byla jedna z měděných ucpávek odvrtna tak, aby u jednoho z krajů ucpávky zůstal prstenec o šířce 4 mm. Tedy při rubbingu dochází ke kontaktu pouze v rámci tohoto prstence. Tato ucpávka je dále označována jako bodová. Na obr. 5-2 jsou obě měděné ucpávky, uprostřed bodová umístěná ve stojanu, nalevo pak ucpávka s šířkou 3 cm. Jeden ze souborů dat získaný při experimentech s bodovou ucpávkou byl naměřen 12. a 18. 12. 2013. Při měření byly použity dva snímače měřící relativní rotorové vibrace – *ch02*, *ch03* a dva snímače měřící rychlost absolutních vibrací umístěných na ložiskových stojanech – *ch17*, *ch18*. Celkem bylo měřeno pro vzdálenosti ucpávky 20,5, 16,1, 12,9, 8,5 a 5,4 cm vzhledem ke snímači *ch17*. Úkolem analýzy těchto dat byl návrh metody pro lokalizaci částečného kontaktu hřídel/ucpávka, která by byla schopná rozlišit přibližně tyto vzdálenosti, ideálně při různých frekvencích otáčení hřídele. Měření bylo realizováno pomocí systému RAMS se vzorkovací frekvencí 51200 Hz. Další experiment spočíval v umístění bodové ucpávky na střed hřídele (tedy vzdálenost k jednotlivým snímačům bez uvažování povrchu disku byla stejná), přičemž disk musel být ze středu hřídele posunut, a to směrem ke snímači *ch18*.

5.5 Měření tvaru kmitu rotoru

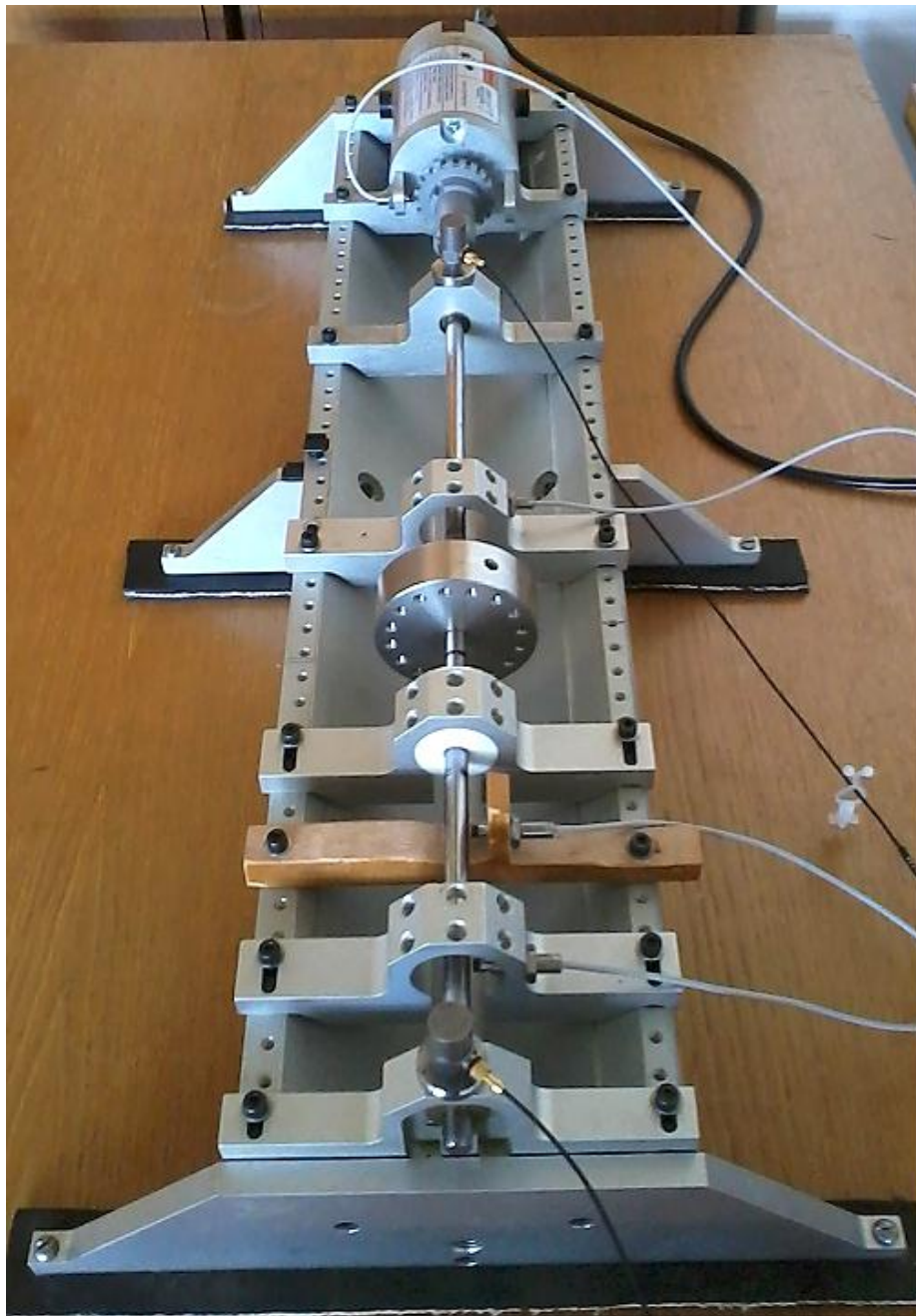
Další experimenty, provedené na rotorovém standu 16. 8. 2013, byly pro měření tvaru kmitu rotoru, který lze dále označovat jako tvar provozní. Jednalo se o experimenty, při kterých bylo pozorováno chování hřídele při rotaci a v situaci, kdy na hřídeli vznikl kontakt (s ucpávkou či poklepem kovovým klíčem). Nejednalo se tedy o experimenty, na jejichž základě měla být navržena metoda pro lokalizaci místa kontaktu, ale měly spíše objasnit chování hřídele při kontaktu, respektive jaký je tvar kmitu rotoru. Pro měření byly použity snímače měřící relativní rotorové vibrace. V případě měření s ucpávkou byly k dispozici tři relativní snímače vibrací, v situaci bez ucpávky čtyři snímače. Aby bylo možné rozhodnout o provozním tvaru kmitu rotoru na základě měření ve třech resp. čtyřech místech, bylo potřeba vhodně zvolit umístění snímačů relativních vibrací. Proto bylo nejprve vykresleno několik možných tvarů kmitů hřídele, na jejichž základě mohlo být rozhodnuto o vhodných umístěních snímačů. Celý problém je zobrazen na obr. 5-3, modré křížky představují vhodná místa pro umístění snímačů. Relativní snímače vibrací byly při experimentech umístěné před 1/8 resp. před 1/4 resp. za 5/8 délky hřídele, tedy ve vzdálenosti 5, 11, 30 a popřípadě 35 cm.



obr. 5-3: Možné tvary kmitu rotoru a umístění snímačů

Kromě relativních snímačů vibrací – *ch01*, *ch02*, *ch03* popř. *ch04* byly při měření také použity absolutní snímače – *ch06*, *ch07* umístěné opět na ložiskových stojanech. Disk s nevývažkem byl umístěn na středu hřídele, měření bylo provedeno pomocí systému RAMS se vzorkovací frekvencí 51200 Hz. Před každým měřením musela být provedena kalibrace relativních snímačů, tedy aby byly stejně vzdálené od povrchu hřídele. Nejprve bylo postupně poklepáno kovovým klíčem (přibližně deseti rázy) na stojící hřídel ve vzdálenostech 13,5, 20 a 26 cm vzhledem k snímači *ch06*. Poté byl celý experiment proveden i pro rotující hřídel a to pro 1000 resp. 2000 resp. 3000 ot./min. Dále byla umístěna teflonová ucpávka na pozici 16,2 cm a opět bylo poklepáno na hřídel kovovým klíčem ve vzdálenostech 13,5, 20 a 26 cm od *ch06* pro 0 resp. 1000 resp. 2000. resp. 2400 ot./min. Nakonec byla provedena měření, při

kterých docházelo ke kontaktu pouze mezi rotující hřídelí a ucpávkou (bez poklepů) pro vzdálenosti 17,7, 16,2 a 14,7 cm a to při konstantních otáčkách. Rotorový stand při měření provozního tvaru kmitu spolu s ucpávkou a umístěnými snímači je zobrazen na obr. 5-4.



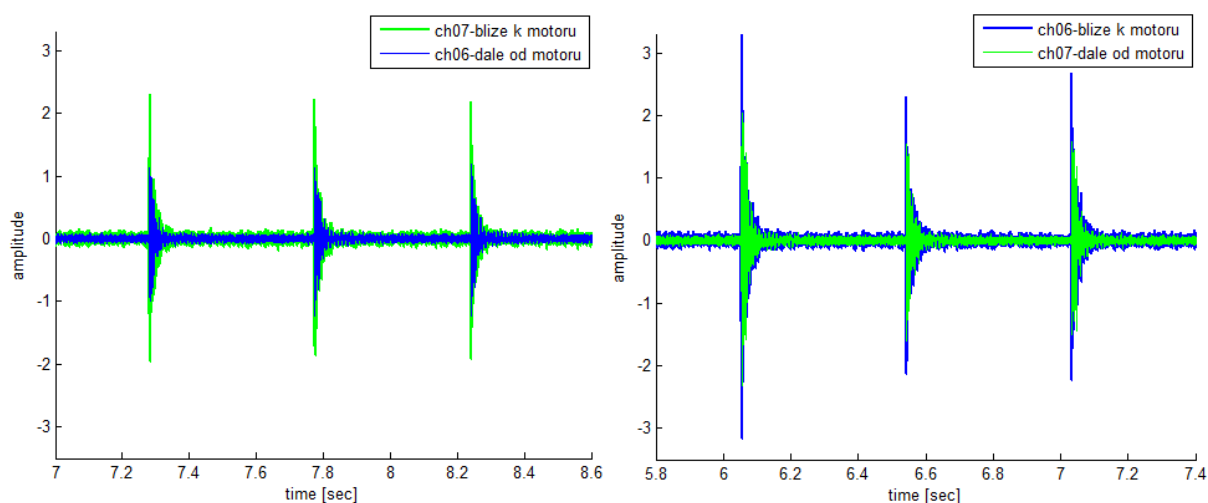
obr. 5-4: Rotorový stand při měření provozního tvaru kmitu hřídele

6 Analýza signálů získaných z rotorového stendu a návrh metody pro lokalizaci

Cílem této kapitoly je analýza získaných dat z experimentů popsaných v kapitole 5, která by vedla na návrh metody pro lokalizaci místa kontaktu rotující hřídele a ucpávky. Na rotorovém stendu byla postupně prováděna celá řada experimentů. Od základní úlohy typu poklep kovovým klíčem na stojící hřídel bez uvažované hmoty – disku až po tu nejsložitější úlohu pro lokalizaci v podobě velmi četného kontaktu hřídele s diskem a ucpávky za rotace navíc při proměnných otáčkách. Velkým úspěchem by pak bylo, kdyby navržená metoda úspěšně lokalizující místo kontaktu hřídel/ucpávka na rotor-stendu byla schopna lokalizovat místo vzniku rubbingu i na parních turbínách v provozu. Ačkoli by se mohlo zdát, že lokalizace místa vzniku rubbingu na rotorovém stendu díky zpětné vazbě v podobě přesné znalosti umístění ucpávky je relativně jednoduchou úlohou, skutečnost je jiná. Uvědomme si, že úloha lokalizace místa kontaktu hřídel/ucpávka na necelé polovině půlmetrové hřídele (tj. přibližně 23 cm) navíc za použití měření pouze ve dvou rovinách (nemožnost vyloučení rychlosti šíření vlnění, viz podkapitola 3.2), vyžaduje přesnost navržené metody pro lokalizaci v řádu centimetrů. Ve skutečnosti lze ovšem považovat lokalizaci s přesností například deseti centimetrů na dvacetimetrové parní turbíně za velice přesnou.

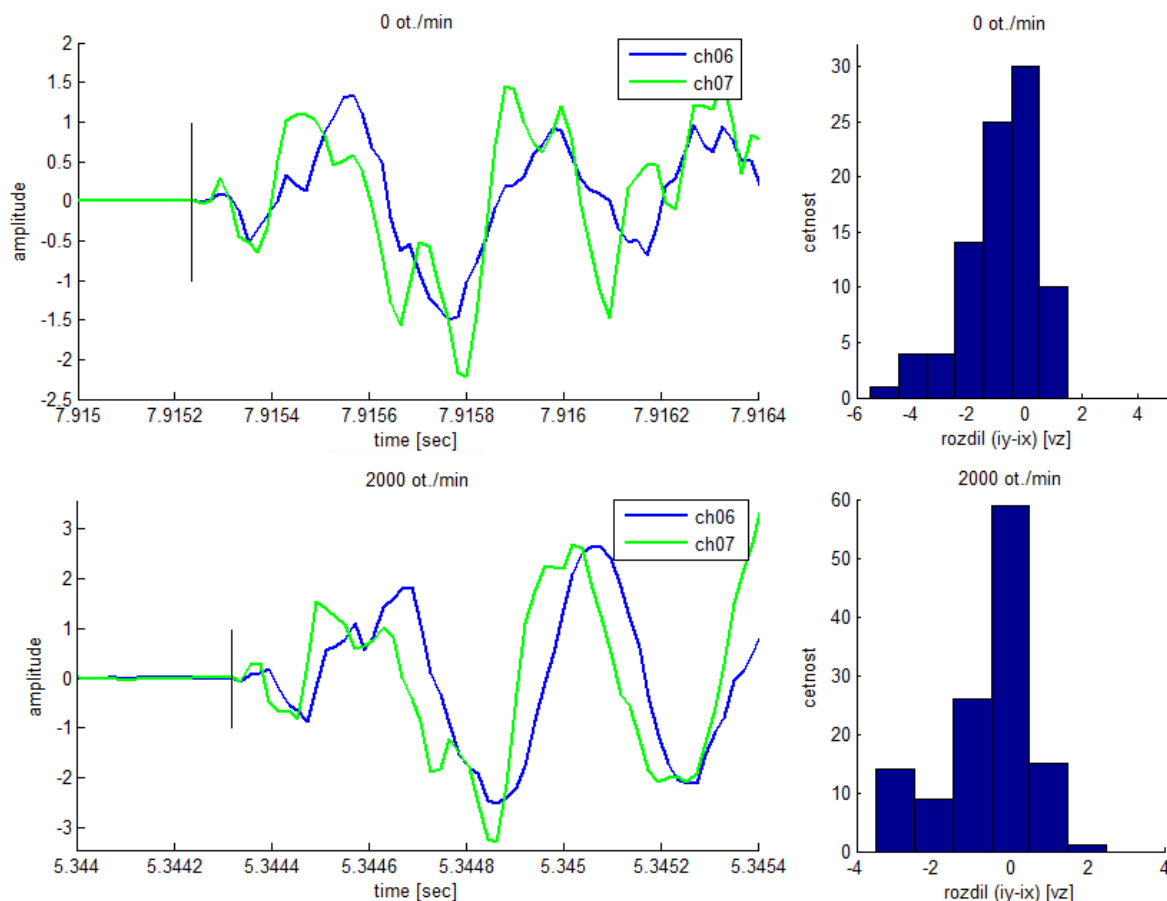
6.1 Analýza dat z experimentů s kovovým klíčem

Nejprve se zaměříme na analýzu dat získaných z experimentů, při kterých rázy vznikaly na základě poklepů kovovým klíčem na různých místech hřídele v situacích bez rotace, za rotace, s diskem a bez disku podrobně popsaných v části 5.2. Cílem této analýzy je zodpovězení základní otázky, zda je vůbec možné vzniklý kontakt na necelé půlmetrové hřídeli zaznamenat a to s časovým posuvem příchodu vzruchu k oběma snímačům při dostupných možnostech vzorkovací frekvence (nejčastěji 51200 Hz). I když samozřejmě nevíme, zda se bude jednat o stejný typ šíření vzruchu i při kontaktu rotující hřídele s ucpávkou, jako v případě poklepu kovovým klíčem. Dále je nutné ověřit, zda by případný časový posuv nebyl způsoben například odlišnou rychlostí transformace fyzikální veličiny na naměřená data u některého ze snímačů apod. Proto budou nejprve analyzována data z experimentů, při kterých rázy vznikaly uprostřed samotné hřídele, tedy kdy vzdálenost k oběma snímačům byla stejná.



obr. 6-1: Amplitudy naměřených rázů, kontakt na středu hřídele při 2000 ot./min

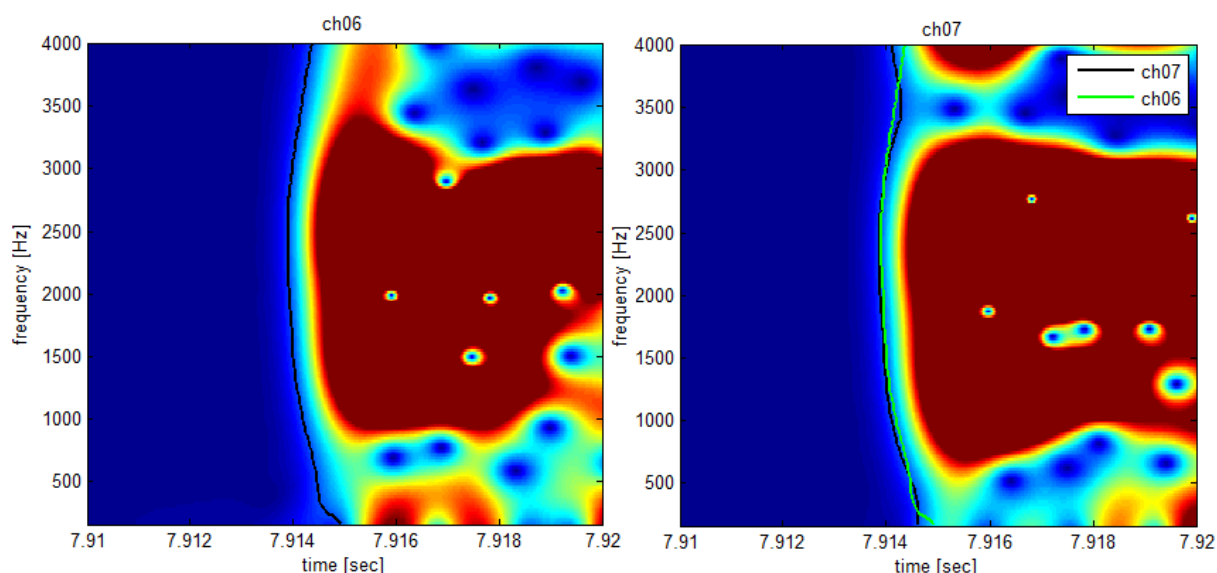
Na obr. 6-1 jsou zobrazeny časové signály z obou snímačů absolutních vibrací pro tři rázy vzniklé na středu rotující hřídele při 2000 ot./min. Levá část obr. 6-1 zobrazuje situaci pro umístění snímače *ch06* resp. *ch07* na ložisko dále od motoru stendu (tj. vpravo od středu hřídele) resp. na ložisko blíže k motoru stendu (tj. vlevo od středu hřídele). Pravá část obr. 6-1 zobrazuje situaci opačnou, tedy snímač *ch06* resp. *ch07* byl umístěn na ložisko blíže k motoru stendu resp. dále od motoru stendu. Z obr. 6-1 je patrné, že větší amplitudy dosahují rázy naměřené na ložisku blíže k motoru bez závislosti na použitém snímači. Tento fakt může souviset například s rozdílnou vůlí mezi hřídelí a jednotlivými ložisky, tedy hřídel usazená v ložisku blíže k motoru může více kmitat než v případě druhého ložiska. Zároveň si všimněme většího šumu u snímačů umístěných taktéž blíže k motoru. Tato skutečnost je s největší pravděpodobností způsobena samotným provozem elektromotoru. Dále se zaměříme na detailnější analýzu časových signálů získaných z experimentů s poklepy na středu hřídele pro 0 a 2000 ot./min. Levá část obr. 6-2 zobrazuje časové průběhy snímačů *ch06* a *ch07* pro jeden ráz. Při detailnějším přiblížení byly vyznačeny pravděpodobné počátky několika rázů pro oba snímače (viz obr. 6-2 černá úsečka), které byly stanoveny na základě první výraznější změny v signále. Pro oba snímače se okamžiky první výraznější změny v signále shodovaly a to jak v případě bez rotace, tak také pro 2000 ot./min (viz levá část obr. 6-2).



obr. 6-2: Časové signály a histogram, kontakt na středu hřídele při 0 a 2000 ot./min

Jelikož ale neznáme přesné počátky dospění vzruchů ke snímačům a jejich stanovení je velmi subjektivní, byla dále data s rázy statisticky zpracována některou z metod pro automatické určení paty rázu. Ačkoli by bylo dobré zmínit, že detekování počátku dospění vzruchu ke snímači je taktéž závislé na použité metodě. Zvolená metoda byla následující: nejprve byl ze signálu s rázy získán rekurzivní odhad čtvrtého centrálního momentu (tj. špičatost) pomocí rekurzivní metody nejmenších čtverců s exponenciálním zapomínáním (viz 4.1.1), na který

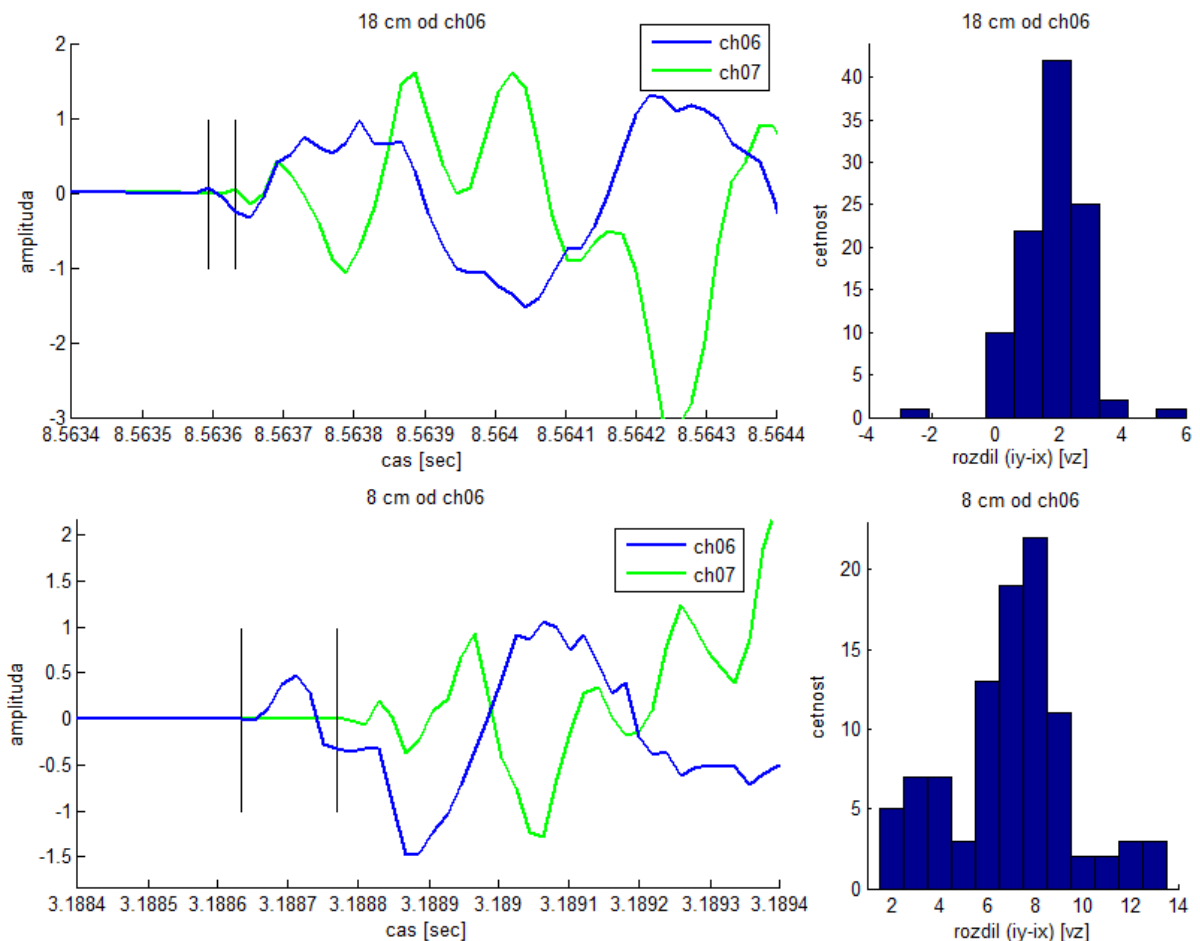
byla dále aplikována metoda podílu středních hodnot dvou klouzavých oken určité délky (viz 4.4.1). Pro každý experiment s poklepy na středu hřídele byly získány jednotlivé počátky rázů pro oba snímače (v řádu desítek rázů), přičemž počátek rázu pro snímač *ch06* resp. *ch07* je označován jako *ix* resp. *iy*. Histogram rozdílu detekovaných počátků rázů (ve vzorkách) pro snímač *ch07* a *ch06* (tj. *iy-ix*) je pro 0 resp. 2000 ot./min zobrazen v pravé části obr. 6-2. V obou případech histogramy dosahují svého maxima pro rozdíl 0 vzorků, tedy dospění vzruchu k oběma snímačům byly zvolenou metodou nejčastěji stanoveny pro stejný okamžik. Do jisté míry nám tyto výsledky potvrzují naše subjektivní pozorování v časových signálech (viz levá část obr. 6-2). Na závěr analýzy poklepů na středu hřídele bez disku je zobrazen amplitudový spektrogram rázu vzniklý na nerotující hřídeli pro oba snímače, viz obr. 6-3. Spektrogramy byly získány pomocí aproximace spojitě Gaborovy transformace (viz 4.3.2). Oba spektrogramy jsou velmi naškálované tak, aby byl na všech frekvenčních liniích v pásmu 0 – 4000 Hz viditelný počátek rázu. Zároveň byl stanoven určitý threshold detekující na každé frekvenční linii spektrogramu počátek vzruchu. Výsledná křivka tedy spojuje okamžiky se stejnou amplitudou. Z křivky je patrné odlišné šíření vzruchu na jednotlivých frekvencích, což je označováno jako Lambova (Rayleighova) vlna, podrobně popsáno v [8]. Pro každý snímač je na obr. 6-3 výsledná křivka zobrazena černě. Navíc je pro porovnání v pravém spektrogramu obr. 6-3 zobrazena také křivka snímače *ch06* (zeleně). Pro způsob, jakým byly získány obě křivky (shodný threshold pro oba snímače), by bylo dobré zmínit následující skutečnost. Je potřeba, aby byl u obou snímačů ráz vybuzen ve stejné frekvenční oblasti a to s podobnými hodnotami amplitudy. Pak by totiž porovnávání počátků rázu na určité frekvenční linii u obou snímačů nebylo korektní. Z obr. 6-3 je patrné, že obě křivky mají podobný tvar a téměř se překrývají, tedy počátek dospění vlnění k oběma snímačům lze považovat za shodný. Na základě výsledků získaných výše popsanou analýzou lze tedy předpokládat, že ráz vzniklý na středu samotné hřídele (tj. bez disku) bude v naměřených datech obou snímačů ve stejném časovém okamžiku, ať již v případě nerotující či rotující hřídele.



obr. 6-3: Spektrogram rázu, kontakt na středu hřídele při 0 ot./min

Dále budou analyzovány časové signály pro dvě odlišná místa kontaktu pro nerotující i rotující hřídel a to nejprve pro samotnou hřídel a poté pro hřídel s diskem. Cílem bude ukázat změnu časového zpoždění dospění vzruchu k oběma snímačům při změně místa poklepu v jednotlivých situacích (bez disku, s diskem, bez rotace, za rotace). Nepůjde tedy o porovnávání získaných výsledků mezi jednotlivými případy (např. zkoumání vlivu disku

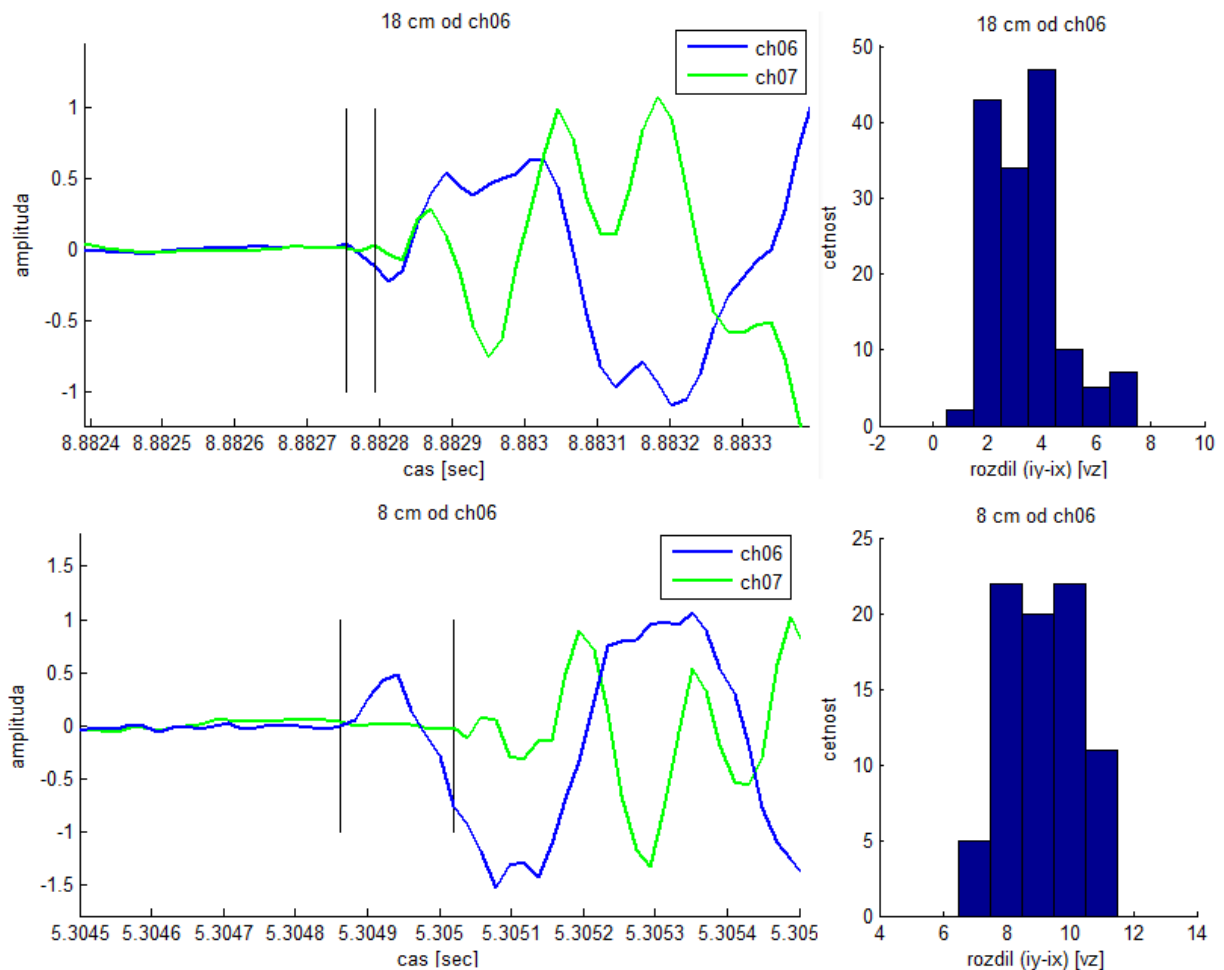
apod.), ale spíše o sledování, zda je přítomna důležitá informace o změně místa kontaktu obsažená v signálech. Analýza bude provedena podobným způsobem jako na obr. 6-2. V levé části obr. 6-4 je zobrazen detail časových signálů pro ráz vzniklý na nerotující hřídeli bez disku ve vzdálenosti 18 a 8 cm vzhledem k snímači *ch06*. Pro oba snímače byly opět stanoveny pravděpodobné počátky rázu (viz černé úsečky na obr. 6-4) stejným způsobem jako v případě kontaktu na středu hřídele. Jelikož přistupujeme k jednotlivým výsledkům statistickým způsobem a stanovení počátku vzruchu je velmi subjektivní, byla data opět zpracována metodou pro automatické určení paty rázu. Metoda byla totožná s metodou v předchozím případě, tj. nejprve byl rekurzivně odhadnut čtvrtý centrální moment, na který byla dále použita metoda dvou klouzajících oken určité délky. Rozdíly detekovaných počátků rázů snímače *ch07* a snímače *ch06* (*iy-ix*) jsou opět zobrazeny v podobě histogramu v pravé části obr. 6-4. Rozdělení časové osy na obr. 6-4 pro 18 a 8 cm je shodné. Z časových signálů je patrné, že v případě nerotující hřídele bez disku při změně místa kontaktu blíže k jednomu ze snímačů dojde ke zvýšení časového zpoždění, což je základní předpoklad pro návrh metody pro lokalizaci. Tuto skutečnost navíc potvrzují výsledné histogramy na obr. 6-4. Při kontaktu ve vzdálenosti 18 cm resp. 8 cm od *ch06* byl nejčtenější rozdíl příchodu vzruchu ke snímačům 2 resp. 8 vzorků.



obr. 6-4: Časové signály a histogram, kontakt na hřídeli bez disku při 0 ot./min

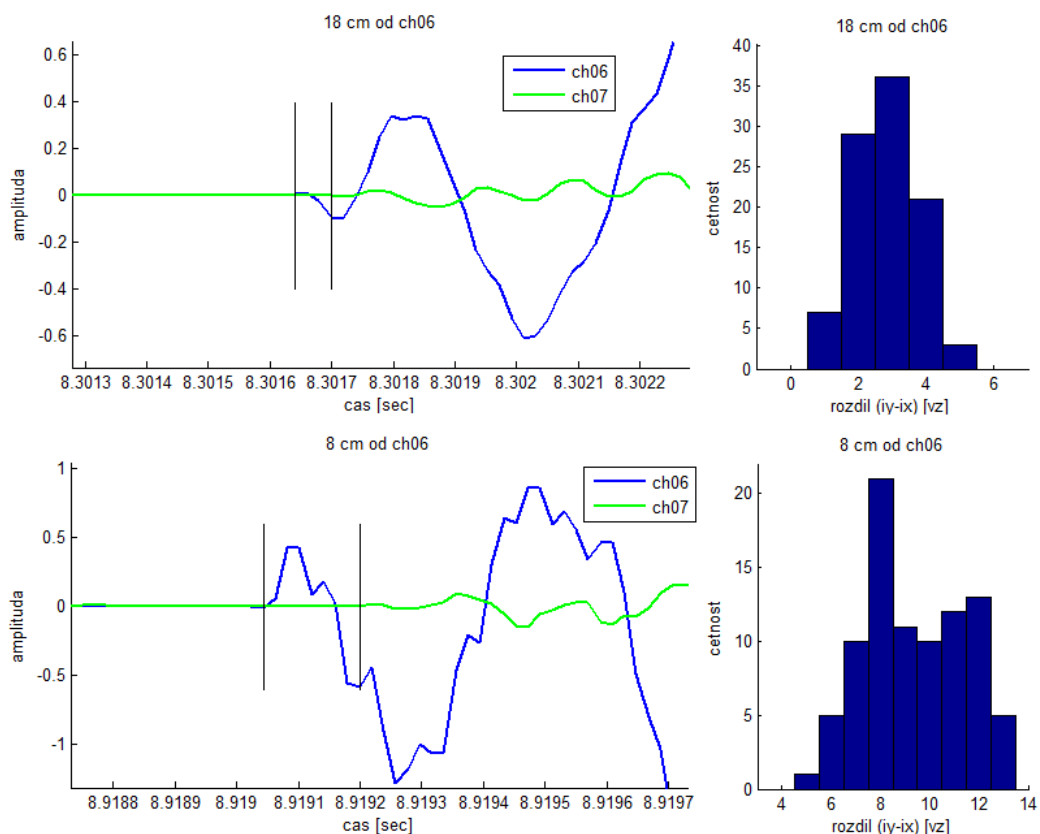
Na obr. 6-5 jsou zobrazeny časové signály a histogramy pro kontakt na samotné hřídeli ve vzdálenosti 18 a 8 cm vzhledem k snímači *ch06* při frekvenci otáčení 2000 ot./min. Rotace hřídele je spojena se vznikem šumu v časových signálech, což může mít vliv na přibližné určení počátků rázů, nicméně při takto silných rázech způsobené poklepy je změna v signálech poměrně dobře rozpoznatelná, viz levá část obr. 6-5. Pro získání histogramů

jednotlivých rozdílů zobrazených v pravé části obr. 6-5 byla použita stejná metoda (se stejnými hodnotami parametrů) jako v předchozích případech. Při kontaktu 18 cm resp. 8 cm od snímače *ch06* byl nejčastější rozdíl příchodu vzruchu ke snímačům 2 – 4 resp. 8 – 10 vzorků. Histogramy v případě rotující hřídele nemají tak ostrá maxima jako v situaci bez rotace (viz obr. 6-4). Nicméně z těchto histogramů a časových signálů zobrazených na obr. 6-5 je patrné, že při změně místa kontaktu k jednomu ze snímačů dojde opět ke zvýšení časového zpoždění. Tedy při kontaktech na hřídeli bez disku je v případě nerotující i rotující hřídele v signálech pozorovatelný časový posuv.

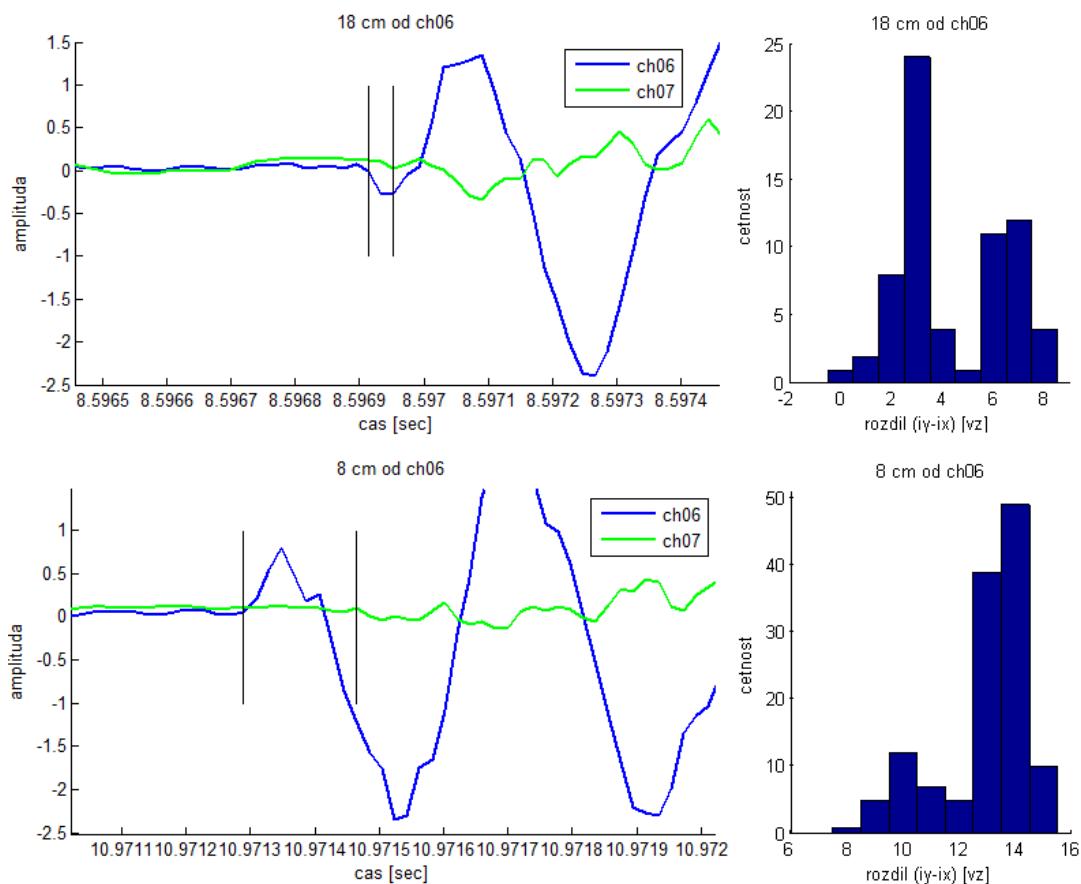


obr. 6-5: Časové signály a histogram, kontakt na hřídeli bez disku při 2000 ot./min

Další analýza naměřených signálů je pro případ hřídele s diskem. Opět je ukázána situace pro kontakt ve vzdálenosti 18 a 8 cm vzhledem k snímači *ch06* a to nejprve pro nerotující hřídel (obr. 6-6) a poté pro hřídel s frekvencí otáčení 2000 ot./min (obr. 6-7). Z časových signálů obou případů je patrné, že amplituda signálů naměřených na ložisku blíže k motoru (snímač *ch07*) je výrazněji nižší než pro signály naměřené na druhém ložisku (snímač *ch06*). V případě poklepů na středu samotné hřídele naopak větších amplitud dosahovaly signály naměřené právě na ložisku blíže k motoru, viz obr. 6-1. Je tedy zřejmé, že disk umístěný v přenosové cestě od místa poklepu k jednomu ze snímačů (*ch07*) způsobuje především útlum v amplitudě a časová změna signálu snímače *ch07* představující začátek rázu není tak zřejmá jako v případech samotné hřídele. Navíc z experimentů na obr. 6-1 bylo zřejmé, že zároveň většího šumu je obsaženo (při rotaci) v signálech naměřených na ložisku blíže k motoru, tedy v tomto případě také pro snímač *ch07*.



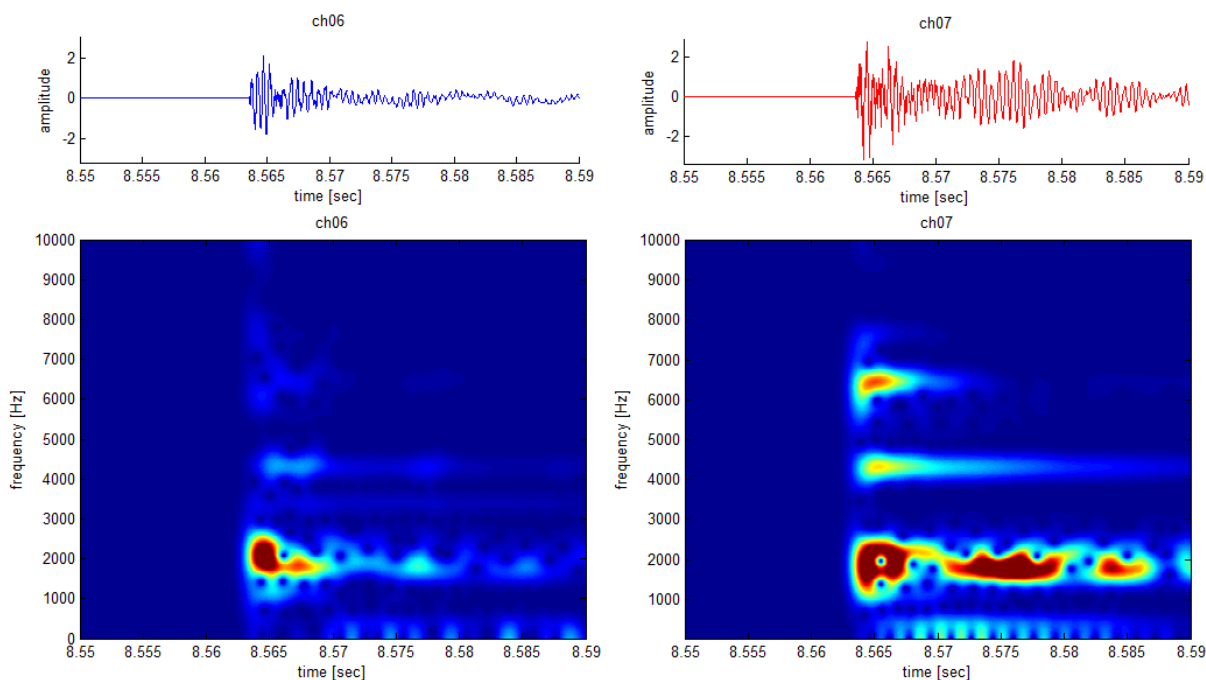
obr. 6-6: Časové signály a histogram, kontakt na hřídeli s diskem při 0 ot./min



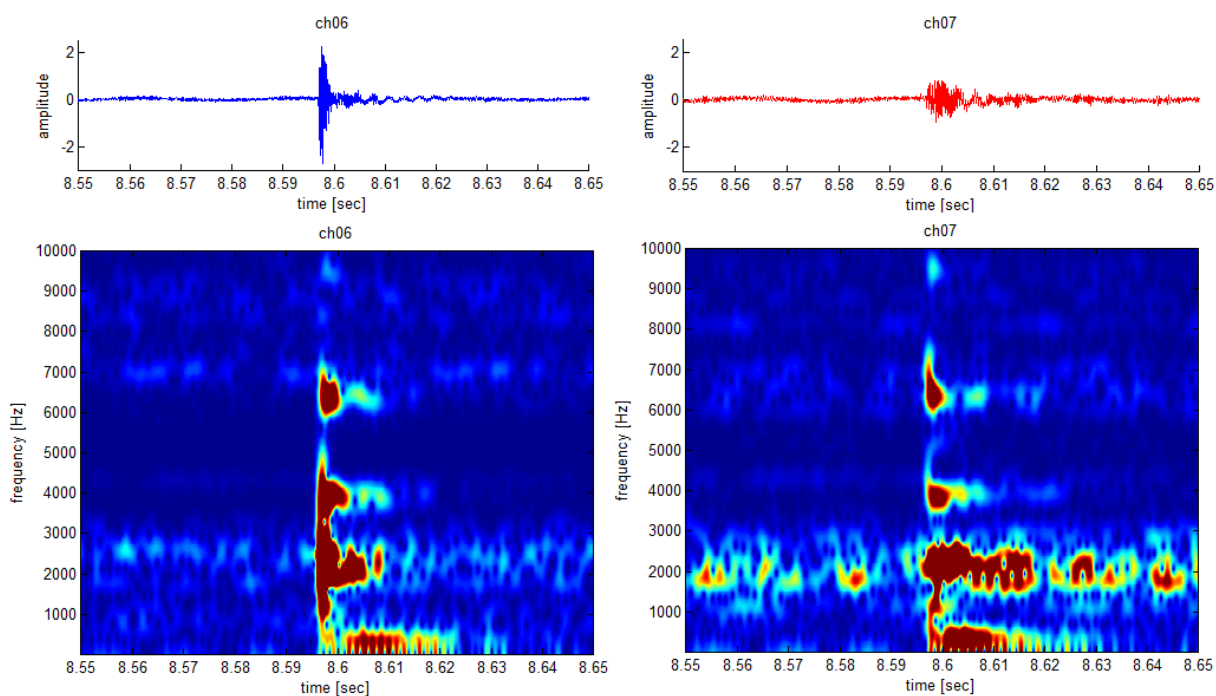
obr. 6-7: Časové signály a histogram, kontakt na hřídeli s diskem při 2000 ot./min

V časových signálech byly opět vyznačeny přibližné počátky dospění vzruchu ke snímačům, viz černé úsečky na obr. 6-6 a obr. 6-7, přičemž pro snímač *ch07* bylo potřeba většího přiblížení, než je ukázáno na obrázcích. Výsledky získané metodou pro automatické určení počátků vzruchů jsou opět pro případ nerotující i rotující hřídele s diskem zobrazeny v podobě histogramů (viz pravá část obr. 6-6 a obr. 6-7). V případě nerotující hřídele s diskem dojde při změně místa kontaktu z 18 cm na 8 cm (vzhledem k snímači *ch06*) ke změně maxima histogramu ze 2-3 na 8 vzorků, v případě rotující hřídele s frekvencí otáčení 2000 *ot./min* ze 3 na 13-14 vzorků. Na závěr by bylo dobré zmínit, že změny signálu způsobené například diskem, šumem či větší vzdáleností k jednomu ze snímačů (větší útlum) apod. ovlivňují časové okamžiky, které jsou příslušnou metodou stanoveny jako počátky vzruchů. Důležité ovšem je, že s měnící se vzdáleností místa kontaktu dochází ke změně časového posuvu dospění vzruchu ke snímačům a to nejen na samotné hřídeli, ale také na rotující hřídeli s diskem, což je základní požadavek pro návrh metody pro automatickou lokalizaci místa částečného rubbingu.

Na závěr této podkapitoly jsou ukázány projevy kontaktu v časo-frekvenční oblasti. Na obr. 6-8 je ukázán spektrogram rázu pro oba snímače, který vznikl na nerotující hřídeli bez disku ve vzdálenosti 18 cm od *ch06*. Dále pak na obr. 6-9 je zobrazen spektrogram rázu vzniklý na rotující hřídeli s diskem (2000 *ot./min*) ve stejné vzdálenosti jako v předchozím případě. Spektrogramy byly získány aproximací spojitě Gaborovy transformace pro frekvenční pásmo 0 – 10 kHz. Rozsah barevné škály spektrogramů je vždy pro oba snímače stejný. Ze spektrogramů popř. z příslušných časových signálů na obr. 6-9 je patrné, že větší amplitudy dosahuje ráz u snímače, který nemá v přenosové cestě disk, tedy snímač *ch06*. V případě samotné hřídele bez disku je tomu přesně naopak, tedy větší amplitudy ve spektrogramu dosahuje ráz pro snímač *ch07*. Dále pak porovnáním spektrogramů pro nerotující a rotující hřídel je ve spektrogramech rotující hřídele (obr. 6-9) zřejmý šum. Navíc vyšší amplitudy dosahuje šum u snímače *ch07*. Tyto skutečnosti byly již zmíněné při analýze v oblasti časové.

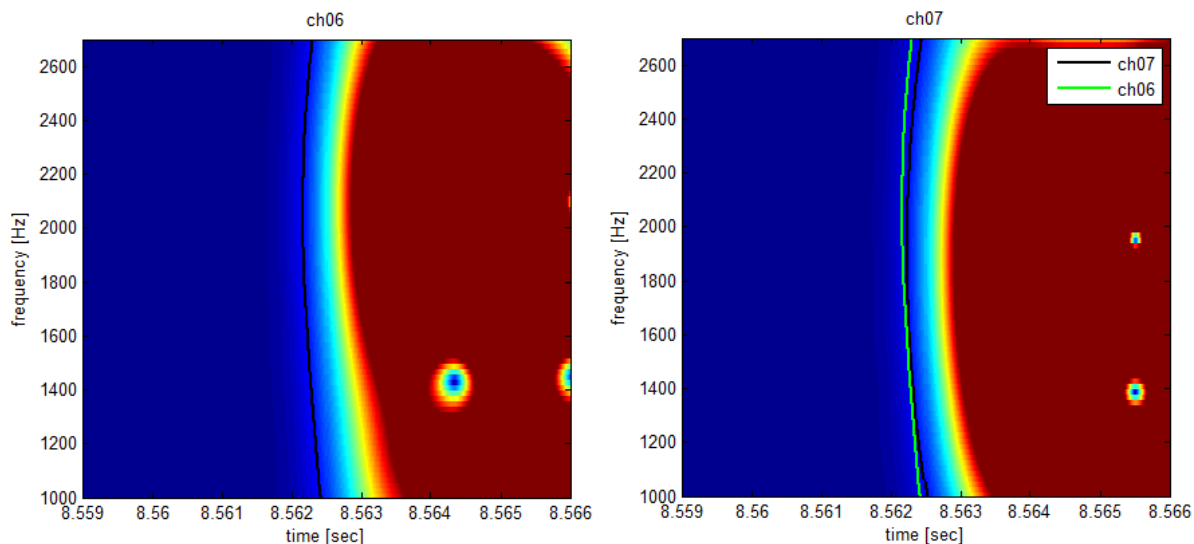


obr. 6-8: Spektrogram rázu, nerotující hřídel bez disku

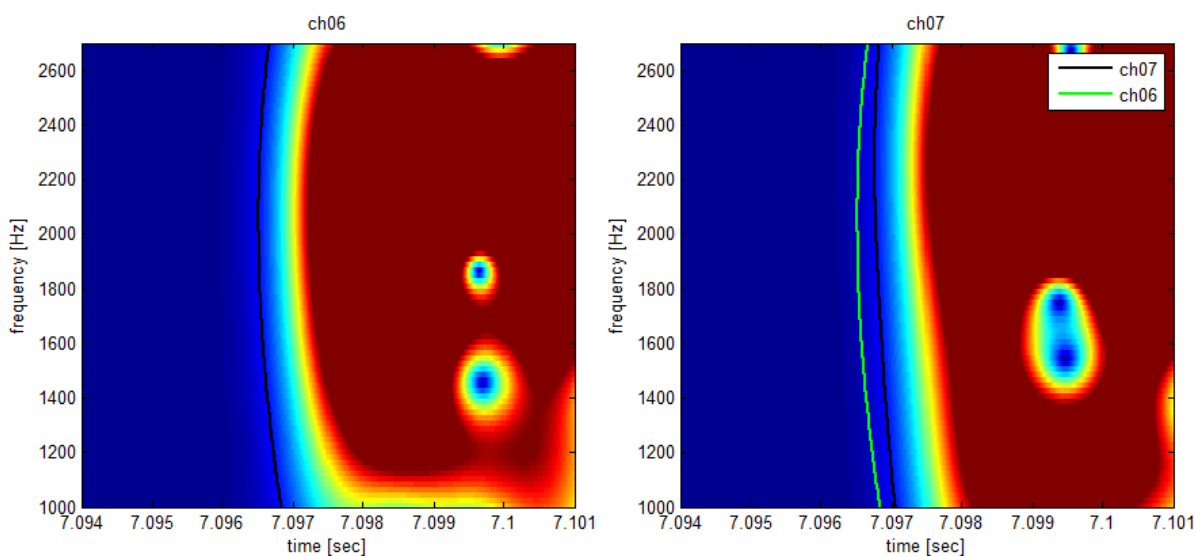


obr. 6-9: Spektrogram rázu, hřídel s diskem při 2000 ot./min

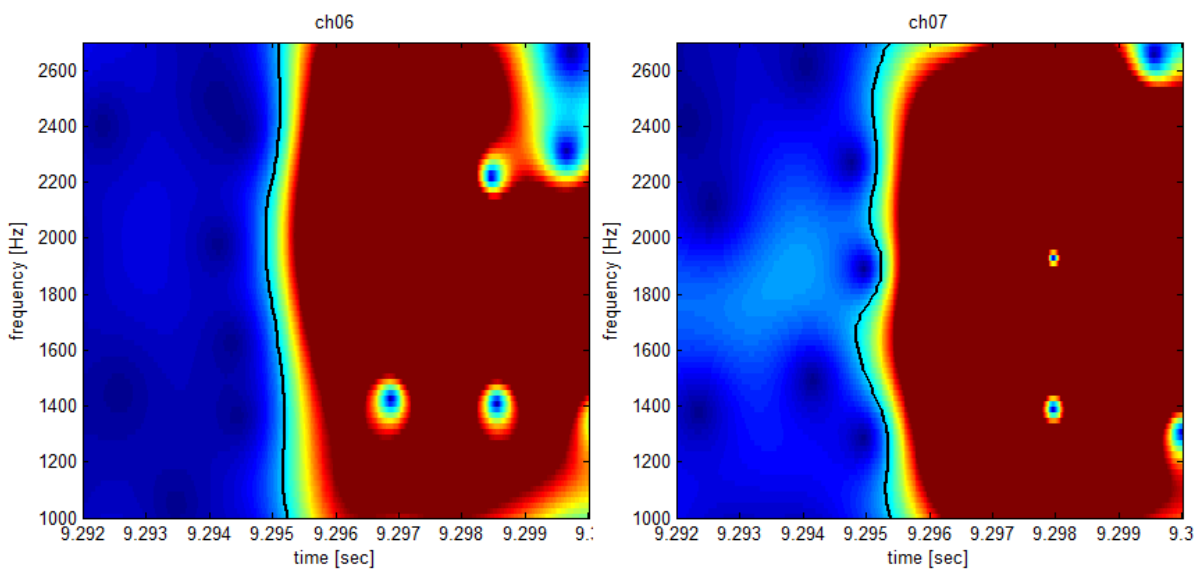
Původně byla navržena metoda pro lokalizaci kontaktu vycházející z časo-frekvenční oblasti. Jednalo se o stejný přístup jako na obr. 6-3, tedy počátky dospění vzruchu ke snímači byly detekovány na každé frekvenční linii určitého frekvenčního pásma. Na základě časového posuvu získaných křivek Lambových (Rayleighových) vln obou snímačů měla být provedena lokalizace místa kontaktu. Na obr. 6-10 je zobrazen spektrogram rázu (získaný aproximací spojitě Gaborovy transformace) pro kontakt vzniklý 18 cm od snímače *ch06* na hřídeli bez disku pro frekvenční pásmo 1000 – 2700 Hz. Křivka určující počátek rázu na jednotlivých frekvenčních liniích je pro daný snímač zobrazena černě, navíc je pro porovnání ve spektrogramu snímače *ch07* zobrazena také křivka získaná ze spektrogramu snímače *ch06* (zeleně). Analogická situace pro kontakt 12 cm vzhledem k snímači *ch06* je na obr. 6-11. Rozsah časové osy je pro oba případy stejný. Z obr. 6-10 a obr. 6-11 je tedy zřejmé, že při změně místa kontaktu blíže k jednomu ze snímačů dojde ke zvětšení časového posuvu křivek snímače *ch06* a *ch07*, přičemž křivky mají na daném frekvenčním pásmu podobný tvar. Problém ovšem nastává v případě rotující hřídele, jak je ukázáno na obr. 6-12. V tomto případě dochází k jakési deformaci tvaru obou křivek, které nejsou dále již nikterak porovnatelné. Pro určení křivek byla vyzkoušena celá řada způsobů, nicméně nejvhodnější se ukázal výše uvedený způsob, který je popsán v souvislosti s obr. 6-3. Jak také bylo zmíněno, je potřeba, aby byl u obou snímačů kontakt buzen ve stejné frekvenční oblasti a to s podobnými hodnotami amplitudy, což při kontaktu hřídel/ucpávka nemusí být splněno (viz dále). Z těchto a dalších důvodů bylo tedy na rotorovém stendu přistoupeno k návrhu metod pro lokalizaci částečného rubbingu pouze v oblasti časové.



obr. 6-10: Spektrogram rázu, kontakt 18 cm od *ch06*, hřídel bez disku při 0 ot./min



obr. 6-11: Spektrogram rázu, kontakt 12 cm od *ch06*, hřídel bez disku při 0 ot./min

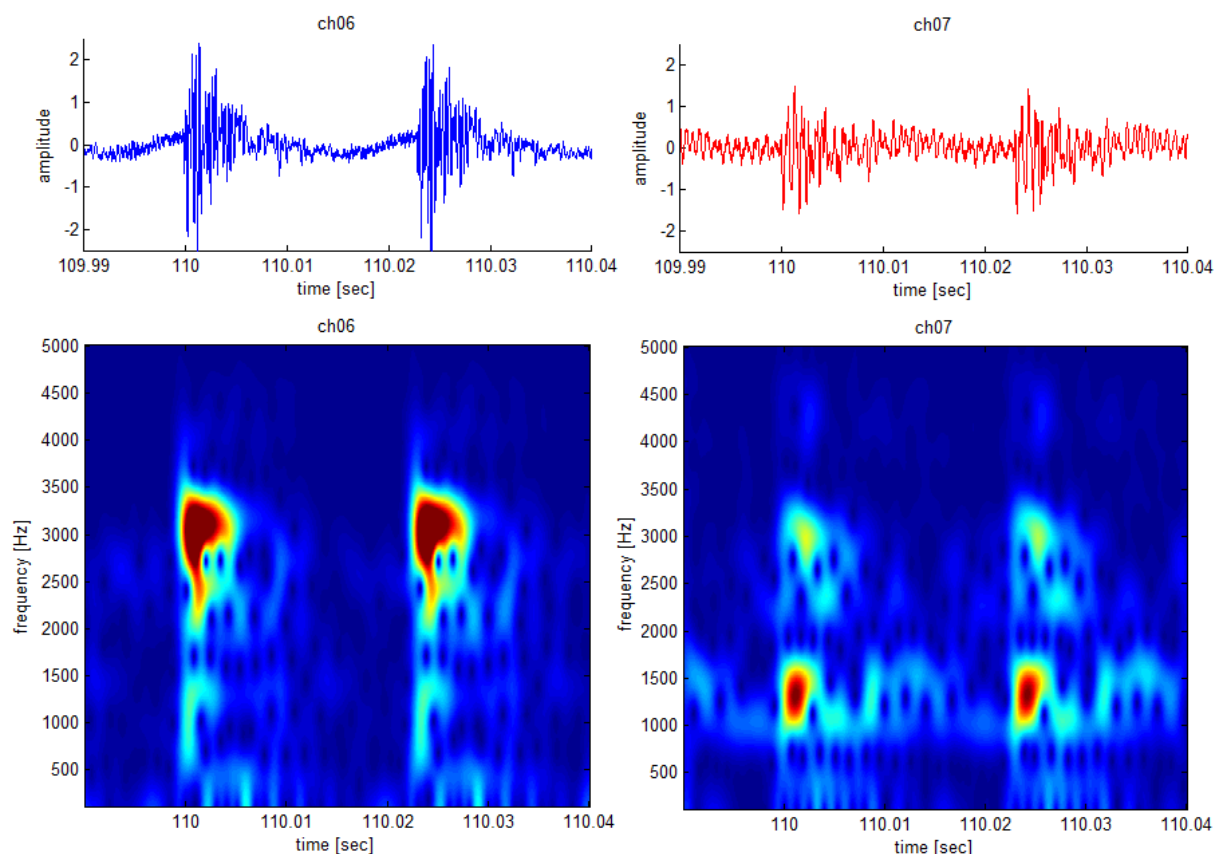


obr. 6-12: Spektrogram rázu, kontakt 18 cm od *ch06*, hřídel bez disku při 2000 ot./min

6.2 Analýza dat a lokalizace místa kontaktu hřídel/teflonová ucpávka

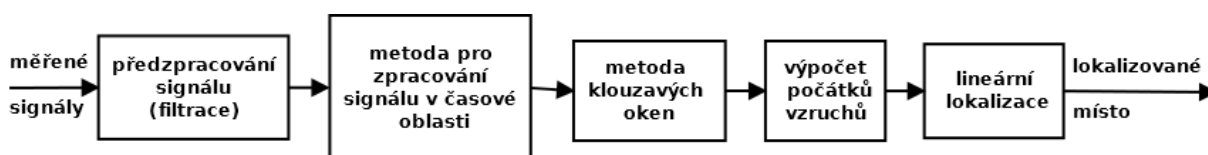
Jak bylo již zmíněno v úvodu této kapitoly, řada experimentů realizovaných na rotorovém stendu by měla vést k návrhu lokalizační metody místa kontaktu hřídel/ucpávka, což je jeden z hlavních cílů této práce. V této podkapitole je provedena analýza signálů získaných při experimentech s teflonovou ucpávkou, které byly popsány v části 5.3. Na základě této analýzy by měla být dále navržena lokalizační metoda.

Na obr. 6-13 jsou zobrazeny časové signály absolutních snímačů a jím příslušné amplitudové spektrogramy získané aproximací spojitě Gaborovy transformace pro kontakt rotující hřídele s teflonovou ucpávkou. Při tomto experimentu docházelo ke kontaktu jednou za otáčku, přičemž frekvence otáčení hřídele byla přibližně 43 Hz. Teflonová ucpávka byla umístěna ve vzdálenosti 14,7 cm od snímače *ch06*. Z časových signálů obou snímačů je patrné, že v případě kontaktu hřídel/ucpávka dojde k výrazné změně měřeného signálu a to především k nárůstu amplitudy. Navíc u snímače *ch07*, který má v přenosové cestě od místa kontaktu umístěn disk, nedochází k tak výraznému útlumu rázu, jako v případě silných poklepů realizovaných kovovým klíčem (viz analýza 6.1). Z dostupných dat obsahující rázy, realizovaných poklepy či některou z ucpávek, bylo pozorováno, že útlum rázu způsobený diskem umístěným v přenosové cestě k jednomu ze snímačů je výraznější při silnějších rázech. Proto v případě slabších rázů hřídel/ucpávka (v porovnání s rázy od poklepů) je v řadě případů amplituda u obou snímačů podobná (viz dále). Navíc při některých experimentech jsou amplitudy rázů na snímači za diskem dokonce větší, což může být také způsobeno např. odlišnou vrstvou vosku použitého pro upevnění snímačů na ložiskové stojany, který má bez pochyby tlumící účinek. Přístup návrhu metod pro lokalizaci není v této práci založen na útlumu amplitudy vzruchu způsobeného šířením vlnění na odlišné vzdálenosti k jednotlivým snímačům, a proto není vždy amplituda událostí předmětem dalšího zkoumání. Pro přístup používaný v této práci (popsán v kapitole 3) je spíše rozhodující, zda je projev rubbingu pozorovatelný v časových signálech nebo jestli má být tedy v opačném případě přistoupeno k časo-frekvenčnímu zpracování signálu. V předchozí podkapitole bylo ukázáno, že i v případě rotující hřídele s diskem je možné pozorovat změnu časového posuvu dospění vzruchu ke snímačům při změně místa poklepu. Lze tedy předpokládat, že časový posuv dospění rázu ke snímačům, vzniklý kontaktem hřídel/ucpávka, bude také závislý na umístění ucpávky. Dále si všimněme, že je na obě ložiska přenášen základní tvar kmitu hřídele, viz časové signály na obr. 6-13. Tyto projevy nejsou z hlediska lokalizace rubbingu nikterak významné, a proto by měly být při lokalizaci vyfiltrovány. Širokopásmová vybuzení způsobená kontaktem hřídel/teflonová ucpávka jsou ve spektrogramech pozorovatelná přibližně ve frekvenčním pásmu 500 – 4000 Hz. Dále je zřejmé, že u obou snímačů nedochází k silnějšímu vybuzení ve stejné frekvenční oblasti. V případě snímače *ch06* resp. *ch07* k tomu dochází ve frekvenčním pásmu 2100 – 3500 Hz resp. 1000 – 1700 Hz. To je jeden z důvodů, proč způsob lokalizace v časo-frekvenční oblasti popsáný v souvislosti např. s obr. 6-3 nebo obr. 6-11 není na rotor-stendu používán a je pro lokalizaci zvolena pouze oblast časová.



obr. 6-13: Časový signál a spektrogram pro kontakt s teflonovou ucpávkou

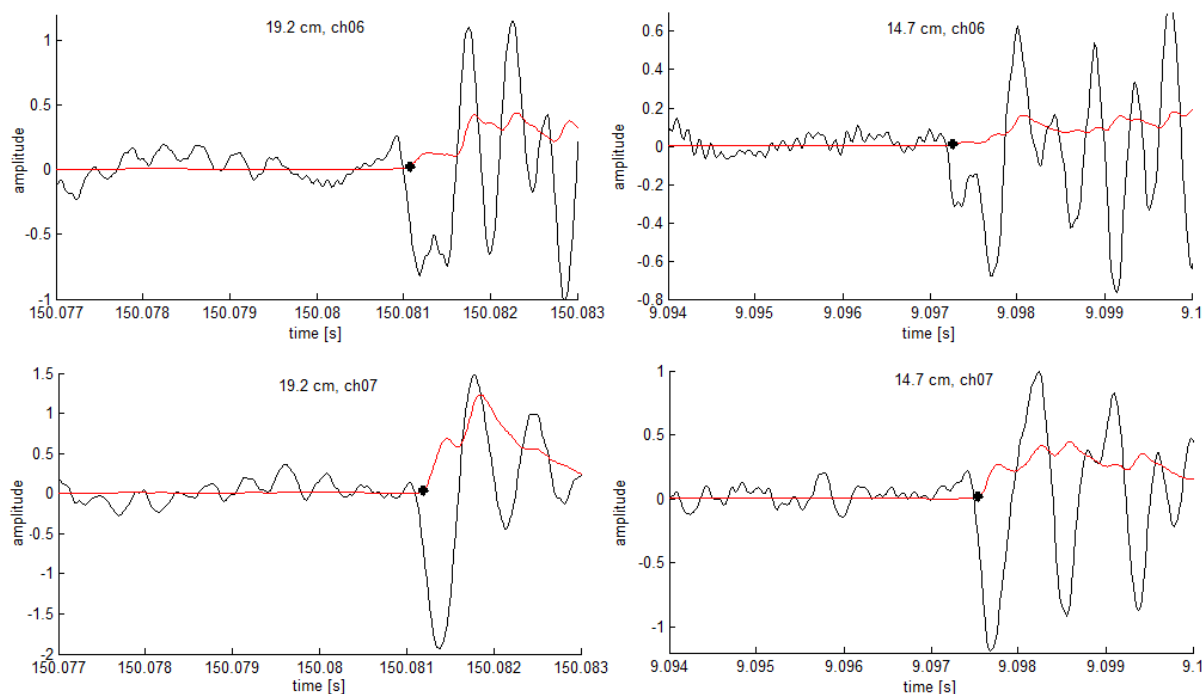
Dále je uveden návrh algoritmu pro automatickou lokalizaci místa kontaktu hřídel/ucpávka pomocí nástrojů pro zpracování signálů popsaných v kapitole 4. Obecné schéma metody je ukázáno na obr. 6-14. Prvním krokem je filtrace vstupního signálu. Odfiltrovány mohou být například složky signálu, které nejsou nikterak významné z hlediska rubbingu (projev základního kmitu hřídele, viz obr. 6-13) popř. může být signál filtrován pro určité frekvenční pásmo apod. K filtraci lze použít například sinc filtr popsaný v části 4.2.2. Jelikož je projev kontaktu hřídel/ucpávka poměrně dobře viditelný v časových signálech, je vhodné v dalším kroku návrhu algoritmu použít některou z metod pro zpracování signálů v časové oblasti (viz 4.1), jako je například rekurzivní výpočet k -tého centrálního momentu nebo výpočet obálky signálu atd. Dalším bodem návrhu je použití metody dvou klouzavých oken (viz 4.4.1) na veličinu získanou v předchozím kroku algoritmu. Poté jednotlivá maxima veličiny získané metodou klouzavých oken představují detekované počátky vzruchů. Po stanovení časů těchto maxim lze nakonec přistoupit k výpočtu pravděpodobného místa kontaktu hřídel/ucpávka pomocí lineární lokalizace (viz 3.2).



obr. 6-14: Schéma návrhu metody pro automatickou lokalizaci místa rubbingu

Při experimentech s teflonovou ucpávkou byla získána celá řada naměřených dat, při kterých se pozice ucpávky nejčastěji pohybovala v rozmezí 14,7 až 19,2 cm od jednoho ze snímačů. Dále bude použit předchozí návrh metody pro automatickou lokalizaci místa kontaktu na některá z naměřených dat. Použijme data získaná při experimentech 12. a 16. 8.

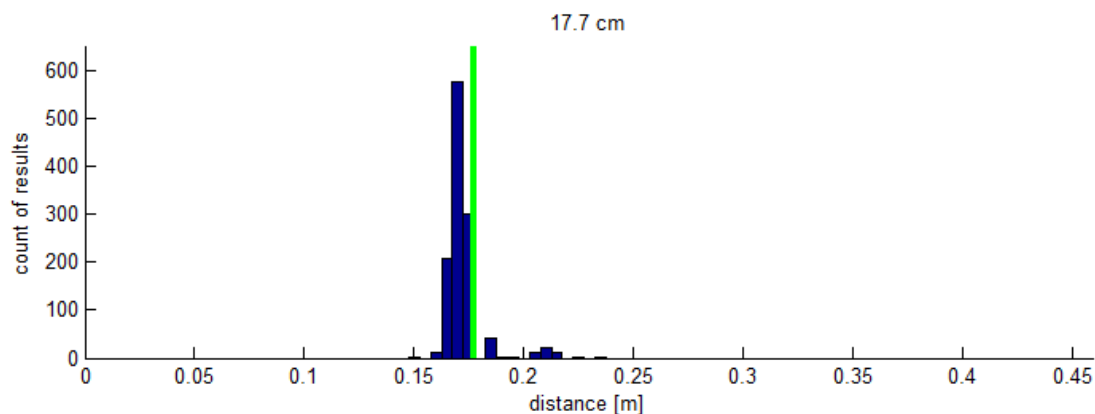
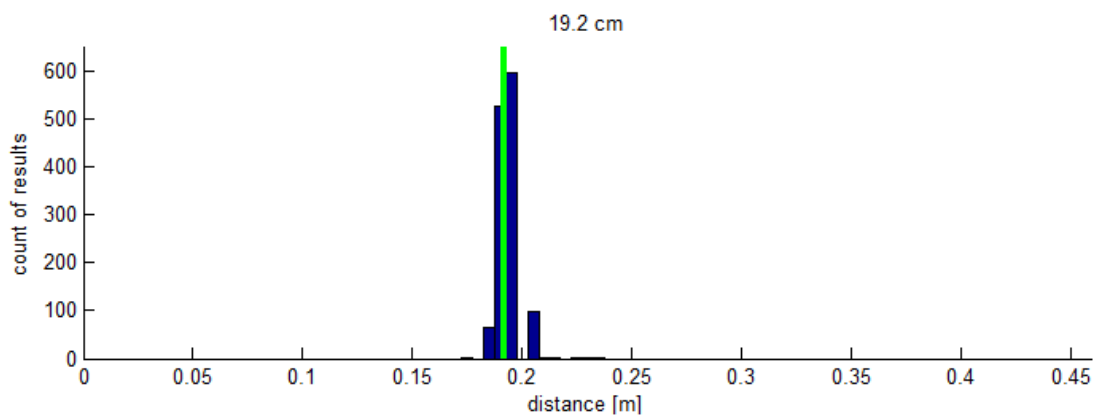
2013 pro umístění ucpávky ve vzdálenosti 19,2, 17,7, 16,2 a 14,7 cm od snímače *ch06*. Při těchto experimentech vznikl při určité frekvenci otáčení periodický kontakt hřídel/ucpávka jednou za otáčku, přičemž změna průběhu signálu způsobená kontaktem byla v časových signálech výrazná - amplitudově dominantní. Tento kontakt vznikl pro vzdálenost 19,2 resp. 17,7 cm přibližně při 2500 resp. 2300 ot./min. Pro vzdálenost 16,2 resp. 14,7 vznikl při 2460 resp. 2435 ot./min. Pro lokalizaci místa kontaktu použijme na tyto úseky dat (30 sec.) následující metodu. Nejprve je pomocí sinc filtru odfiltrován projev základního tvaru kmitu hřídele přenášený na ložiska stendu, tj. frekvenční pásmo 0 – 100 Hz. V okamžiku vzniku rázu resp. dospění vzruchu způsobeného kontaktem hřídel/ucpávka ke snímači dochází k výraznému rozkmitání měřeného signálu. Tento okamžik lze charakterizovat nárůstem variance (rozptylu) měřeného signálu, a proto je na filtrovaný signál dále použita rekurzivní metoda pro odhad druhého centrálního momentu, popsána v 4.1.1. Časová konstanta filtru byla zvolena 0,5 ms. Dalším krokem bylo použití metody klouzavých oken na průběh odhadu variance signálu. Matematická operace, prováděná v jednotlivých oknech, byla podle vztahu (4.23), tedy výpočet střední hodnoty z absolutní hodnoty signálu. Délka okna byla zvolena přibližně 0,8 ms. Nakonec byly určeny časy jednotlivých maxim veličiny získané metodou klouzavých oken, které představují detekované počátky dospění rázů ke snímačům. Časová konstanta filtru metody pro odhad variance a délka okna metody klouzavých oken byla stanovena experimentálně. Jelikož nebyla k dispozici žádná data spolu s informací o přesném počátku rázu, nebylo možné mezi sebou porovnávat přesnost detekce počátků jednotlivých metod popř. jedné metody s více nastaveními. Pro stanovení vhodných parametrů metody (časová konstanta, délka okna) byla použita tzv. citlivostní analýza, která spočívala ve výpočtu rychlostí šíření vzruchu z určitého úseku dat obsahujícího rázu a to pro různá nastavení dané metody. Čím menší byl rozptyl výsledných rychlostí, tím byly dané parametry metody považovány za vhodnější.



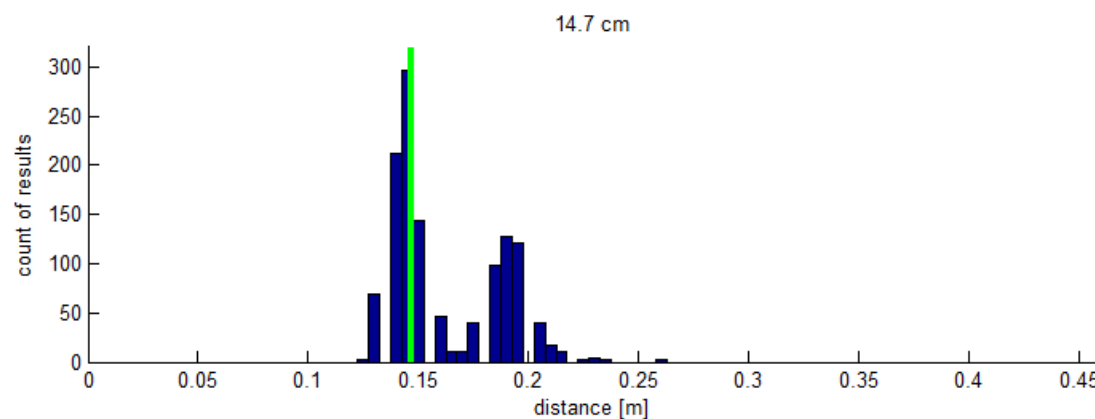
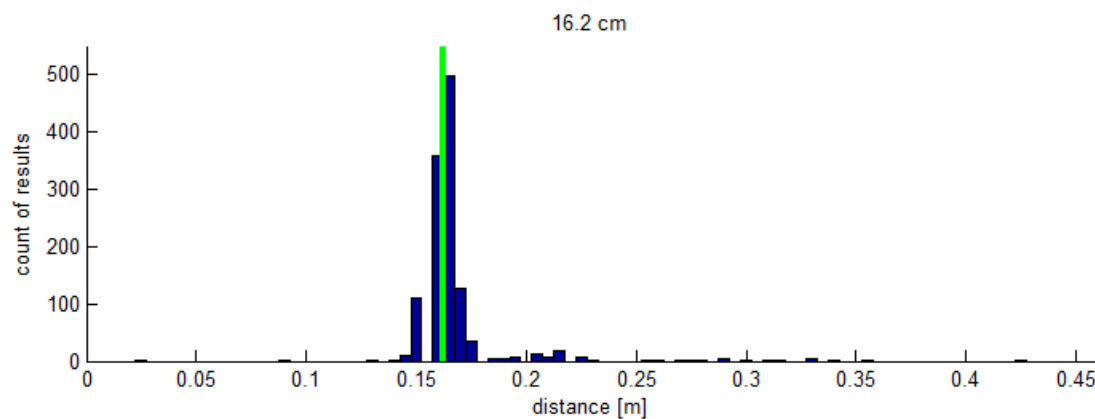
obr. 6-15: Detekované počátky rázu, kontakt hřídel/teflonová ucpávka

Na obr. 6-15 jsou zobrazeny časové průběhy obou snímačů pro kontakt rotující hřídele s teflonovou ucpávkou pro vzdálenost 19,2 a 14,7 cm. Dále jsou pak zobrazeny průběhy odhadu variance spolu s detekovanými počátky rázů, které byly získány výše popsanou

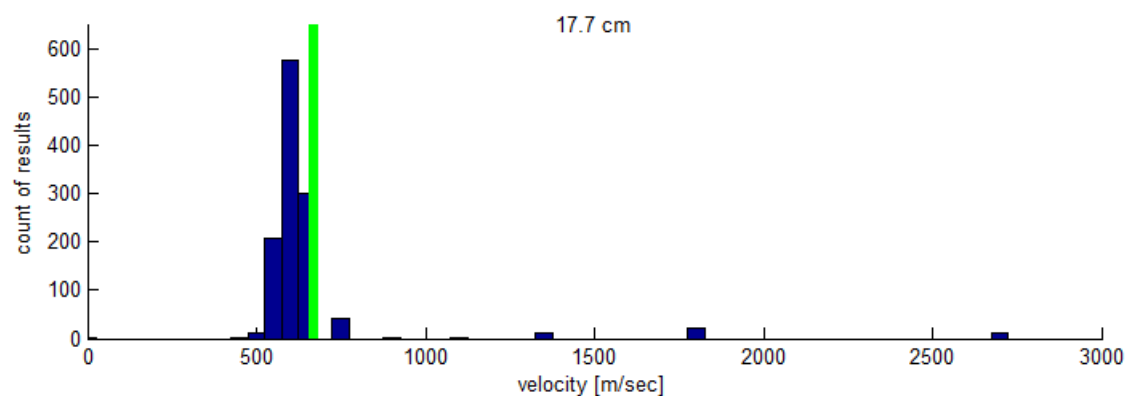
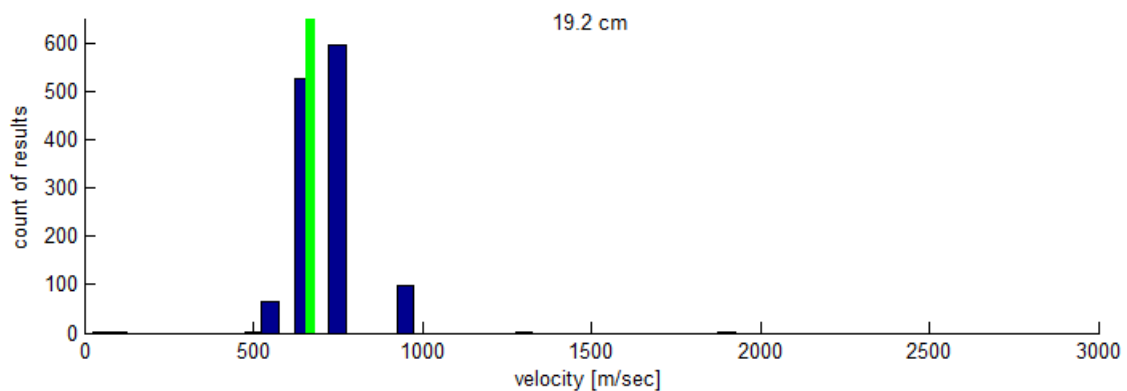
metodou. Z obr. 6-15 je patrné, že v případě výraznější změny signálu (nárůstu amplitudy) dojde k detekování počátku rázu. Analogické výsledky byly získány i pro zbylé dvě vzdálenosti (17,7 a 16,2 cm). Z jednotlivých počátků rázů detekovaných na snímači *ch06* a *ch07* bylo dále pro danou pozici ucpávky vypočítáno pravděpodobné místo kontaktu a to pomocí vztahu (3.2). Pro výpočet je ovšem potřeba znát rychlost šíření vzruchu vzniklého kontaktem hřídel/teflonová ucpávka. Rychlost šíření tohoto projevu byla experimentálně stanovena 670 m/sec. Jak uvádí [3] a bylo již zmíněno v rámci kapitoly 3, každá metoda filtruje původní signál a tedy i rychlosti šíření vzruchů vypočítané z tohoto signálu se mohou při použití jiných popř. jinak nastavených metod lišit. Z detekovaných počátků rázů na obou snímačích a za použití rychlosti šíření 670 m/sec byly vypočítány jednotlivé vzdálenosti pro danou polohu ucpávky, které byly dále zobrazeny ve formě histogramu. Na obr. 6-16 je zobrazen histogram vypočítaných vzdáleností pro polohu ucpávky 19,2 a 17,7 cm. Na obr. 6-17 jsou histogramy zobrazeny pro polohu 16,2 a 14,7 cm. Vzdálenost 0 cm resp. 45,9cm představuje umístění snímače *ch06* resp. *ch07*. Zároveň je v jednotlivých grafech zeleně zobrazena skutečná poloha středu teflonové ucpávky. Jelikož je v těchto datech snahou rozpoznat malé změny polohy ucpávky (1,5 cm), byla šířka sloupců histogramu zvolena 0,5 cm. V případě umístění středu ucpávky ve vzdálenosti 19,2 cm má histogram nejvíce výsledků pro vzdálenost 19,5 a 19 cm. Pro polohu 17,7 cm je maximum histogramu v bodě 17 cm. Pro umístění ucpávky ve vzdálenosti 16,2 cm jsou nejčtenější vypočítané vzdálenosti 16,5 a 16 cm. Pro polohu ucpávky 14,7 cm nejsou výsledné vzdálenosti zcela tak koncentrované jako v předchozích případech, nicméně maximum histogramu je zřetelné v bodě 14,5 cm. Největší odchylka lokalizovaného místa kontaktu od skutečné polohy středu ucpávky tedy nastává pro vzdálenost 17,7 cm. Nicméně je zřejmé, že výsledky získané výše popsanou metodou použitou na tato data, při kterých vznikl periodický kontakt jednou za otáčku s výraznou změnou amplitudy v případě kontaktu, lze považovat za velmi přesné, navíc zmíníme-li skutečnost, že šířka teflonové ucpávky je 3 cm. Nakonec byly s využitím detekovaných počátků vzruchů na obou snímačích spolu se znalostí přesného místa kontaktu hřídel/ucpávka vypočítány jednotlivé rychlosti šíření vlnění, které byly pro jednotlivé pozice ucpávky opět zobrazeny ve formě histogramů. Tyto histogramy jsou zobrazeny na obr. 6-18 a obr. 6-19. Zároveň je zeleně zobrazena použitá rychlost při lokalizaci, tj. 670 m/sec. Šířka sloupců histogramů je 50 m/sec. Z obr. 6-18 a obr. 6-19 je zřejmé, že se získané rychlosti šíření pro jednotlivé vzdálenosti skutečně nejvíce pohybují kolem hodnoty 670 m/sec.



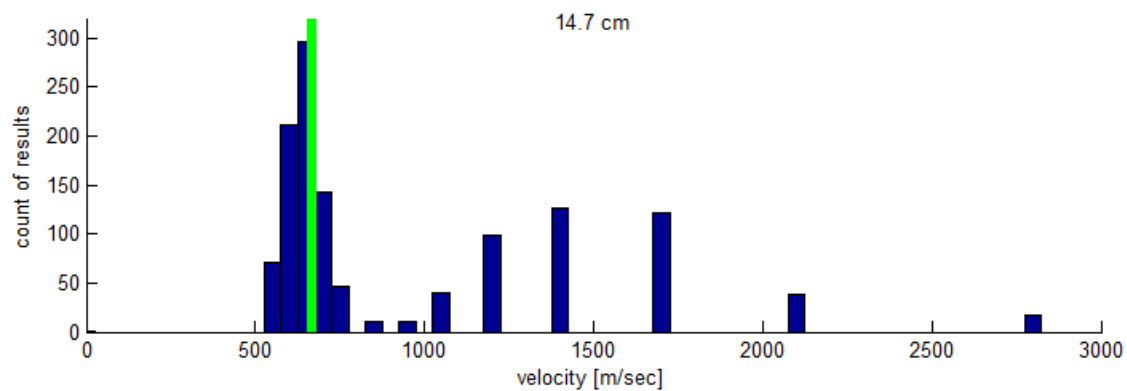
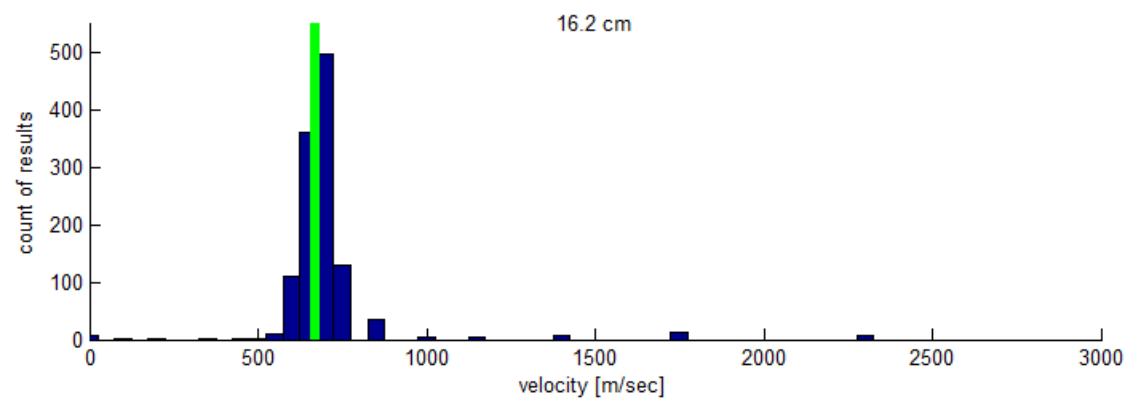
obr. 6-16: Histogram vypočítaných vzdáleností, ucpávka 19,2 resp. 17,7 cm



obr. 6-17: Histogram vypočítaných vzdáleností, ucpávka 16,2 resp. 14,7 cm

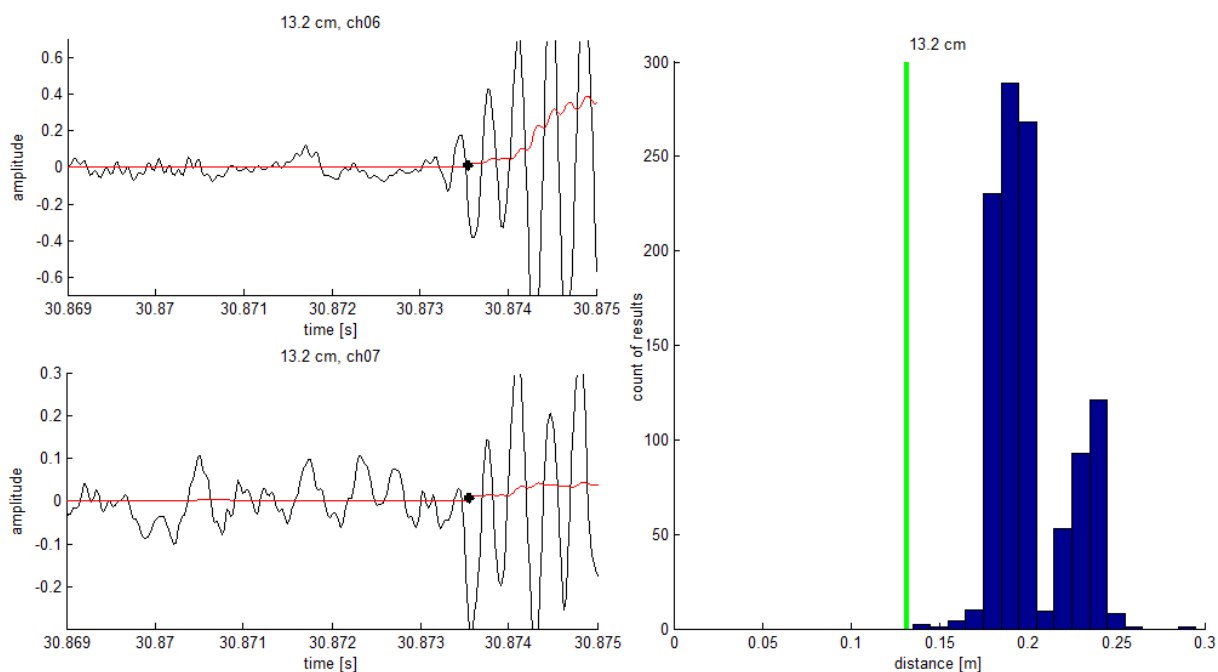


obr. 6-18: Histogram vypočítaných rychlostí, ucpávka 19,2 resp. 17,7 cm

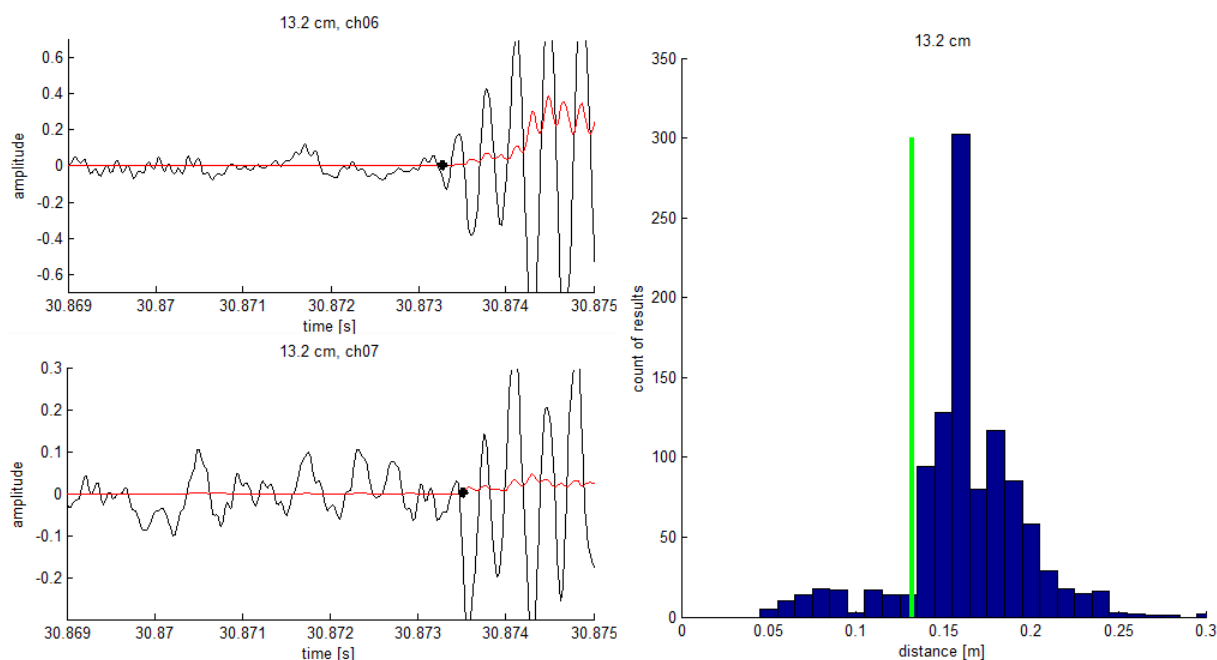
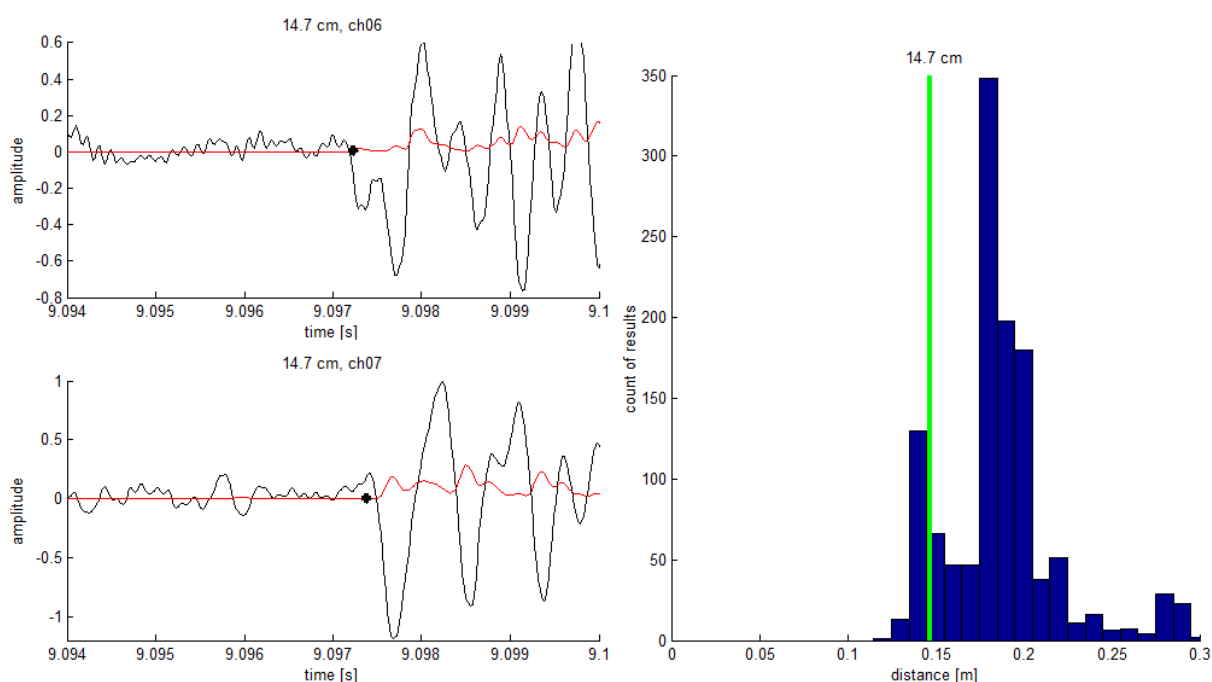


obr. 6-19: Histogram vypočítaných rychlostí, ucpávka 16,2 resp. 14,7 cm

Při jednotlivých experimentech s teflonovou ucpávkou byla zjištěna následující skutečnost. Výše navržená metoda pro lokalizaci rubbingu není zcela univerzální metodou, která by byla schopna v jakémkoliv případě (navíc s tak vysokou přesností uvedenou výše) lokalizovat místo kontaktu hřídel/ucpávka. Problém může například nastat, když počáteční změna průběhu signálu souvisejícího se vznikem kontaktu (rozkmit signálu, nárůst amplitudy) není tak výrazná (jako na obr. 6-15) popř. je silně zašuměná nebo také v případě, kdy dochází k velmi četnému neperiodickému kontaktu. V těchto případech může být lokalizováno místo kontaktu hřídel/ucpávka nepřesně nebo dokonce může dojít k detekování počátku rázu dříve u snímače vzdálenějšího od místa kontaktu – tzv. porušení kauzality. Navíc nelze nikterak stanovit chybu detekce počátků rázu vedoucí k nepřesné lokalizaci, neboť přesný počátek dospění vzruchu ke snímačům není znám. Celý problém bude ukázán na následujících datech naměřených 16. 8. 2013. Při tomto experimentu byla teflonová ucpávka umístěna ve vzdálenosti 13,2 cm od snímače *ch06*, přičemž při frekvenci otáčení hřídele 37 Hz docházelo ke kontaktu jednou za otáčku. Na obr. 6-20 vlevo je zobrazen časový průběh rázu pro oba snímače spolu s detekovanými počátky, které byly získány stejnou metodou (se stejnými parametry), jako v předchozím případě. Z detekovaných počátků rázů spolu s použitou rychlostí pro lokalizaci 670 m/sec byly vypočítány jednotlivé vzdálenosti, které byly zobrazeny opět ve formě histogramu (viz pravá část obr. 6-20). Jak je z výsledků patrné, v tomto případě dochází k nepřesné lokalizaci místa kontaktu hřídel/ucpávka přibližně s chybou 6 cm. To je způsobeno tím, že detekované časové posuvy dospění rázů ke snímačům jsou pro tuto polohu ucpávky poměrně malé. Ačkoliv neznáme přesné počátky rázů, pravděpodobně je nepřesná lokalizace v tomto případě způsobena především chybnou detekcí počátků vzruchů u snímače *ch06*. Z průběhu časového signálu se lze domnívat, že počátek rázu u snímače *ch06* je ve skutečnosti dříve než ten, který byl detekován metodou (viz obr. 6-20). Jelikož prvotní změna signálu související s dospěním vzruchu ke snímači *ch06* není tak výrazná, jako například na obr. 6-15, nedošlo proto k výraznějšímu nárůstu odhadu variance a následnému detekování.



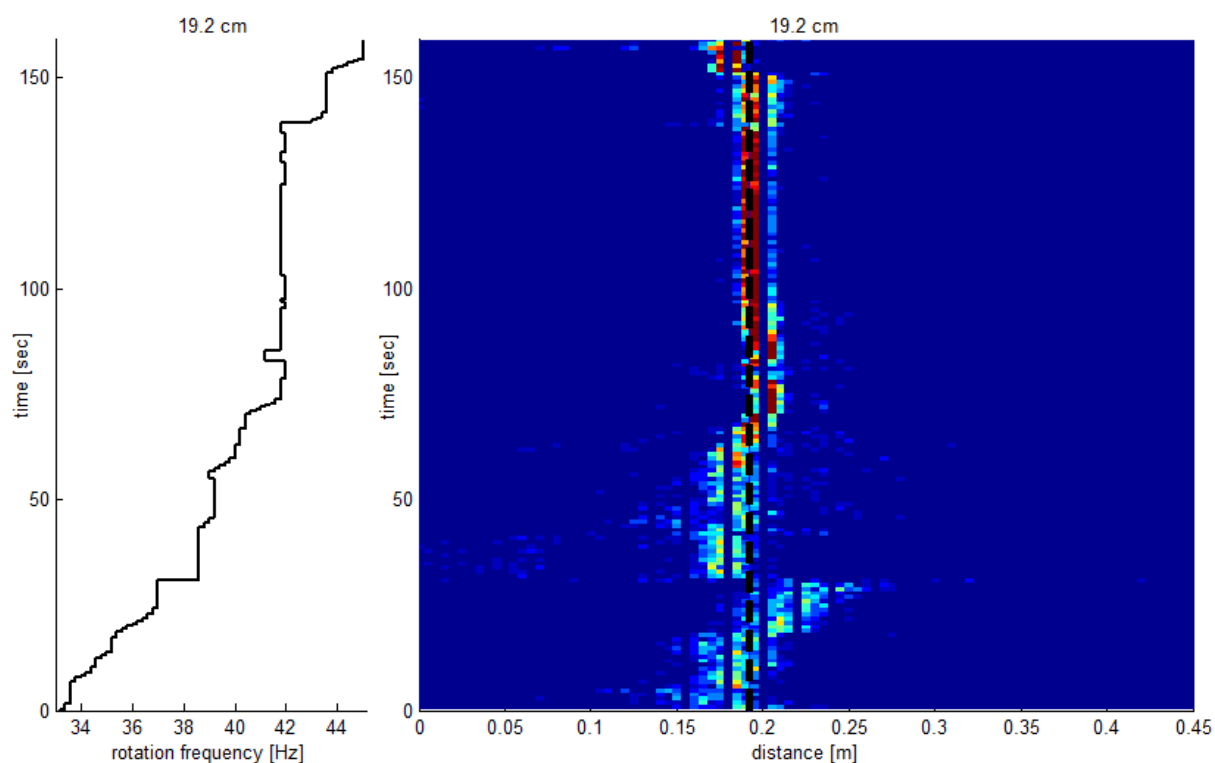
obr. 6-20: Časové signály a histogram vypočítaných vzdáleností pro $\tau = 0,5 \text{ ms}$

obr. 6-21: Časové signály a histogram vypočítaných vzdáleností pro $\tau = 0,1 \text{ ms}$ obr. 6-22: Lokalizace místa rubbingu při změně časové konstanty τ pro 14,7 cm

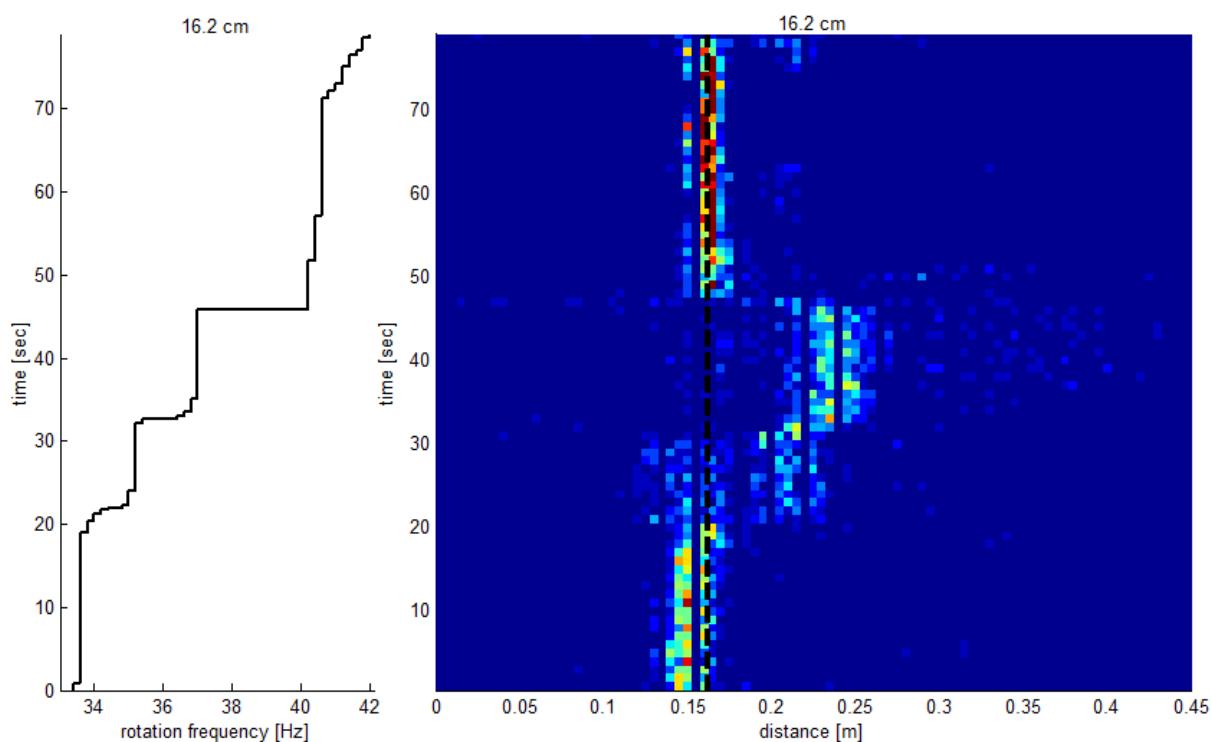
Nabízí se tedy otázka, zda by pouze případnou změnou parametrů metody (délka okna, časová konstanta filtru apod.) mohla být dosažena přesnější lokalizace i pro tento případ. Na obr. 6-21 je zobrazen výsledek lokalizace při změně časové konstanty filtru τ při výpočtu odhadu variance z 0,5 ms na 0,1 ms. Při snížení časové konstanty filtru bude výsledný průběh odhadu variance méně vyhlazený, tedy můžou být zachyceny i kratší a rychlejší změny signálu. V případě použití časové konstanty filtru $\tau = 0,1 \text{ ms}$ došlo u snímače *ch06* k detekování počátků vzruchů dříve než v případě $\tau = 0,5 \text{ ms}$ (viz časové signály obr. 6-20 a obr. 6-21), což vedlo k zvětšení časových posuvů dospění vzruchů ke snímačům. Z výsledného histogramu vzdáleností je pak zřejmé, že došlo k zpřesnění lokalizace a tedy ke snížení chyby z 6 na 3 cm. Nicméně při použití takto přenastavené metody například na data,

ve kterých lokalizace pro původní nastavení vycházela prakticky přesně (viz obr. 6-16, obr. 6-17), může naopak dojít ke zhoršení lokalizace místa kontaktu. Tato situace je ukázána na obr. 6-22 pro umístění ucpávky 14,7 cm. Porovnáním detekovaných počátků rázů v časových signálech na obr. 6-15 a obr. 6-22 je zřejmé, že v případě změny časové konstanty filtru τ dochází k detekování jiných počátků a to především na snímači *ch07*. Výsledkem toho je lokalizace přibližně s chybou 3 cm, přičemž pro původní nastavení časové konstanty $\tau = 0,5 \text{ ms}$ vycházela lokalizace na správné místo. Bylo tedy zmíněno a ukázáno, že navržená metoda není zcela univerzální metodou (při daném nastavení) pro lokalizaci místa kontaktu hřídel/ucpávka pro jakékoliv (vstupní) signály obsahující projevy kontaktu, přičemž ani změnou parametrů toho nelze docílit. Přesto lze výsledky získané touto metodou (viz výše resp. dále) považovat za velmi dobré.

Jak bylo ukázáno, projev kontaktu v měřeném signále byl pro vzdálenost 13,2 cm jiný, než pro zbylé vzdálenosti (19,2 – 14,7 cm) měřené při určitých otáčkách, což dále vedlo k nepřesné lokalizaci. Změna měřeného signálu obsahující projevy kontaktu nemusí být nutně spojena pouze se změnou polohy ucpávky, ale především změnou frekvence otáčení hřídele, při které kontakt vzniká. Navíc nemusí přímo dojít ke změně typu kontaktu (1X, 1/2X apod.). Dále je ukázán výsledek lokalizace kontaktu hřídel/ucpávka při různé frekvenci otáčení pro vzdálenost 19,2 a 16,2 cm. Pomocí stejné metody pro lokalizaci kontaktu hřídel/ucpávka, použitou pro vzdálenosti 19,2 – 14,7 cm, byla vždy zpracována jedna vteřina měřeného signálu, přičemž výsledkem byl opět histogram vypočítaných vzdáleností. Výsledné histogramy jsou pro jednotlivé časové úseky (vteřiny) zobrazeny v pravé části obr. 6-23 resp. obr. 6-24. Osa *x* představuje vzdálenost, osa *y* čas a pomocí barevné škály je zachycena četnost jednotlivých histogramů. Zároveň je černou přerušovanou čarou zobrazena skutečná poloha středu ucpávky. V levé části obou obrázků je pak zobrazen odpovídající vývoj frekvence otáčení hřídele v závislosti na čase. V případě silnějšího kontaktu pro umístění ucpávky ve vzdálenosti 19,2 cm, tj. přibližně časový okamžik 65 – 159 sec, jsou výsledné histogramy poměrně koncentrované a to kolem správné hodnoty. Naopak v případě slabšího kontaktu, tj. přibližně 0 – 18 sec resp. 30 - 65 sec, není výsledná lokalizace zcela tak koncentrovaná, dokonce pro časový okamžik 18 - 30 sec lokalizace vychází značně nepřesně. Analogicky pro vzdálenost ucpávky 16,2 cm, v případě kontaktu při frekvenci otáčení 33,6 Hz resp. 40,6 – 41,8 Hz odpovídající časovému okamžiku 0 – 20 sec resp. 48 – 79 sec dochází k poměrně velmi přesné lokalizaci. Naopak v případě kontaktu při frekvenci 35,2 a 37 Hz (tj. 20 – 48 sec), kdy počáteční změna signálu souvisejícího se vznikem události nebyla tak výrazná (podobně jako pro 13,2 cm), nedochází k lokalizování místa kontaktu hřídel/ucpávka. Bylo tedy ukázáno, že při různých otáčkách rotující hřídele, při kterých vzniká kontakt, může dojít k přesné či méně přesné lokalizaci, dokonce se nemusí při určitých otáčkách lokalizace vůbec podařit. Nicméně je patrné, že navržená metoda pro lokalizaci místa rubbingu hřídel/ucpávka je úspěšná i pro kontakt vznikající při různé frekvenci otáčení. Výsledný histogram získaný součtem jednotlivých histogramů měl v obou případech své maximum na skutečné pozici kontaktu. Dále si všimněme, že při různé frekvenci otáčení může být výsledná lokalizace lehce odlišná, ačkoliv se pohybuje kolem očekávané hodnoty. To může být například způsobeno změnou místa kontaktu v ucpávce, neboť její šířka je 3 cm, popř. může docházet k detekování trochu jiných počátků vzruchů než je to mu na jiné frekvenci. Uvědomme si, že chybná detekce počátků rázů u snímačů například o 3 vzorky (se vzorkovací frekvencí 51200 Hz, tedy 59 μs) při použité rychlosti 670 m/s zapříčiní chybu lokalizace 2 cm. Proto je mimo jiné lokalizace na tak krátké hřídeli poměrně složitým problémem.



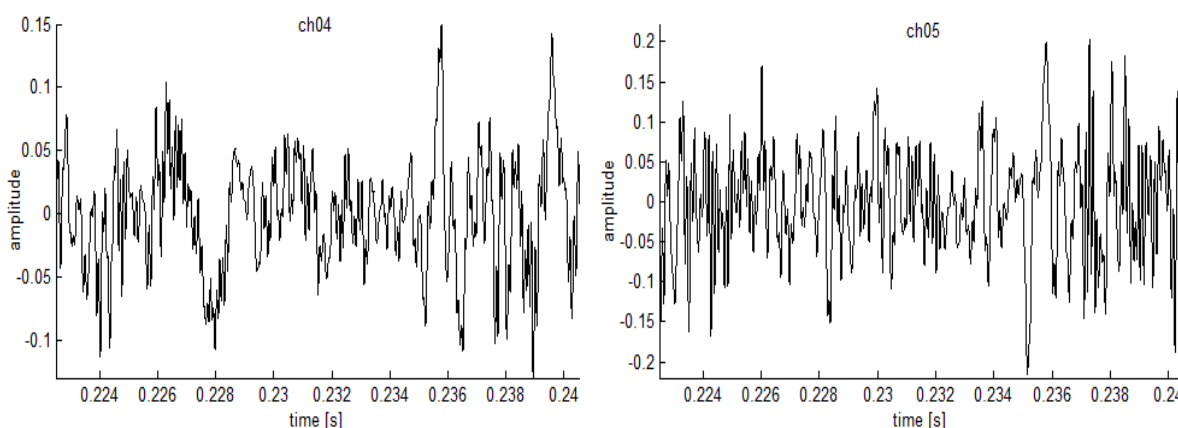
obr. 6-23: Vývoj lokalizace při různé frekvenci otáčení hřídele, kontakt 19,2 cm



obr. 6-24: Vývoj lokalizace při různé frekvenci otáčení hřídele, kontakt 16,2 cm

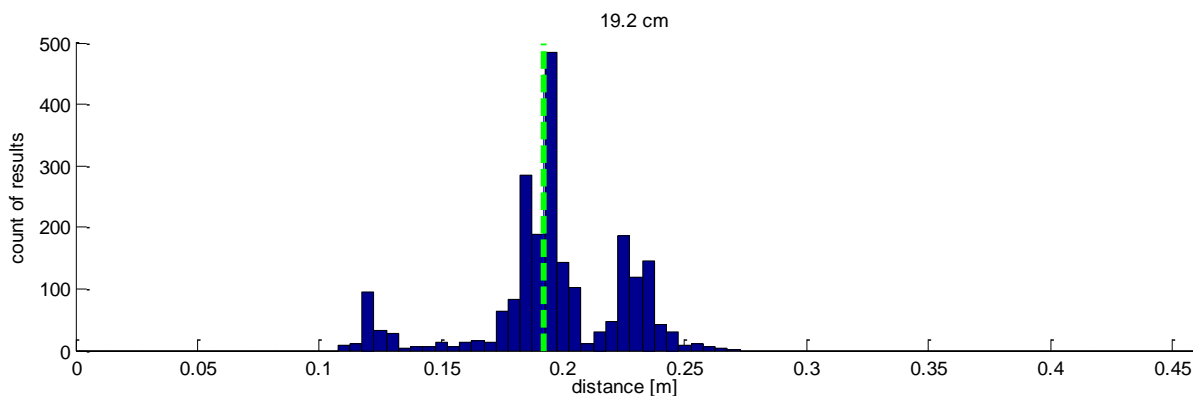
Na závěr této podkapitoly budou ukázány výsledky lokalizace pro více pozic umístění teflonové ucpávky. Jedná se o soubor dat naměřený 6. - 7. 6. 2013, kdy byla postupně měněna pozice ucpávky v rozmezí 19,2 – 7,2 cm vzhledem k snímači *ch04*, viz 5.3. Pro danou vzdálenost ucpávky bylo naměřeno několik časových úseků (v řádu desítek vteřin) pro různé frekvence otáčení hřídele, při kterých vznikl kontakt. Pro lokalizaci místa rubbingu hřídel/ucpávka byla použita stejná metoda jako doposud a to se stejnou rychlostí šíření

vzruchu 670 m/sec. Časová konstanta filtru metody pro výpočet rekurzivního odhadu variance a délka okna metody klouzavých oken byla v obou případech zvolena 0,5 ms. Předzpracování vstupního signálu v podobě filtrace bylo provedeno pro frekvenční pásmo 100 Hz – 10 kHz. V případě umístění ucpávky blíže ke středu hřídele – blíže k disku s nevývažkem (např. 19,2 cm), kde je výkmit největší, byl kontakt buzen pro více frekvencí otáčení, než pro pozice ucpávky výrazněji vzdálených od středu hřídele, tedy blízkých k jednomu z ložisek (např. 7,2 cm). Dále pak v tomto případě byla pro lokalizaci místa rubbingu použita data naměřená spíše při „vyšších“ frekvencích otáčení hřídele, při kterých vznikal výraznější kontakt. Na následujícím obrázku je zobrazen časový signál rázu, vzniklého právě při „nižší“ frekvenci otáčení (2100 ot./min), pro umístění ucpávky 19,2 cm. Přibližně v časovém okamžiku 0,234 – 0,237 sec dojde na obou snímačích ke vzniku události. Nicméně je zřejmé, že detekování počátků vzruchů pomocí této metody, na tak nevýrazných rázech, je prakticky nemožné.

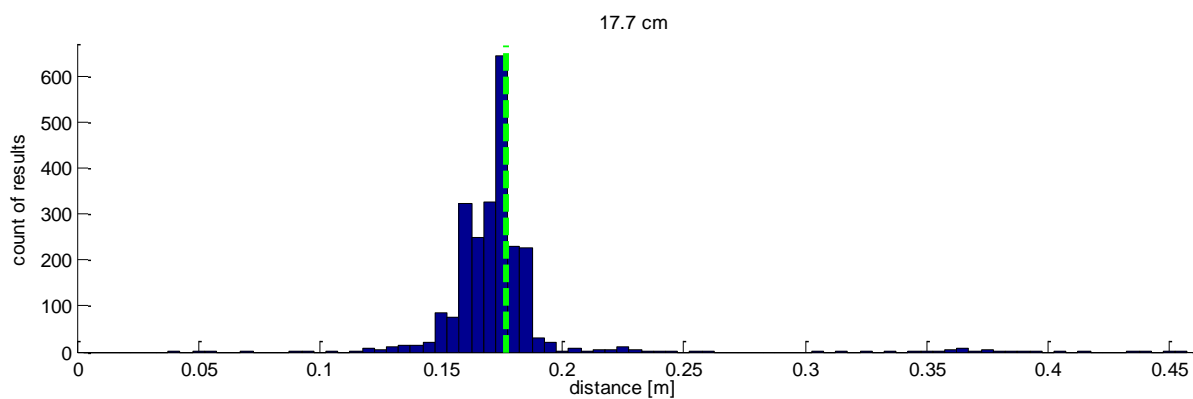


obr. 6-25: Časové signály amplitudově nevýrazného rázu

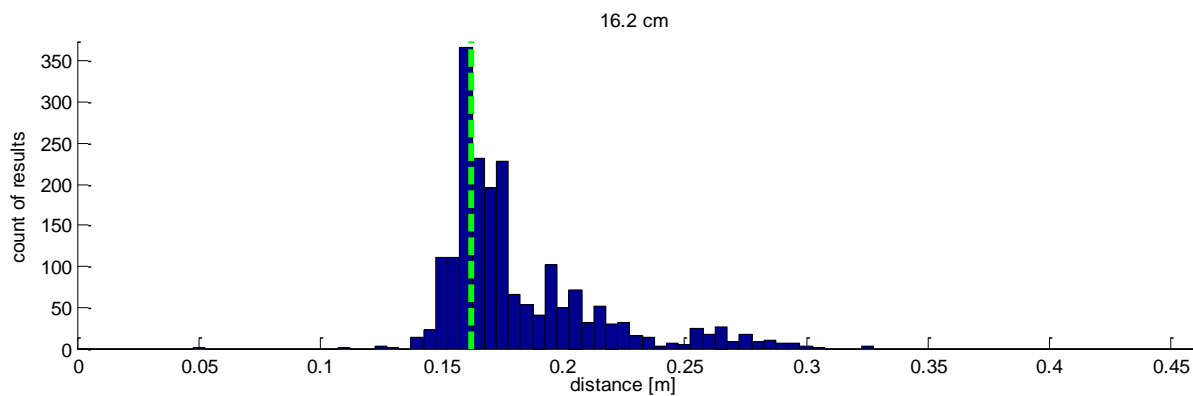
Navrženou metodou byl pokaždé zpracován dvacetivteřinový úsek dat naměřený při určité frekvenci otáčení hřídele. Pro osm různých pozic umístění teflonové ucpávky jsou na obr. 6-26 až obr. 6-33 zobrazeny výsledné histogramy vypočítaných vzdáleností. Šířka sloupců histogramů byla zvolena 5 mm. Vzdálenost 0 resp. 0,459 m představuje pozice ložisek, tedy umístění snímače *ch04* resp. *ch05*. Zároveň je v jednotlivých obrázcích označena zelenou přerušovanou čarou skutečná poloha středu teflonové ucpávky. Z výsledků je patrné, že pro pozice ucpávky 19,2, 17,7, 16,2 a 13,2 cm jsou maxima histogramů téměř totožná se skutečnou polohou. Dále pak v případě umístění ucpávky ve vzdálenosti 14,7 resp. 11,7 resp. 7,2 cm je odchylka vypočítané od skutečné polohy ucpávky (při stanovené šířce sloupců) 0,7 resp. 0,7 resp. 0,8 cm. Naopak největší odchylka nastala pro pozici ucpávky 8,2 cm a to 3,7 popř. 2,7 cm. Zároveň dodejme, že pro vzdálenost ucpávky 10,2 cm se lokalizace nepodařila a to z podobného důvodu, který byl popsán v souvislosti s obr. 6-20. Dále poznamenejme, že ke kontaktu nedocházelo pouze (periodicky) jednou za otáčku, ale například pro pozici ucpávky 19,2 a 17,7 cm resp. 19,2 a 14,7 cm docházelo také k jinému typu kontaktu a to ke kontaktu jednou za dvě (1/2X) resp. jednou za tři (1/3X) otáčky. Navíc v případě umístění ucpávky 19,2 resp. 14,7 cm docházelo mimo jiné při určité frekvenci otáčení k velmi četnému kontaktu resp. ke kontaktu, jehož intenzita byla silně modulována. Jak bylo již zmíněno, šířka teflonové ucpávky je 3 cm. Proto lze získané výsledky opět považovat za velmi přesné.



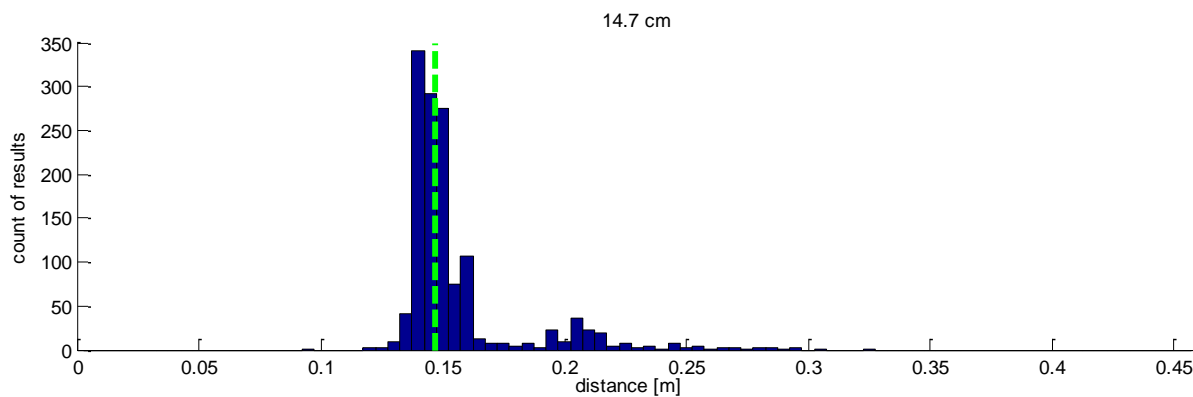
obr. 6-26: Histogram vzdáleností, kontakt 19,2 cm při 2260, 2400, 2500, 2700 ot./min



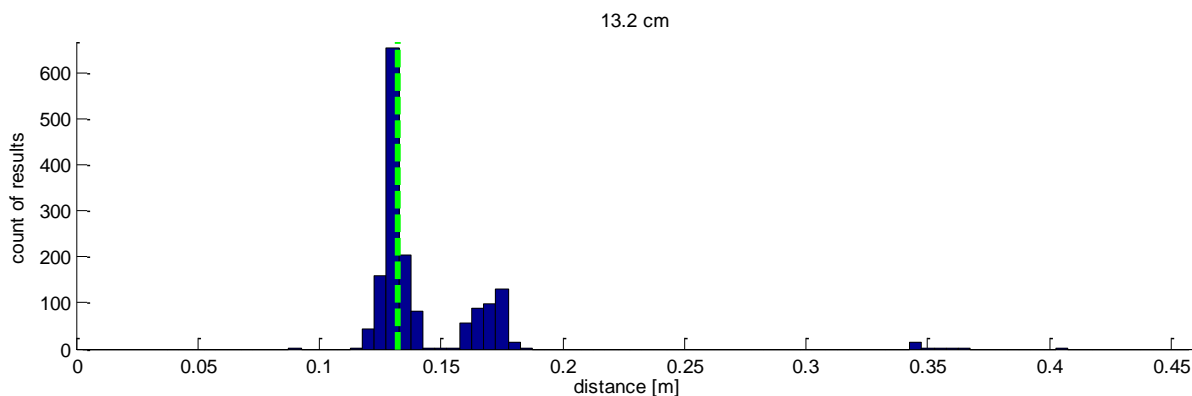
obr. 6-27: Histogram vzdáleností, kontakt 17,7 cm při 2200, 2300, 2400, 2500 ot./min



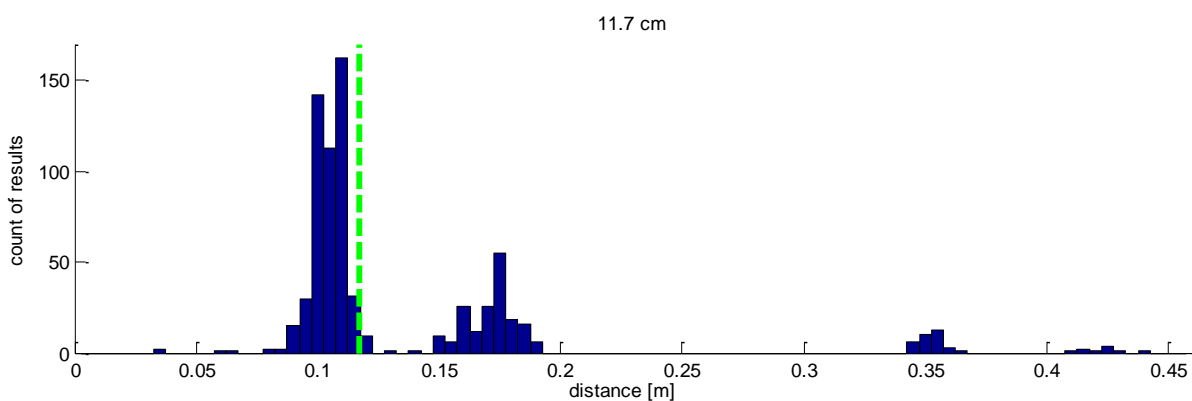
obr. 6-28: Histogram vzdáleností, kontakt 16,2 cm při 2400, 2505, 2700 ot./min



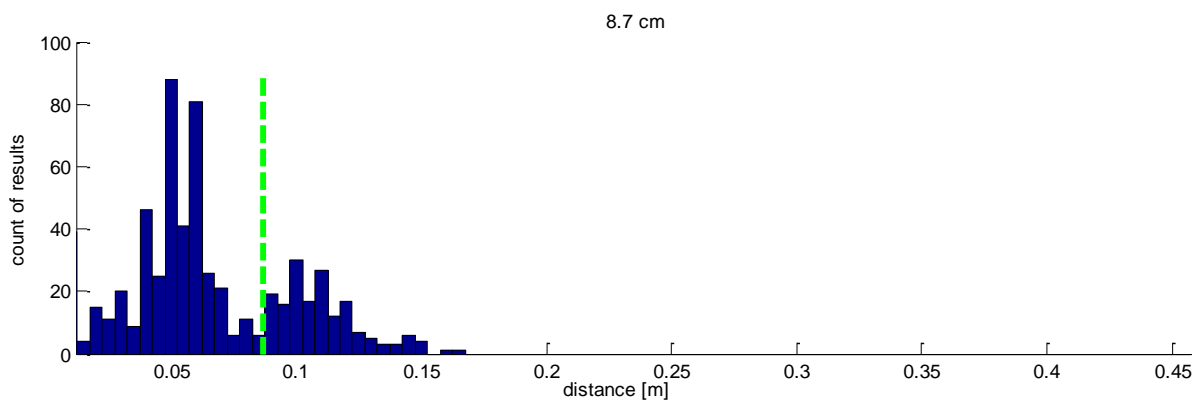
obr. 6-29: Histogram vzdáleností, kontakt 14,7 cm při 2300, 2340, 2400 ot./min



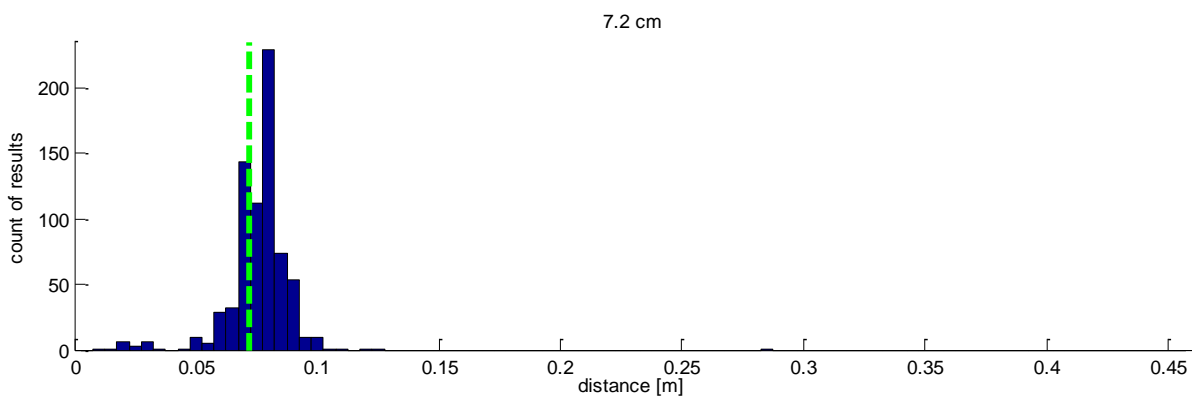
obr. 6-30: Histogram vzdáleností, kontakt 13,2 cm při 2340, 2400 ot./min



obr. 6-31: Histogram vzdáleností, kontakt 11,7 cm při 2320 ot./min

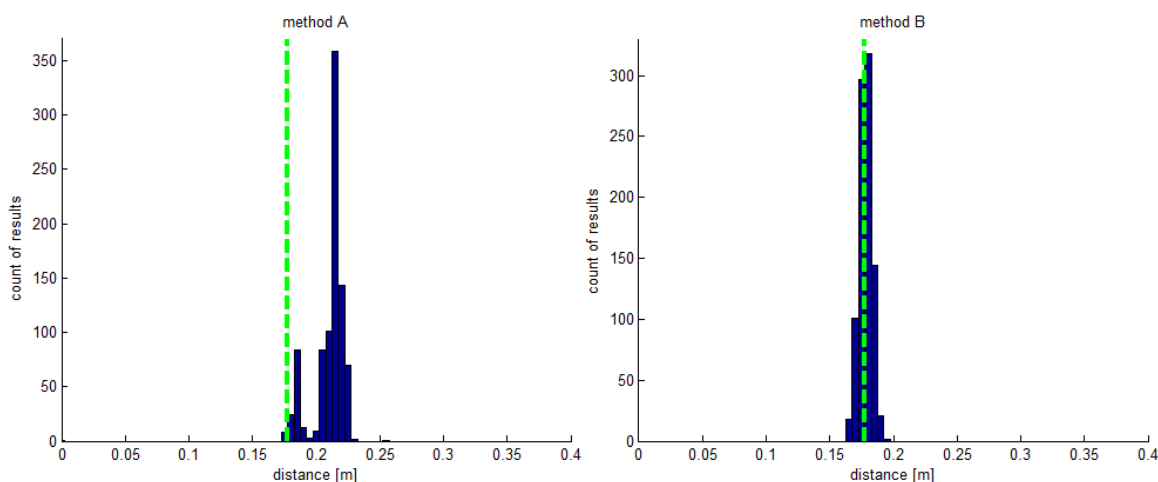


obr. 6-32: Histogram vzdáleností, kontakt 8,7 cm při 2200 ot./min

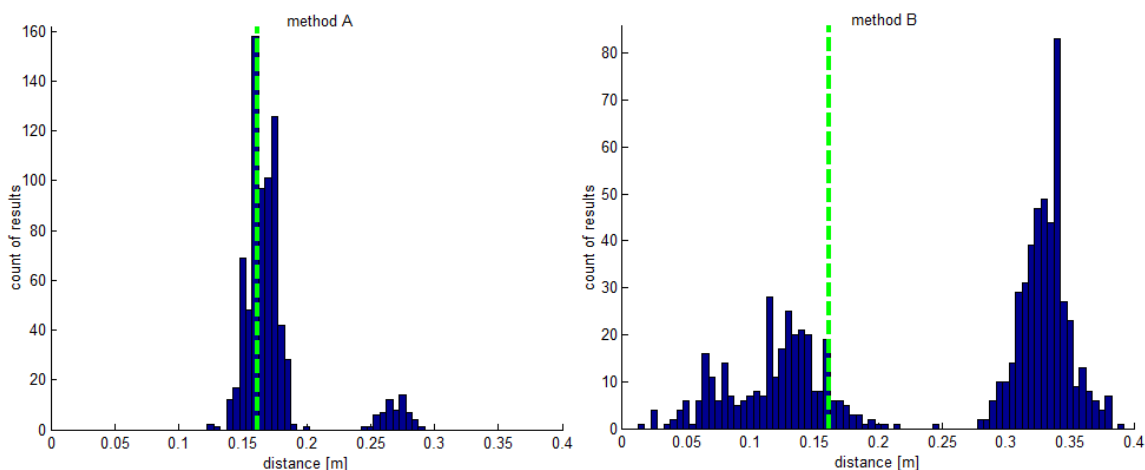


obr. 6-33: Histogram vzdáleností, kontakt 7,2 cm při 2200 ot./min

Jak bylo již zmíněno, navržená metoda není zcela univerzální metodou, která by byla schopna (s vysokou přesností) lokalizovat místo rubbingu pro jakékoliv vstupní signály. Problém s přesnou detekcí počátků vzruchů může například nastat u signálů, jejichž prvotní změna představující počátek rázu není příliš amplitudově výrazná oproti předchozím úsekům signálu neobsahující projevy kontaktu (šum), viz obr. 6-20 a obr. 6-25. Bylo ukázáno, že změnou frekvence otáčení hřídele může dojít ke změně vstupního signálu, což může vést vlivem detekování jiných počátků vzruchů na zhoršení přesnosti lokalizace (viz obr. 6-23, obr. 6-24). Navržená metoda změnou svých parametrů sice odstraňovala některé své původní nedostatky, nicméně naopak pro jiné úseky dat spíše přispívala k nepřesné lokalizaci (obr. 6-21 a obr. 6-22). Za účelem nalezení zcela univerzální metody pro jakékoliv (vstupní) signály byla na získaných datech vyzkoušena celá řada metod a to s nejrůznějšími nastaveními svých parametrů. Velmi dobrých výsledků bylo také dosaženo metodou (podobně jako používanou doposud), která aplikuje metodou klouzavých oken na rekurzivní odhad čtvrtého centrálního momentu z obálky filtrovaného signálu. Podrobně bude tato metoda popsána v následující podkapitole, kde byla při lokalizaci místa rubbingu hřídel/kovová ucpávka velmi používána. Označme si původní metodu například jako metodu A a nově zmíněnou metodu B. Z obr. 6-34 je zřejmé, že lepších výsledků lokalizace, použité na některý z úseků dat, dosahuje metoda B. Aplikací obou metod na jiná data je úspěšnější metodou naopak metoda A. Bylo tedy ukázáno, že ani nově zmíněná metoda není zcela univerzální, ačkoliv při použití na některá data dosahuje lepších výsledků než jiné metody. Závěrem můžeme dodat, že zcela univerzální metoda nebyla doposud nalezena, nicméně řada metod dosahuje velmi dobrých výsledků, tak jak bylo a bude dále ukázáno.



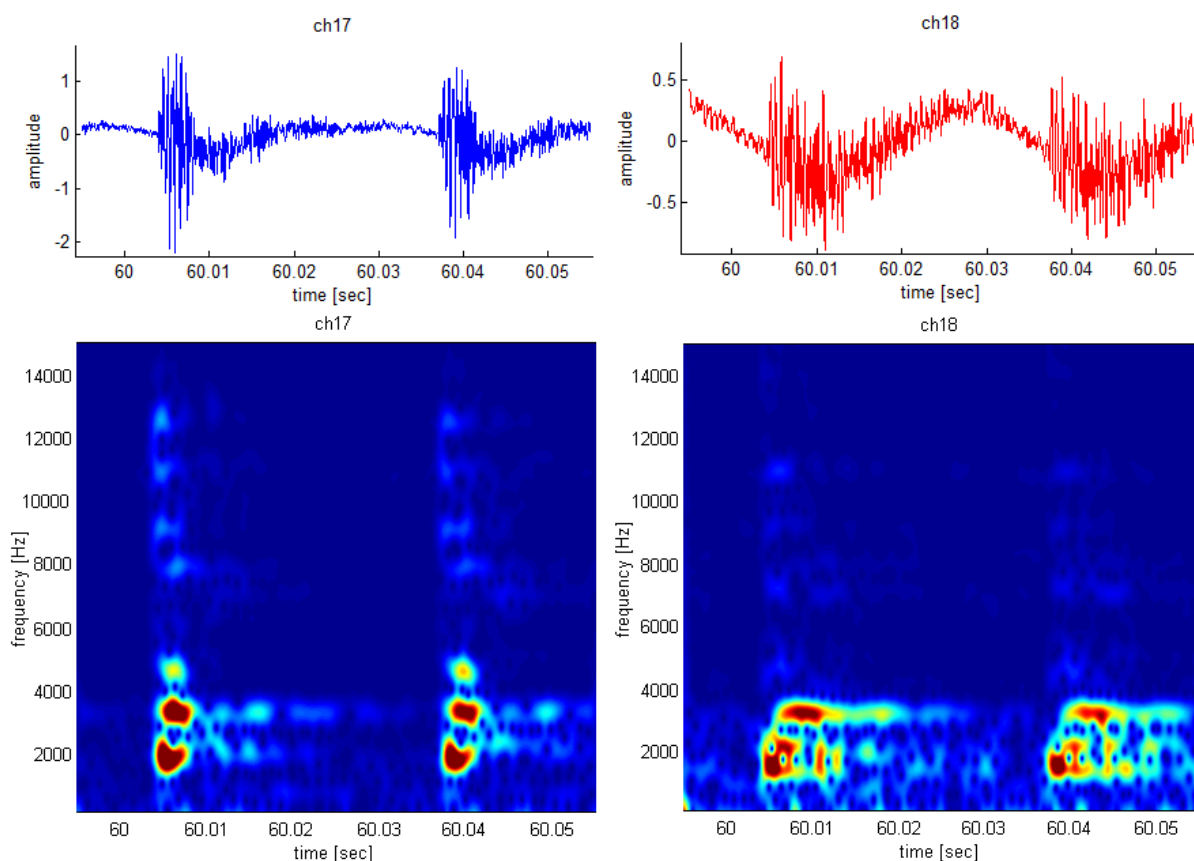
obr. 6-34: Porovnání výsledků metod, ucpávka ve vzdálenosti 17,7 cm



obr. 6-35: Porovnání výsledků metod, ucpávka ve vzdálenosti 16,2 cm

6.3 Lokalizace místa kontaktu hřídel/kovová ucpávka

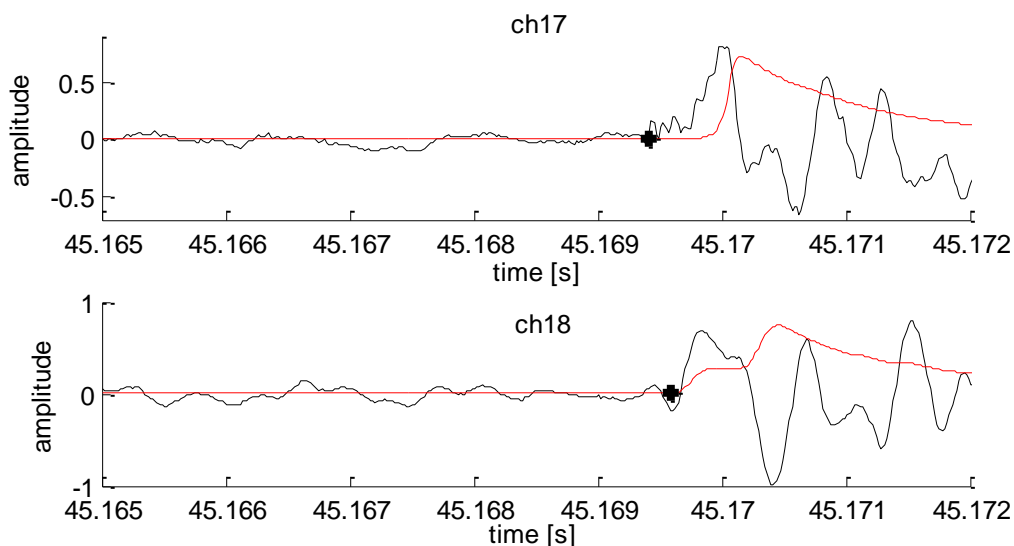
Dalším souborem experimentů, které byly na rotor-stendu provedeny, byly experimenty s kovovou ucpávkou, viz 5.4. Použita byla především ucpávka, která byla částečně odvrtnána, tzv. bodová. Jedná se o data naměřená 12. a 18. 12. 2013. Na následujícím obrázku, viz obr. 6-36, je zobrazen časový signál a spektrogram dvou rázů hřídel/kovová ucpávka pro oba snímače absolutních vibrací (*ch17* a *ch18*). Z časových signálů je patrné, že se jedná o amplitudově dominantní rázy stejně tak, jako v případě kontaktu s teflonovou ucpávkou. Navíc je na ložiska opět přenášen základní tvar kmitu hřídele. V případě kontaktu je ve spektrogramu snímače *ch17* resp. *ch18* nejvíce buzené frekvenční pásmo 1 – 5,2 kHz resp. 1 – 3,8 kHz. Dále si všimněme, že jsou také buzeny i vyšší frekvence a to přibližně do 15 kHz. V případě kontaktu s kovovou ucpávkou se tedy jedná o frekvenčně bohatší signály, než v případě teflonové ucpávky, kdy byly projevy kontaktu u obou snímačů viditelné pouze do 5 kHz. Navíc byl projev vyšších frekvenčních složek spíše viditelný u snímače, který nemá v přenosové cestě od místa kontaktu umístěn disk, tedy v tomto případě snímač *ch17*. Je tedy možné, že disk působí na měřený signál jako jistý filtr.



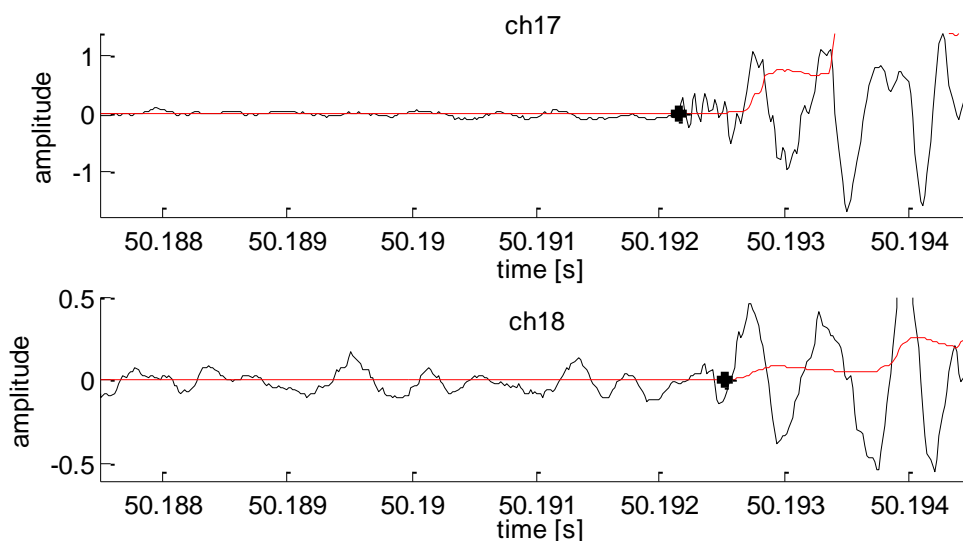
obr. 6-36: Časový signál a spektrogram rázů hřídel/kovová ucpávka

Jak bylo již zmíněno na závěr předchozí podkapitoly, pro detekování počátků vzruchů hřídel/kovová ucpávka se velmi osvědčila následující metoda. Nejprve jsou v měřeném signále pomocí sinc filtru odfiltrovány projevy související se základním kmitem rotoru. Signál je tedy filtrován pro frekvenční pásmo 100 Hz – 15 kHz popř. 25 kHz. Na filtrovaný signál je dále použita metoda pro výpočet okamžité amplitudy signálu (viz 4.1.2). Ze získané obálky signálu je proveden výpočet odhadu čtvrtého centrálního momentu (tj. špičatost), viz 4.1.1. Získaná veličina je zobrazena na následujících obrázcích červeně (viz obr. 6-37 - obr. 6-39). Pro detekování počátku nárůstu odhadu čtvrtého centrálního momentu, tedy počátku vzruchu,

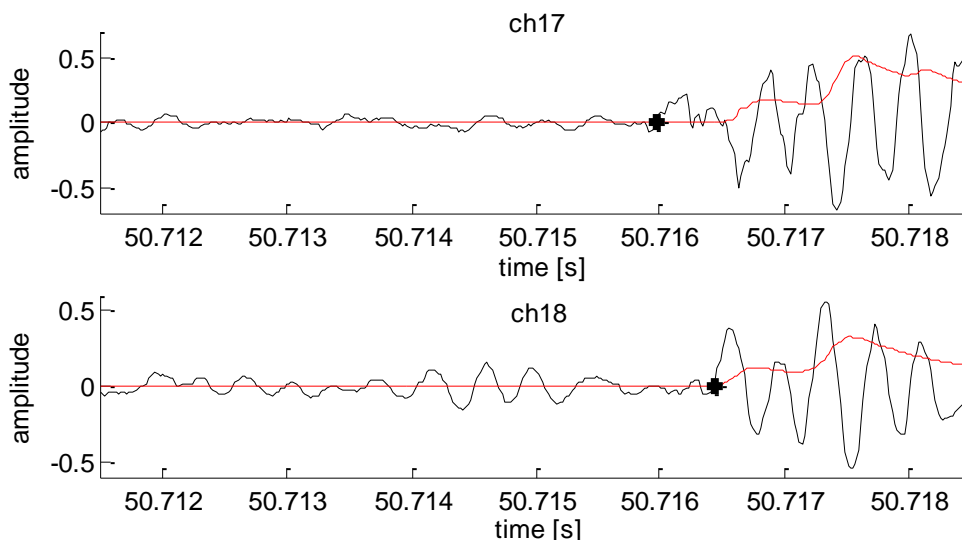
byla dále použita metoda klouzavých oken s matematickou operací podle vztahu (4.23). Časová konstanta filtru τ metody pro výpočet odhadu čtvrtého centrálního momentu byla zvolena 1 ms a délka okna metody klouzavých oken 0,8 ms. Na obr. 6-37 - obr. 6-39 jsou ukázány filtrované signály obou snímačů spolu s detekovanými počátky rázu hřídel/kovová ucpávka pro umístění ucpávky ve vzdálenosti 20,5, 12,9 a 5,4 cm vzhledem k snímači *ch17*. Z časových signálů je patrné, že v případě vzniku kontaktu hřídel/kovová ucpávka nedochází k tak výrazné prvotní změně signálu (amplitudový nárůst), jako například na obr. 6-15, kdy byla použita teflonová ucpávka. I Přesto jsou touto metodou detekovány i méně výrazné amplitudové změny signálu, viz např. snímač *ch17* na obr. 6-37 a obr. 6-38. Ani v tomto případě neznáme přesné počátky vzruchů na jednotlivých snímačích, nicméně při změně místa rubbingu blíže k jednomu ze snímačů opět dochází k nárůstu časového zpoždění. Všimněme si, že například na obr. 6-38 v případě snímače *ch17* dochází v okolí vzniku rázu, tj. přibližně v čase 50,192 – 50,1925 sec, k vybuzení složek signálu s výrazněji vyšší frekvencí. Naopak na snímači *ch18* není tento jev pozorován, což právě může souviset s hypotézou, kdy by disk mohl fungovat jako filtr.



obr. 6-37: Detekované počátky rázu, rubbing s kovovou ucpávkou 20,5 cm od *ch17*



obr. 6-38: Detekované počátky rázu, rubbing s kovovou ucpávkou 12,9 cm od *ch17*

obr. 6-39: Detekované počátky rázu, rubbing s kovovou ucpávkou 5,4 cm od *ch17*

Při umístění ucpávky blíže k jednomu snímači dochází k žádanému nárůstu časového zpoždění dospění vzruchu ke snímačům (viz počátky rázů na obr. 6-37 - obr. 6-39). Z detekovaných počátků rázů spolu s přesnou znalostí místa kontaktu byly tedy pro jednotlivé případy umístění ucpávky (20,5, 12,9 a 5,4 cm) vypočítány jednotlivé rychlosti šíření vzruchů. Pro každou polohu kovové ucpávky byl zpracován desetivteřinový úsek dat, při kterém docházelo ke kontaktu jednou za otáčku. Jednotlivé rychlosti šíření vzruchů jsou dokumentovány na následujícím obrázku, viz obr. 6-40. Ze získaných výsledků plynou dva problémy. Zaprvé jednotlivé rychlosti nejsou zcela tak koncentrované, jako v případě kontaktu s teflonovou ucpávkou. Nepůjde tedy tak dobře rozlišit malé změny polohy ucpávky, např. v řádu 1,5 cm, jako tomu bylo v předchozím případě (viz obr. 6-16 a obr. 6-17 popř. obr. 6-26 - obr. 6-33). Z tohoto důvodu se dále zaměříme spíše na rozlišení výraznějších změn umístění kovové ucpávky, například poloha výrazněji blízká k jednomu z ložisek resp. k disku umístěného na středu hřídele či uprostřed mezi těmito polohami. Tomu například odpovídají právě zvolné vzdálenosti 5,4, 20,5 a 12,9 cm. Druhý a závažnější problém souvisí s rozdílnou rychlostí šíření vzruchů pro jednotlivé polohy ucpávky. V případě umístění ucpávky 5,4 cm jsou získané rychlosti přibližně v rozmezí 200 – 350 m/sec. Pro pozici 12,9 cm jsou vypočítané rychlosti v pásmu 500 – 650 m/sec a pro pozici 20,5 cm v pásmu 650 – 850 m/sec. Tento problém ovšem v případě rubbingu s teflonovou ucpávkou nenastával, neboť při použití některé metody pro lokalizaci byla vždy použita stejná rychlost pro jednotlivé polohy ucpávky (viz histogramy rychlostí na obr. 6-18 a obr. 6-19).

Nepředpokládáme, že by při změně polohy místa kontaktu hřídel/kovová ucpávka ve skutečnosti docházelo k tak výrazné změně rychlosti šíření vzruchu. Problém tedy nejspíše souvisí s použitou metodou pro detekci počátků rázů nebo se samotným výpočtem jednotlivých rychlostí. Jednotlivé rychlosti pro danou polohu ucpávky byly vypočítány podle následujícího vztahu, získaného úpravou rovnice (3.1):

$$v = \frac{L - 2l}{\Delta t} = \frac{(L - 2l)}{(iy - ix)} f_s \quad (6.1)$$

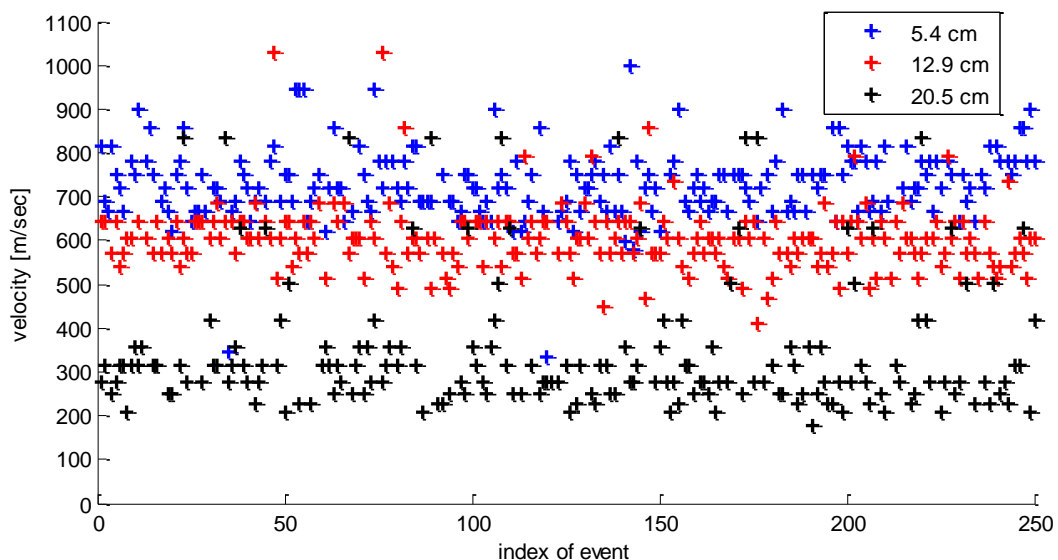
kde L představuje vzdálenost mezi oběma snímači (mezi rovinami), l je vzdálenost místa kontaktu (tj. umístění ucpávky), $(iy - ix)$ je rozdíl detekovaných počátků rázu na snímačích ve vzorcích a f_s je vzorkovací frekvence. Jelikož nemáme k dispozici žádnou informaci o

přesných počátcích rázů hřídel/kovová ucpávka, zbývá tedy detekované počátky (ix a iy) považovat za korektní. Dále se podle vztahu (6.1) tedy zabývejme vzdáleností L použitou při výpočtu rychlostí. Navíc si uvědomme, že při snížení rozdílu ($iy - ix$) například o 4 vzorky, což může být například způsobeno šířením vzruchu po povrchu disku, který nebyl uvažován, zapříčiní pro vzdálenost ucpávky 20,5 cm změnu vypočítané rychlosti o 315 m/sec, kdežto v případě umístění ucpávky 5,4 cm pouze o 150 m/sec. Změna uvažované vzdáleností L bude výsledné rychlosti pochopitelně ovlivňovat, viz rovnice (6.1). Doposud jsme uvažovali přenosovou cestu šíření vzruchu pouze po samotné hřídeli. Co když je ovšem součástí skutečné přenosové cesty i disk popř. přenosová cesta vede po konstrukci stendu. Ačkoliv neznáme skutečnou přenosovou cestu, provedme změnu resp. jakousi kompenzaci uvažované vzdálenosti L , která by vedla na stejnou hodnotu rychlostí pro různé polohy kovové ucpávky. Cílem je tedy, aby rychlosti pro libovolné dvě polohy umístění kovové ucpávky byly stejné, tedy $v_1 = v_2$. Po dosazení vztahu (6.1) dostáváme následující rovnici:

$$\frac{L + \Delta L - 2l_1}{\Delta t_1} = \frac{L + \Delta L - 2l_2}{\Delta t_2} \quad (6.2)$$

kde Δt_1 resp. Δt_2 je detekovaný časový posuv dospění vzruchu ke snímačům při poloze ucpávky 1 resp. 2, ΔL je změna uvažované vzdálenosti L . Po úpravě předchozího vztahu pak dostáváme výslednou rovnici pro výpočet ΔL :

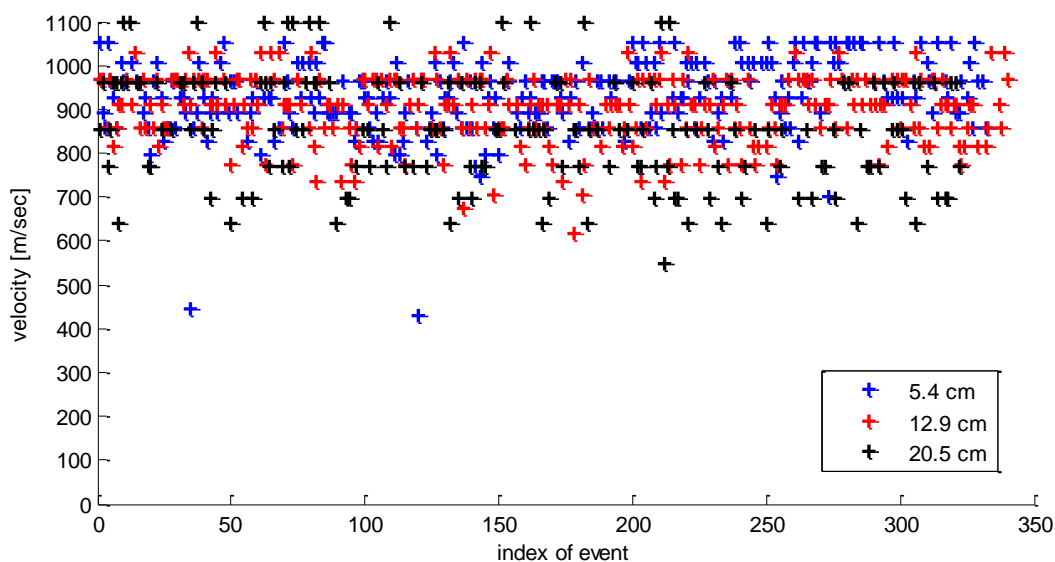
$$\Delta L = \frac{(L - 2l_2)\Delta t_1 - (L - 2l_1)\Delta t_2}{(\Delta t_2 - \Delta t_1)} \quad (6.3)$$



obr. 6-40: Jednotlivé rychlosti šíření vzruchů, kontakt hřídel/kovová ucpávka

Pro dvě zvolené polohy kovové ucpávky byla podle vztahu (6.3) pro několik rázů vypočítána hodnota zmiňované kompenzace $\Delta L = 10,1$ cm. Dále dodejme, že součtem vzdáleností, které nebyly původně v přenosové cestě uvažovány (tj. část povrchu disku a část ložiskových stojanů od míst usazení hřídele ke snímačům), dostáváme právě hodnotu 10 cm. Důvodem, proč jsou vypočítané rychlosti pro jednotlivé vzdálenosti ucpávky odlišné, může tedy být nesprávný předpoklad přenosové cesty. Analogicky navýšení původní vzdálenosti L o ΔL , které by mělo vést ke stejným rychlostem, může taktéž souviset s šířením vzruchu po konstrukci stendu, než po samotné hřídeli. V tomto případě získaná změna ΔL také přibližně

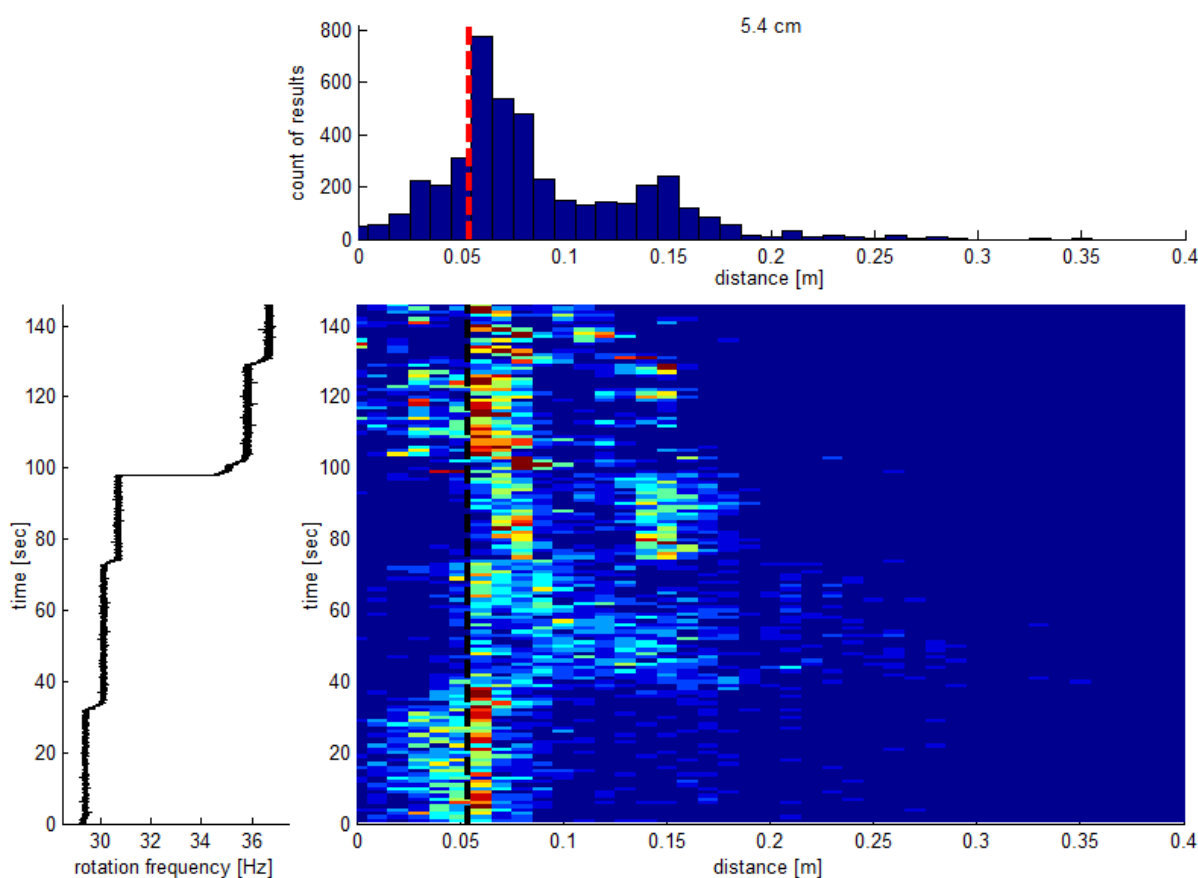
odpovídá součtu části stojanu ucpávky a částí ložiskových stojanů, kterými by se mohl vzruch šířit. Další hypotéza, vysvětlující příčinu odlišných rychlostí pro jednotlivé polohy ucpávky, souvisí s diskem. Jak bylo již zmíněno v této podkapitole, některé komponenty měřeného signálu (především s vyšší frekvencí) jsou pravděpodobně na snímači mající v přenosové cestě disk filtrovány, viz např. obr. 6-36 či obr. 6-38. To pochopitelně může vést k detekování odlišných počátků rázů na obou snímačích. Navíc není vyloučeno, že pro každou vzdálenost může disk filtrovat trochu jiné frekvenční složky. Představme si, že vlivem filtrace signálu na jednom snímači dochází k chybné detekci o určitý počet vzorků. Kdyby tento počet vzorků byl odečítán od celkového rozdílu ($iy - ix$), pak bychom se také dostali na podobné rychlosti šíření vzruchů pro jednotlivé polohy ucpávky. Navíc lze objasnit, proč k tomuto efektu v případě teflonové ucpávky nedochází. Měřené signály totiž neobsahují frekvenční složky s vyššími frekvencemi, tak jako v případě kovové ucpávky, a tedy vliv filtrace se u jednoho ze snímačů neprojeví. Na obr. 6-41 jsou dokumentovány jednotlivé rychlosti šíření vzruchů pro umístění kovové ucpávky ve vzdálenosti 20,5, 12,9 a 5,4 cm při použití výše získané změny vzdálenosti (kompenzace) o $\Delta L = 10,1$ cm. Z výsledků je patrné, že se již vypočítané rychlosti pro jednotlivé pozice umístění ucpávky pohybují ve stejném pásmu, což je jeden ze základních předpokladů pro lokalizaci místa rubbingu. Ani v tomto případě se ovšem nejedná o tak koncentrované výsledky, na jejichž základě by mohla být rozeznána i velmi malá změna umístění kovové ucpávky.



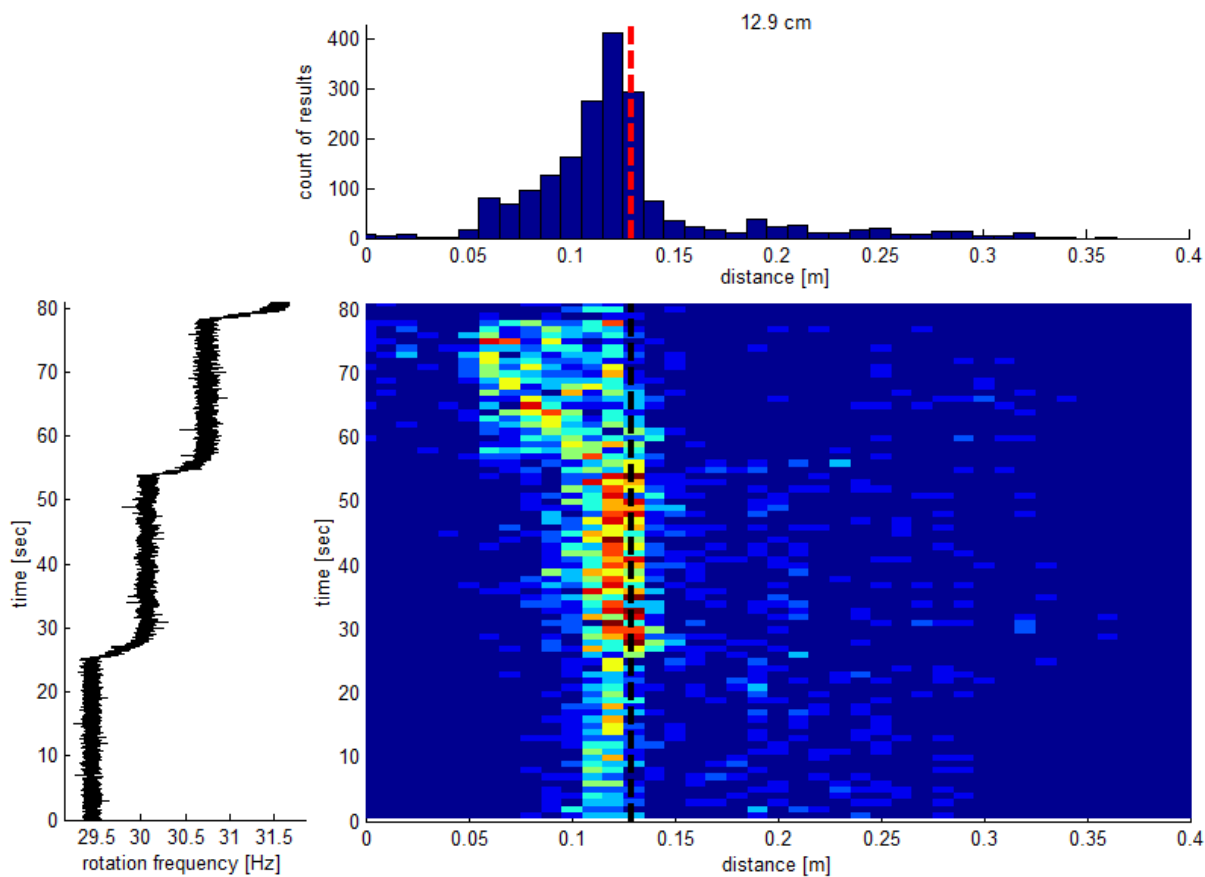
obr. 6-41: Jednotlivé rychlosti šíření vzruchů při použité vzdálenosti $L + \Delta L$

Po odstranění problému s odlišnými rychlostmi šíření vzruchů, což pochopitelně neumožňovalo provést lokalizaci místa kontaktu za použití jedné (konstantní) rychlosti pro jednotlivé polohy kovové ucpávky, bylo dále přistoupeno k samotné lokalizaci. Pro stanovení počátků rázů byla použita metoda popsaná na začátku této podkapitoly. Při výpočtu jednotlivých vzdáleností místa rubbingu, podle vztahu (3.2), byla použita rychlost šíření vzruchů 960 m/sec a nově stanovená vzdálenost mezi oběma snímači (rovinami) $L + \Delta L = 0,56$ m. Na obr. 6-42 - obr. 6-44 jsou dokumentovány výsledky lokalizace kontaktu hřídel/kovová ucpávka při různé frekvenci otáčení pro výše zmíněné pozice 5,4, 12,9 a 20,5 cm. Dále byly provedeny experimenty pro další dvě polohy ucpávky 8,5 a 16,1 cm, přičemž výsledky lokalizace jsou analogickým způsobem zobrazeny na obr. 6-45 a obr. 6-46. Pro dané umístění ucpávky byl získán vývoj lokalizace v závislosti na čase v podobě jednotlivých histogramů vzdáleností získaných postupným zpracováváním jednotlivých úseků dat. Zároveň je na těchto obrázcích vždy zobrazen vývoj frekvence otáčení hřídele spolu

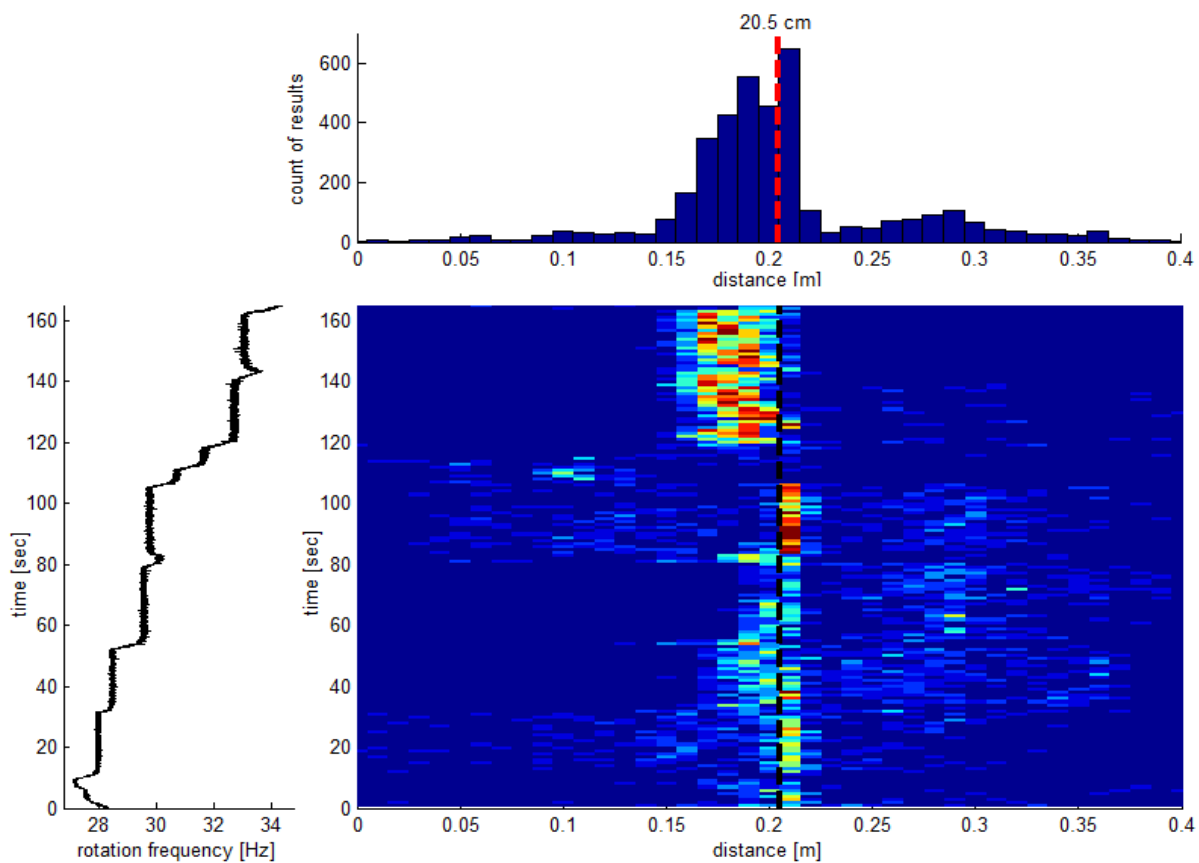
s celkovým histogramem vypočítaných vzdáleností získaný součtem dílčích histogramů. Šířka sloupců histogramů byla zvolena 1 cm. Dále je v případě jak celkového, tak i jednotlivých histogramů vzdáleností také zobrazena přerušovanou čarou skutečná poloha kovové ucpávky. Nejčastěji vznikl kontakt jednou za otáčku, nicméně kromě polohy ucpávky 5,4 cm je v ostatních případech i část dat s kontaktem jednou za dvě otáčky (1/2X). Navíc pro vzdálenost 8,5 cm vznikaly při frekvenci otáčení 35,7 Hz, tj. přibližně pro časový okamžik 90 – 110 sec, dva rázy za jednu otáčku. Jak bylo již zmíněno, nejedná se o tak koncentrované výsledky, kterých bylo dosaženo v případě teflonové ucpávky. Nicméně díky statistickému přístupu je zřejmé, že maxima celkových histogramů jsou velmi blízká skutečným polohám. Z výsledků je tedy patrné, že je možné navrženou metodou velmi dobře rozpoznat výraznější změny umístění kovové ucpávky a to při různé frekvenci otáčení hřídele, při které rubbing vzniká. Konkrétně se v tomto případě podařilo rozeznat 5 různých poloh umístění ucpávky v rámci poloviny hřídele stendu. Jelikož opět zdůrazníme velmi důležitou skutečnost, že se jedná o poměrně krátkou hřídel, lze získané výsledky považovat za velmi dobré. Jako v případě teflonové ucpávky si lze povšimnout, že při určité frekvenci otáčení rotoru může dojít k poměrně přesné lokalizaci, méně přesné lokalizaci popř. při určité frekvenci nemusí prakticky k žádné lokalizaci vůbec dojít. Příkladem mohou být jednotlivé úseky dat pro vzdálenost 20,5 cm (viz obr. 6-44). Například v případě kontaktu při frekvenci otáčení 29,7 Hz, tj. přibližně pro časový úsek 85 – 105 vteřin, dochází k velmi přesné lokalizaci. Pro časový úsek 120 – 165 sec. (tj. 32,7 a 33,1 Hz) dochází k méně přesné lokalizaci, navíc výsledné histogramy mají výrazně větší rozptyl než v předchozím případě. Pro časový úsek 111 – 119 sec. (tj. 31,6 Hz) prakticky nelze místo kontaktu lokalizovat. Ani v tomto případě se tedy nejedná o zcela univerzální metodu pro jakékoliv vstupní signály, nicméně přesto lze získané výsledky považovat za velmi dobré (viz celkové histogramy vzdáleností).



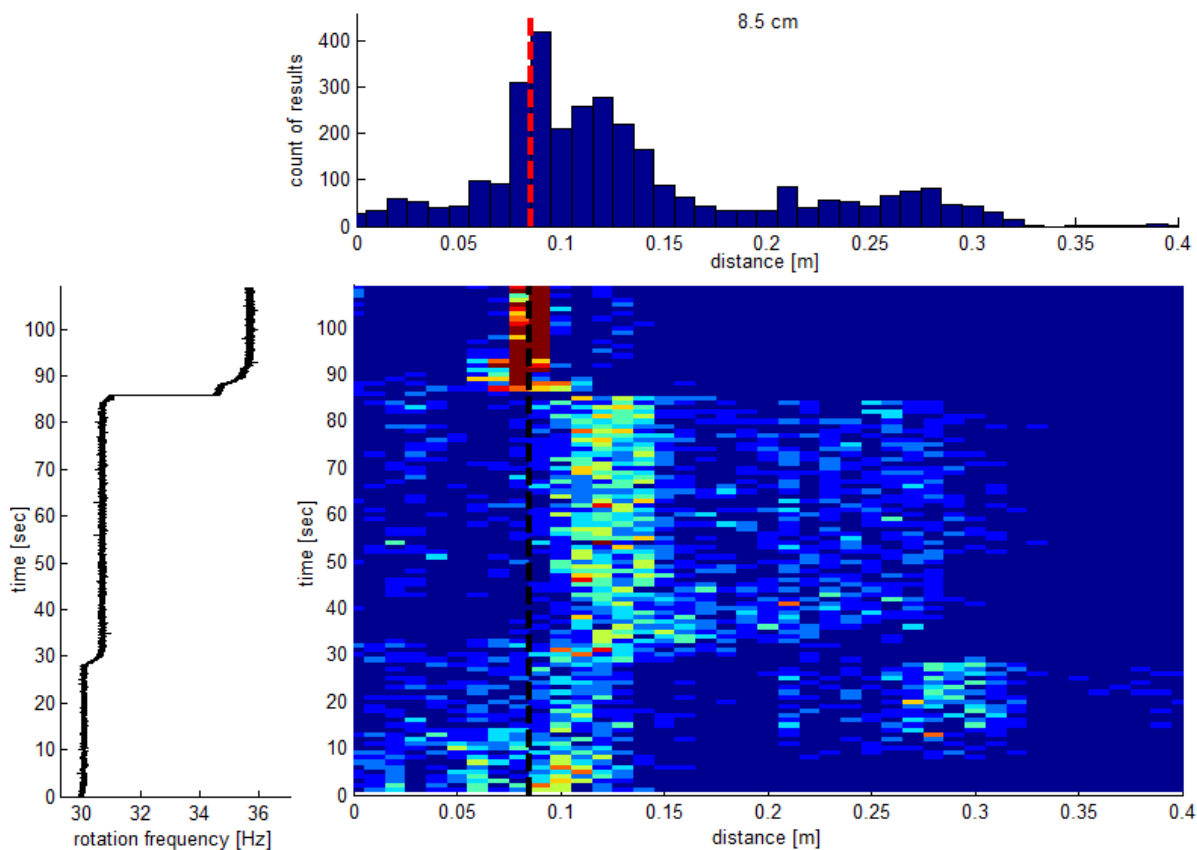
obr. 6-42: Lokalizace místa rubbingu při umístění kovové ucpávky 5,4cm



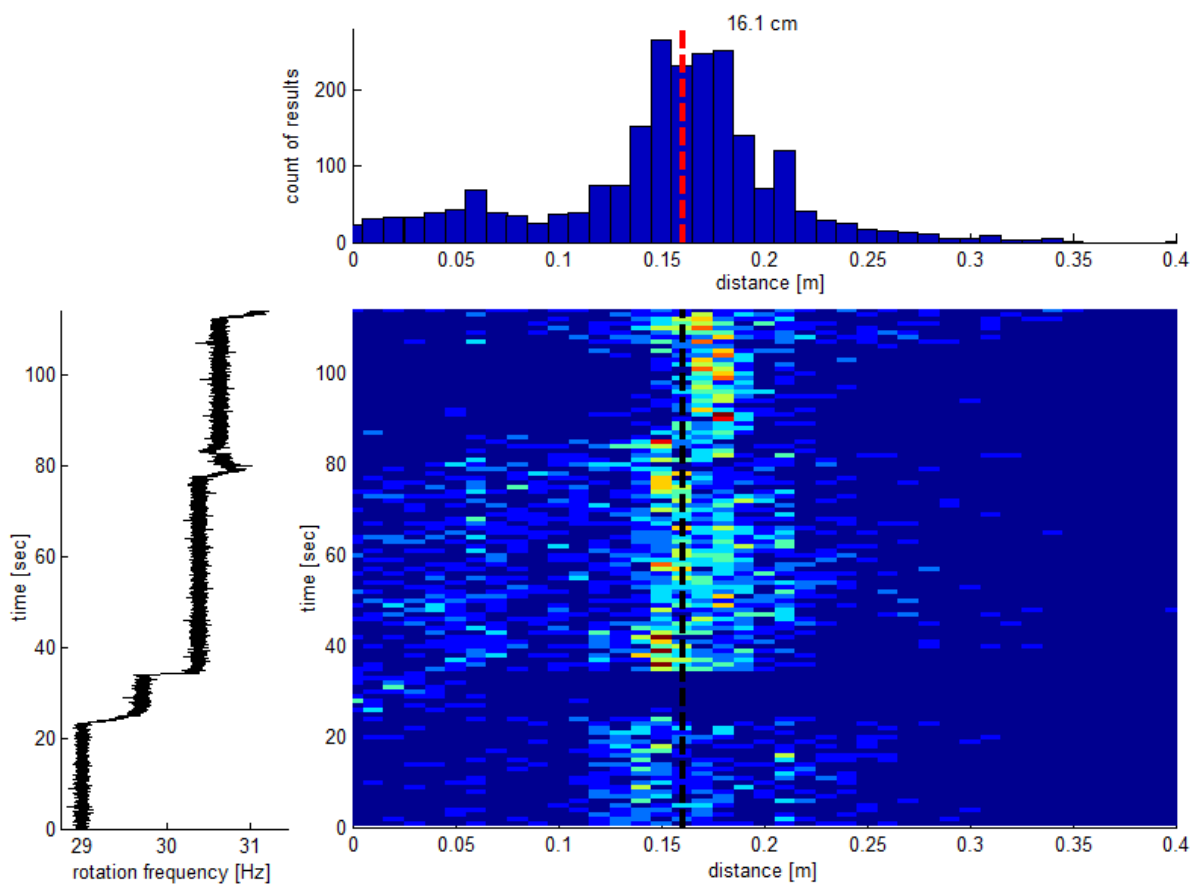
obr. 6-43: Lokalizace místa rubbingu při umístění kovové ucpávky 12,9cm



obr. 6-44: Lokalizace místa rubbingu při umístění kovové ucpávky 20,5cm

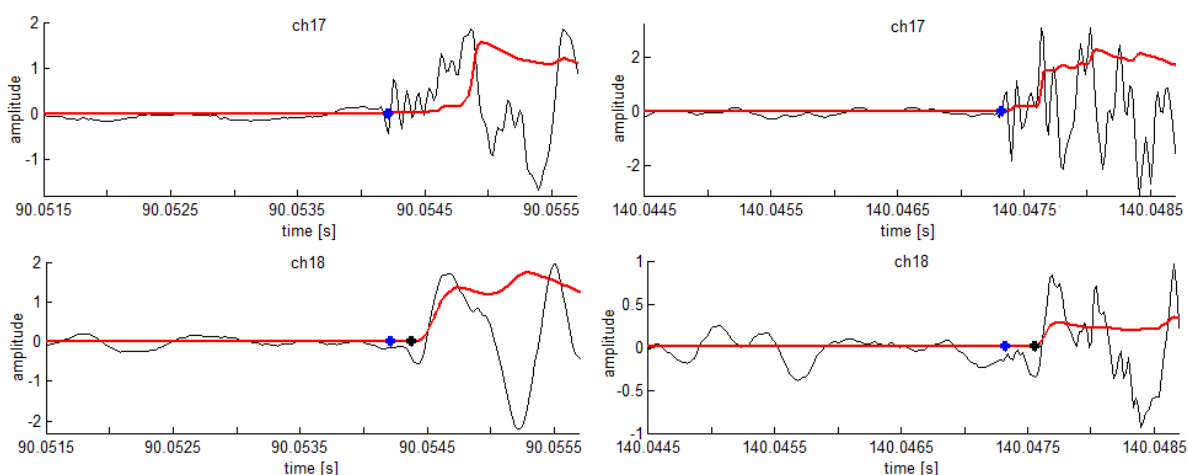


obr. 6-45: Lokalizace místa rubbingu při umístění kovové ucpávky 8,5cm

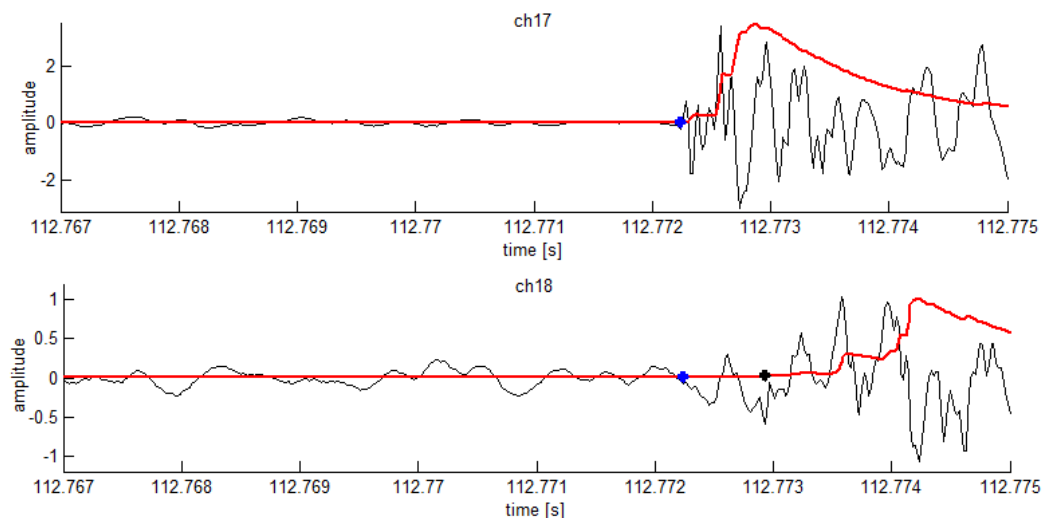


obr. 6-46: Lokalizace místa rubbingu při umístění kovové ucpávky 16,1cm

Dále bude ukázána detailnější analýza měřených signálů spolu s detekovanými počátky rázu právě pro výše zmíněné úseky dat, kdy k výsledné lokalizaci dochází poměrně přesně či méně přesně. Na obr. 6-47 vlevo resp. vpravo jsou pro oba snímače zobrazeny časové signály s detekovanými počátky rázu pro případ přesné resp. méně přesné lokalizace. Zobrazené signály jsou již po filtraci, tj. odfiltrováno 0 – 100 Hz. Detekovaný počátek rázu pro snímač *ch17* resp. *ch18* je zobrazen modrým resp. černým bodem. Navíc v případě snímače *ch18* je také zobrazen počátek rázu snímače *ch17* (opět modře). Porovnáním levé a pravé části obr. 6-47 (především snímače *ch18*) vidíme, že při jiné frekvenci otáčení hřídele může být výsledný detekovaný časový posuv dospění rázu ke snímačům trochu odlišný. Potom i výsledná lokalizace může být při jiné frekvenci otáčení hřídele trochu odlišná, tedy i méně přesná. Na obr. 6-48 je situace zobrazena pro úsek dat, kdy k lokalizaci prakticky nedochází a to vlivem příliš velkého časového posuvu, navíc pro umístění ucpávky blízko středu hřídele. V případě snímače *ch17* lze získaný počátek rázu považovat za korektní. Problém ovšem nastává pro snímač *ch18*, kdy změna signálu představující počátek dospění vzruchu není tak amplitudově výrazná, jako například na obr. 6-47. Detekovaný počátek rázu na snímači *ch18* lze tedy považovat za chybný, ačkoliv skutečný není znám. Z tohoto důvodu tedy lokalizaci nelze korektně provést. Opět bylo ukázáno, že jsou navržené metody především vhodné pro signály s výraznou amplitudovou změnou představující počátek vzruchu.

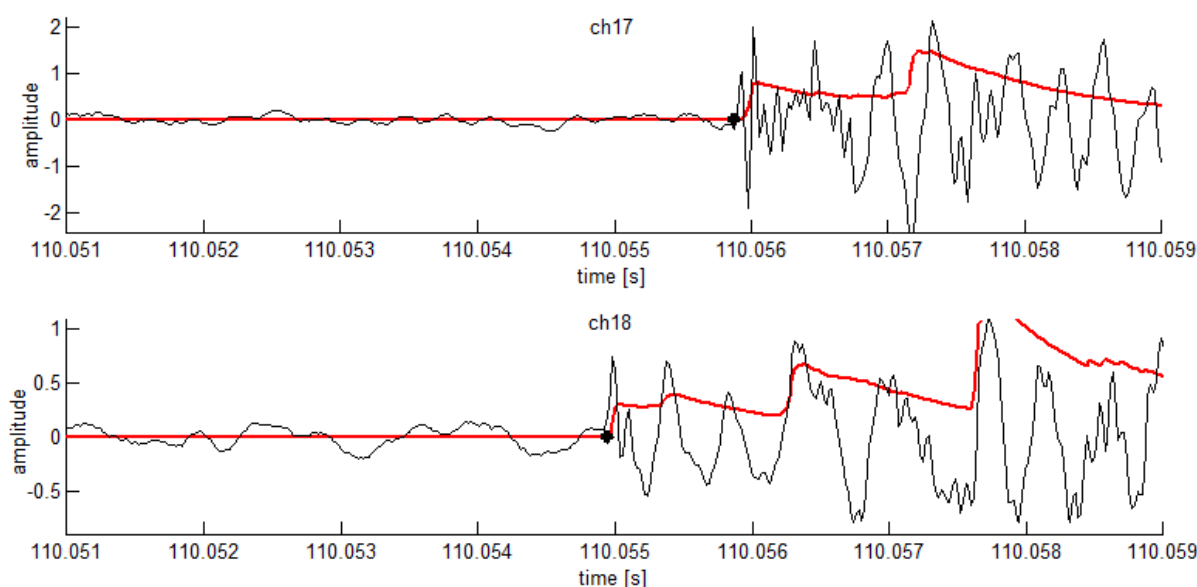


obr. 6-47: Detekované počátky rázu pro přesnou a méně přesnou lokalizaci



obr. 6-48: Detekované počátky rázu v případě chybné lokalizace

Na závěr této podkapitoly bude ukázán velmi zajímavý jev, který byl téměř pro všechny výše zmíněné polohy kovové ucpávky při vyšší frekvenci otáčení hřídele pozorován. Na následujícím obr. 6-49 je zobrazena část signálu snímače *ch17* a *ch18*. V obou případech je zřejmé, že v určitém časovém okamžiku dojde k výraznému vybuzení představující počátek nějaké události. Za tyto časové okamžiky lze považovat ty, které byly detekovány metodou (viz černé body). Je patrné, že ke vzniku události dochází výrazně dříve na snímači *ch18*. Kovová ucpávka byla ovšem umístěna výrazněji blíže ke snímači *ch17* a to ve vzdálenosti 12,9 cm. Pravděpodobně je v tomto případě právě pozorován tzv. efekt třetího ložiska, který je například zmíněn v [11]. Jedná se o situaci, kdy prvek představující omezení dalšího výkmitu hřídele, v našem případě ucpávka, vytváří uzel. To dále vede ke změně základního tvaru kmitu hřídele (viz 6.4), například na druhý tvar apod. Důsledkem toho mohou vznikat rázy v místě usazení hřídele - v ložiskách, ve kterých je vůle. Tedy rázy, které pozorujeme na obr. 6-49 pravděpodobně nepochází pouze od místa kontaktu hřídel/ucpávka, ale také od kmitů hřídele v ložiskách. Tyto kmity mohou pochopitelně vznikat v různých časových okamžicích pro jednotlivá ložiska, což v tomto případě vysvětluje i zdánlivé „porušení“ kauzality. Z těchto dat pochopitelně není možné nikterak provádět lokalizaci místa rubbingu.

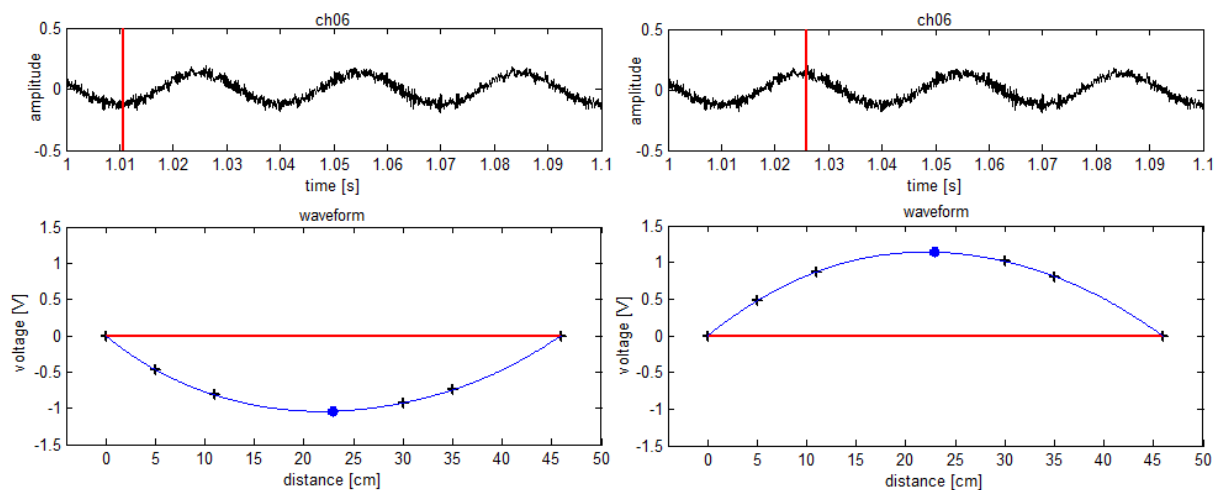


obr. 6-49: Pravděpodobný efekt třetího ložiska

6.4 Provozní tvar kmitu rotoru

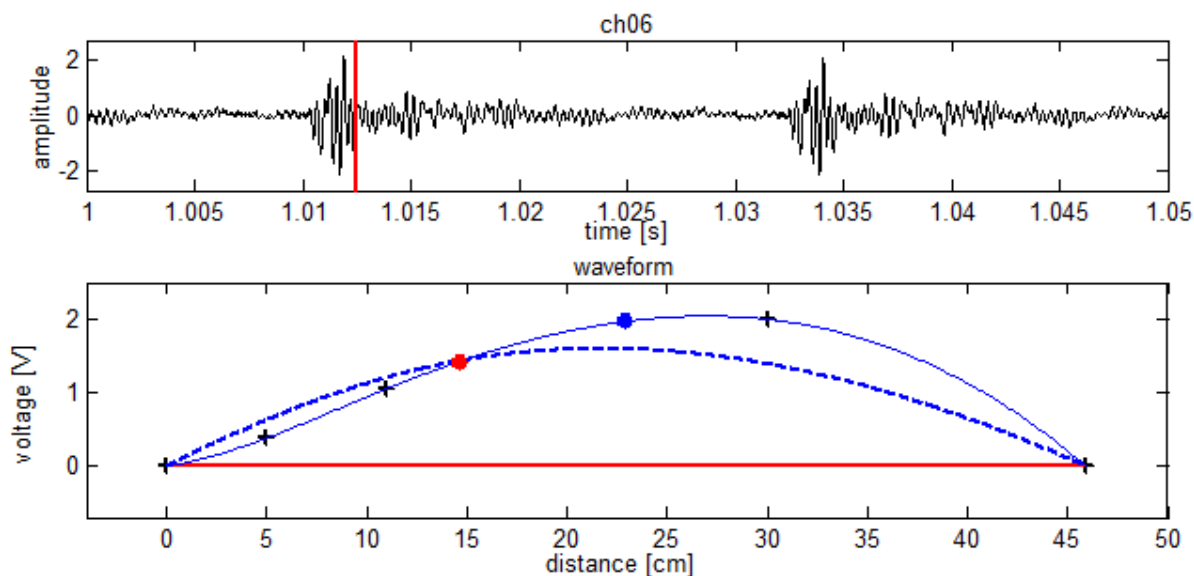
Pro získání nových poznatků bylo přistoupeno k experimentům, které byly popsány v části 5.5. Jak bylo již zmíněno, cílem těchto experimentů bylo především sledování rotující hřídele během kontaktu. Naměřená data byla dále použita pro samotnou vizualizaci chování rotoru. V této podkapitole budou ukázány některé výsledky z této vizualizace. Využita byla především data ze tří popř. čtyř snímačů měřící relativní rotorové vibrace rozmístěných na vhodných místech podél hřídele (viz podkapitola 5.5). V každém vzorkovaném okamžiku máme tedy k dispozici informaci o kmitu rotoru ve třech popř. čtyřech bodech. Navíc předpokládáme nulový výkmit v krajních bodech hřídele, tedy v obou ložiskách. Vhodnou interpolací těchto bodů lze získat přibližný tvar kmitu celého rotoru pro daný časový okamžik. Před každým experimentem byla provedena kalibrace jednotlivých snímačů relativních vibrací, tedy v klidovém stavu hřídele ukazovaly stejnou hodnotu napětí. Nicméně pouhým pootočením hřídele toho již nemuselo být dosaženo. Tato skutečnost byla způsobena mírným

trvalým ohnutím popř. nerovným povrchem na některých místech hřídele. Z tohoto důvodu byly dále signály z jednotlivých snímačů relativních rotorových vibrací usředněny. Nejprve se zaměříme na chování hřídele při samotné rotaci, tedy v situaci bez kontaktu. Část vizualizace experimentu pro tento případ je ukázána na obr. 6-50. V dolní části obr. je zobrazen modrou křivkou přibližný tvar kmitu hřídele získaný měřením ve čtyřech místech. Tato místa respektive aktuální hodnoty napětí jednotlivých snímačů (po usřednění) jsou zobrazeny spolu s koncovými body hřídele černými křížky. Klidový stav hřídele je zobrazen červenou úsečkou. Modrým bodem je pak vyznačena pozice umístění středu hmotného disku s nevývažkem. V horní části obr. je dokumentován průběh signálu z absolutního snímače vibrací (*ch06*) umístěného na ložisku. V případě rubbingu se bude jednat o snímač umístěný na ložisku blíže místu kontaktu. Aktuální časový okamžik, pro který je vizualizace zobrazena, je v signále absolutního snímače vibrací vyznačen červenou úsečkou. Z obr. 6-50 je zřejmé, že se v případě rotující hřídele, při kterém nevniká kontakt, jedná o základní tvar kmitu (podobný například tvaru luku). Navíc po interpolaci daných bodů má přibližný tvar kmitu hřídele největší výkmit právě v místě hmotného disku s nevývažkem (viz modré body), což koresponduje s fyzikálním předpokladem. Tento základní tvar kmitu je také přenášěn na ložiskové stojany, což je patné z časového signálu absolutního snímače vibrací *ch06*.



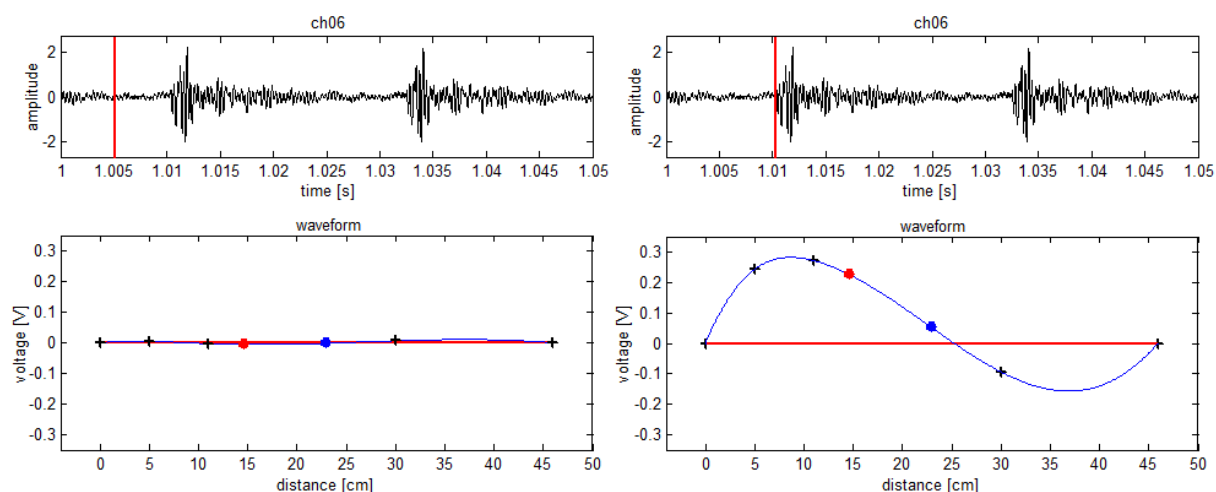
obr. 6-50: Tvar kmitu rotující hřídele bez kontaktu

Dále se zaměříme na chování rotující hřídele při kontaktu s teflonovou ucpávkou. Tento případ je pro umístění ucpávky 14,7 cm analogickým způsobem dokumentován na následujícím obr. 6-51. V tomto případě bylo možné použít pouze tři snímače relativních vibrací. Červeným bodem je pak vyznačen střed teflonové ucpávky. Situace je zachycena pro časový okamžik, kdy došlo právě ke kontaktu hřídel/ucpávka. Pro porovnání je navíc v tomto obrázku také zobrazen modrou přerušovanou křivkou tvar hřídele před daným kontaktem. Tvar hřídele před kontaktem je podobný, jako v případě obr. 6-50, tedy základní tvar kmitu s největším výkmitem v blízkosti disku (viz modrá přerušovaná křivka na obr. 6-51). Vlivem dalšího výkmitu hřídele ovšem dochází v místě ucpávky k omezení, což dále vede na deformaci tohoto základního kmitu (viz modrá plná křivka na obr. 6-51). Je zřejmé, že největší výkmit rotoru při kontaktu s ucpávkou již nenastává v místě disku s nevývažkem (tj. kolem 23 cm), ale přibližně ve vzdálenosti 27 cm. Při vizualizaci chování rotoru je právě toto místo, kde dochází k omezení v dalším výkmitu hřídele, tedy pozice ucpávky, velmi dobře zřetelné. To samozřejmě podkřývá další možný způsob, jak k lokalizaci místa rubbingu přistupovat.



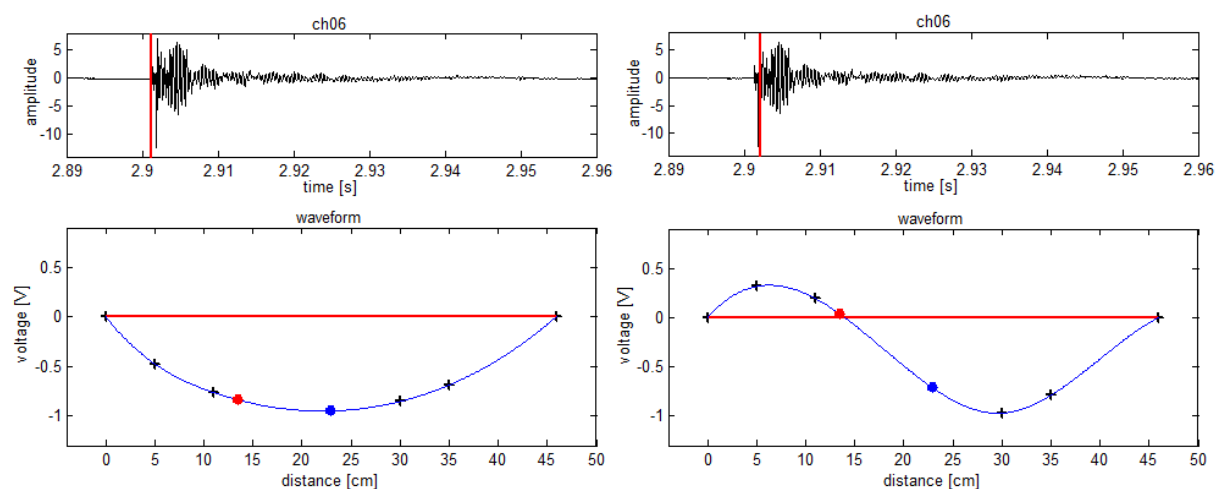
obr. 6-51: Tvar hřídele při kontaktu s teflonovou ucpávkou

Bylo ukázáno, že při kontaktu rotující hřídele s teflonovou ucpávkou je dominantní základní tvar kmitu, ačkoliv je určitým způsobem deformován. Zkusme tedy tento tvar kmitu odfiltrovat a sledujme, zda nedochází i k jinému chování hřídele. K filtraci byl použit sinc filtr (viz 4.2.2), který v tomto případě v signálech ze snímačů relativních rotorových vibrací odfiltroval frekvenční pásmo 0 – 100 Hz. Opět byla spuštěna vizualizace chování rotoru pro tyto filtrované signály. Část vizualizace je zobrazena na obr. 6-52. Dále dodejme, že chování hřídele (v dolní části vizualizace) je v jakémsi „předstihu“ oproti situaci, která je zobrazována pomocí časového signálu ze snímače absolutních vibrací *ch06*, neboť šíření vzruchu od místa rázu k ložisku je vždy spojeno s určitým časovým okamžikem. Nicméně je zřejmé, že v případě kontaktu hřídel/ucpávka dochází i k jinému chování rotoru a to k výraznému ohybu (pravá část obr. 6-52), přičemž po určitém časovém okamžiku pak dochází mezi jednotlivými rázy k ustálení (levá část obr. 6-52). Z tohoto plyne důležitý poznatek. Při kontaktu hřídel/ucpávka také dochází ke vzniku a následnému šíření ohybové vlny. To může být jeden z důvodů, proč získané rychlosti šíření vzruchu na rotor-stendu (například viz obr. 6-18, obr. 6-19 či obr. 6-41) jsou nižší než rychlosti šíření povrchových vln (3000 m/sec), při kterých by byla jakákoliv lokalizace na tak krátké hřídeli prakticky nemožná. Šíření ohybových vln je nižší než šíření vln povrchových. Projevy kontaktu v signálech používaných při lokalizaci místa rubbingu mohou tedy být spojeny právě s ohybovými vlnami. Druhý důvod pozorování nižších rychlostí na rotor-stendu může souviset s jednotlivými metodami pro zpracování signálu, které filtrují původní signály, jak bylo již podrobněji zmíněno například v kapitole 3. Výsledný tvar kmitu hřídele při kontaktu s ucpávkou, pozorovaný na obr. 6-51, je tedy minimálně složen ze dvou kmitů - ze základního tvaru a z ohybu rotoru.



obr. 6-52: Ohyb hřídele při kontaktu s teflonovou ucpávkou

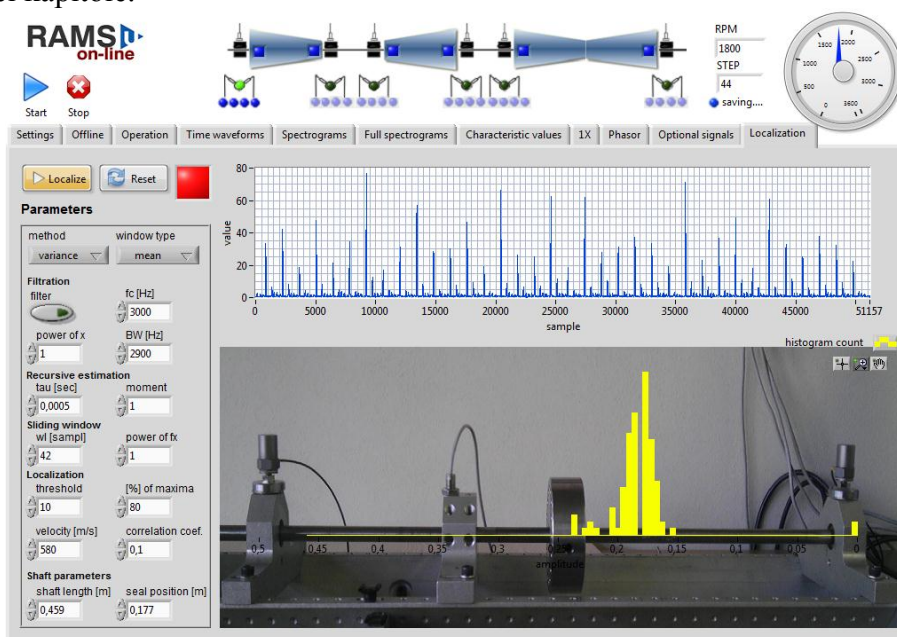
Na následujícím obrázku je ukázáno, že i v případě kontaktu může dojít ke změně provozního tvaru kmitu rotující hřídele. Poměrně silný ráz je v tomto případě realizovaný poklepem kovovým klíčem. Místo kontaktu je vyznačeno červeným bodem. Vlevo na obr. 6-53 je zobrazen tvar kmitu hřídele před tímto kontaktem. Je zřejmé, že se opět jedná o (první) základní tvar. V případě kontaktu ovšem dochází ke změně na druhý tvar (viz pravá část obr. 6-53). Pouze dodejme, že naměřené signály nebyly nikterak filtrovány, jako v předchozím případě. Vlivem rubbingu může tedy dojít i ke změně provozního tvaru kmitu rotoru. Nejčastěji byla v jednotlivých datech pozorována změna právě na druhý popř. i třetí tvar. Tento jev může také souviset s tzv. efektem třetího ložiska, který je zmíněn na závěr podkapitoly 6.3, která se zabývá lokalizací rubbingu hřídel/kovová ucpávka. Právě při vyšších otáčkách, při kterých vznikaly silnější rázy, byl tento jev pravděpodobně pozorován.



obr. 6-53: Změna provozního tvaru kmitu hřídele při poklepu kovovým klíčem

V této kapitole byla provedena analýza některých signálů získaných při experimentech na rotorovém stendu, která měla vést k návrhu metod pro lokalizaci místa rubbingu hřídel/ucpávka. V úvodu této kapitoly jsme se nejprve zabývali základní otázkou, zda je vůbec možné na tak krátké hřídeli detekovat nějaký časový posuv dospění vzruchu k oběma snímačům v závislosti na místě kontaktu. Otázkou jsme se postupně zabývali od nejjednoduššího případu (nerotující hřídel bez disku) až po ten nejsložitější případ (rotující hřídel s diskem). Zároveň bylo vysvětleno, proč jsme při návrhu metod vycházeli z časové

oblasti (nikoliv z časo-frekvenční). Jelikož bylo časové zpoždění pozorovatelné i v případě poklepu kovovým klíčem na rotující hřídel s diskem, bylo dále přistoupeno k analýze signálů získaných při experimentech s teflonovou ucpávkou. V této části byl proveden návrh metod pro lokalizaci místa částečného rubbingu. Navržená metoda dosahovala velmi dobrých výsledků. Lokalizace byla prováděna pro různé polohy teflonové ucpávky, navíc při různé frekvenci otáčení hřídele, při které vznikl kontakt. Získanou metodou byla dokonce rozlišena i změna polohy ucpávky o pouhých 1,5 cm. Zároveň bylo ovšem také ukázáno, že metoda není zcela univerzální pro jakékoliv vstupní signály. Problém s lokalizací mohl například nastat pro vzruchy, jejichž počátky nebyly příliš amplitudově výrazné oproti jiným úsekům signálu neobsahující projevy kontaktu. Další část této kapitoly byla věnována lokalizaci rubbingu s kovovou ucpávkou. V této části vycházeli výsledné rychlosti šíření vzruchů pro jednotlivé polohy ucpávky odlišně. To pochopitelně znemožňovalo provést lokalizaci místa kontaktu při použití jedné (konstantní) rychlosti pro různé polohy kovové ucpávky. Byly popsány některé hypotézy vysvětlující příčinu této skutečnosti, přičemž dále byla provedena korekce vzdálenosti L používané při výpočtu, která nakonec vedla k odstranění tohoto problému. Ačkoliv nebyly získané histogramy vzdáleností tak koncentrované, jako v případě teflonové ucpávky, přesto se podařilo poměrně přesně lokalizovat pět různých míst rubbingu hřídel/kovová ucpávka na polovině hřídele a to opět při různé frekvenci otáčení. Dále dodejme, že navržené metody byly pro online lokalizaci místa rubbingu implementovány do systému RAMS. Příklad online lokalizace místa kontaktu hřídel/ucpávka je na obr. 6-54. V poslední části kapitoly jsme se věnovali provoznímu tvaru kmitu rotoru. Měřením pouze ve třech popř. čtyřech místech bylo pomocí vizualizace experimentu pozorováno chování rotující hřídele bez resp. při kontaktu. Ze získaného chování byla při vizualizaci pozice ucpávky poměrně dobře rozpoznatelná, což podkrývalo další možnost, jak vůbec k lokalizaci přistupovat. Dále bylo ukázáno, že v případě kontaktu dochází ke vzniku a šíření ohybového vlnění. To by také mohl být jeden z důvodů, proč jsou na rotor-stendu získané rychlosti nižší než rychlosti šíření povrchových vln. Nakonec bylo dokumentováno, že v případě rubbingu může dojít i ke změně provozního tvaru kmitu rotoru, ze základního např. na druhý tvar apod. Všechny tyto poznatky spolu s navrženými metodami by měly být dále použity pro lokalizaci rubbingu v provozu parních turbín. Jestli se vůbec podaří nalézt nějaké projevy kontaktu v získaných signálech a popř. zda se vůbec podaří provést lokalizaci, bude ukázáno právě v následující kapitole.



obr. 6-54: Online lokalizace místa rubbingu hřídel/ucpávka (převzato z [12])

7 Lokalizace rubbingu v provozu parních turbín

Některé dále zmíněné části vycházejí z předchozí práce [4]. V současné době není příliš vědeckých publikací, které by se přímo zabývaly problematikou lokalizace rubbingu v provozu parních turbín. Proto je dalším cílem práce přispění novými poznatky do této různorodé problematiky. Úkolem této kapitoly je nalezení některého projevu kontaktu rotor/stator v signálech získaných z reálných turbín, na jehož základě by mohla být dále provedena lokalizace místa vzniku rubbingu, ideálně metodou navrženou při experimentech na rotorovém stendu. K tomuto byla získána data naměřená na 220 MW parní turbíně a to jak při provozních otáčkách (50 Hz), tak i v případě turbíny na tzv. natáčecím stroji, dále označovaném jako natáčedlo. Režim natáčedla představuje nízkou frekvenci otáčení rotoru - přibližně 64 ot./min (1,067 Hz). Tento režim je navozován především po odstavení turbíny z provozních otáček a to z důvodu zabránění prohnutí rotoru vlivem své velké hmotnosti. Dále byla získána data při sjezdu/nájezdu z/na provozní otáčky. Jednotlivé snímače byly umístěny celkem do šesti měřicích rovin. Měřicí roviny byly zvoleny před resp. za každým dílem turbíny (vysokotlaký, středotlaký a nízkotlaký díl). V každé měřicí rovině byly v blízkosti rotoru umístěny (pod úhlem 90°) dva snímače měřící relativní rotorové vibrace a jeden snímač absolutních vibrací, který byl umístěn na skříni turbíny. Vzdálenosti mezi jednotlivými rovinami (mezi 1. a 2., ..., 5. a 6.) byly po řadě 4,55, 1,25, 4,6, 1,195 a 4,5 m. Nejčastěji byla data naměřena se vzorkovací frekvencí 4096 Hz. Dodejme, že spolu se získanými daty nebyla k dispozici žádná informace popisující případné projevy rubbingu v měřených signálech. To pochopitelně přidává na složitosti celé úlohy, neboť v měřených signálech je celá řada jiných projevů, které nikterak nesouvisí s rubbingem.

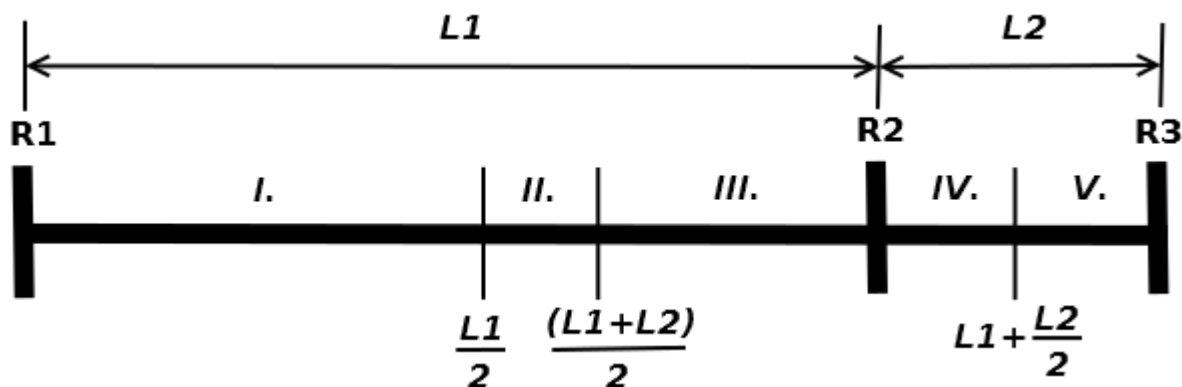
Aby mohla být provedena lokalizace případného rubbingu stejným způsobem jako na rotorovém stendu, je potřeba znát dopředu rychlost šíření vzruchů. Jelikož není k dispozici žádná informace o místu kontaktu, není tedy možné tuto rychlost nikterak určit. Navíc si uvědomme, že přenosová cesta šíření vzruchu od místa rubbingu ke snímačům (ovlivňující vzdálenost L , viz rovnice (6.1)) je ve skutečnosti velmi složitá a nelze ji prakticky stanovit. Zmíňme například problém s určením rychlosti šíření vzruchů na výrazněji jednodušším rotorovém stendu způsobený možným vlivem disku v části 6.3. Proto nelze v tomto případě provádět lokalizaci s využitím informace pouze ze dvou snímačů respektive ze dvou měřicích rovin. K celé úloze lze ovšem přistoupit s využitím informace ze tří snímačů – ze tří měřicích rovin a to za předpokladu stejné rychlosti šíření vzruchů mezi rovinami (viz lineární lokalizace v části 3.2). Pochopitelně musí být splněn předpoklad detekování počátků vzruchů ve všech třech rovinách. Poté lze provádět lokalizaci místa kontaktu s vyloučením rychlosti šíření v , tedy nemusí být tato rychlost dopředu stanovena. V podkapitole 3.2 byl již odvozen vztah pro výpočet místa kontaktu pro jednu uvažovanou polohu. V následujícím uveďme zbylé vztahy pro ostatní možné případy. Předpokládejme například, že na prvních třech rovinách (R_1, R_2, R_3) výše zmíněné parní turbíny jsou detekovány počátky vzruchu v čase t_1, t_2, t_3 . Přípustnou kombinací časů t_1, t_2, t_3 lze část turbíny zahrnující 1. až 3. rovinu rozdělit do několika oblastí. Ke každé oblasti lze dále odvodit vztah pro výpočet vzdálenosti místa rubbingu l (vzhledem k snímači v rovině R_1), přičemž podmínkou je, aby vypočítaná vzdálenost l náležela do příslušné oblasti. Odvození zbylých vztahů je analogické s tím, které bylo již uvedeno podkapitole 3.2 pro jednu uvažovanou polohu místa kontaktu. Dodejme, že při odvozování byla předpokládána větší vzdálenost mezi 1. a 2. rovinou než mezi 2. a 3. (viz výše uvedené vzdálenosti mezi rovinami). Potom tedy musí být splněna pro všechny případy následující podmínka:

$$\max(t_1, t_2) > |t_2 - t_3| \quad (7.1)$$

Pokud by vzdálenost mezi 1. a 2. rovinou byla menší než mezi 2. a 3. popř. bychom využívali informace z jiných rovin, např. z 1., 2. a 4. (viz výše uvedené vzdálenosti mezi rovinami) pak by muselo být provedeno analogickým způsobem nové odvození níže uvedených vztahů s intervalovými podmínkami. Elegantnější způsob ovšem spočívá v „umělé“ záměně detekovaných počátků vzruchů na 1. a 3. (popř. 4.) rovině, přičemž výsledné vzdálenosti budou pouze vztaženy k 3. (popř. 4.) rovině (nikoliv k 1. rovině). Označíme-li vzdálenost mezi 1. a 2. resp. 2. a 3. rovinou L_1 resp. L_2 , pak jsou výsledné vztahy s intervalovými podmínkami pro jednotlivé případy místa kontaktu následující:

I.	$t_1 \leq t_2 < t_3:$	$l = \frac{1}{2} \left[L_1 - L_2 \left(\frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_2} \right) \right],$	$l \in \left(0, \frac{L_1}{2} \right)$
II.	$t_2 < t_1 \leq t_3:$	$l = \frac{1}{2} \left[L_1 + L_2 \left(\frac{t_1 - t_2}{t_3 - t_2} \right) \right],$	$l \in \left(\frac{L_1}{2}, \frac{L_1 + L_2}{2} \right)$
III.	$t_2 < t_3 < t_1:$	$l = \frac{1}{2} \left[L_1 + L_2 \left(\frac{t_1 - t_2}{t_3 - t_2} \right) \right],$	$l \in \left(\frac{L_1 + L_2}{2}, L_1 \right)$
IV.	$t_2 \leq t_3 < t_1:$	$l = \frac{1}{2} \left[L_2 - L_1 \left(\frac{t_3 - t_2}{t_1 - t_2} \right) \right] + L_1,$	$l \in \left(L_1, L_1 + \frac{L_2}{2} \right)$
V.	$t_3 < t_2 < t_1:$	$l = \frac{1}{2} \left[L_2 + L_1 \left(\frac{t_2 - t_3}{t_1 - t_2} \right) \right] + L_1,$	$l \in \left(L_1 + \frac{L_2}{2}, L_2 \right)$

Rozdělení části turbíny zahrnující 1. až 3. rovinu pro výše uvedené případy místa rubbingu je zobrazeno na obr. 7-1.

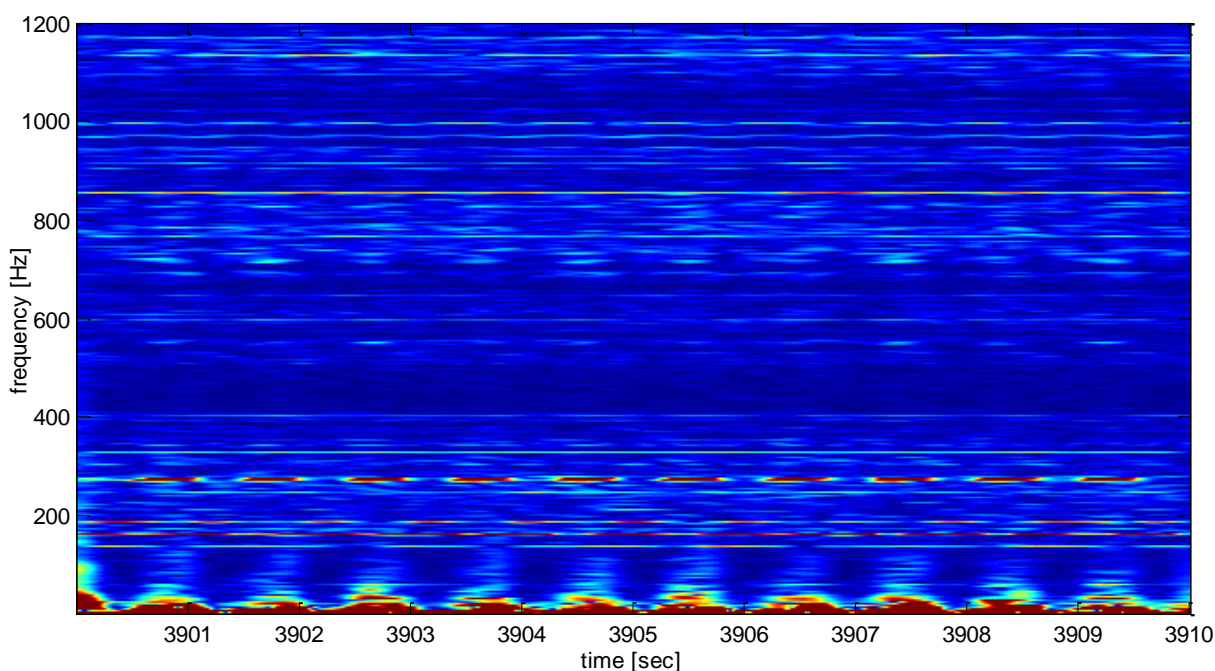


obr. 7-1: Rozdělení části turbíny pro jednotlivé případy místa kontaktu

Z velikostí časů t_1 , t_2 , t_3 představující detekované počátky vzruchů na jednotlivých rovinách lze určit, o jaký případ místa kontaktu se jedná (I - V). Přesné místo kontaktu je pak vypočítáno podle příslušného vztahu, přičemž podmínkou je, aby vypočítaná vzdálenost l náležela do daného intervalu. Všimněme si, že se jedná o pouze dva vztahy – pro případ I., II., III. jeden vztah, pro případ IV. a V. druhý vztah. Dále pak pro III. a IV. možnost nelze z velikostí časů t_1 , t_2 , t_3 přesně rozhodnout o jaký případ jde. To může být algoritmicky řešeno například tím, že se vypočítá vzdálenost místa rubbingu l pro jeden z těchto případů

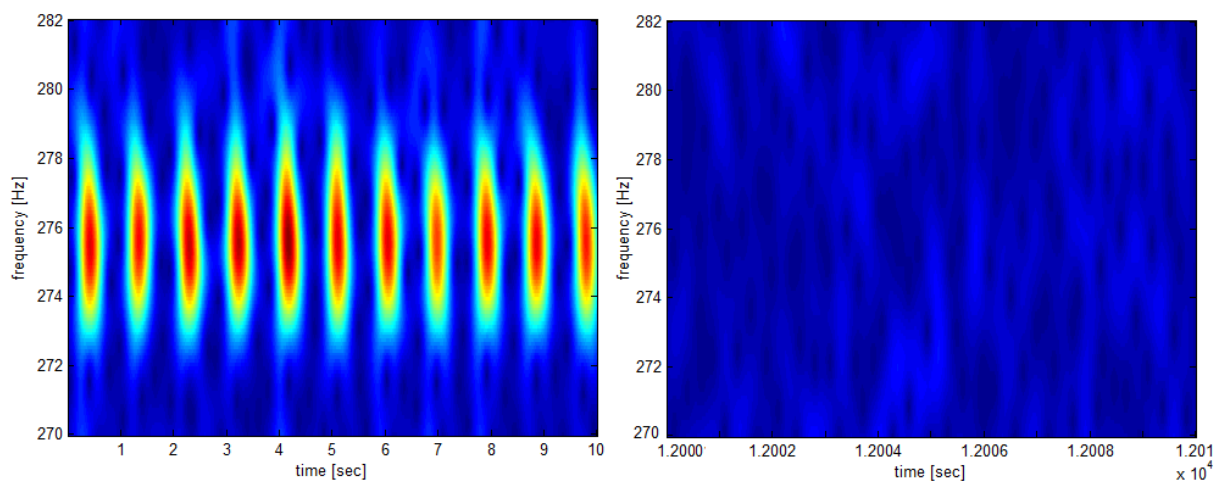
(např. pro III.) a pokud vypočítaná vzdálenost nevyhovuje příslušnému intervalu, je počítána pro druhý případ (IV.). Pokud není splněna podmínka (7.1), nenastává z velikostí časů t_1 , t_2 , t_3 ani jedna z uvedených pěti možností (např. pro „porušení“ kauzality: $t_1 < t_3 < t_2$) či vypočítaná vzdálenost místa kontaktu l nevyhovuje příslušnému intervalu, nejsou tyto případy zahrnovány do výsledné lokalizace.

Základním problémem v této části práce, se kterým jsme se v případě rotorového stendu nesetkali, je nalezení takových projevů v získaných datech, které skutečně souvisí s rubbingem. Neboť při kontaktu rotoru a statoru v parní turbíně nedochází v časových signálech absolutních snímačů ke vzniku amplitudově dominantních rázů, jako v případě rotor-stendu. K tomuto byly využívány metody pro časo-frekvenční zpracování signálů popsané v části 4.3. Při provozních otáčkách (resp. při sjezdu i nájezdu) nebyly zaznamenány žádné projevy kontaktu. Nicméně po odstavení turbíny z provozních otáček na natáčedlo došlo k výraznému ohnutí rotoru. Tento jev se po několika dnech opět opakoval, přičemž pokaždé trval v řádu několika hodin. Při zmenšení vůle mezi rotorem a storem (způsobený např. ohybem rotoru) se zvyšuje pravděpodobnost vzniku rubbingu. Právě při výše zmíněných ohybech byly v získaných datech zaznamenány některé projevy kontaktu rotor/stator (viz dále). Pokud nebude uvedeno jinak, v této části budou především použita data z 26. 3. 2012. Pro odhalení nestacionarit v měřených signálech, tedy i projevů rubbingu, byly používány časo-frekvenční metody zpracování signálů. Na obr. 7-2 je zobrazen spektrogram signálu z absolutního snímače vibrací umístěného v první měřicí rovině, který byl získán pomocí Gaborovy transformace. Ze spektrogramu je patrné, že signál obsahuje celou řadu dalších událostí. Které události skutečně souvisí s případným rubbingem a které nikoliv, je velmi obtížné určit. Nicméně se podařilo v získaných datech rozpoznat dva typy rubbingu. Jeden typ kontaktu představuje amplitudové navýšení v okolí frekvence 276 Hz. Druhý typ kontaktu pak souvisí amplitudovým nárůstem nízkofrekvenčních komponent signálu (nejvíce 0 – 10 Hz). Na obr. 7-2 jsou oba tyto projevy kontaktu viditelné, nicméně větší detail bude ukázán níže. Jak uvádí [3], první typ rubbingu bude dále označován jako nadbandážový kontakt, druhý pak jako hřídelový.

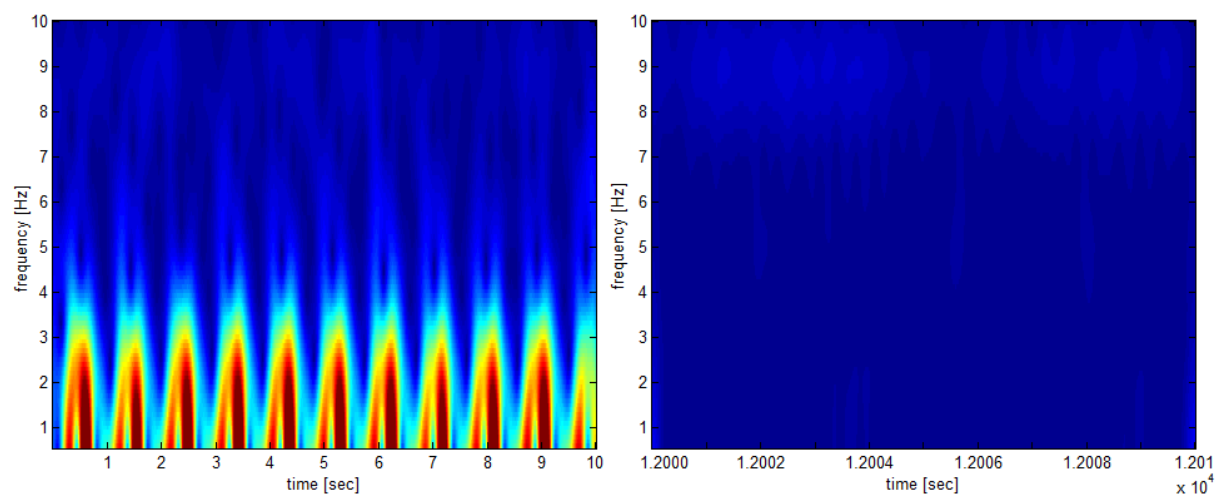


obr. 7-2: Spektrogram signálu z absolutního snímače vibrací (1. rovina)

Nadbandážový typ rubbingu se podařilo rozpoznat podle počtu určitých komponent statoru – tzv. brzdiček, které byly již uvedeny v kapitole 2. Brzdičky jsou po obvodu statoru rozmístěny v místech oběžných kol s lopatkami. Právě součin počtu brzdiček 260 (v případě vysokotlakého dílu výše uvedené parní turbíny) a frekvence otáčení rotoru na natáčecím stroji odpovídá frekvenci 276 Hz. Tedy v případě, kdy je vybudeno frekvenční pásmo okolí frekvence 276 Hz (při frekvenci otáčení rotoru na natáčedle) dochází k nadbandážovému rubbingu. Ke kontaktu v tomto případě dochází mezi tzv. bandáží a zmiňovanými brzdičkami. Bandáž je součástí rotoru a je umístována nad oběžné lopatky. V případě výraznějšího rozkmitání oběžných lopatek dochází pomocí bandáží k jakémusi uzamčení a zabrání v dalším výkmitu. Opakovaně bylo při nárůstu ohybu rotoru v získaných datech pozorováno vybudění nízkofrekvenčních složek signálu. Naopak při vyrovnávání rotoru k tomuto buzení již nedocházelo (viz dále). Tímto byl také indetifikován hřídelový typ rubbingu. Na obr. 7-3 resp. obr. 7-4 je dokumentován projev nadbandážového resp. hřídelového kontaktu. V levé části obou obrázků je zobrazen spektrogram signálu, při kterém vzniká daný typ rubbingu. Vpravo je pak zobrazen spektrogram části signálu bez projevu příslušného typu kontaktu. Spektrogramy byly získány ze signálu absolutního snímače vibrací umístěného v první rovině a to opět pomocí Gaborovy transformace. Je zřejmé, že v obou případech dochází ke kontaktu jednou za otáčku (tj. přibližně s frekvencí 1,067 Hz), přičemž dynamika obou projevů je ve srovnání s rázy, které vznikaly při rubbingu na rotorovém standu, výrazněji nižší (viz např. obr. 6-13).



obr. 7-3: Projev nadbandážového kontaktu

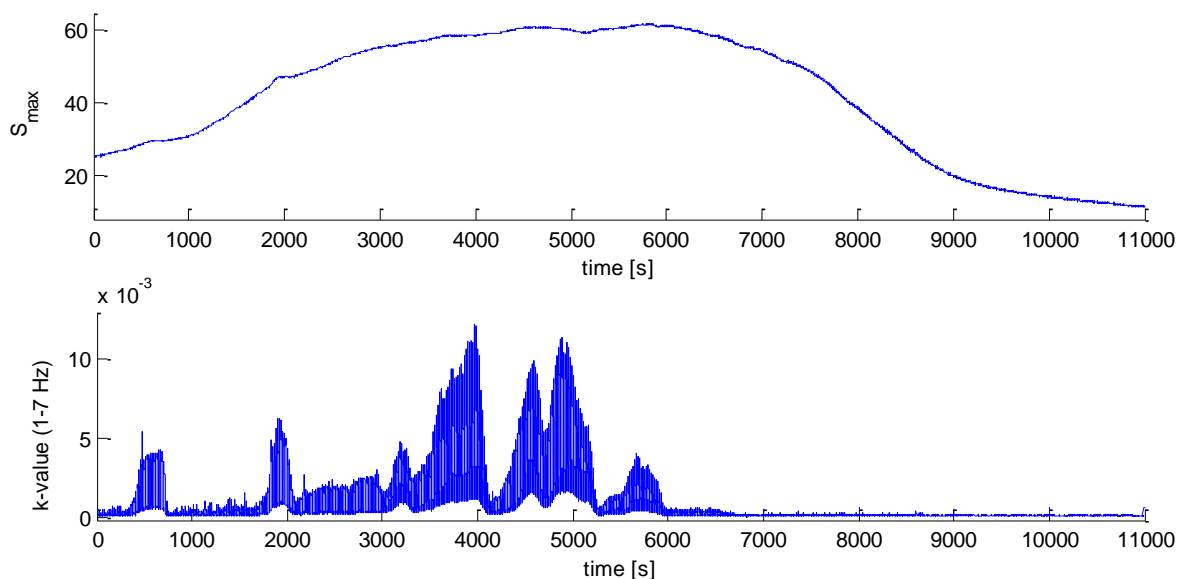


obr. 7-4: Projev hřídelového kontaktu

Na následujícím obr. 7-5 je zobrazena závislost ohybu rotoru a veličiny popisující přítomnost hřídelového rubbingu. Jedná se o data z první měřicí roviny naměřená 17. 3. 2012. Veličina určující případnou existenci hřídelového rubbingu byla zvolena jako průměrná amplituda spektrogramu pro frekvenční pásmo 1 – 7 Hz, tj. k-hodnota (viz 4.3.3). Ze získané k-hodnoty lze poměrně dobře stanovit, ve kterých časových okamžicích docházelo k hřídelovému kontaktu popř. s jakou intenzitou (viz dolní část obr. 7-5). Ohyb rotoru v dané rovině popisuje tzv. Smax veličina (viz horní část obr. 7-5). Smax veličinu lze určit pomocí dvou snímačů měřící relativní rotorové vibrace. Podmínkou ovšem je aby, oba snímače byly vzájemně umístěny pod úhlem 90° (nebo jejich signály příslušně transformovány). Potom hodnotu Smax veličiny pro i-tý vzorkovaný okamžik lze získat podle následujícího vztahu:

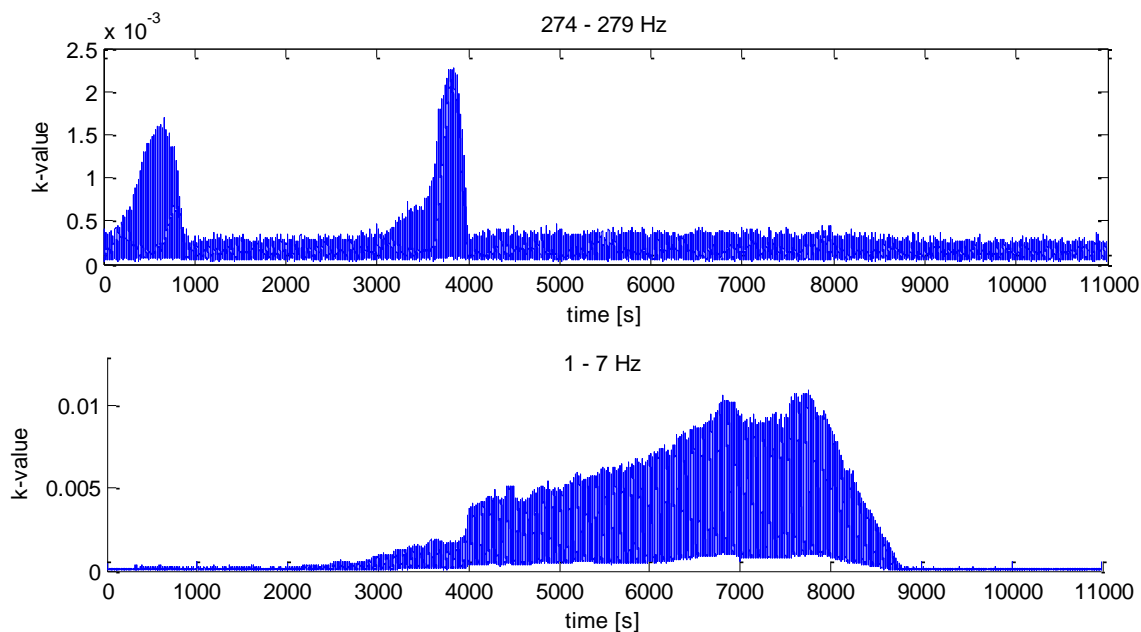
$$S_{max}(i) = \sqrt{x^2(i) + y^2(i)} \quad (7.2)$$

kde $x(i)$ resp. $y(i)$ je naměřená hodnota snímače x resp. y pro i -tý časový okamžik. Z obr. 7-5 je patrné, že v případě nárůstu ohybu rotoru (tj. přibližně pro časový okamžik 0 – 6000 sec) dochází zároveň ke vzniku hřídelového rubbingu. Naopak během vyrovnávání rotoru (tj. 6000 – 11000 sec) k tomuto kontaktu dále již nedochází. Podobná závislost byla pozorována v jiných datech (např. 26. 3. 2012) a také i pro druhý ze zmiňovaných typů rubbingu – tj. nadbandážový. Z tohoto je mimo jiné patrné, že oba uvedené projevy skutečně souvisí s kontaktem rotor/stator. Jak bylo již zmíněno, vlivem ohybu rotoru dochází ke zmenšení vůle mezi rotorem a státorem, což může být příčina vzniku rubbingu (hřídelový, nadbandážový). Naopak vznik rubbingu může být také příčinou ohybu rotoru. Například vlivem hřídelového rubbingu může docházet k nestejnomyšernému zahřívání rotoru v místě kontaktu, což může mít za následek právě jeho ohyb. Další důvod vzniku rubbingu může být spojen s deformací skříně turbíny, tedy nemusí dojít k výraznějšímu ohybu rotoru. K té dochází vlivem rozdílné teploty v různých částech skříně, způsobené odlišnou teplotou přehřáté vodní páry v jednotlivých dílech turbíny (vysokotlaký, středotlaký, nízkotlaký). Jistě by se našli i další důvody vzniku rubbingu, nicméně je společné právě zmenšení vůle mezi rotorem a státorem. Dodejme, že Smax veličiny popisují případný ohyb rotoru pouze v místech měření - v ložiskách (uzlech). Ohyb rotoru tedy mezi jednotlivými rovinami není znám. Proto může nastat situace, kdy je pozorován projev nějakého typu rubbingu, aniž by došlo k výraznějšímu nárůstu veličiny Smax. Je tedy zřejmé, že se jedná o poměrně různorodou problematiku.



obr. 7-5: Průběh ohybu rotoru a existence hřídelového kontaktu

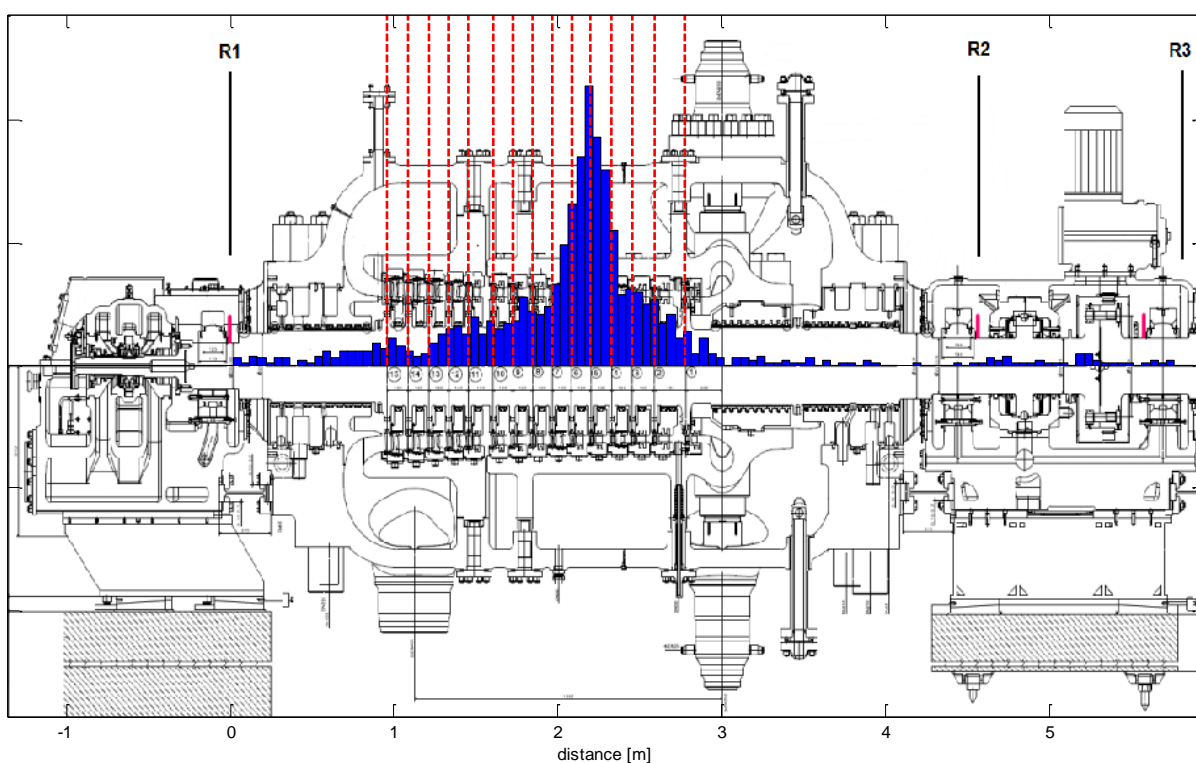
K oběma typům rubbingu často docházelo v podobných časových okamžicích (především data naměřená 17. a 26. 3. 2012). Nabízí se tedy otázka, zda pozorované projevy skutečně pocházejí od dvou různých typů rubbingu. Že se skutečně jedná o dva typy kontaktu je dokumentováno na obr. 7-6. Na obrázku je zobrazena průměrná amplituda spektrogramu v daném frekvenčním pásmu (k-hodnota) odpovídající příslušnému typu rubbingu. Jedná se o data z 19. května 2012. Přibližně pro časový okamžik 0 – 4000 sec je patrný především nadbandážový kontakt (viz horní část obr. 7-6). Naopak v časovém rozmezí 4000 – 9000 sec dochází pouze k hřídelovému rubbingu (viz dolní část obr. 7-6). Je tedy zřejmé, že se skutečně jedná o dva různé typy kontaktu, které se mohou vyskytovat nezávisle na sobě.



obr. 7-6: Nadbandážový a hřídelový rubbing v odlišných časových okamžicích

Důležitou skutečností je, že se v naměřených datech z provozu parních turbín podařilo rozpoznat některé projevy kontaktu rotor/stator. Oba výše uvedené projevy (nadbandážový, hřídelový) mohou být dále použity pro lokalizaci místa rubbingu. V této části budou pro lokalizaci použita výše zmiňovaná data z 26. 3. 2012. V tomto případě docházelo k hřídelovému i nadbandážovému kontaktu jednou za otáčku. Nejvíce byly projevy obou typů kontaktu pozorovány na prvních dvou rovinách, slaběji pak také na třetí. Z toho lze usuzovat, že k rubbingu docházelo právě mezi 1. a 2. rovinou. Navíc dodejme, že k nadbandážovému kontaktu může docházet pouze v místech umístění brzdíček (tj. nad oběžnými lopatkami), což je pouze mezi 1. a 2. rovinou (nikoliv 2. a 3.) přibližně v rozmezí 1 – 2.8 m vzhledem k rovině R_1 . Zaměříme se dále nejprve na lokalizaci nadbandážového rubbingu. Zkusme k tomu použít metodu navrženou při experimentech na rotorovém standu, pochopitelně vhodně nastavenou pro tyto projevy kontaktu. Nejprve je signál ze snímače měřící absolutní vibrace v první resp. druhé a třetí rovině filtrován pomocí sinc filtru. Dodejme, že vliv provozního šumu byl patrný především na třetí rovině. S ohledem na to bylo zvoleno frekvenční pásmo pro filtraci 274 – 279 Hz. Výsledkem filtrace je amplitudově modulovaná harmonická funkce, přičemž v určitých okamžicích dochází k výraznému navýšení amplitudy, což představuje počátek projevu kontaktu v dané rovině. Na filtrovaný signál dále použijeme metodu pro výpočet odhadu čtvrtého centrálního momentu. Jak bylo již zmíněno, dynamika projevů je výrazněji nižší než v případě rotorového standu. Proto byla zvolena vyšší časová konstanta filtru $\tau = 50 \text{ ms}$. Výraznější časová změna (nárůst) odhadu čtvrtého centrálního momentu představuje počátek projevu nadbandážového kontaktu. Pro detekci jednotlivých počátků

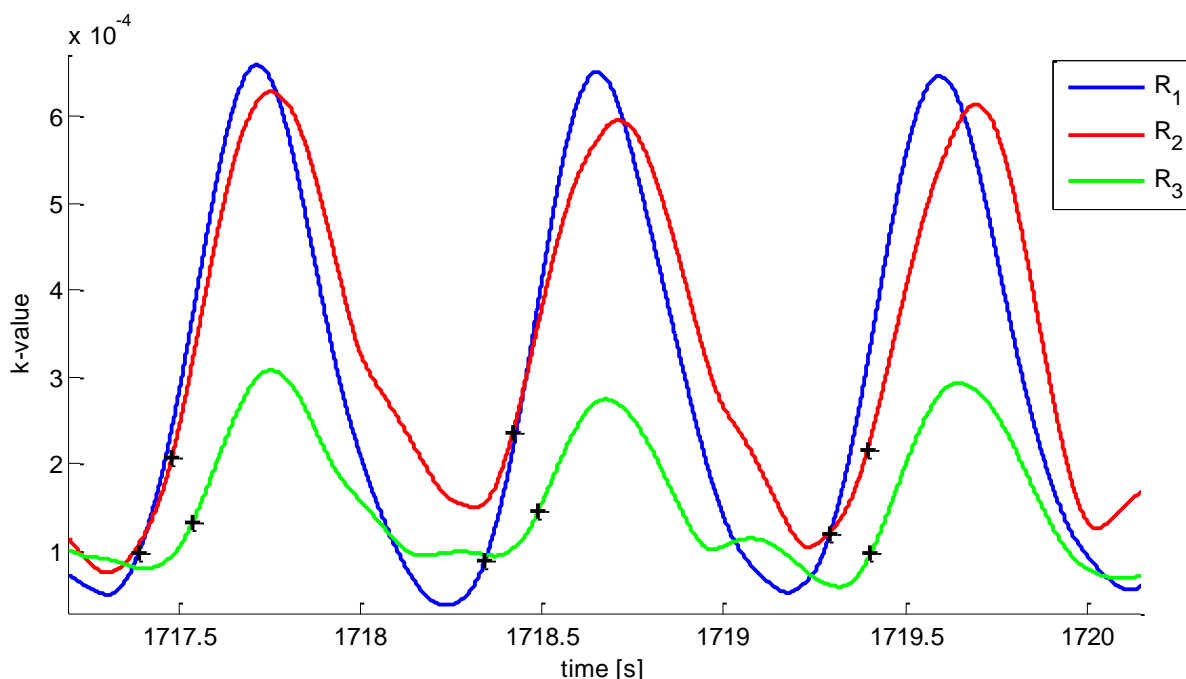
nárůstů čtvrtého momentu použijme metodu klouzavých oken s matematickou operací v okénkové funkci například podle vztahu (4.23). Délka okna byla zvolena přibližně 70 ms. Po detekování počátků projevů nadbandážového kontaktu na jednotlivých rovinách lze tedy přistoupit k výpočtu pravděpodobného místa kontaktu a to způsobem, který byl již podrobně uveden v této kapitole, tj. lokalizace rubbingu s využitím informace ze tří snímačů (viz výše). Jednotlivé vzdálenosti místa kontaktu vzhledem k 1. rovině jsou vypočítány na základě velikosti časů t_1, t_2, t_3 podle příslušného vztahu, přičemž musí být splněny určité podmínky. Výsledný histogram vzdáleností je dokumentován na obr. 7-7. Na tomto obrázku je dále zobrazeno schéma části příslušné turbíny zahrnující 1. až 3. rovinu. Rozdělení osy x je s měřítkem schématu totožné. Zároveň jsou vyznačeny pozice měřicích rovin R_1, R_2 a R_3 . Červenými přerušovanými čarami jsou pak zobrazena umístění jednotlivých oběžných kol s lopatkami, tedy místa, ve kterých může docházet k nadbandážovému rubbingu. Z výsledků je zřejmé, že s největší pravděpodobností docházelo k nadbandážovému kontaktu mezi 4. až 6. oběžným kolem, tj. přibližně ve vzdálenosti 2,08 – 2,33 m od roviny R_1 .



obr. 7-7: Lokalizace nadbandážového kontaktu v časové oblasti

Dále by měla být provedena lokalizace hřídelového rubbingu a to stejnou metodou, jako v případě kontaktu nadbandážového. Pozorované projevy hřídelového rubbingu na nízkých frekvencích (0-10 Hz), které byly ukázány na obr. 7-4, představují rozechvění (rozvibrování) stroje způsobené kontaktem rotor/ucpávka. Problém ovšem nastává v případě filtrovaného signálu pro tak nízké frekvence. V tomto signále je obtížné stanovit počátek projevu hřídelového kontaktu v dané rovině. Vhodnější způsob přináší jiná metoda vycházející ne z časové, ale z časo-frekvenční oblasti zpracování signálů. Tato metoda byla navržena ve spolupráci s autorem publikace [3], ve které je taktéž uvedena. Zkusme tuto metodu použít i pro nadbandážový rubbing, pro který byla lokalizace provedena v časové oblasti a porovnejme získané výsledky. Nejprve je pro signál ze snímače absolutních vibrací získán pomocí některé časo-frekvenční metody pro zpracování signálu amplitudový spektrogram. Nejčastěji k tomu byla opět používána aproximace spojitě Gaborovy transformace (viz 4.3.2). Pro nadbandážový rubbing byl spektrogram počítán pro frekvenční

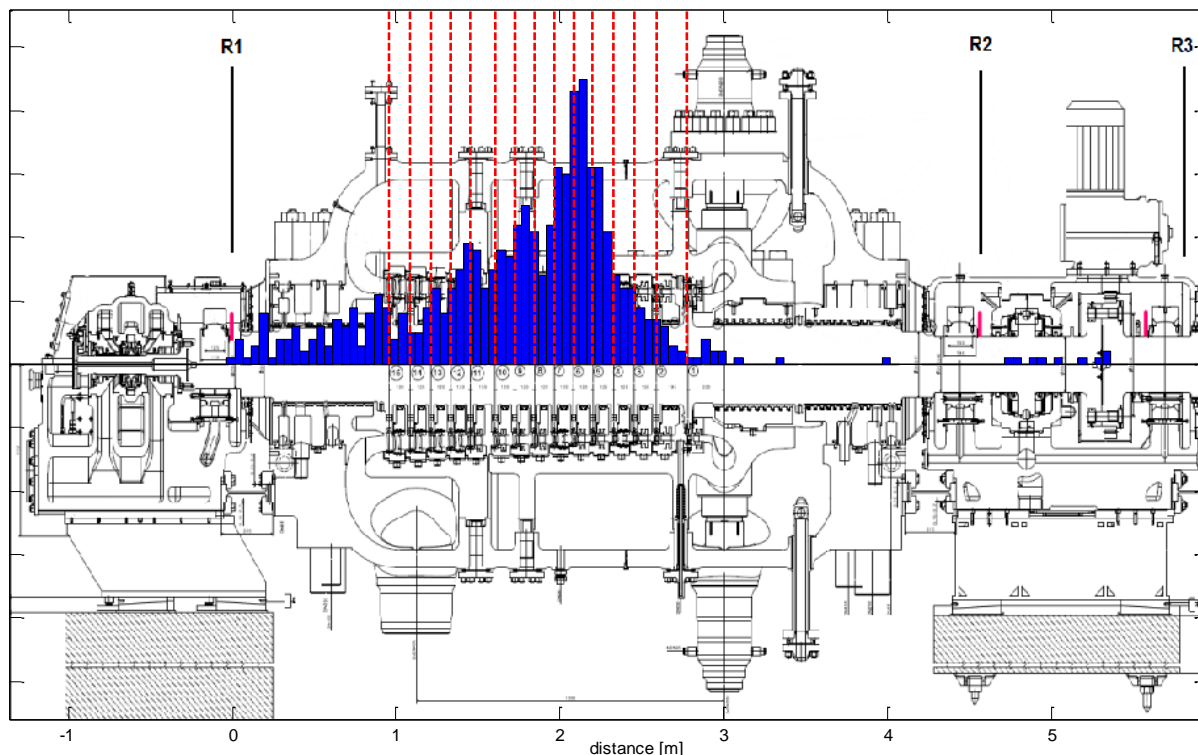
pásmo 274 – 280 Hz. Z amplitudového spektrogramu je dále získána průměrná amplituda v daném frekvenční pásmu (tzv. k-hodnota), viz část 4.3.3. V určitých okamžicích dochází k výraznému nárůstu k-hodnoty, což představuje počátek projevu nadbandážového rubbingu v dané rovině. Dalším krokem je tedy stanovení těchto okamžiků, což je realizováno pomocí metody klouzavých oken s výpočtem střední hodnoty signálu v dané okénkové funkci. Délka okna byla zvolena přibližně 50 ms. Nakonec je potřeba určit jednotlivá lokální maxima veličiny získané metodou klouzavých oken, která představují detekované počátky projevu nadbandážového rubbingu v příslušné měřicí rovině. Na obr. 7-8 je zobrazena průměrná amplituda spektrogramu frekvenčního pásma 274 – 280 Hz spolu s detekovanými počátky projevu kontaktu v rovině R_1, R_2 a R_3 . Z velikostí amplitud je patrné, že nadbandážový rubbing byl v získaných datech patrný především na první a druhé rovině.



obr. 7-8: Průměrná amplituda spektrogramu pro frekvenční pásmo 274 – 280 Hz

Další možností, jak určit počátek projevu kontaktu v získané k-hodnotě, je stanovení časového okamžiku, ve kterém k-hodnota dosahuje určitého procentuálního náběhu minimum-maximum (např. 10%). To ovšem nejprve vyžaduje nalezení minima a maxima daného projevu, což může být v některých případech nejednoznačné (např. 3. rovina s výrazným vlivem šumu). Dodejme, že oba tyto způsoby byly při lokalizaci v získaných datech vyzkoušeny, nicméně bylo dosaženo podobných výsledků. Po detekování počátků nadbandážového rubbingu na příslušných rovinách je dále přistoupeno k výpočtu jednotlivých vzdáleností místa kontaktu a to stejným způsobem, jako v předchozím případě (lokalizace v časové oblasti). Výsledný histogram vzdáleností je dokumentován na obr. 7-9. Z výsledků získaných výše popsanou metodou (vycházející z časo-frekvenční oblasti) je zřejmé, že k nadbandážovému kontaktu pravděpodobně docházelo mezi 4. až 7. oběžným kolem, což přibližně odpovídá vzdálenosti 1,97 – 2,33 m od roviny R_1 . Dále si všimněme, že výsledky lokalizace v časo-frekvenční oblasti mají větší rozptyl než v případě lokalizace v časové oblasti (méně koncentrovaný histogram, viz obr. 7-7 a obr. 7-9). Poznamenejme, že v jiných datech tomu bylo přesně naopak. Podstatné ovšem je, že nejčastější výskyty nadbandážového kontaktu v obou histogramech, získaných dvěma různými metodami (časová a časo-frekvenční oblast), se nacházejí na téměř stejných místech turbíny. Ačkoliv nemáme

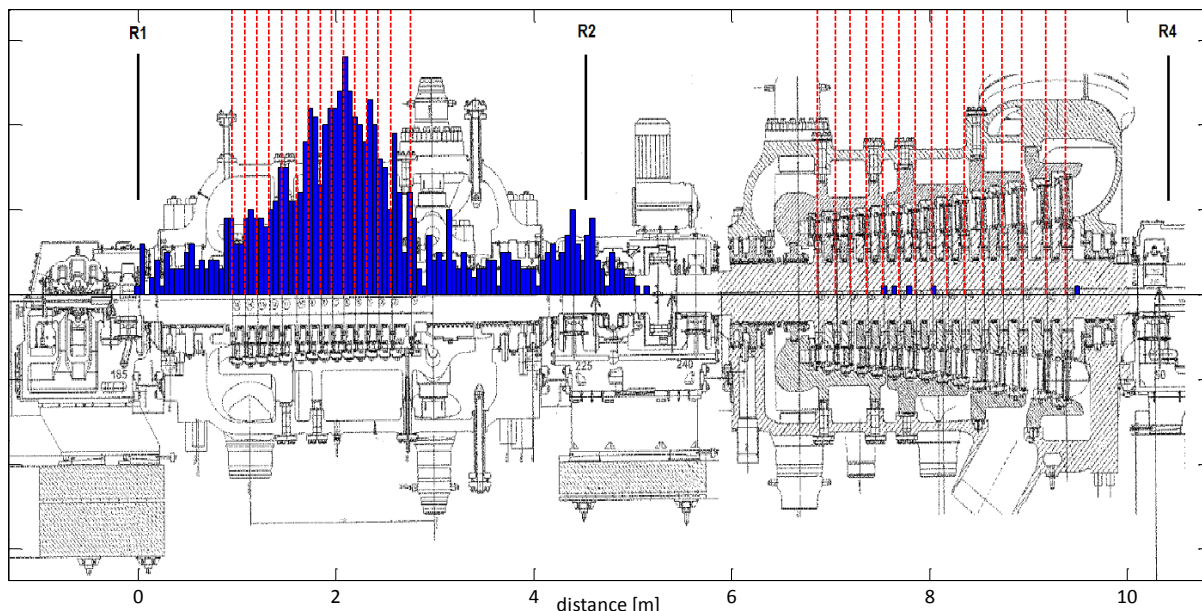
k dispozici žádnou zpětnou informaci o skutečném místě vzniku tohoto rubbingu, lze shodu výsledků obou metod do jisté míry považovat za potvrzení správnosti získané lokalizace.



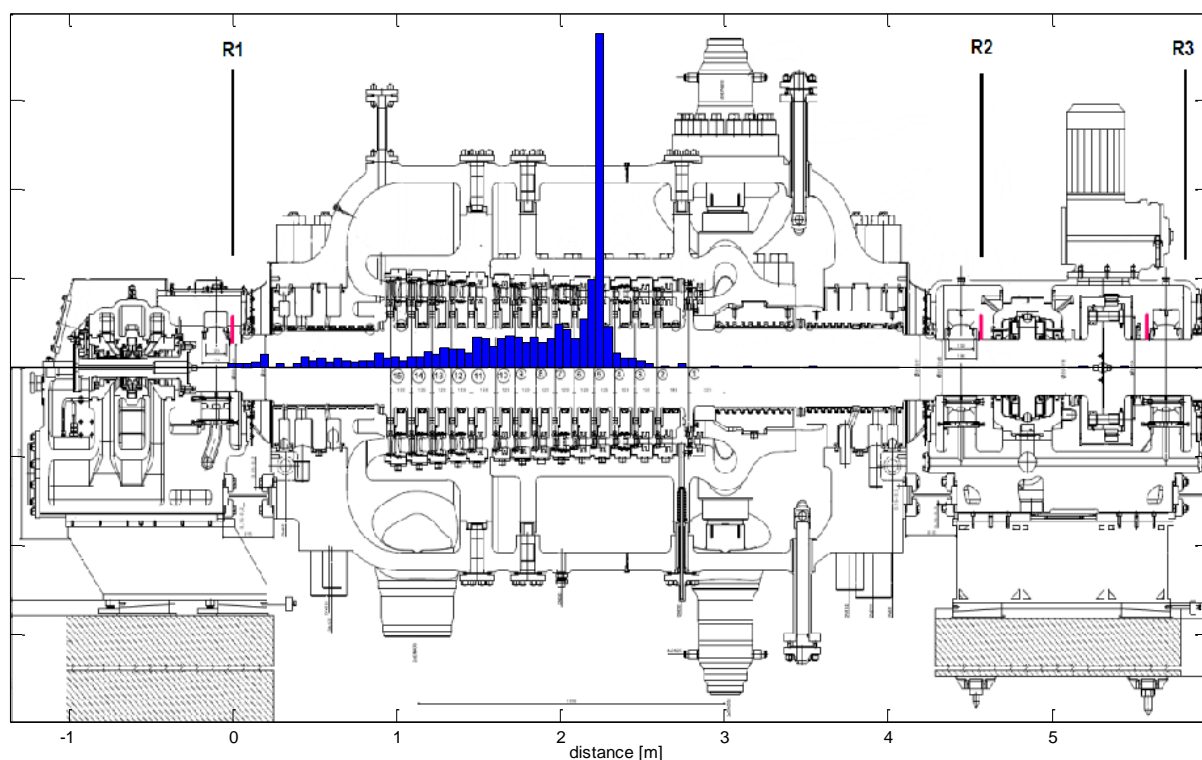
obr. 7-9: Lokalizace nadbandážového kontaktu v časo-frekvenční oblasti

Na závěr lokalizace nadbandážového rubbingu v datech z 26. 3. 2012 ukažme ještě jeden výsledek. Jak bylo již zmíněno, projevy tohoto typu kontaktu byly patrné především na prvních třech rovinách. Dodejme ovšem, že byly také slabě pozorovány i na čtvrté rovině. Amplituda těchto projevů byla ovšem o řád nižší, z čehož mimo jiné usuzujeme, že tyto projevy pocházejí od nadbandážového kontaktu vzniklého ve vysokotlakém dílu turbíny (tj. mezi 1. a 2. rovinou). Navíc kdyby docházelo k tomuto typu kontaktu ve středotlakém dílu (tj. mezi 2. a 4. rovinou), byly by projevy pozorovány v jiné frekvenční oblasti (než 276 Hz), neboť počet tzv. brzdiček je v této části turbíny vyšší. Použijme tedy některou z metod (časová oblast, časo-frekvenční oblast) pro lokalizaci nadbandážového rubbingu pomocí projevů na 1., 2. a 4. rovině. Poznamenejme, že vzdálenost mezi 2. a 4. rovinou (tj. 5,85 m) je výrazně větší než mezi 2. a 3. rovinou (1,25 m), přičemž přenosová cesta ke snímači v rovině R_4 zahrnuje další díl turbíny (středotlaký). Navíc se jedná na čtvrté rovině o poměrně slabé projevy. Z těchto důvodů nepůjde o přesnou lokalizaci místa kontaktu, ale spíše o potvrzení korektnosti používaného přístupu a výše získaných výsledků. Bude tedy podstatné, zda vypočítané vzdálenosti místa rubbingu budou především vycházet do oblasti možného vzniku nadbandážového kontaktu (tj. do oblasti kol s lopatkami) ve vysokotlakém dílu turbíny. Pro detekci počátků projevů na jednotlivých rovinách byla použita výše popsaná metoda vycházející z časové oblasti. Jak bylo již zmíněno, při odvozování vztahů pro výpočet místa kontaktu s intervalovými podmínkami bylo předpokládáno větší vzdálenosti mezi 1. a 2. rovinou než mezi 2. a v tomto případě 4. rovinou. Je tedy potřeba provést nové odvození vztahů s podmínkami nebo lze pouze zaměnit detekované časové okamžiky na 1. a 4. rovině a ponechat zbylý algoritmus, přičemž vypočítané vzdálenosti budou vztaheny k 4. rovině. Na obr. 7-10 je zobrazen výsledek lokalizace nadbandážového rubbingu pomocí 1., 2. a 4. roviny. Z výsledku je zřejmé, že nejčastější výskyty kontaktu jsou v oblasti oběžných kol s lopatkami

ve vysokotlakém dílu turbíny. Navíc maximum histogramu opět vychází na velmi podobné místo jako v případě lokalizace pomocí 1., 2. a 3. roviny. Potom tedy z výsledků lokalizace nadbandážového rubbingu získaných dvěma různými metodami, dokonce i s využitím projevu na čtvrté rovině, lze usuzovat na správnosti získané lokalizace a používaného přístupu, kterým bylo těchto výsledků dosaženo.



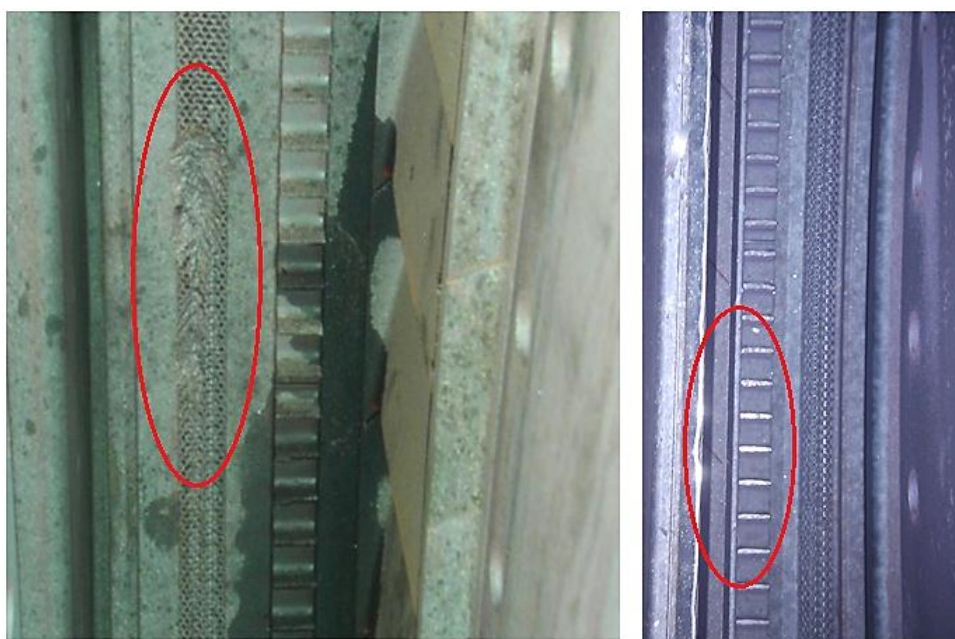
obr. 7-10: Lokalizace nadbandážového kontaktu pomocí 1., 2. a 4. roviny



obr. 7-11: Lokalizace hřídelového rubbingu

Jak bylo zmíněno, pro lokalizaci hřídelového kontaktu byla použita metoda vycházející z časo-frekvenční oblasti zpracování signálů, která byla popsána výše. Pro tento typ kontaktu byla počítána průměrná amplituda pro frekvenční pásmo 1 – 10 Hz. Počátky projevu

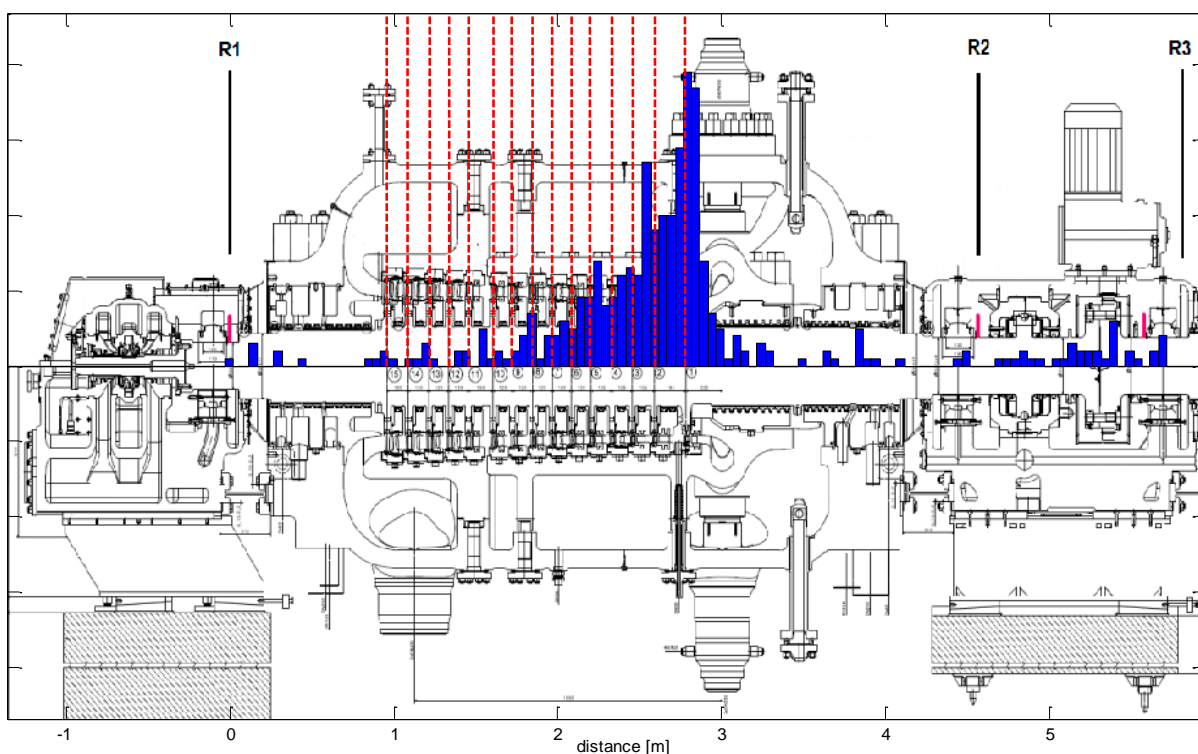
hřídelového rubbingu na jednotlivých rovinách (v podobě nárůstu k-hodnoty) byly opět stanoveny pomocí metody klouzavých oken s výpočtem střední hodnoty v okénkových funkcích. Poznamenejme, že projevy hřídelového kontaktu byly pozorovány pouze na prvních třech rovinách. Výsledek lokalizace je dokumentován na obr. 7-11. Výsledný histogram má zřejmé maximum přibližně ve vzdálenosti 2,24 m od roviny R_1 , tj. přibližně mezi 4. a 5. oběžným kolem. Dále je patrné, že vypočítané vzdálenosti místa hřídelového rubbingu jsou více koncentrované než v případě kontaktu nadbandážového, což je nejspíše způsobeno provozním šumem, jehož vliv byl více patrný právě pro nadbandážový rubbing (především pak na 3. popř. 4. rovině). Jak bylo již uvedeno, nepodařilo se v případě dat, pro která byla výše provedena lokalizace, získat zpětnou informaci o skutečném místě vzniku hřídelového a nadbandážového rubbingu. Dodejme ovšem, že po odstávce a dalším podrobném ohledání typově shodné turbíny s podobnými symptomy rubbingu byly nalezeny důsledky obou těchto typů rubbingu v podobě poničení některých částí stroje. Tato poničení byla pozorována v případě nadbandážového i hřídelového rubbingu přibližně mezi 4. až 6. oběžným kolem vysokotlakého dílu turbíny, tedy na velmi podobných místech, která byla výše lokalizována. Je tedy pravděpodobné, že v případě vzniku rubbingu 26. 3. 2012 skutečně docházelo ke kontaktu na výše lokalizovaných místech, neboť jsou obě turbíny z hlediska své konstrukce zcela stejné a navíc se potýkaly s podobnými problémy. Na obr. 7-12 jsou zobrazeny důsledky nadbandážového rubbingu po ohledání výše zmíněné turbíny. V levé části obrázku je patrné poškození ucpávky, vpravo je pak zřejmé obroušení několika brzdíček. Podobné důsledky byly pozorovány i pro hřídelový kontakt.



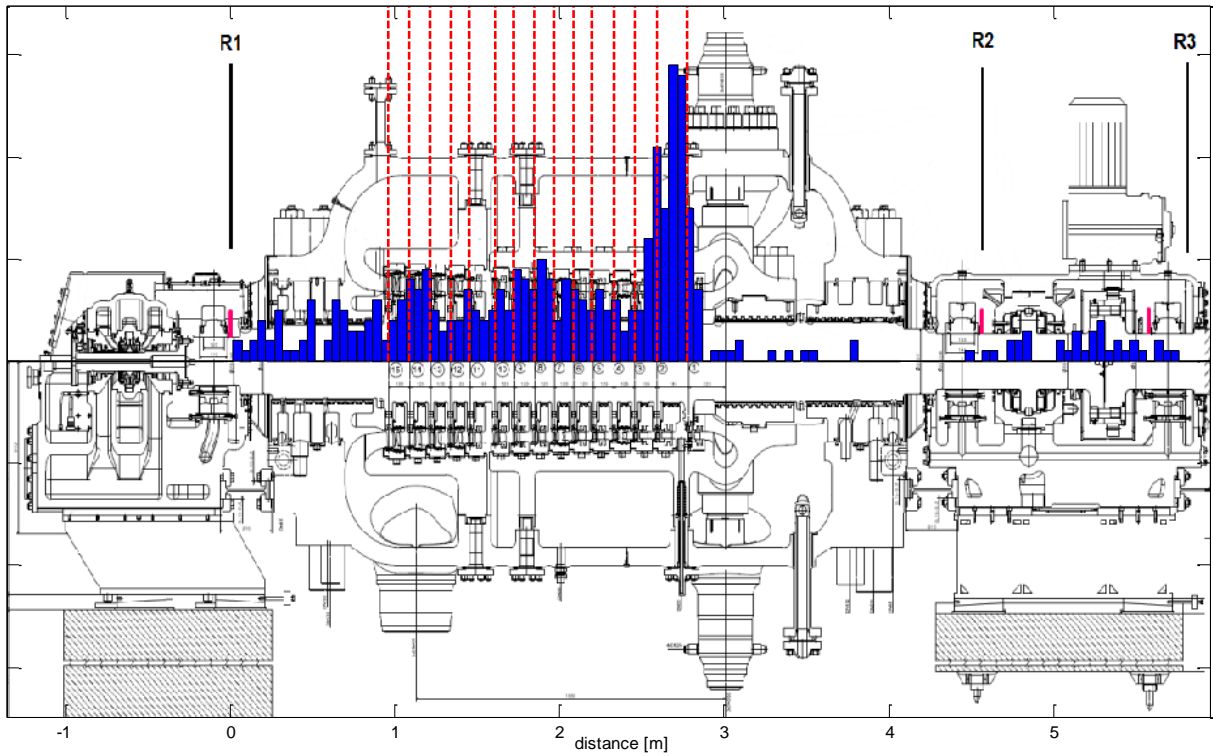
obr. 7-12: Důsledky nadbandážového rubbingu po ohledání turbíny

Dále jsou zobrazeny výsledky lokalizace rubbingu pro druhý soubor dat, který byl v této kapitole zmíněn. Jedná se o data naměřená 17. 3. 2012 na stejné parní turbíně. V těchto datech byly opět na prvních třech měřicích rovinách pozorovány oba typy rubbingu. V případě lokalizace nadbandážového kontaktu bylo k dispozici výrazně méně časových úseků, než v předcházejícím případě a to z důvodu šumu na třetí rovině. Pro lokalizaci nadbandážového rubbingu byly použity obě popsané metody vycházející jak z oblasti časové, tak oblasti časo-frekvenční. Lokalizace hřídelového rubbingu byla opět provedena pomocí časo-frekvenčního zpracování signálů. Z výsledků lokalizace nadbandážového rubbingu (viz obr. 7-13 a obr. 7-14) je zřejmé, že ke kontaktu docházelo s největší pravděpodobností

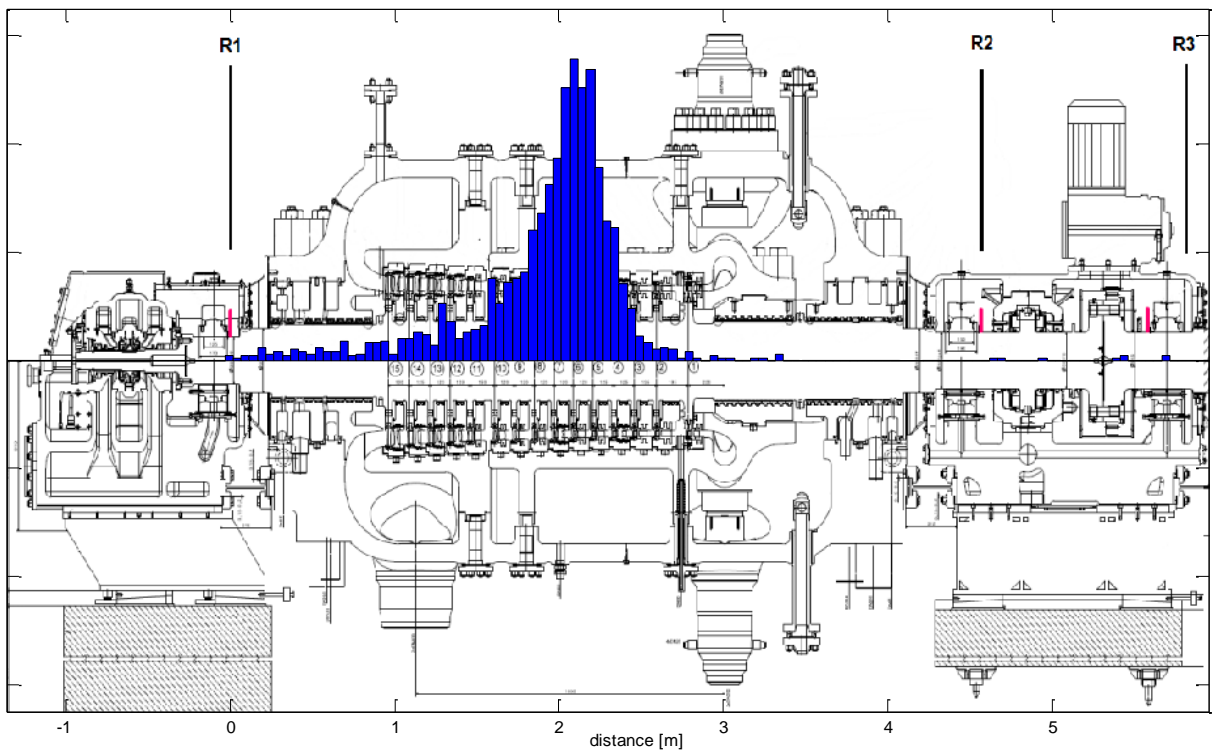
přibližně mezi 1. až 3. oběžným kolem, tedy ve vzdálenosti 2,46 – 2,78 m od roviny R_1 . Podstatné ovšem je, že se opět poměrně dobře shodují výsledky dosažené oběma metodami, což lze částečně považovat za hrubé ověření získané lokalizace. Na obr. 7-15 je dokumentován výsledek lokalizace hřídelového rubbingu. Nejčetnější výskyt se nachází přibližně mezi 5. až 7. kolem, tj. 1,97 – 2,2 m od R_1 , tedy na podobném místě jako v datech z 26. 3. 2012. Z výsledků je taktéž patrný větší vliv provozního šumu v případě nadbandážového rubbingu. Na závěr této kapitoly poznamenejme, že v datech naměřených v provozu parních turbín byly identifikovány i další projevy. Některé dokonce přímo souvisely se samotným rubbingem. Jako příklad uveďme nízkofrekvenční šum, který byl důsledkem dření rotoru a statoru. Z těchto projevů ovšem nebyla nikterak možná lokalizace, avšak svůj význam měli z hlediska detekce rubbingu.



obr. 7-13: Lokalizace nadbandážového rubbingu v časové oblasti (17. 3. 2012)



obr. 7-14: Lokalizace nadbandážového rubbingu v časo-frekvenční oblasti (17. 3. 2012)



obr. 7-15: Lokalizace hřídelového rubbingu (17. 3. 2012)

8 Závěr

Rubbingem je označován jakýkoliv mechanický kontakt rotující a stacionární části stroje. Přítomnost rubbingu v parních turbínách je velmi nežádoucím jevem, který může vést ke snižování účinnosti stroje až po jeho úplné zničení. Rubbing nastává po překročení stanovené vůle mezi rotorovou a stacionární částí, což může být způsobeno tepelnou deformací statoru – skříně turbíny nebo nárůstem rotorových vibrací. Samotný rubbing, jeho typy a příčiny jeho vzniku byly podrobně popsány ve druhé kapitole, kde byly dále uvedeny základní části parní turbíny právě z pohledu kontaktu rotor/stator. Hlavním cílem této práce bylo především navrhnout metodu pro automatickou lokalizaci místa vzniku rubbingu. Ve třetí kapitole byla proto nejprve rozebrána problematika současného stavu detekce a lokalizace kontaktu rotor/stator. Bohužel není příliš vědeckých publikací, které by se touto problematikou zabývaly, zvláště pak lokalizací rubbingu na reálných strojích v provozu. Důležitou částí při návrhu algoritmu lokalizace kontaktu rotor/stator byla volba metod, kterými by měly být měřené signály zpracovávány. Tyto metody byly shrnuty ve čtvrté kapitole, kde byly rozděleny do časové, frekvenční a časo-frekvenční oblasti. Metody pro zpracování signálů v časové oblasti se ukázaly být vhodné v případě amplitudově dominantních rázů, které například vznikaly při rubbingu na rotorovém stendu. Pro frekvenční analýzu a zpracování dat byla používána známá Fourierova transformace a sinc filtr. K získání časo-frekvenční reprezentace signálu byla pak využívána krátkodobá Fourierova transformace resp. její speciální případ - Gaborova transformace, která je vhodná pro odhalení nestacionarit v měřeném signále.

Tato práce je nejprve věnována lokalizaci rubbingu na rotorovém stendu, což bylo předmětem páté a šesté kapitoly. Jelikož se jednalo o poměrně krátkou hřídel, bylo nejprve ověřeno, zda je vůbec možné detekovat časové zpoždění dospění vzruchu k jednotlivým snímačům. Na základě analýzy získaných dat z experimentů byla dále v této části práce navržena metoda pro lokalizaci místa rubbingu hřídel/ucpávka, která vycházela z metod pro zpracování signálů v časové (a frekvenční) oblasti. V případě kontaktu hřídel/teflonová ucpávka se podařilo navrženou metodou velmi přesně lokalizovat místo vzniklého rubbingu. Postupně byly lokalizovány různé pozice teflonové ucpávky, navíc při proměnných otáčkách, při kterých vznikal kontakt. Dokonce se podařilo rozlišit změnu polohy ucpávky o pouhých 1,5 cm. Získané výsledky lze tedy považovat za velmi dobré, navíc zmíníme-li fakt, že šířka samotné ucpávky byla 3 cm. V případě rubbingu s kovovou (bodovou) ucpávkou nebyly výsledné histogramy vzdáleností tak koncentrované, jako v případě teflonové ucpávky, což neumožňovalo rozpoznat malé změny místa kontaktu. Přesto se poměrně přesně podařilo lokalizovat pět různých poloh kovové ucpávky na polovině hřídele stendu a to opět při různé frekvenci otáčení. Lokalizace kontaktu hřídel/ucpávka na rotorovém stendu by se mohla zdát relativně jednoduchou úlohou. Opak je ovšem pravdou a to z důvodu poměrně krátké hřídele. Například chybné detekování počátků vzruchů pouze o několik vzorků (při vzorkovací frekvenci 51200 Hz) již vedlo k nepřesné lokalizaci místa kontaktu hřídel/ucpávka (v řádu jednotek centimetrů). Problém s lokalizací mohl proto nastávat u rázů, jejichž počátky nebyly příliš amplitudově výrazné oproti zbylým úsekům signálu. Nejedná se tedy o zcela univerzální metodu pro jakékoliv vstupní signály obsahující projevy kontaktu, nicméně její dosažené výsledky (pro teflonovou i kovovou ucpávku) lze považovat za velmi dobré. Dodejme, že byla navrhována celá řada dalších metod (časo-frekvenční oblast), ovšem lepších výsledků nebylo dosaženo. Na základě této práce byly implementovány metody pro online lokalizaci rubbingu do diagnostického systému RAMS, který vznikl na Katedře kybernetiky

Západočeské univerzity v Plzni. Další experimenty prováděné na rotorovém standu se zabývaly provozním tvarem kmitu rotoru. Pomocí měření pouze ve třech (popř. čtyřech) bodech byla získána vizualizace chování hřídele při vzniklém rubbingu. Z vizualizace byla pak poměrně dobře rozpoznatelná pozice ucpávky, což poodkrývalo další možný způsob, jak k lokalizaci rubbingu vůbec přistupovat. Dále bylo zjištěno, že při kontaktu hřídel/ucpávka dochází ke vzniku a následnému šíření ohybového vlnění. Tím bylo mimo jiné vysvětleno, proč byly získané rychlosti šíření vzruchů nižší než rychlosti povrchových vln. Nakonec bylo také pozorováno, že při rubbingu může dojít ke změně provozního tvaru kmitu (ze základního např. na druhý).

Druhou hlavní částí této práce, které je věnována sedmá kapitola, byla lokalizace rubbingu v provozu parních turbín. Ačkoliv s velkou pravděpodobností v některých případech docházelo během měření na reálných strojích ke vzniku rubbingu, nebylo předem známo, jaké projevy skutečně souvisí s kontaktem rotor/stator popř. zda se vůbec v měřených signálech vyskytují. Mezi řadou událostí, které byly v signálech pozorovány, se podařilo pomocí časofrekvenční analýzy rozpoznat dva typy rubbingu – hřídelový a nadbandážový. Oba typy kontaktu, které byly pozorovány především na prvních třech rovinách, byly dále úspěšně lokalizovány. V této části práce byla také navržena další metoda pro lokalizaci rubbingu vycházející z časofrekvenční oblasti zpracování signálů. Lokalizace nadbandážového rubbingu byla provedena jak metodou používanou na rotorovém standu (časová oblast), tak i metodou vycházející z časofrekvenční analýzy. Hřídelový rubbing bylo možné lokalizovat pouze pomocí druhé ze zmíněných metod. Z výsledků lokalizace vyplynulo, že s největší pravděpodobností k nadbandážovému resp. hřídelovému rubbingu docházelo ve vysokotlakém dílu turbíny přibližně ve vzdálenosti 2,08 – 2,33 m (tj. mezi 4. až 6. oběžným kolem) resp. 2,24 m vzhledem k první rovině. Ačkoliv nebyla získána žádná zpětná informace o skutečném místě vzniku obou typů kontaktu, na správnosti získané lokalizace a používaného přístupu lze usuzovat na základě poměrně dobré shody výsledků, kterých bylo dosaženo dvěma rozdílnými metodami (časová, časofrekvenční oblast) v případě nadbandážového rubbingu. Totéž dokonce podporují výsledky lokalizace, které byly dále získány pomocí projevů i na 4. rovině, což mimo jiné zahrnuje další díl turbíny (středotlaký). Navíc po odstávce a dalším podrobném ohledání typově shodné turbíny, která měla podobné příznaky rubbingu, byly objeveny důsledky obou typů kontaktu v podobě poničení některých částí stroje a to na velmi podobných místech (4. až 6. oběžné kolo ve vysokotlakém dílu). Jelikož se jedná z hlediska konstrukce o zcela stejné turbíny, je pravděpodobné, že ke kontaktu v datech z 26. 3. 2012 skutečně docházelo na námi lokalizovaných místech. Nakonec byla analogickým způsobem provedena lokalizace obou typů kontaktu pro jiná data (17. 3. 2012), na kterých byla opět v případě nadbandážového rubbingu dokumentována velmi dobrá shoda získaných výsledků pro obě použité metody.

Literatura

- [1] Hall, L. D., Mba, D.: *Diagnosis of continuous rotor-stator rubbing in large scale turbine units using acoustic emissions*. Ultrasonics 41, p. 765-773, 2004
- [2] Sato, I.: *Rotating machinery diagnosis with acoustic emission techniques*. Electr. Eng. Jpn. 2 (1990) 110
- [3] Jakl, J.: *Výzkum a vývoj metod a algoritmů pro detekci a lokalizaci rubbingu na parních turbínách*. Disertační práce, ZČU Plzeň 2014
- [4] Boublerle, A.: *Analýza úlohy lokalizace kontaktu rotor/stator v parních turbínách*. Bakalářská práce, ZČU Plzeň 2012
- [5] 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.
- [6] *RK4 Rotor Kit*, uživatelský manuál, Bently Nevada LLC, 2000
- [7] Liška, J., Jakl, J., Janeček, E.: *Rubbing na parních turbínách a metody jeho detekce*. Výzkumná zpráva ZČU, Plzeň 2010
- [8] Liška, J.: *Časo-frekvenční metody lokalizace volných částí v diagnostice energetických zařízení*, Disertační práce, Plzeň 2008
- [9] Smith, S. W.: *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, San Diego, California, ISBN 0-9660176-6-8, second edition 1999
- [10] Maragos, P., Kaiser, J. F., Quantieri, T. F.: *On amplitude and frequency demodulation using energy operators*. IEEE Transactions on Signal Processing, 41, 3024-3051, 1993
- [11] Muszynska, A.: *Rotordynamics*. Taylor & Francis Group, CRC Press, 2005, ISBN 0-8247-2399-6
- [12] Jakl, J., Liška, J., Janeček, E.: *Výzkum a vývoj metod lokalizace rubbingu a jejich automatizace*. Výzkumná zpráva, ZČU Plzeň, 2013
- [13] Vejražka, F.: *Signály a soustavy*, učební text, ČVUT, Praha, 1992
- [14] Vaseghi, S., V.: *Advanced digital signal processing and noise reduction*, John Wiley & sons, 2008, ISBN 978-0-470-75406-1
- [15] Cohen, L.: *Time-frequency distributions*, Proceedings of the IEEE, Vol. 77, No. 7, 1989
- [16] Mertins, A.: *Signal Analysis: Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms and Applications*, John Wiley & sons, ISBN 0-471-98626-7, 1996

-
- [17] Soares, L. R., de Olivera, H. M., Cintra, R. J. S., Campello de Souza, R. M.: *Fourier Eigenfunctions, Uncertainty Gabor Principle and Isoresolution Wavelets*, Rio de Janeiro, 2003
- [18] Skopal, V., Adámek, J., Hofírek, M.: *Stavba a provoz strojů IV*, Praha, 1982
- [19] Michele, F.: *Parní turbíny a kondenzace, plynové turbíny a turbokompresory, konstrukce*, učební text, VUT Brno, 1985