

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta aplikovaných věd
Katedra kybernetiky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Využití optických snímačů v úloze bezkontaktního
monitorování lopatek

Autor: Bc. Jaroslav Hajdúk
Vedoucí práce: Ing. Jindřich Liška, Ph.D.

Plzeň, 2013

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

.....

vlastnoruční podpis

Poděkování: Rád bych poděkoval Ing. Jindřichu Liškovi Ph.D a Ing. Jaromíru Strnadovi za vedení diplomové práce a podnětné konzultace.

Abstract

Tato diplomová práce pojednává o možnosti měření clearance parních turbín pomocí optických sond. V teoretické části jsou nejprve shrnuty informace o konstrukcích parních turbín a o chování parních turbín při provozu. V další části jsou rozebrány možné přístupy měření vibrací a clearance na parní turbíně. Je odůvodněn výběr optických sond pro měření clearance a navrženo několik principů měření. U každého principu je vyhodnocena použitelnost v praxi. V praktické části je popsáno testování optické sondy s jedním a dvěma paprsky na různých standech. Výsledky testů ukazují, že použité konstrukce optických sond jsou funkční, ale je nutné zlepšit přesnost měření zejména jejich kalibrací.

Klíčová slova: parní turbína, lopatka, vibrace, clearance, měřící sondy, optické sondy, sonda s dvojitým paprskem, tip-timing, zpracování signálu

The diploma thesis deals with the steam turbines clearance measurement principles using optical probes. In the first theoretical part informations about design of steam turbines and behaviour of turbines in the service are summarized. Then practicable principles of the clearance and vibrations measurement are discussed. The decision why the optical probes have been chosen is explained and several principles using optical probes are suggested. For every single principle the industrial applicability is discussed. In the practical part single beam and dual beam probes are tested and results are evaluated. The results show that used principles using optical probes work properly but in order to achieve better results it is necessary to use especially calibration of the probes.

Keywords: steam turbine, blade, vibration, clearance, measuring probe, optical probe, dual beam probe, tip-timing, data processing

Obsah

1	Úvod	1
2	Teoretická část zaměřená na parní turbíny a jejich parametry	3
2.1	Parní turbíny	3
2.1.1	Rozdělení turbín	3
2.2	Monitorování dynamických parametrů turbín	11
2.2.1	Příčiny vzniku vibrací či clearance	11
2.2.2	Rozdělení vibrací	12
2.2.3	Vibrodiagnostika lopatkového kola	14
2.2.4	Monitorování clearance	17
3	Druhy měřících sond a jejich srovnání	19
3.1	Původní přístup pomocí kontaktního měření	19
3.2	Tip - timing	20
3.3	Druhy měřících sond a jejich srovnání	21
3.3.1	Kapacitní	21
3.3.2	Mikrovlonné	23
3.3.3	Indukční	24
3.3.4	Optické	25
4	Rozbor použitých návrhů optických sond	27
4.1	Pomocí změny intenzity signálu	27
4.2	Pomocí optické triangulace	30
4.3	Přímé měření času odrazu signálu od lopatky a klasické měření BTT	32
4.4	Optická sonda využívající jednoho nakloněného paprsku	33
4.5	Optická sonda s dvojitým paprskem	35
4.6	Optická sonda s dvojitým paprskem - modifikovaná verze	39
4.7	Optická sonda využívající optické interferometrie	41
5	Testování optických sond	45
5.1	Měřicí systém	45
5.1.1	Stand - Merkur	46
5.1.2	Stand - HDD	46
5.1.3	Uživatelské rozhraní pro testování	47
5.2	Sonda s jedním paprskem	48
5.2.1	Zpracování dat	48
5.2.2	Výsledky	50
5.3	Sonda se dvěma paprsky	53
5.3.1	Zpracování dat	53
5.3.2	Výsledky	55
5.4	Sonda se dvěma paprsky - modifikovaná verze	57
5.4.1	Zpracování dat	57
5.4.2	Výsledky	58
6	Závěr	59

1 Úvod

Moderní společnost se stala vysoce závislou na stabilních dodávkách energie, zejména elektrické. Je tedy nutné zaručit, že části procesu podílející se právě na její výrobě budou soustavně modernizovány a vylepšovány ať už z důvodů ekonomických či bezpečnostních, kdy by například několikadenní výpadek elektrické energie mohl způsobit nedozírné škody. Ačkoliv existuje mnoho rozličných typů elektráren, které využívají různé druhy paliva k výrobě elektrické energie, většinu těchto elektráren spojuje princip výroby tepelné energie a její přeměny na energii mechanickou a dále elektrickou. A právě tímto pojátkem z důvodu nutnosti přeměny tepelné energie na mechanickou, jsou parní turbíny.

Jak bylo zmíněno, parní turbína je složitý stroj využívající termodynamických vlastností plynů k přeměně jejich tepelné energie na energii mechanickou. Tato výměna je často realizována pomocí páry o vysoké teplotě, tlaku a průtoku, a součásti turbíny jsou tedy vystaveny nehostinnému prostředí, které se projevuje na jejich opotřebení. Toto opotřebení může způsobit až nucené odstavení turbíny. To samosebou přináší výrazné problémy pro energetické společnosti, kdy zejména jaderné elektrárny, které jsou známé svými vysokými pořizovacími náklady a nízkými provozními náklady, přicházejí kvůli neplánovaným odstávkám o vysoké příjmy. Je tedy požadováno tyto poruchy či havárie omezit, nakolik to je jen možné. Jednou z možností omezení poruch by mohla být výměna lopatek turbíny při každé pravidelné odstávce, aby se minimalizovala možnost havárie. Jenže toto řešení je velice finančně náročné a neefektivní. Je totiž možné, že se budou pravidelně měnit součásti, které by to nepotřebovaly. Vyvstává tedy otázka, jak vhodně určit tento interval výměny, aby se předešlo poruchám, ale aby se na druhou stranu zbytečně nepřerušovala výroba. Tato diplomová práce se zaměřuje na metody detekce možných příznaků namáhání a opotřebení lopatkových kol. Za pomoci těchto metod měření bylo možné určit vhodný interval výměny.

Mezi hlavní dynamické vlastnosti lopatek patří jejich vibrace a clearance. Mezi vibrace se řadí kmitání lopatek v různých směrech - axiálním, radiálním a tangenciálním. Hlavní důraz je kladen na měření clearance, což je mezera mezi konci lopatek a statoru turbíny. Měřením vibrací můžeme zjistit, která lopatka je namáhána, jaká je amplituda vibrací či zda se tato amplituda nezvyšuje. Také je možné zjistit, za kterých provozních podmínek tyto vibrace nastávají. Následně je možné se těmito podmínkám vyhnout či jejich vznik co nejvíce omezit. Měřením clearance se může odhalit například prodloužení lopatky způsobené únavou materiálu či nevyváženost rotoru. V krajním případě by se mohla mezera snížit natolik, až by došlo k tzv. rubbingu, tedy kontaktu rotoru a statoru.

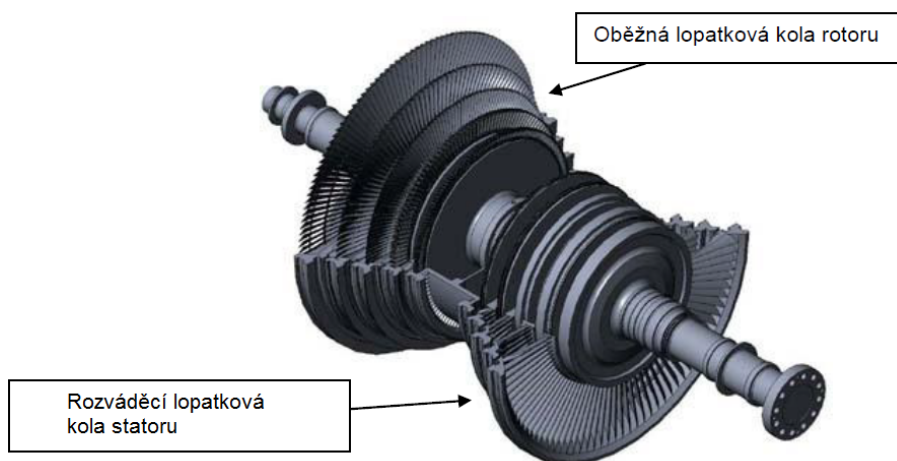
Měření vibrací a clearance lopatkových kol není ničím novým, ale nový je přístup použitý k měření. Stávající metody využívající sond připevněných přímo na lopatkách vystřídaly metody nové, bezkontaktní, které dokáží eliminovat některé nevýhody metod kontaktních. Kontaktní metody například neumožňují nepřetržitý monitoring a mají omezenou životnost, proto se hodí zejména pro testovací účely či pro jednorázová měření s nutností rozebrat stroj. Bohužel ale vyvstávají problémy nové, kdy se konstruktéři musí zaměřit na odolnost sond vůči vysoce nepříznivému prostředí uvnitř turbíny. Většina měření s využitím těchto sond využívá principu

tip-timing. Tip timing je metoda, kde jsou snímány časy průletů lopatek před senzorem a z těchto naměřených dat je možné zjistit požadované údaje o vibracích či clearance. Ideálním řešením by byla konstrukce sondy, která by umožňovala měřit současně vibrace a clearance a tyto veličiny by bylo možné pomocí zpracování signálu číst v reálném čase. Požadovaná hodnota rozlišení změny clearance je stanovena na $10\mu m$.

2 Teoretická část zaměřená na parní turbíny a jejich parametry

2.1 Parní turbíny

Většina energie, která je vyrobena v České republice, pochází z elektráren, které využívají ohřevu média, většinou demineralizované vody. Jde tedy například o elektrárny jaderné, uhelné či paroplynové. Nedílnou součástí právě těchto, pro moderní společnost naprosto nezbytných, průmyslových procesů je parní turbína. Je to právě parní turbína, která dokáže za pomoci změny tlaků urychlit hnací médium, a přeměnit tak kinetickou energii vodní páry na energii mechanickou, v případě parní turbíny energii rotační, kterou získá rotor - otáčivá část turbíny. Jelikož je turbína spojena hřídelí s generátorem, tato rotační energie je dále přeměněna právě jím na energii elektrickou. Podle [28] je kolem 90% generátorů v USA poháněno právě některým typem parní turbíny. V České republice se elektrárny využívající parních turbín podílí podle ČEPS a.s. více jak 95% na celkové výrobě elektrické energie. Spojení parní turbíny a generátoru je nazýváno jako turbogenerátor. Obvyklý elektrický výkon těchto soustrojí se pohybuje od řádů kW až k výkonům přesahujícím 1GWe.



Obrázek 1: Řez parní turbínou (převzato z [1] a upraveno)

2.1.1 Rozdělení turbín

Podle [1], [25], [26] a [10] je možné rozdělit parní turbíny či jejich součásti podle těchto následujících kritérií.

1. Podle tlaku výstupní páry

Dosažitelný tlak výstupní páry je jeden z parametrů ovlivňující účinnost celé turbíny. Čím větší změnu tlaku může turbína využít, tím více může přeměnit energie termodynamické na mechanickou.

- **Turbíny protitlakové**

Tlak výstupní páry je u této turbíny stejný nebo vyšší, než je tlak atmosférický. Jelikož není tímto využít celý energetický potenciál páry, nejsou tyto turbíny často využívané v energetice, ale spíše v závodech jako jsou rafinerie, teplárny atd. Tedy závody, kde se tato pára dále využívá a není ihned vrácena zpět do oběhu.

- **Turbíny kondenzační**

Kondenzační turbíny jsou využity především v elektrárnách, jelikož dovolují využít téměř celý potenciál vodní páry. Za posledním stupněm nízkotlaké části turbíny je instalován kondenzátor, kde se voda ochlazuje až na teplotu 15°C. V kondenzátoru tím vzniká nízký tlak blížící se vakuu, a proto se říká, že pára zde kondenzuje až do vakua. Na obrázku sekundárního okruhu JETE (3) je tyto kondenzátory možné najít pod zkratkami 1HK, 2HK a 3HK. Jak je patrné, kondenzátory jsou chlazeny terciálním okruhem a teplo z nich je odváděno pomocí cirkulačního čerpadla (ČCCHV) do chladicích věží (CHV). Ačkoliv je zde snížena teplota média pouze o několik málo °C, je nutné na jednom bloku JETE dodávat 36500 m³/h chladicí vody. Samotný kondenzátor jde zde řešen jako soustava titanových trubek s co největší možnou teplosměnnou plochou (23200 m²).

2. Podle principu funkce

Toto kritérium definuje, jakým způsobem je získána energie, respektive které díly turbíny se podílejí na snížení tlaku a zvýšení rychlosti média, které tímto způsobem předá svou energii. Na obrázku 2 je vidět nákres možné konstrukce (vlevo - rovnotlaká, vpravo - přetlaková) s grafy průběhu tlaku (p) a rychlosti (c) páry. Podle [23] je rovnotlaký stupeň schopen optimálně zpracovat při stejné obvodové rychlosti přibližně dvojnásobný izoentropický tepelný spád než přetlakový. To umožňuje konstruovat turbíny s menším počtem stupňů. Teplota páry se po odevzdání energie sníží.

- **Turbíny rovnotlaké - akční či impulsní**

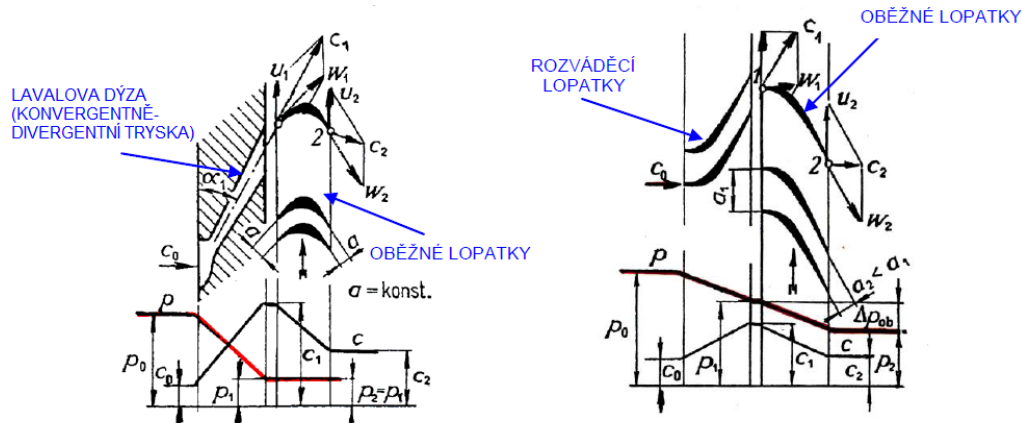
Rovnotlaká turbína má stejný tlak páry před oběžným lopatkovým kolem jako za ním. Úbytek tlaku na tlak atmosférický (protitlakové turbíny) či do vakua (kondenzační turbíny), tedy celý entalpický spád, a zvýšení rychlosti probíhá na rozváděcích lopatkách, které fungují jako dýzy. Pára o vysoké rychlosti, tedy s vysokou pohybovou energií, je následně přivedena na oběžné lopatkové kolo, kde se energie využije na jeho roztáčení.

- **Turbíny přetlakové - reakční**

Tlak páry před lopatkovým kolem a za ním se u tohoto druhu turbíny liší. Částečně se tlak sníží již na rozváděcích lopatkách a poté také na oběžném lopatkovém kole. Rychlost páry na rozváděcích lopatkách opět vzrůstá a snižuje se na lopatkovém kole.

- **Turbíny smíšené**

V těchto turbínách se na různých stupních využívá obou principů.



Obrázek 2: Rozdíl mezi rovnotlakou (nalevo) a přetlakovou (napravo) turbínou (převzato z [1] a upraveno)

3. Podle počtu stupňů

Jeden stupeň turbíny je definován jednou satorovou a rotorovou lopatkovou řadou.

- **Turbíny jednostupňové**

Jednostupňovou turbínou může být například turbína Lavalova.

- **Turbíny vícestupňové**

Vícestupňová turbína je například uvedena na obrázku 1. Jednotlivé stupně jsou v turbíně odstupňovány podle tlaku páry. Každý stupeň sníží tlak páry, a další tedy musí pracovat již s tlakem sníženým. Tato vlastnost musí být uvažována při návrhu turbíny.

4. Podle počtu těles

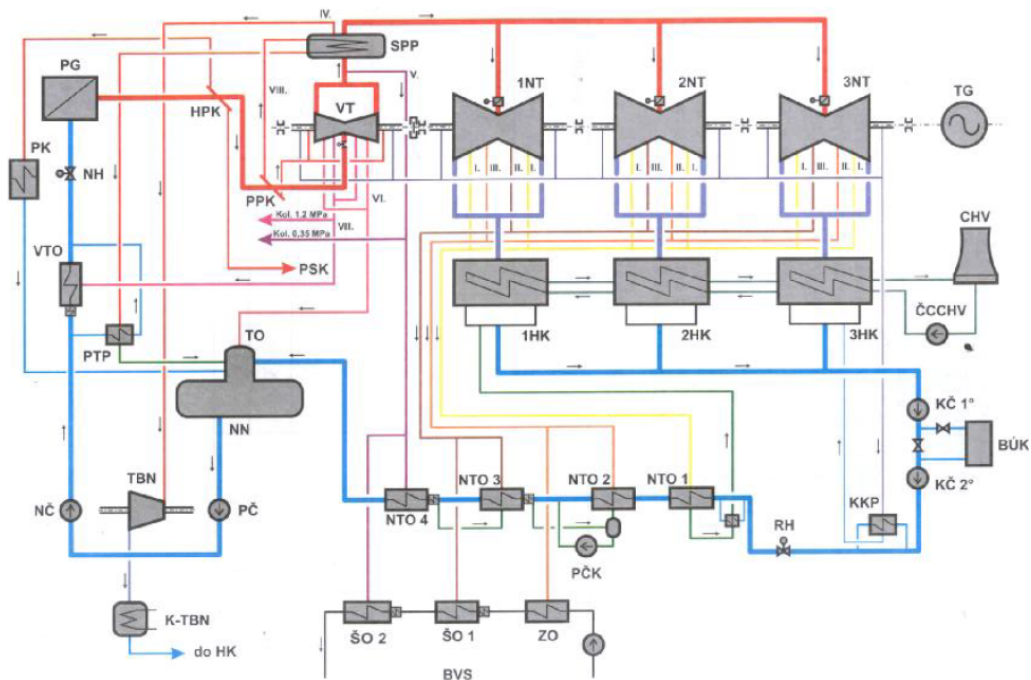
Počet těles parní turbíny je dán počtem jednotlivých oddělených částí turbíny. Konstrukce většinou zahrnuje vysokotlaký stupeň, na který navazuje několik stupňů nízkotlakých. Více nízkotlakých stupňů vyplývá z principu expanze páry, kdy je následně nutné zpracovat mnohem větší objem. Jak je patrné z obrázku 3, tak jaderná elektrárna Temelín využívá jeden vysokotlaký stupeň (VT) a tři stupně nízkotlaké (NT). Do vysokotlakého stupně přichází pára o teplotě 270°C a tlaku $5,4\text{MPa}$. Zde předá zhruba 40% své energie a na výstupu má teplotu 168°C a $0,76\text{MPa}$. Pomocí přihřevu v separátoru páry (SPP v 3) se poté pára zbaví vlhkosti a ohřeje na 252°C a vstupuje do nízkotlakých stupňů, kde odvede další práci a její teplota se na výstupu sníží na 39°C .

- **Turbíny jednotělesové**

Tato turbína je jedno těleso, a obsahuje tak v jedné části všechny stupně.

- **Turbíny vícetělesové**

Každé těleso turbíny je specializovanou částí pro určitý řád tlaku. Často je jedním tělesem realizována vysokotlaká či nízkotlaká část. Hřídele jednotlivých těles jsou v jeden celek spojeny spojkami.



Obrázek 3: Sekundární okruh JETE (převzato z [2])

5. Podle odběru páry z turbíny

Odběr páry z turbíny je prováděn na částech turbíny, kde je pára již po částečné expanzi. Na turbíně může být vyvedeno více odběrů na různých stupních. Podle oficiálních internetových stránek společnosti ČEZ a.s. má například každá 210 MW turbína na uhelné elektrárně Prunéřov 7 neregulovaných odběrů páry.

- **Turbíny s neregulovanými odběry**

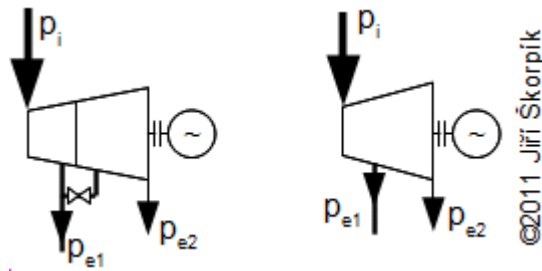
Neregulovaný odběr může sloužit například ke zvýšení tepelné účinnosti parního cyklu, kdy se neregulovaný odběr použije na ohřev páry pro další stupeň turbíny.

- **Turbíny s regulovanými odběry**

Regulovaný odběr páry nachází uplatnění v situacích, kdy je potřeba nějakou část páry vyvést pro účely zisku tepla. Zejména v teplárnách je tento princip důležitý, jelikož primární úlohou je výroba tepla a pak až výroba elektřiny. Je tedy nutná regulace poměru kogenerace. Nemusí to být ale pravidlem, jelikož například uhelná elektrárna Prunéřov využívá k výrobě tepla neregulované odběry. Pro ilustraci je na levé části obrázku 4 vyobrazeno schéma regulovaného a na pravé neregulovaného odběru páry z turbíny.

6. Podle směru proudění páry

Pára může do turbíny vstupovat pod různým úhlem vůči ose turbíny a v nějakém směru také turbínu opouští. Porovnání typů je zobrazeno na obrázku 5. Typy (a) až (d) mohou být označeny jako turbočerpadla či turbokompresory, typy (e) až (h) jako turbíny.



Obrázek 4: Druhy odběru páry z turbíny: vlevo - regulovaný, vpravo - neregulovaný (převzato z [12])

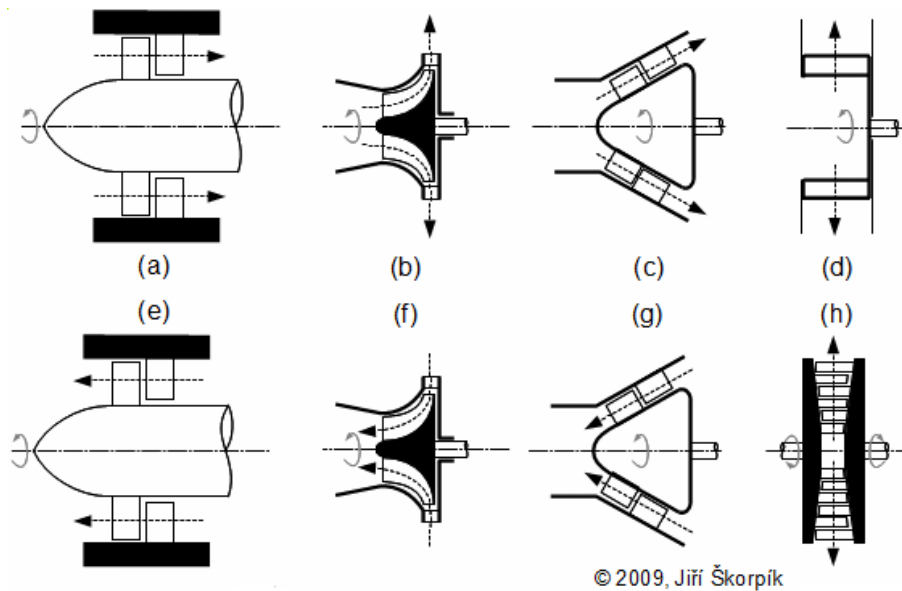
- **Turbíny axiální**

Pára proudí ve směru osy hřídele turbíny. Na obrázku 5 jde o body (a) a (e).

- **Turbíny radiální** Pára proudí ve směru kolmém na osu hřídele turbíny. Na obrázku 5 jde o body (d) a (h).

- **Turbíny centripetální** Někdy také označované jako radiálně axiální. Pára vstupuje ze směru kolmého na osu hřídele a vychází ve směru osy. Na obrázku 5 jde o body (b) a (f).

- **Turbíny diagonální** Pára proudí diagonálně mezi osou hřídele a směrem k ní kolmým. Na obrázku 5 jde o body (c) a (g).

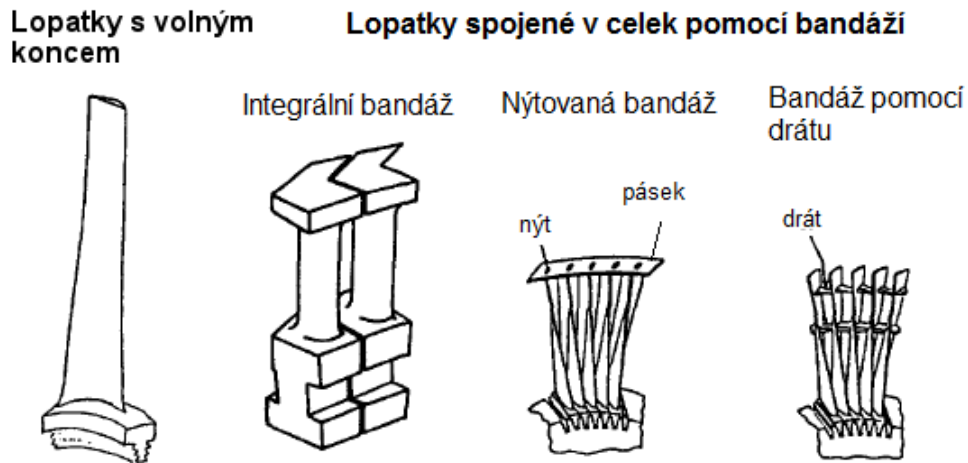


Obrázek 5: Směr proudění páry turbínou : (a,e)-axiální, (b,f) - centripetální, (c,g) - diagonální, (d,h) - radiální (převzato z [10])

7. Podle typu bandáží

Bandáže jsou prvky, které mají zejména zamezit nechtěným mechanickým jevům, jako jsou vibrace lopatek. Jak bude ukázáno dále, spojení lopatek v jeden celek se projeví změnou vlastních frekvencí. Bandáže mohou být

umístěny na konci lopatek (integrální, nýťovaná, pomocí drátu) nebo i v jejich středu (pomocí drátu). Další úlohou bandáží může být minimalizace ztrát díky přetékaní páry mezi lopatkami a statorem tzv. radiální mezerou. Schématický náčrt bandáží je vyobrazen na obrázku 6.



Obrázek 6: Typy bandáží (převzato z [10] a upraveno)

- **Lopatky s volným koncem**

Tato konstrukce se často využívá u delších typů lopatek a je například použita na posledním stupni lopatek u nízkotlakých částí 1020 MWe parní turbíny umístěné v jaderné elektrárně Temelín. Absence bandáže způsobuje vyšší amplitudy kmitů než u bandážovaných lopatek.

- **Integrální bandáže**

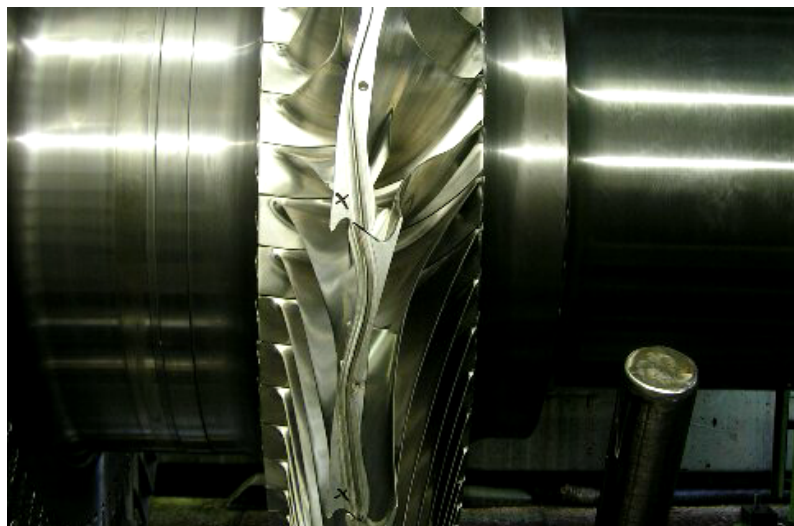
Integrální bandáž je vyráběna přímo s lopatkou a je její neoddělitelnou součástí. Podle [30] je nevýhodou integrální bandáže její vysoká cena, jelikož k její výrobě musí být v některých případech použito 5-osé frézování. Další nevýhodou je vyšší hmotnost lopatky, kdy je zatěžována vyšší odstředivou silou, a je tedy nutné zvolit lepší materiál vyhovující těmto podmínkám. Lopatky se pomocí integrálních bandáží spojují do svazků, kdy velikost těchto svazků je ovlivněna výpočtem zohledňujícím možné kmitání lopatek. Další možností spojení je vzájemné opření bandáží. Tímto se dosáhne spojení všech lopatek v jeden celek, čímž může být zmírněno tangenciální kmitání. Některé typy integrálních bandáží obsahují také tzv. zámky. Při působení odstředivé síly na lopatkové kolo se lopatky do sebe zaklesnou právě díky těmto zámkům. Tento typ bandáže je ukázán na obrázku 7.

- **Nýťované bandáže spojené páskem**

Tento druh bandáže je jednodušší na výrobu, tudíž i levnější než bandáž integrální. Tato konstrukce je často použita pro středotlaký stupeň turbíny. Pásek je k lopatkám upevněn nýty.

- **Lopatky spojené drátem vedeným otvory v lopatkách**

Tato konstrukce se často využívá pro zmenšení amplitudy tangenciálních



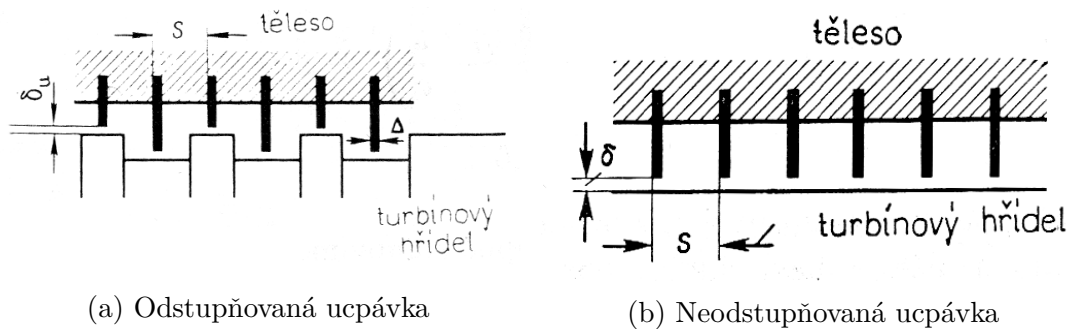
Obrázek 7: Integrální bandáž lopatky se zámkem na turbíně od Doosan Škoda Power s.r.o.

kmitů. Bandáž může být vedena koaxiálně středem lopatek či na více místech (viz obrázek 6). Často bývá kombinována s dalšími typy bandáží na konci lopatek.

8. Podle typu ucpávek

Ztráty parní turbíny mají vícero důvodů. Jedním z hlavních důvodů jsou ztráty způsobené únikem páry mezi lopatkovým kolem a statorem. Podle [14] se tyto ztráty podílí mezi 30 až 50% na ztrátách celkových. Pro zamezení nežádoucích úniků páry, a tak zvýšení účinnosti turbíny, je použito labyrintových ucpávek. *Ucpávku tvoří řada po sobě následujících velmi malých průtočných průřezů a poměrně rozměrných komor. Toho se dosáhne těsnícími břitzy, jejichž ostrí přiléhají až na malou vůli k rotoru turbíny. Při průtoku velmi malým průřezem se proud páry urychlí. V rozšířeném prostoru za břitzem ucpávky se kinetická energie proudu páry mění vířením v energii tepelnou. Při průchodu následující mezerou se pára znovu urychluje, aby v následující komoře ucpávky znovu došlo k přeměně kinetické energie v tepelnou. Tímto způsobem je průtok páry labyrintovou ucpávkou charakterizován střídavým urychlováním proudu s následným mařením jeho kinetické energie. Čím větší je počet břitů labyrintové ucpávky, tím větší je její odpor, a tím menší množství páry protéká ucpávkou.* [8] Labyrintové ucpávky jsou rozděleny na odstupňované a neodstupňované. Jejich znázornění je na obrázku 8.

- **Odstupňované** Tento druh ucpávky využívá odstupňování břitů, které kopírují tvar rotoru. Turbínový hřídel v tomto případě není hladký, ale obsahuje výstupky. Odstupňovaná labyrintová ucpávka dokáže více zamezit únikům páry než ucpávka neodstupňovaná. To je způsobeno tím, že proud páry ztratí svou kinetickou energii nejen kvůli rozšíření objemu, ale také kvůli zakřivení proudu páry v komůrkách mezi břitzy. Při prohřívání turbíny či změnou zatížení se může rotor posunout v axiálním



(a) Odstupňovaná ucpávka

(b) Neodstupňovaná ucpávka

Obrázek 8: Schéma labyrintových ucpávek (převzato z [8])

směru. V tomto případě může nastat poškození ucpávky výstupky rotoru. Odstupňované ucpávky jsou tedy použity zejména v blízkosti axiálního ložiska turbíny, kde by případný posuv hřídele byl malý. Se vzrůstající vzdáleností od axiálního ložiska by bylo nutné zvýšit rozestup mezi výstupky nebo použít neodstupňované ucpávky.

- **Neodstupňované** Neodstupňované ucpávky jsou označovány také jako nepravé. Hřídel rotoru je zde hladká a břity ucpávky jsou v řadě s konstantní vzdáleností mezi konci břitů a hřídelí. V porovnání s odstupňovanými jsou podstatně méně účinné. To je dáno nižší úspěšností maření kinetické energie proudu páry protékající skrz. Proud zde nemusí měnit směr mezi břity a průtok závisí převážně jen na poměru mezery mezi břitem a hřídelí vůči rozteči mezi břity ucpávky δ/s . Zvýšení účinnosti ucpávky se také může docílit zvýšením počtu břitů.

2.2 Monitorování dynamických parametrů turbín

2.2.1 Příčiny vzniku vibrací či clearance

Turbíny jsou v průběhu své činnosti podrobeny silám a jevům, které ovlivňují vibrace jejich jednotlivých částí nebo turbíny jako celku. Vibrace mohou nastat z důvodu dynamického chování jednotlivých komponent parní turbíny jako jsou kmitající lopatková kola vlivem jejich buzení, a nebo mohou nastat z důvodu závad na turbíně. Mezi závady, které mohou vyvolat vibrace, patří například poškození lopatkového kola, poškození ucpávky, kontakt rotoru se statorem, poškozené či opotřeбенé ložisko, nevyváženost hřídele, nesouosost hřídelí ve spojkách nebo chybná montáž některé součástky. Vznik vibrací má tedy vícero příčin, ale každá z těchto příčin ovlivňuje vznik jiným způsobem. Je vhodné rozlišit, jak ty které vibrace vznikají a jak se projevují. V případě diagnostiky turbíny je podle této znalosti možné zjistit problém, který by měl být odstraněn. Budící síly jednotlivých poruch jsou rozděleny na

- **Periodická budící síla** - obrázek 9A

Čistě harmonická budící síla se vyskytuje v praxi málokdy, ale často vzniká složením více harmonických sil. Důsledkem působení této síly je opět harmonické kmitání se stejnou úhlovou rychlostí, ale často s rozdílnou amplitudou a fázovým posunem. Periodická budící síla vzniká například při nevyváženosti hřídele turbíny či chybném napojení hřídelí pomocí spojky.

- **Impulsní budící síla** - obrázek 9B

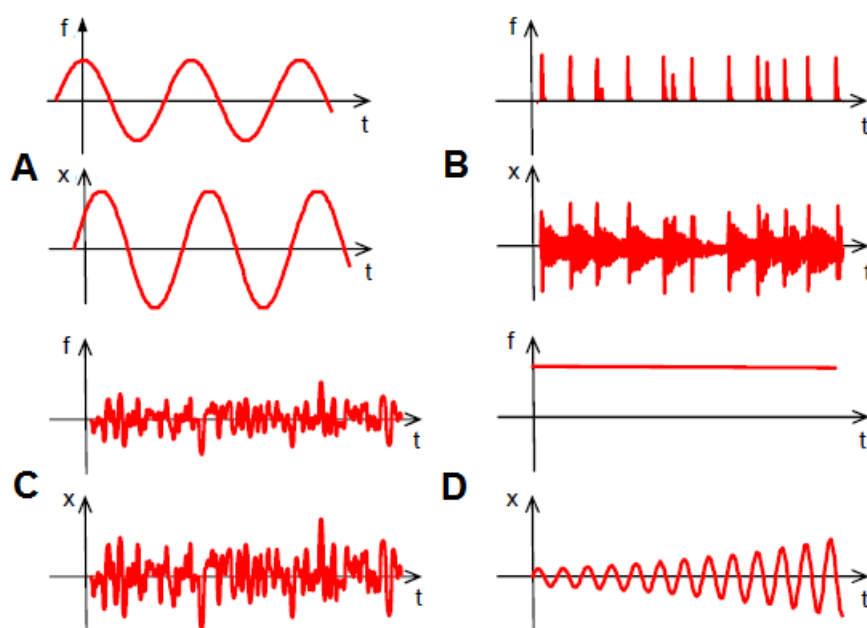
Impulsní budící síla je založena na principu podobném úderu do zvonu, kdy je u tělesa vybuzeno kmitání na jeho vlastní frekvenci (a vyšších harmonických), jehož výchylka po prvotním vybuzení postupně slábne. Jsou tedy vybuzeny tlumené kmity. Budící silou jsou impulsy, které mohou být periodické i neperiodické. Neperiodický impuls může nastat z důvodu opotřeбенí ložiska a periodický impuls například jako opakující se kontakt některé lopatky o statorovou část turbíny.

- **Budící síla náhodného průběhu** - obrázek 9C

Síla náhodného průběhu mění v čase svou amplitudu, polaritu i frekvenci. Odezva na toto buzení je rovněž náhodná, ale navíc mohou být buzeny i vlastní frekvence částí turbíny. Náhodná budící síla je vlastně obsažena v každém druhu vibrací a většinou se jedná o nepodstatný šum. Ten může být ale někdy způsoben například turbulentním prouděním páry v turbíně.

- **Samobuzené kmitání** - obrázek 9D

Samobuzené kmitání je nebezpečný typ vibrací, které mohou vyústit až v destrukci turbíny či jejich komponent. Součásti turbíny jako jsou lopatky turbíny mohou být buzeny aerodynamickými silami, které je budí na jejich vlastních frekvencích. Samotný kmit poté ještě zvýší vliv budící síly, která opět zvýší výchylku kmitání. Budící síla a součástka tedy uzavřou obvod s kladnou zpětnou vazbou. Při ponechání působení nevhodné budící síly může výchylka kmitů překročit únosnou mez, a způsobit tak zmíněnou havárii.



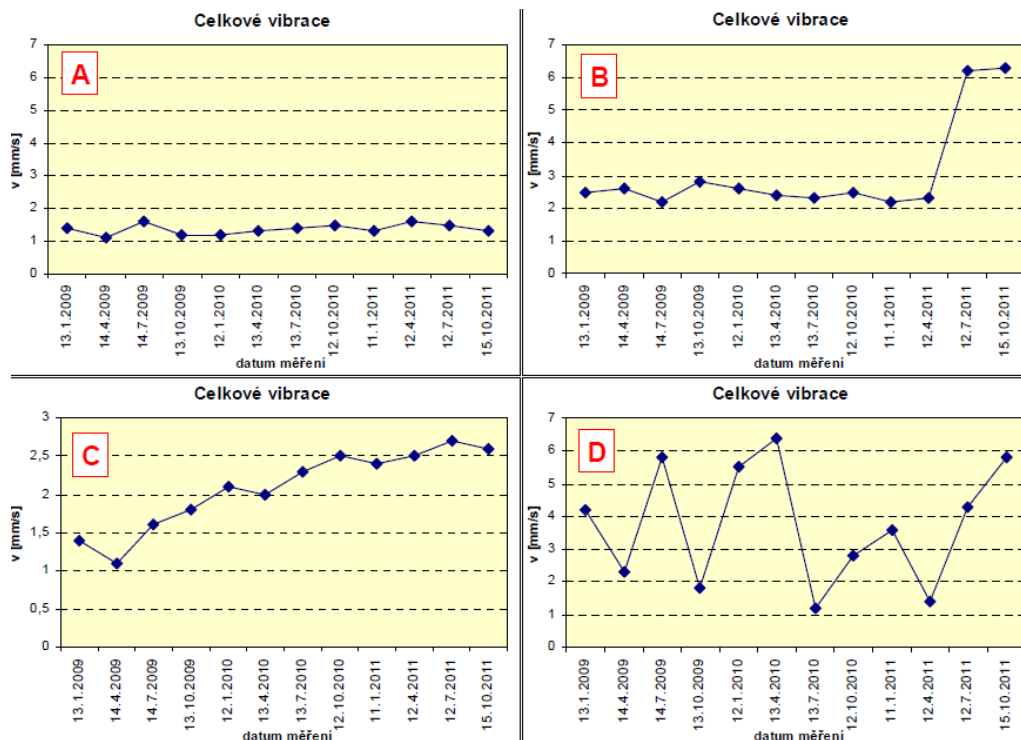
Obrázek 9: Typy budících sil a jejich vibrační odezvy: **A** - periodická budící síla, **B** - impulsní budící síla, **C** - budící síla náhodného průběhu, **D** - samobuzené kmitání (převzato z [4] a upraveno)

2.2.2 Rozdělení vibrací

Vibrace označují kmitání těles v daném směru. Vibrace v parních turbínách se rozděluje na absolutní a relativní. Absolutní vibrace se měří akcelerometry, jelikož referencí pro určení amplitudy je seismická hmota. Relativní vibrace se měří pomocí výchylky, která je vztažena k dané součásti turbíny.

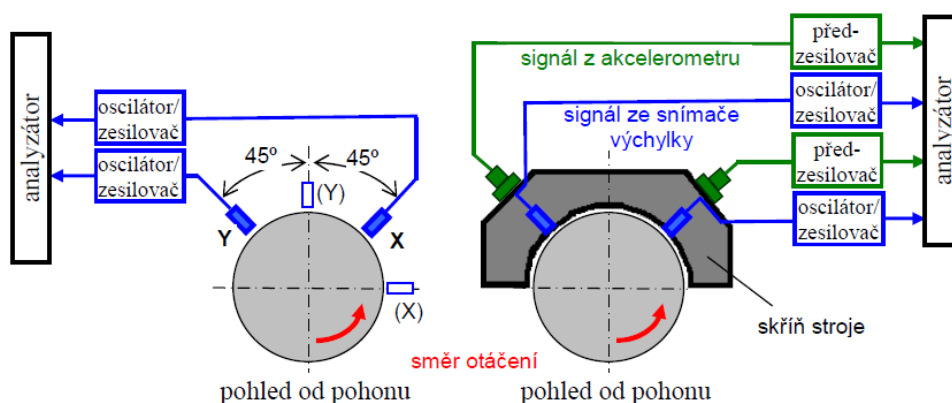
Absolutní vibrace se měří většinou jen pro nerotující částí parní turbíny. V ideálním případě by se měla amplituda vibrací blížit nule, může však dosahovat nízkých konstantních hodnot. Změna absolutních vibrací může detekovat odchylku od normálního stavu, tedy případnou závadu. Ze zaznamenaného trendu je možné vyhodnotit druh závady. Čtyři trendy vibrací jsou zobrazeny na obrázku 10. Jednotlivé trendy označují tyto stavy:

- **A**- Setrvalý průběh vibrací. Bez závady.
- **B**- Náhlá změna amplitudy vibrací. Tento stav může signalizovat závadu turbíny. Není důležité, zda se amplituda výchylky zvýšila či snížila, jelikož za snížením vibrací může stát utržení části lopatky, které v důsledku stabilizovalo vibrace.
- **C**- Postupné zvyšování vibrací může signalizovat průběh opotřebení součástí turbíny. Vibrace by neměly překročit danou mez.
- **D**- Tento trend zobrazuje nesmyslná data a signalizuje například chybné umístění měřicí sondy.



Obrázek 10: Trendy absolutních vibrací (převzato z [4])

Relativní vibrace jsou měřeny v hodnotě výchylky od referenčního stavu. Je takto možné měřit vibrace lopatkového kola (referenční stav je lopatkové kolo v klidu) nebo vibrace hřídele (vibrace vůči statoru), které mohou způsobit změnu clearance a případný kontakt rotoru se statorem. Měření relativních vibrací u hřídele může být prováděno podobným způsobem jako měření clearance u lopatek. U hřídelí je možné měřit i jejich absolutní vibrace, ale tato možnost se realizuje až u turbín vyšších výkonů. Jejich měření je obtížnější než měření relativních hřídelových vibrací. Pro zjištění je nutné znát jak relativní vibrace rotoru vůči statoru, tak vibrace statoru. Schéma měření je na obrázku 11.



Obrázek 11: Způsob měření vibrací na hřídeli - vlevo: relativní, vpravo: absolutní (převzato z [4])

2.2.3 Vibrodiagnostika lopatkového kola

Kmitání lopatek má několik příčin. Jak již bylo řečeno dříve, jednou z příčin je přenos vibrací z důvodu mechanických vlivů z hřídele na lopatky. Budící síly z těchto vlivů dokáží způsobit kmitání ve směru tangenciálním, radiálním i axiálním. Axiální kmitání je způsobeno například nevhodným uložením hřídele či vadou ložiska. Radiální kmitání je způsobeno zejména nevyvážeností hřídele. Tangenciální kmitání může být částečně způsobeno přenosem torzních kmitů hřídele. Torzní kmity vznikají kvůli změnám zátěže generátoru z důvodu různého zatížení elektrické sítě. Tyto kmity je možné eliminovat u nízkých výkonů vhodnou spojkou mezi turbínou a generátorem. Druhou příčinou vibrací lopatkových kol jsou aerodynamické síly proudu páry. Aerodynamické síly jsou zdrojem tzv. synchronních vibrací lopatek. Synchronní jsou z důvodu, jelikož jejich frekvence jsou určeny celočíselným násobkem frekvence otáčení turbíny. Jestliže je poté frekvence či některý násobek této budící síly blízký vlastní frekvenci lopatek, může nastat rezonance a nadměrné namáhání součástí lopatkového kola. Pro zabránění těchto stavů je možné použít tlumících členů jako jsou lopatkové bandáže. Také je potřeba znát dynamické chování lopatkového kola, které pomůže určit, kterým otáčkám turbíny se při najíždění vyhnout či jak pomocí mistuningu "rozladit" lopatkové kolo. Při znalosti dynamického chování, vlastních frekvencí, všech lopatek je totiž možné zjistit, zda spolu nesousedí lopatky se stejnou či podobnou vlastní frekvencí. U takových lopatek by došlo k buzení rezonančních frekvencí. Se znalostí vlastních frekvencí je tedy možné rozložit lopatky tak, aby jejich vlastní frekvence nepodporovaly rezonanční stavy, či jim dokonce zabraňovaly.

Při vybuzení vnější silou kmitá objekt vlastní frekvencí a daná změna tvaru je nazývána vlastním tvarem. Vlastní tvar je určen způsobem šíření vln objektem a definován uzlovými průměry a uzlovými kružnicemi. Každý vlastní tvar je buzen jinou frekvencí. Lopatkové kolo je možné pro základní analýzu nahradit diskem, jelikož je chováním velice podobné. Jestliže by byl nerotující disk buzen v jednom bodě, šířily by se na něm po koaxiálních drahách vlny o stejné amplitudě a úhlové rychlosti v opačných směrech. Jestliže je frekvence buzení blízká vlastní frekvenci disku či jeho násobku, vznikne stojaté vlnění (obrázek 13a) s danými uzlovými body. Uzlový bod je místo, kde se střetnou vlny v protifázi a kmitání v tomto bodě má nulovou amplitudu. Dva uzlové body spojené středem disku definují uzlový průměr. Při tomto druhu vybuzení se uzlové průměry po disku nepohybují. [18] Na disku mohou také vzniknout uzlové kružnice, což jsou kružnice, které kmitají s nulovou výchylkou. Ukázka uzlových průměrů a uzlových kružnic je na obrázku 12. Jelikož u obecného disku je možné najít teoreticky nekonečný počet uzlových bodů, platí tedy i možnost nekonečného počtu uzlových průměrů. U lopatkového kola, kde může být pak každá lopatka uzlovým bodem, je možné nalézt počet uzlových průměrů rovnající se polovině počtu lopatek.

U rotujícího kola je ale situace jiná. Je zde vhodné určit dva souřadné systémy. První souřadný systém je statický a je určen pevnou částí turbíny. Druhý systém je naopak pevně daný k lopatkovému kolu a rotuje spolu s ním. V případě staticky umístěného buzení je opět z pohledu statického souřadného systému vybuzené vlnění stojaté. Ale jelikož se disk pohybuje, je toto stojaté vlnění rozděleno přes celý disk a po disku se šíří běžící vlna. Namáhání je tedy z tohoto důvodu rozděleno

na všechny části disku, a žádná část disku není namáhána nadměrně. Rychlost, kterou se vlnění šíří po disku se označuje jako relativní úhlová rychlost vlnění ω_{rel} . Představme si, že disk rotuje s úhlovou rychlostí ω_l a vlna v protisměru rotace s úhlovou rychlostí ω_r . Relativní úhlová rychlost vlnění je poté vyjádřena jako

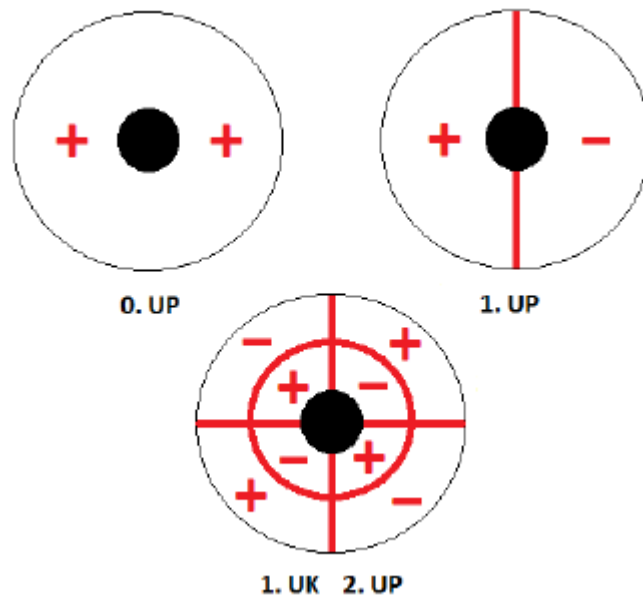
$$\omega_{rel} = \omega_r - \omega_l \quad (2.2.1)$$

Jestliže nebude relativní rychlost vlnění nulová, vlna se bude stále pohybovat po disku. Při nulové relativní rychlosti se ale vytvoří na disku stojící vlna. Opět budou tedy některé části disku jako pevné uzlové body a některé stále kmitat s vysokou amplitudou. Je tedy patrné, že pro každý vlastní tvar s počtem uzlových průměrů m , respektive každou vlastní frekvenci disku, je možné najít úhlovou rychlost disku, která způsobí vybuzení tohoto tvaru. Podle [19] se docílí rezonance za následujících podmínek.

$$f_m = k \cdot f_{rot}, k \in N \quad (2.2.2)$$

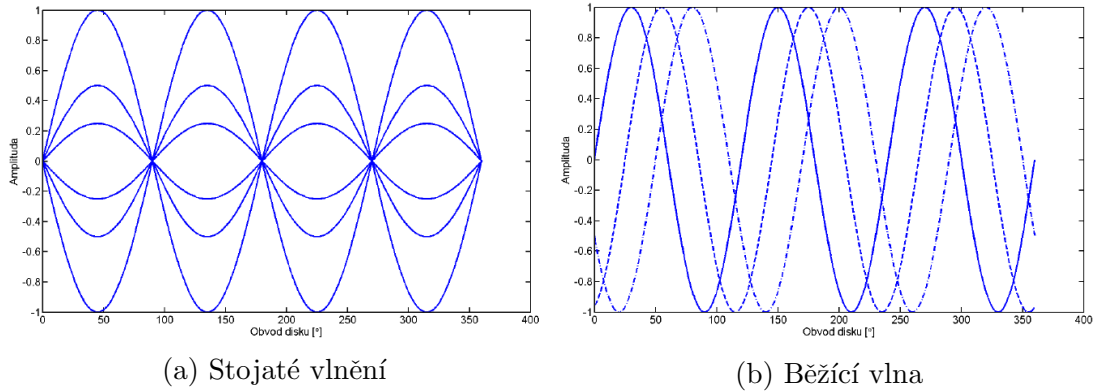
$$k = m \quad (2.2.3)$$

Vlastní frekvence pro daný počet uzlových průměrů m je rovna celočíselnému násobku k frekvence otáček f_{rot} a k je rovno počtu uzlových průměrů. V případě rovnosti $k = m$ lze zjistit nebezpečné frekvence z Campbellova diagramu, který je ukázán na obrázku 14. Body znamenají oblasti, kde by nastala rezonance s daným vlastním tvarem. Je tedy nutné se otáčkám odpovídajícím těmto stavům co nejvíce vyhnout.



Obrázek 12: Nulý uzlový průměr (UP), první uzlový průměr, druhý uzlový průměr a první uzlová kružnice (UK)(převzato z [18])

Podle [18] jsou však kritické otáčky závislé nejen na vlastní frekvenci pro vlastní tvar s m uzlovými průměry, ale záleží i na počtu lopatek či jednotlivých celků spojených lopatek například pomocí bandáže. Poté nastává vybuzení nejen v případě



Obrázek 13: Typy kmitů (převzato z [18])

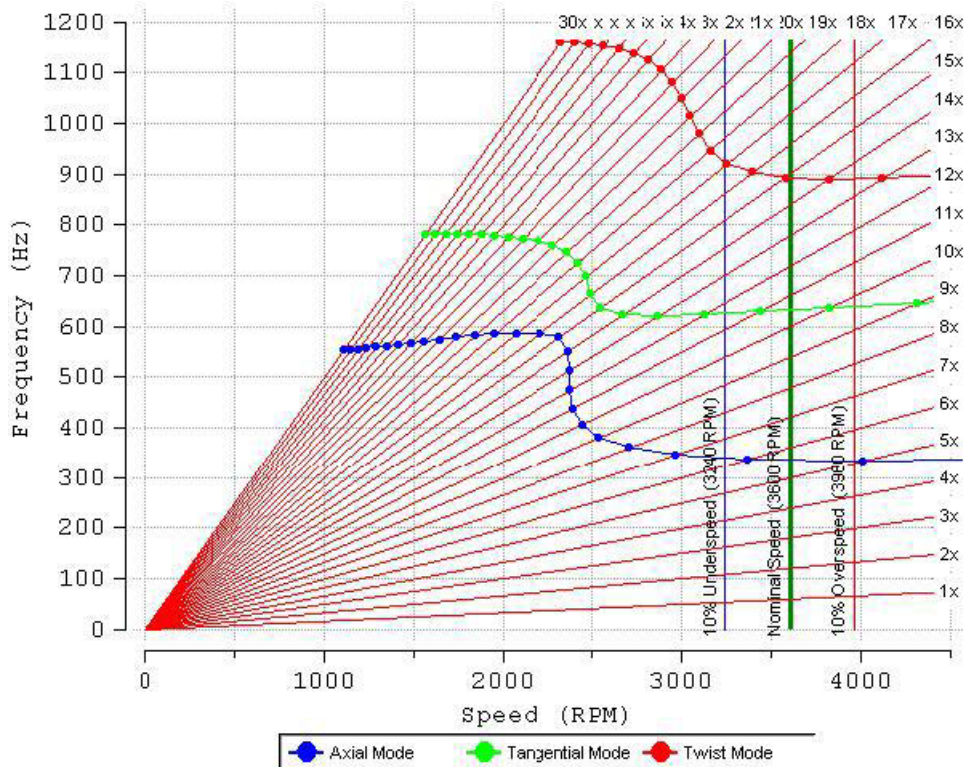
$k = m$, ale i při situacích

$$k = s - m \quad (2.2.4)$$

$$k = s + m \quad (2.2.5)$$

$$k = 2s - m, \quad (2.2.6)$$

kde s je počet lopatek nebo počet spojených struktur. Při této znalosti je pak Campbellův diagram nedokonalý a je nutné použít pro zjištění kritických otáček například SAFE diagram, který tuto situaci uvažuje.



Obrázek 14: Campbellův diagram (převzato z [19])

2.2.4 Monitorování clearance

Pojmem clearance je nazvána mezera mezi pevnou částí turbíny - statorem a konci lopatek na rotoru.

Prvním z důvodů nutnosti měřit clearance je jeho vliv na efektivitu turbíny. Velikost clearance ovlivňuje účinnost cyklu parní turbíny, jelikož vyšší mezerou proudí větší proud páry. Tento proud je nežádoucí, jelikož je tímto mařena část kinetické energie páry. Podle [5] se ztráty způsobené clearance lineárně zvyšují v závislosti na jeho velikosti. Je tedy žádoucí jeho hodnotu minimalizovat. Samotná minimalizace ale naráží na několik překážek. První z nich je nestálost clearance při různých operačních režimech turbíny - klid, běh naprázdno, nájezd či zátěž. Lopatky se se zvyšováním otáček protahují, a zmenšuje se tak radiální vůle mezi konci lopatek a nadbandážového těsnění. Při neznalosti hodnoty, o kterou se lopatky protáhnou, je nutné zkonstruovat těsnění tak, aby se minimalizovala radiální vůle, ale zároveň byla vůle dostatečná a nenastal při prodloužení lopatek kontakt rotorové a statorové části, tedy tzv. rubbing. Tento stav může nastat také z důvodu nevyváženosti rotoru a jeho chvění. Prostředkem ke snížení ztrát a zároveň zajištění minimální radiální vůle, je aplikace nadbandážového těsnění z voštin. Voština je složena z tenkých plechů poskládaných do tvarů dutých šestiúhelníků připomínajících včelí plástve - obrázek 15. Z hlediska proudění páry je voštinová ucpávka pevnou překážkou a min-



Obrázek 15: Voštinová nadbandážová ucpávka (převzato z internetové adresy www.turbineaviation.com)

imalizuje tak ztráty. Z hlediska materiálových vlastností je poté podle [14] porézním kompozitem s malou pevností, minimální tepelnou kapacitou a minimálním koeficientem vedení tepla. Tyto vlastnosti způsobí, že při kontaktu s bandáží lopatky se část voštiny utaví a bez přenosu výrazných vibrací či tepla do okolí je opět vytvořena dostatečná radiální vůle. Voštinové ucpávky není možné použít ale

u všech typů lopatek. Jelikož jde o druh nadbandážového těsnění, je možné je využít u bandážovaných lopatek. Mnoho lopatkových kol, zejména u nízkotlakých stupňů, používá nebandážované lopatky. V případě prodloužení lopatek či chvění celého lopatkového kola by došlo ke kontaktu s nedeformovatelnou částí statoru, tedy rubbingu, který by znamenal nadměrné opotřebování částí turbíny a snížení její účinnosti. Při znalosti odhadu prodloužení lopatek, by tedy bylo určit vhodnou konstrukci turbíny.

Druhým důvodem monitoringu clearance je možnost detekce poruch či kritických stavů turbíny. Lopatky jsou při provozu namáhány aerodynamickými silami od proudu páry, gravitační silou či setrvačnými silami. Vada materiálu lopatky může způsobit její postupné či skokové prodloužení, které může vyústit až v její utržení. Včasná detekce těchto stavů může předejít haváriím turbín a finančním ztrátám. Je také možné zjistit provozní režimy, které způsobují nadměrné namáhání částí turbíny. Tímto měřením je možné například odhalit radiální chvění lopatek. Také je možné detekovat nevyváženosti lopatkového kola či vibrace hřídele v ložisku.

3 Druhy měřících sond a jejich srovnání

3.1 Původní přístup pomocí kontaktního měření

Kontaktní měření spočívá v instalaci vhodného čidla přímo na lopatkové kolo turbíny. Jako čidla jsou použity tenzometry. Tenzometr je pasivní elektronická součástka, která je schopná převést mechanické namáhání na změnu jejího elektrického odporu. Jelikož je tenzometr pasivní součástka, musí být pro zjištění informace napájen.

- **Výhody tenzometrického měření**

Hlavní výhodou tohoto způsobu měření je možnost zjištění aktuální výchylky kmitání spojitě v reálném čase. Je až na vyhodnocovací zařízení, s jakou vzorkovací frekvencí bude zpracovávat data. Vyhodnocovací zařízení se vzorkovací frekvencí v řádu kHz či MHz je tedy naprosto dostačující, jelikož očekávané nebezpečné frekvence kmitů na turbíně se pohybují v řádově nižších hodnotách.

- **Nevýhody tenzometrického měření**

Mezi hlavní nevýhody tenzometrického měření patří nutnost instalace sondy na lopatku turbíny a následný přenos informace mimo turbínu. Tenzometr je instalován do nepříznivého prostředí parní turbíny a je vystaven vysokým tlakům a teplotě páry. Tyto vlivy zkracují jeho životnost. Také je nutné kompenzovat vliv teploty páry. To se řeší například zapojením více tenzometrů do můstku. Přenos informace z tenzometru do vyhodnocovací elektroniky může být realizován pomocí vodivého spojení nebo bezdrátovým způsobem. Přímé spojení vodičů obnáší nutnost instalace vodičů do vnitřku turbíny, tedy i nutnost speciální přípravy částí turbíny. Tyto vodiče jsou opět namáhány podmínkami uvnitř turbíny. Musí být zajištěn přenos signálu z pohybujících se vodičů na nepohybující se. K tomu se využívají kroužky s kartáči. Tento přenos s sebou nese riziko zanesení šumu do naměřených hodnot. Bezdrátový přenos vyžaduje samostatné napájení senzoru. To může být provedeno baterií, která je součástí přenosové elektroniky či pomocí využití rotace turbíny a elektromagnetické indukce, kde by byl na statickou část turbíny umístěn permanentní magnet a na rotační část cívka. K přenosu informace je také nutné umístit vysílač signálu mimo extrémní prostředí rotoru. Je také nutné zmínit, že jeden tenzometr je schopný měřit vibrace pouze jedné lopatky. Pro kompletní diagnostiku lopatkového kola by tedy musel být použit počet tenzometrů rovný počtu lopatek. Ne na každé turbíně je však možné toto zajistit. Ať už z důvodu potřeby prostoru pro uložení a vedení vodičů, uložení množství vysílačů do útroby hřídele. Shrnující porovnání mezi kontaktní a bezkontaktní metodou poskytuje tabulka 1.

Parametr	Bezkontaktní metoda	Kontaktní metoda
Počet měřených lopatek	Všechny lopatky	Lopatky s umístěnými senzory
Rozsah měřených frekvencí	Základní frekvence a tvary	Teoreticky až celé spektrum
Přesnost měření výchylky	10 - 20 μm	$\sim 10\mu m$
Možná doba měření	Po dobu životnosti turbíny	1 až 2 týdny
Umístění senzoru	Po obvodu na statoru	Přímo na lopatce

Tabulka 1: Srovnání kontaktních a bezkontaktních metod měření vibrací (údaje převzaty z [10])

3.2 Tip - timing

Požadavkem pro měření vlastností turbín je možnost online měření a časově neomezené měření. Tyto požadavky zajistí možnost snímání parametrů při různých operačních režimech turbíny či odhad životnosti jednotlivých částí lopatkového kola. Pro splnění těchto požadavků je vhodné použít bezkontaktní metody měření, kdy odpadá problém krátké životnosti kontaktní sondy či bezdrátového přenosu informace mezi sondou a měřicím zařízením. A právě metoda tip - timingu se mezi bezkontaktní řadí. Použití této metody se datuje od 70. let 20. století. [7]

Tip - timing je založen na měření časů průletů lopatek s následným zpracováním naměřených dat. Přesněji jsou snímány časy průletů hran lopatek. Vyhodnocením je možné získat údaje o vibracích jednotlivých lopatek či změně clearance mezi lopatkami a státorem turbíny. Pro zjišťování vibrací i clearance je například nutné získat diference mezi očekávaným průletem lopatky a naměřeným časem. Jestliže by bylo lopatkové kolo dostatečně tuhé těleso nezatížené vibracemi, bylo by možné určit aktuální polohu jednotlivé lopatky vzorcem

$$x_l(t) = x_0 + 2\pi \cdot f(t) \cdot R \cdot t, \quad (3.2.1)$$

kde x_l je aktuální poloha lopatky, x_0 počáteční poloha lopatky $f(t)$ frekvence otáčení lopatkového kola, R poloměr lopatkového kola a t čas pro určení polohy. Jestliže ale lopatka kmitá, její poloha z tohoto důvodu bude mírně vychýlena o x_v .

$$x_l(t) = x_0 + 2\pi \cdot f(t) \cdot R \cdot t + x_v(t) \quad (3.2.2)$$

Právě $x_v(t)$ je možné označit jako amplitudu kmitů. Při znalosti odhadu očekávaného průletu lopatky \bar{t} se vypočte tato hodnota jako

$$x_v(t) = 2\pi \cdot f(t) \cdot R \cdot (\bar{t} - t) \quad (3.2.3)$$

Jako referenční hodnota může sloužit přesná znalost časů průletů jednotlivých lopatek. Jestliže tyto hodnoty nejsou známy, je možné použít odhad pomocí střední hodnoty měřených časových okamžiků nebo IIR filtru. Při měření clearance se také jeví vhodné použití časových okamžiků naměřených při nízkých otáčkách jako referenčních hodnot. Dalším použitím tip - timingu je měření jedné náběžné hrany pomocí dvou sond, kde z časové difference mezi sondami je možné získat vzdálenost lopatky od statorové části. Příklad tohoto použití je ilustrován v kapitole 4.5.

Měřicí zařízení tip - timingu se liší typem vyhodnocovací elektroniky a typem sond. Samotný typ sondy neovlivní princip tip - timingu, ale ovlivní jeho přesnost.

Přesnost je závislá na rychlosti odezvy měřicí sondy na náběžnou hrany měřené části lopatky. Mezi typy sond patří například sondy kapacitní, mikrovlnné, indukční či optické, kdy právě na použití optických sond je zaměřena tato práce. Důležitá je také schopnost maximálního odstupu signál-šum a efektivita vyhodnocovacích programových prostředků.

3.3 Druhy měřících sond a jejich srovnání

Bezkontaktní měřicí sondy mají za úkol informovat, zda je v jejich dosahu lopatka. Toho se dosáhne použitím principu měření vzdálenosti od plochy, kam je sonda namířena. Z těchto měření je poté získán průběh amplitudy signálu symbolizujícího naměřenou vzdálenost v čase. Jelikož typ sondy ovlivní výsledky při použití tip - timingu, jsou na bezkontaktní měřicí sondy kladeny vysoké nároky. Musí být odolné vysokým teplotám dosahujícím až k $700^{\circ}C$. Dále musí být odolné vůči proudění páry o vysoké rychlosti a tlaku. Nepříznivé prostředí uvnitř parní turbíny by také nemělo mít vliv na rozlišení či spolehlivost sondy. Mezi parametry sondy, které by měly být také splněny, se řadí maximální měřicí vzdálenost, maximální vzorkovací frekvence a průměr snímané oblasti. Maximální měřicí vzdálenost je důležitá kvůli běžné mezeře mezi sondou a lopatkovým kolem z důvodu častého umístění sondy mezi nadbandážové ucpávky. Podle [16] by měla být schopna sonda měřit na vzdálenost 10 až 15mm. Maximální vzorkovací frekvence a průměr snímané oblasti jsou důležité kvůli přesnější identifikaci požadovaného tvaru lopatky. Podle stejného zdroje je žádoucí, aby se maximální vzorkovací frekvence pohybovala nad 10MHz a průměr snímané oblasti pod 0,5mm.

3.3.1 Kapacitní

Kapacitní sondy využívají změny kapacity v závislosti na vzdálenosti elektrod, kdy jedna elektroda je reprezentována statorem (sondou) a druhá rotorem. Jestliže je měřicí sonda uvažována jako kondenzátor s proměnlivou kapacitou. Výpočet kapacity je dán vztahem

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}, \quad (3.3.1)$$

kde ϵ_0 je permitivita vakua, ϵ_r relativní permitivita dielektrika, S plocha elektrod a d vzdálenost mezi elektrodami. Z rovnice plyne, že kapacita se při průletu lopatky, tedy snížení vzdálenosti elektrod, zvýší. Této změny je poté využito k detekci lopatky. Z časů průletů je možné určit vibrace či clearance. Typická průmyslová kapacitní sonda je na obrázku 16.

Pro měření vibrací je možné použít kapacitní sondy a principu tip - timingu. Sonda tedy měří časy průletů jednotlivých lopatek pod sondou a z těchto časů je vypočtena výchylka. Měření času průletu lopatky se může realizovat více způsoby. Prvním je klasický přístup prahováním. Sonda je připojena ke stejnosměrnému napětí. Kapacity je úměrná

$$C = \frac{Q}{U} \quad (3.3.2)$$

Jestliže je tedy známé napětí na elektrodách U a náboj Q , který je zjištěn pomocí nábojového zesilovače, je možné zjistit aktuální hodnotu kapacity. Vhodně nas-

taveným prahem je možné získat časy průletu. Problémem může být průměr měřené oblasti kapacitní sondy, který se pohybuje v rozmezí $10 \sim 30\text{mm}$. [10] To ovlivňuje jak rozlišení měření, jelikož změna kapacity nebude dokonale strmá, ale také může nastat problém u lopatkových kol s integrální bandáží. Jestliže je mezi bandážemi mezera v poměru s průměrem měřené oblasti malá, nemusí se tato mezera dostatečně projevit změnou kapacity sondy. Další možností, jak měřit čas průletu, je napájet sondu zdrojem střídavého napětí. V tomto případě je využito změny fázového posunu mezi napětím a proudem v závislosti na změně kapacity.

Kapacitní sondy se dají využít i pro měření clearance. Není zde ale možné využít principu tip - timingu, jelikož čas průletu lopatky pod senzorem se při jejím prodloužení nezmění. Problém vyvstává s přesností měření. Jestliže u měření tangenciálních vibrací bylo postačující jen vytyčit mez mezi stavy "0 - 1", zde je nutné měřit kapacitu přesně. Měření je tak již ovlivněno chybami jako je nasycenost páry či její teplota, jelikož tyto faktory mění relativní permitivitu ϵ_r . Měření kapacity může být také ovlivněno vodiči a spoji, které mění celkovou kapacitu v řádech pF . Jako vhodný se jeví systém popsáný v článku [24], který tyto nepříznivé vlivy dokáže částečně odstranit. Autoři zde zmiňují kapacitní sondu umožňující měření clearance za použití frekvenční modulace. Sonda je oscilátor obsahující RLC obvod. Při změně clearance se mění výstupní frekvence oscilátoru. Sonda využívá triaxiálního vodiče k odstranění vlivu kapacity vodiče a spojů. Výstupní frekvence poté vstupuje do modulátoru složeného z komparátoru fází, oscilátoru řízeného napětím a zesilovače. Výstupem je periodický sled pulsů, kdy amplituda každého z nich představuje clearance pro průlet jedné lopatky pod senzorem. Pro zjištění průměrného clearance je také možné použít voltmetr měřící střední hodnotu signálu. Data jsou následně zpracována. Autoři po testech konstatovali, že je možné měřit s přesností $\pm 10\mu m$ do rozsahu 1mm a s přesností $\pm 25\mu m$ v rozsahu $1 \sim 2\text{mm}$.

Obecnou výhodou kapacitních sond je cena a snášení vysokých teplot uvnitř turbíny (podle [29] krátkodobě až $1300^\circ C$) a za použití pokročilých metod dostatečné rozlišení. Nejvýznamnějším problémem u použití kapacitních sond je nedostatečný rozsah měření, tedy maximální vzdálenost mezi sondou a snímaným lopatkovým kolem. Tento rozsah se pohybuje v rozmezí $1 \sim 2\text{mm}$. [24] [10] [22] Kapacitní sonda tedy není vhodná k použití u parních turbín, kde se počítá s hodnotou clearance okolo 10mm .



Obrázek 16: Kapacitní sonda (převzato z www.vibrosystem.com a upraveno)

3.3.2 Mikrovlnné

Mikrovlnná sonda se skládá z vysílače a přijímače mikrovlnného signálu. Mezi mikrovlny se řadí elektromagnetické vlny o vlnové délce od 1mm do 1m . Příklad mikrovlnné sondy je na obrázku 17.

Pro měření vibrací se používá podobných principů jako při použití optických senzorů. Je tedy možné mikrovlnný signál vysílat periodicky na lopatkové kolo a měřit čas jeho návratu na přijímač či jeho amplitudu. Tato metoda je ale použitelná jen pro některé typy lopatkových kol. Jestliže by bylo kolo nebandážované, signál by se odrazil až od vzdálených částí turbíny. Jeho doba návratu by se tedy rapidně prodloužila a jeho amplituda kvůli odrazu paprsku také. Nízká amplituda by mohla způsobit i nemožnost měření času odraženého paprsku. U bandážovaných lopatek je však mezi bandážemi úzká a mělká mezera. Rozměry mezery se pohybují pouze v mm . Byl by tedy kladen velký důraz na citlivost vyhodnocovací elektroniky. Další možností je spojitě vysílání mikrovlnného záření a měření rozdílu výstupní a vstupní fáze. Tento princip by mohl být využit i na bandážované lopatky. Na rozdíl od optického paprsku je vlnová délka mikrovln příznivá k tomuto typu měření. K exaktnímu určení hrany by mohla být maximální vzdálenost lopatek rovna polovině vlnové délky použitých mikrovln. [19] Při měření tangenciálních vibrací není úplně podstatné, o kolik se fáze změnila, ale při nastavení vhodného prahu je možné zjistit časové okamžiky změn a podle nich identifikovat hrany lopatek.



Obrázek 17: Mikrovlnná sonda(převzato z [15])

Pro měření clearance může být použit stejný princip odečtu fázového posunu jako u měření vibrací. S tím rozdílem, že je nutné nyní přesně vyhodnocovat onen fázový posun. Čím přesněji bude tato změna vyhodnocena, tím přesněji bude změřen samotný clearance. Fázové posuny budou zaznamenávány tak často, jak vzorkovací frekvence dovolí a v těchto údajích se poté najdou periodické úseky patřící průletům lopatek, hodnoty těchto úseků se přepočtou na clearance pomocí následující rovnice

$$\delta = \frac{\phi'}{4\pi} \cdot \frac{c}{T}, \quad (3.3.3)$$

kde δ je hrubá hodnota clearance, ϕ' rozdíl fází po aplikaci kompenzace z důvodu šíření vlny nejen v měřeném úseku, c rychlost šíření mikrovln v daném prostředí a T perioda mikrovlnného záření o zvolené frekvenci. Minimální hodnota v každém

úseku je clearance pro danou lopatku. Sonda je náchylná na axiální posunutí lopatek či jejich naklopení vůči sondě. Axiálním posuvem či naklopením se totiž změní vzdálenost mezi lopatkou a sondou, přestože nedojde k prodloužení lopatky. Pro zjištění přesného prodloužení lopatky je tedy nutné sondu kalibrovat. Kalibrační proces se řeší například mapovací funkcí. Kalibrací se více zabývá článek [15].

Autoři se zmiňovaného článku dokázali pomocí mikrovlnného senzoru změřit clearance se směrodatnou odchylkou $37\mu m$ na rozsahu $1 \sim 6mm$. Definovaným požadavkům tedy neodpovídá jak přesnost, tak i měřicí rozsah. Je zde ale velký potenciál pro nalezení lepších vyhodnocovacích či kalibračních metod.

3.3.3 Indukční

Indukční metody využívají vzniku vířivých proudů ve feromagnetických materiálech za působení magnetického pole. Indukční sonda se skládá ze snímače - cívky a proximatoru. Proximator je složen z oscilátoru. Ten generuje vysokofrekvenční signál a pomocí připojené cívky je generováno vysokofrekvenční elektromagnetické pole. Jestliže je tomuto poli vystaven objekt z feromagnetického materiálu, začnou se v něm tvořit vířivé proudy. Tyto proudy jsou také nazývány proudy Foucaultovy či Eddy currents v anglické literatuře. Vířivé proudy způsobí změnu odběru energie ze systému, a tedy i změnu impedance cívky. Lopatka působí jako případné jádro cívky a indukční reaktance se zvyšuje. Z poměru mezi reaktancí a činným odporem za pomoci měření rozdílu fází napětí a proudu je možné určit změnu vzdálenosti lopatky před senzorem. Jestliže je žádáno měřit vibrace nebandážovaných lopatek, změna fázového posunu bude výrazná. Opět tedy stačí zvolit vhodný práh a pomocí tip - timingu hledat náběžné hrany a odpovídající časy průletů. U bandážovaných lopatek opět vyvstává problém s přesným určením mezery mezi bandážemi. Naráží se zde na stejný problém jako u kapacitních senzorů. Je tedy nutné přesně měřit změnu fáze, aby mohla být mezera nalezena. Také je zde problém v průměru snímané oblasti. Ta je podle [10] $10 \sim 30mm$. Mezera může být tedy jen malou oblastí v měřené oblasti a změna impedance se nemusí projevit dostatečně výrazně, aby mohla být spolehlivě detekována. Ten samý problém nastává při průletu lopatek, kdy je měřen jen jejich krátký úsek. U měření clearance nastává podobný problém. Ačkoliv je možné poměrně přesně určit clearance z fázového posunu, nemusí být ale patrné, o kterou lopatku se jedná, jestliže nebude možné rozlišit mezeru mezi bandážemi. Případně by musely být vypočteny očekávané časy průletů a v okolí těchto časů spojit naměřené hodnoty clearance s danou lopatkou. Mezi obecné výhody indukčních senzorů patří jejich odolnost proti extrémním vlivům uvnitř turbíny a relativní nezávislost na znečištění. Obecnou nevýhodou je poté, že se začínají vyskytovat lopatky vyrobené z uhlíkových vláken či lopatky vyztužené kompozitními materiály a keramikou. Tyto materiály nejsou vodivé, a není možné vyvolat vířivé proudy. Mezi další nevýhody patří zmiňované problémy s velkým průměrem měřené oblasti a rozsah měření. Ten podle [10] a [4] maximálně $2 \sim 3mm$. Není proto vhodný k použití na parních turbínách.

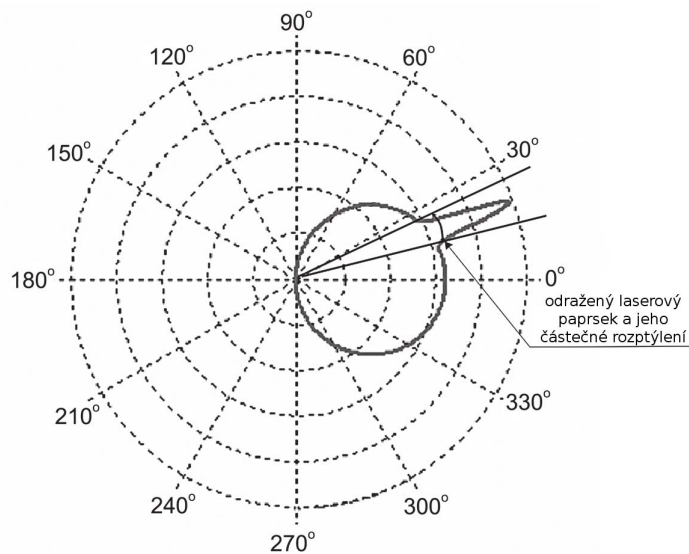
3.3.4 Optické

Optické sondy využívají principu vysílání a zpětného přijímání paprsku. Zdroj světla je pomocí optického vlákna přiveden do sondy. Zde je vysílač paprsku umístěn v jejím středu a přijímače jsou umístěny v kruhu kolem něj. Tato konfigurace je patrná na obrázku 18. Vyslaný signál se odrazí od objektu, lopatky v našem případě,



Obrázek 18: Uspořádání vláken v optické sondě: uprostřed - výstup paprsku, v kruhu - příjem paprsku

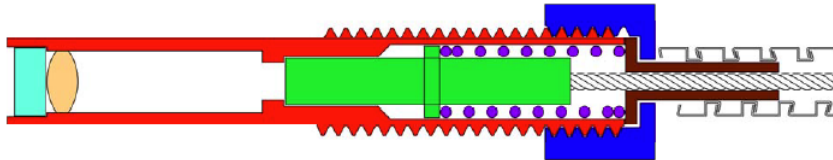
a putuje zpět do přijímače. Zde je následně pomocí vyhodnocovací elektroniky zjištěna pro každý vzorek intenzita přijatého signálu. Z těchto hodnot je možné určit vibrace či clearance za použití vhodného algoritmu pro použitou metodu měření. Obecně je nutné dbát, aby se odražený paprsek vrátil zpět do sondy. Musí se tedy uvažovat vyzařovací charakteristika bodu, který je ozářen laserem. Jako příklad lze uvést obrázek 19, kde je charakteristika rozptylu paprsku při ozáření bodu pod úhlem $-20C^\circ$ ke kolmici ozářené plochy.



Obrázek 19: Vyzařovací charakteristika bodu ozářeného laserem nakloněným $-20C^\circ$ ke kolmici plochy (převzato z [16])

Celá měřicí sonda se skládá ze zdroje paprsku, zařízení pro snímání odraženého paprsku a samotné hlavy sondy. Jako zdroj světla je použit monochromatický laser (tip - timing) či zdroj světla o širokém spektru vlnových délek (optická interferometrie). Nyní bude diskutována sonda navržená pro metody využívající tip - timingu. Tato sonda byla zkonstruována ve spolupráci ZČU a Doosan Škoda Power s.r.o. a její konstrukce je popsána v [17]. Pro snímání odraženého paprsku je využito lavinové fotodiody. Fotodioda musí být rychlá, aby dokázala vzorkovat až v řádech desítek či stovek MHz . Při klasickém zapojení je však doba odezvy sondy pomalá, musí být využito jejího předepnutí. Předepnutí je realizováno připojením napětí v závěrném směru, které změní režim diody na odporový. Čím vyšší napětí je přiloženo, tím více se snižuje doba odezvy a u použité lavinové fotodiody HFD3002 je možné se dostat až na $1ns$.

Konstrukce hlavy sondy je zobrazena na obrázku 20.



Obrázek 20: Konstrukce hlavy optické sondy vyvinuté ve spolupráci ZČU a Doosan Škoda Power (převzato z [16]) Jednotlivé části jsou rozlišeny podle barvy: **Pouzdro sondy**, **krycí safírové sklíčko**, **sférická čočka**, **pevně spojený svazek vláken**, **pružina**, **průchodka** a **matka**

- **Pouzdro sondy**

Pouzdro sondy je trubička vyrobená z nerezavějící oceli. Uvnitř je uzpůsobená potřebám vnitřních součástí. Na vnější části je z poloviny hladká a z poloviny má závit M7 kvůli montáži do turbíny.

- **Svazek vláken**

Z důvodu vysokých teplot, kterým je za provozu sonda podrobena, jsou použita skleněná optická vlákna. Pro vedení výstupního paprsku je použito jedno vlákno o průměru jádra $125\mu m$. Pro snímání odraženého paprsku je po obvodu kruhu kolem středního vlákna rozmístěno 7 vláken o průměru jádra $50\mu m$.

- **Čočka**

Čočka zaostřuje paprsky vystupující z optického vlákna. Je použita spojka, která zaostřuje na vzdálenost $20mm$ při průměru paprsku $0,5mm$.

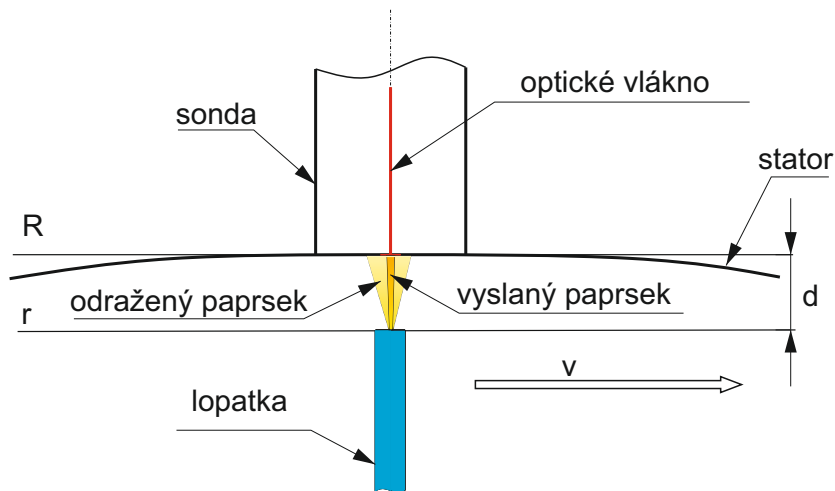
- **Krycí sklíčko**

Krycí sklíčko musí chránit sondu před agresivními podmínkami uvnitř turbíny - vysokou teplotou, vysokým tlakem, poškrábáním, abrazí páry a usazováním nečistot. Také nemá ovlivnit průchod paprsků. Tyto parametry splňuje čiré safírové sklo.

4 Rozbor použitých návrhů optických sond

4.1 Pomocí změny intenzity signálu

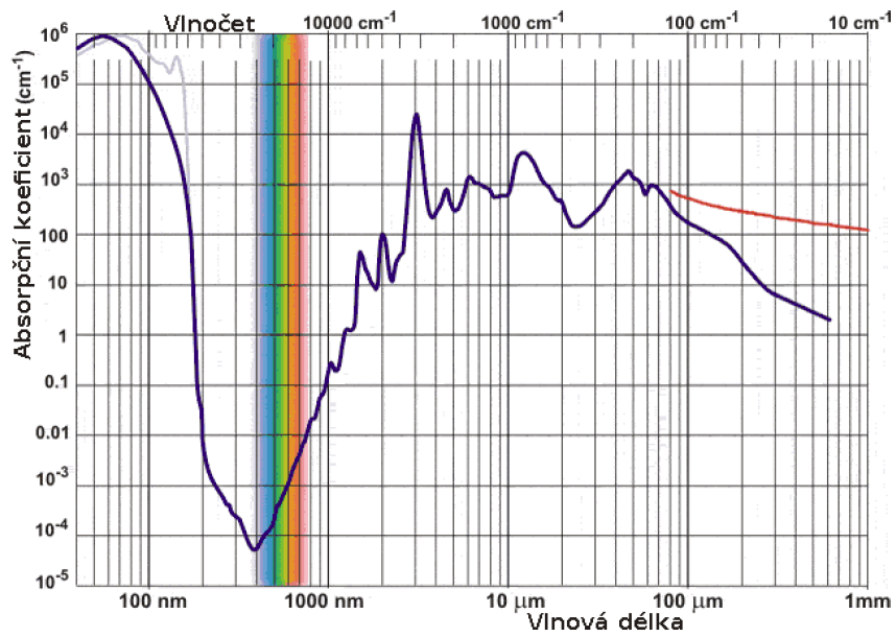
Prvním možným konstrukčním řešením sondy vhodné k měření clearance je použití sondy v přímém radiálním směru vůči ose turbíny. Tedy tak, že paprsek vysílaný sondou dopadá na lopatky kolmo. Samotné nastavení měřící sondy je vidět na obrázku 21.



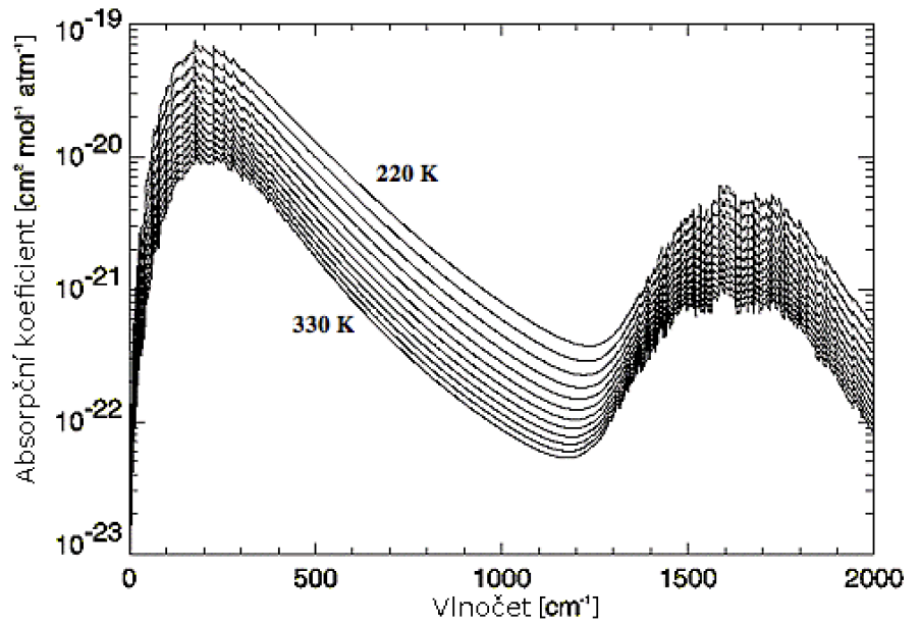
Obrázek 21: Optická sonda v kolmém směru k lopatkám

Sonda vysílá paprsek na lopatkové kolo a zároveň snímá intenzity paprsku přijatého. Jestliže je lopatka blíž, intenzita paprsku se zvýší a naopak. Tuto intenzitu je možné vyjádřit hodnotou napětí na přijímací fotodiodě. Clearance by se pak mohl určit odvozením z těchto hodnot. Tato metoda je realizovatelná pouze za určitých podmínek. Bylo by nutné sondu precizně zkalibrovat a počítat s některými nejednoznačnými situacemi. Kvůli různé absorpci paprsku prostředím (obrázek 22a) je nejprve nutné zvolit takovou vlnovou délku, která by jím byla nejméně ovlivněna. Jde zejména o záření ve viditelném spektru. Dalším faktorem ovlivňujícím výběr vhodné vlnové délky je fakt, že na přechodu mezi vodou a vodní párou vzniká lom paprsku. Tato situace nastává při průchodu paprsku prostředím, které může obsahovat malé kapičky vody, nebo zejména v situaci, když na čočce senzoru ulpí kapka vody. Index lomu na tomto rozhraní by měl být zmenšen kvůli minimalizaci poměru odchyleného záření. Index lomu přibližně exponenciálně klesá s rostoucí vlnovou délkou laserového paprsku. V publikaci [17], ze které byl obrázek převzat, použili autoři zelený laser s vlnovou délkou $532nm$. Absorpce paprsku je ale závislá ale i na jiných vlastnostech prostředí. Jedním z nich je i jeho teplota. Jak je patrné na 22b, vyšší teplota prostředí snižuje hodnotu absorpčního koeficientu a naopak.

Nezanedbatelný vliv na měření nemá jen typ prostředí, kterým se paprsek šíří, ale i typ povrchu, na který paprsek dopadá. V tomto případě na konce lopatek. Lopatky jsou vystaveny nepříznivému prostředí, které způsobuje i změny na povrchu materiálu. Mezi tyto změny patří zejména koroze a eroze. Problémem je, že míra



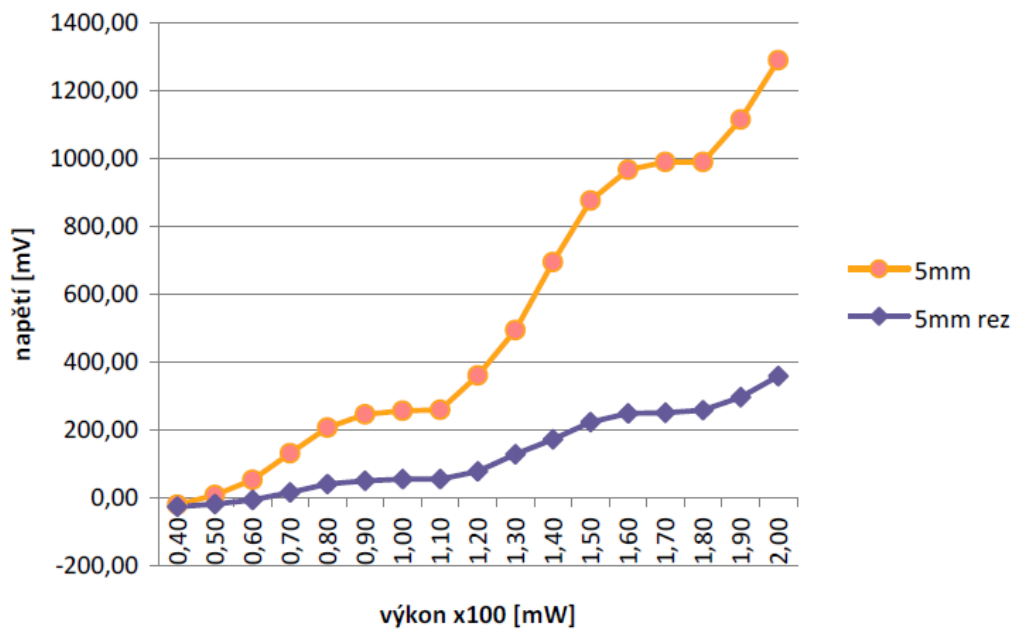
(a) Závislost absorpce elektromagnetického záření na vlnové délce a druhu prostředí. modrá - voda, šedá - vodní pára, červená - led



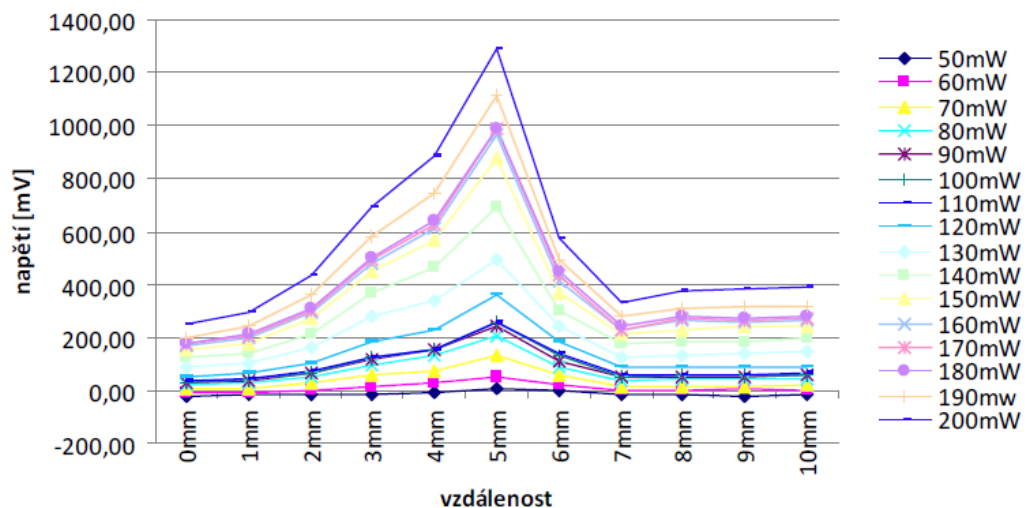
(b) Závislost absorpce paprsku na teplotě prostředí

Obrázek 22: Oba obrázky převzaty z [17]

korozí se mění v čase. Když turbína stojí, míra se zvyšuje a naopak při běhu turbíny se korozí částečně může odstranit. Bylo by nutné tento vliv odfiltrovat. Závislost vlivu odrazivosti materiálu na vybuzeném napětí na fotodiodě je ukázána na obrázku 23. Při zoxidovaném povrchu lopatek je odrazivost menší a napětí na fotodiodě se sníží. Z obrázku je také patrné, že ačkoliv se při vyšším výkonu laseru zvýší napětí na fotodiodě, zvýší se tak pro obě situace. Vyšší výkon laseru tedy neřeší problém s korozí. Eroze navíc způsobí změnu povrchu lopatek, která opět ovlivní odrazivost



Obrázek 23: Napětí na fotodiodě v závislosti na typu povrchu. Vzdálenost sondy je 5mm od povrchu lopatky. (převzato z [17])



Obrázek 24: Napětí na fotodiodě v závislosti na velikosti clearance (převzato z [17])

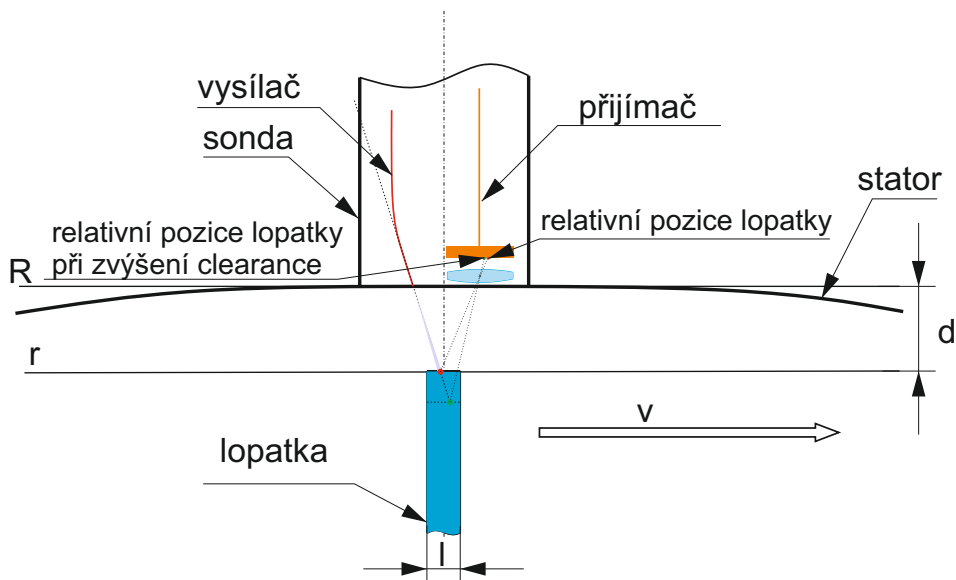
povrchu.

Dalším problémem je nejednoznačnost odečtu clearance vyplývající z charakteristiky 24, jež byla naměřena a publikována [17]. Tato charakteristika vyplývá ze zaostření sondy (na obrázku je paprsek zaostřen na 20mm). Pro určitý clearance sonda přijímá maximum odraženého signálu. Je možné říci, že pro měření většího rozsahu clearance je vhodné používat sondu bez zaostření a naopak pro menší rozsah je možné použít signál zaostřený. Intenzita signálu poté od maxima víceméně souměrně klesá při změně clearance. Není tedy možné například jednoznačně říci, jestli je nyní lopatka vzdálena 4 nebo 6 mm od zdroje signálu. Možným řešením této situace by bylo, že by sonda byla zaostřena pro takovou hodnotu, aby měřená hodnota (clearance) nikdy nepřesáhla oblast s maximální intenzitou navracejícího se světla. Tím pádem by se využila jen jedna část charakteristiky a pomocí předem zjištěných hodnot by bylo možné zjistit clearance.

Jak je patrné, tento princip by byl velice obtížný na kalibraci a na odfiltrování vlivu okolí či samotné konstrukce sondy. Není tedy vhodné ho použít.

4.2 Pomocí optické triangulace

Měření vzdálenosti pomocí triangulace signálu je často využíváno v průmyslu kvůli jeho jednoduchému principu a uspokojivým výsledkům. Princip měření je nastíněn na obrázku 25. Z optického zdroje je vyslán paprsek směrem k měřenému objektu, na kterém vytvoří paprsek bod, jehož relativní pozice je poté snímána senzorem. Jako přijímací část sondy slouží nejčastěji CCD pole s vysokým rozlišením. Pole je schopné zaznamenat místo dopadu paprsku a následně vyhodnotit, jak vzdálený musí být předmět, jestliže jeho relativní pozice se nachází v tomto místě.



Obrázek 25: Optická sonda využívající principu triangulace

Bohužel ale i zde není možné tento princip z několika důvodů aplikovat. Prvním z nich je fakt, že snímaný povrch není zcela homogenní a signál se může často odrazit do jiných míst z důvodu jiného tvaru. Tímto se relativní pozice změní a následný výpočet není již přesný. Může také nastat vícenásobný odraz, kdy se paprsek odrazí do statoru, znovu do rotoru a tento bod může být vyhodnocen jako platné místo dopadu paprsku. Dalším problémem způsobuje prostředí uvnitř turbíny. Jak již bylo řečeno, sonda musí být schopna přesně měřit v prostředí s vysokou vlhkostí, kde pára může obsahovat drobné kapičky vody, a také je nutné eliminovat například vliv srážení vodních kapek na vysílači a přijímači signálu. Problém nehomogenity povrchu a prostředí je možné eliminovat zvětšením průměru paprsku, které zajistí, že případná kapka vody ovlivní jen část paprsku. I nehomogenita povrchu tak může ovlivnit jen část paprsku. Toto řešení však bohužel přináší snížení rozlišení u měření, které již tak není u triangulace často dostačující. Snížení rozlišení je dáno tím, že bod dopadu paprsku bude zabírat větší plochu na snímku z CCD kamery. Právě rozlišení u této konstrukce může být dalším problémem. Vezmeme-li v úvahu například sondy od společnosti Micro-sensor, tak nejvyšší řada OptoNCDT 2000 zaručuje rozlišení 0,03% z měřícího rozsahu, kdy měřící rozsah by měl být kolem 20mm kvůli uložení senzoru v těle statoru. Pro tuto vzdálenost je tedy možné měřit s rozlišením 6 μ m. Je možné najít i senzory s vyšší rozlišovací schopností, je ale otázkou, nakolik se projeví na přesnost výše uvedené okolní vlivy. Důležitým parametrem senzoru je také jeho vzorkovací frekvence. V případě uvedené řady, jsou senzory běžně schopné pracovat na frekvenci okolo 10kHz. Tato frekvence nemusí být ale dostatečná na turbínách s velkým průměrem lopatkového kola a nutností měřit plochy o malých rozměrech. Rozměry plochy ovlivní, jak dlouho bude plocha exponována pod sondou. Jestliže chceme zajistit, aby byla změřena každá lopatka, musíme vzorkovat s takovou frekvencí, která zaručí platnost následujícího vztahu, kde l je rozměr měřené plochy lopatky, o obvod lopatkového kola, f_{rot} frekvence otáčení turbíny a f_v vzorkovací frekvence sondy.

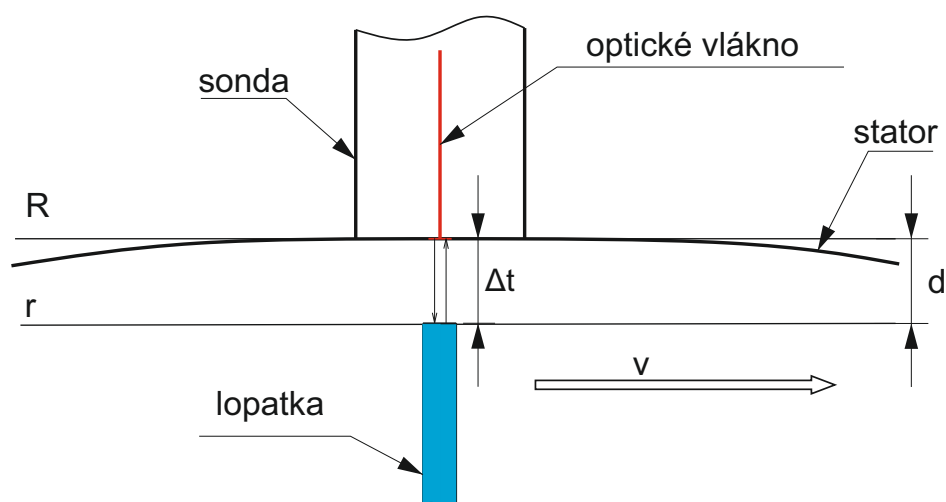
$$l \leq \frac{2o \cdot f_{rot}}{f_v} \quad (4.2.1)$$

Jestliže bychom tedy uvažovali 1MW turbínu od Škoda Power s.r.o. o průměru lopatkového kola $d = 1053,4mm$, jeho obvod je vypočten jako $o = 2\pi R \doteq 3310mm$. Uvažované otáčky turbíny jsou 50Hz. Při uvažované maximální frekvenci $f_v = 10kHz$ je tedy možné měřit vzdálenosti částí lopatek o velikosti alespoň $l \doteq 33,1mm$. Tato hodnota může být splnitelná u bandážovaných lopatek, nikoliv však u některých dalších typů jako jsou lopatky nebandážované nebo spojené pomocí drátu. Je nutné vzít i v potaz, že turbína použitá k příkladu se řadí k těm menším. Při zvětšování průměru lopatkového kola totiž lineárně roste požadavek na minimální rozměr měřené plochy. Dalším problémem by mohla být odolnost CCD snímače vůči vysoké teplotě uvnitř turbíny.

Po zhodnocení všech aspektů použití této konstrukce byla vyhodnocena jako nevhodná.

4.3 Přímé měření času odrazu signálu od lopatky a klasické měření BTT

Předešlé konstrukční řešení se nezakládala na měření časových okamžiků či jejich odchylek. V této kapitole jsou popsány první konstrukční řešení, které se na měření časů zakládají. Sonda bude opět směřovat radiálně do středu lopatkového kola. Toto řešení je znázorněno na obrázku 26. V tomto nastavení je možné měřit následující



Obrázek 26: Optická sonda využívající principu měření času odrazu signálu a průletů lopatek

údaje

1. Čas průletu lopatek v poměru k celé otáčce lopatkového kola
2. Čas mezi náběžnou a sestupnou hranou lopatky, tedy trvání průletu lopatky před senzorem
3. Čas, který putuje paprsek než se po vyslání vrátí zpět do senzoru

V prvním případě je měřen čas průletu lopatky, respektive její náběžné hrany, a tento čas porovnán s časem očekávaným. Z principu radiálně umístěné sondy, jejíž paprsek směřuje do středu kola, se ale změna clearance neprojeví rozdílným časem průletu. Tímto způsobem je ale možné měřit tangenciální vibrace lopatek. Měřením vibrací se zabývají například práce [17], [19] nebo [26].

Čas průletů lopatek před senzorem je tedy nezávislý na změně clearance. Jestliže je čas průletů nezávislý, je nezávislá i doba průletu lopatky před senzorem. Při daných parametrech lopatek a sondy je tato doba závislá jen na úhlové rychlosti lopatkového kola.

Posledním principem je měření časových okamžiků mezi vysláním paprsku k lopatce, odrazu od lopatky a příjmu sondou. I zde vyvstává několik problémů.

Prvním z nich je fakt, že rychlost šíření světla ve vakuu je $c \doteq 300000km/s = 3 \cdot 10^{14} \mu m s^{-1}$. Jeden μm signál tedy urazí za

$$t_{\mu m} \doteq \frac{1 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^8} = 3, \bar{3} \cdot 10^{-15} s = 3, \bar{3} fs \quad (4.3.1)$$

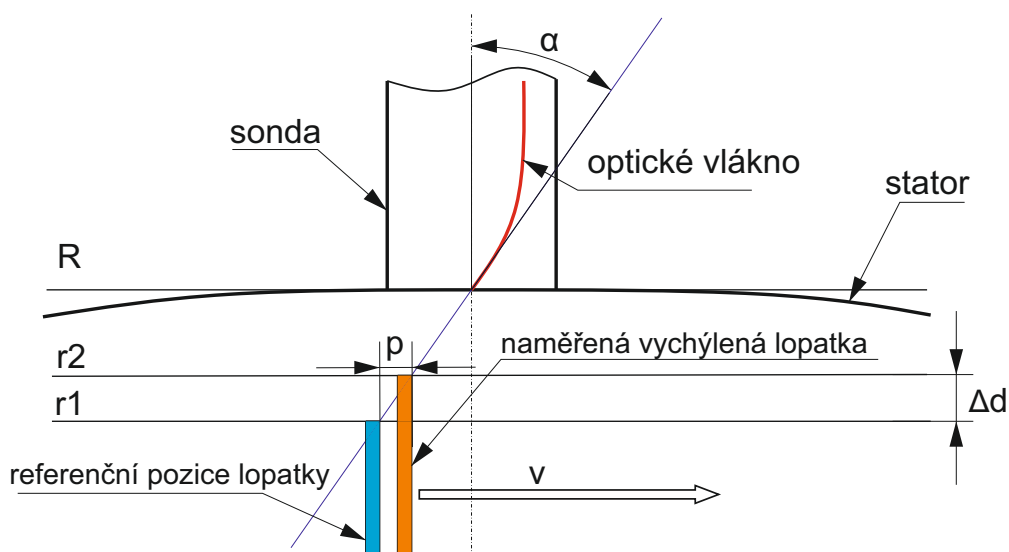
Při uvažování potřebného rozlišení změny clearance o $10 \mu m$ ($20 \mu m$ zvýšení celkové vzdálenosti, kterou musí paprsek urazit) , elektronika musí být schopna rozlišit změnu intenzity signálu každých $t = 66, \bar{6} fs$. Pro splnění tohoto požadavku je nutné vzorkovat s frekvencí $f \doteq 15 THz$. Snímač, který by dokázal pracovat při takové frekvenci však nebyl nalezen. Dalším problémem by zde byl i fakt, že světlo se kvůli indexu lomu šíří jinými prostředími jinou rychlostí. Průchod paprsku kapkou vody by tedy způsobil změnu naměřeného času a vznik chyby. Tento přístup je tedy vyhodnocený jako nevhodný.

4.4 Optická sonda využívající jednoho nakloněného paprsku

Tato metoda využívá měření časů průletů lopatek, tedy metody BTT (blade tip timing). V předchozí kapitole bylo zjištěno, že klasickou sondou bez naklonění paprsku bychom nedokázali změřit změnu clearance. To vyplývá z principu, že paprsek mířící do středu lopatkového kola by vždy naměřil stejný čas průletu nezávisle na vzdálenosti lopatky (při zachování konstantní úhlové rychlosti). Respektive tyto časy by byly ovlivněny pouze vibracemi lopatek v axiálním a tangenciálním směru.

Proto byl navrhnout systém s principem znázorněným na obrázku 27. Jestliže se změní hodnota clearance, změní se i časy, které budou naměřené. V případě prodloužení lopatky paprsek dopadne na její okraj v čase kratším, než je čas očekávaný a naopak. Totéž platí o časech průletů sestupných hran lopatek, je tedy možné říci, že diference mezi náběžnou a sestupnou hranou, tedy čas trvání průletu lopatky, nebude ovlivněna změnou clearance. Teoretická změna trvání průletu lopatky by mohla být zapříčiněna vibracemi zejména v tangenciálním směru. Z důvodu vibrací by mohla být lopatka zjištěna dříve a naopak při měření sestupné hrany by lopatka mohla být v opačné fázi kmitu a hrana zjištěna později. Je tedy otázkou, zda by se pomocí těchto různých časů průletu nemohly měřit i vibrace lopatek. V této práci je diskutováno pouze využití pro měření clearance.

Za pomoci obrázku 27 je vysvětlen princip. Je uvažována aproximace lopatkového kola rovinou. Tato aproximace je vhodná pro zjednodušení výpočtů, jelikož není uvažováno zakřivení kola a je možné aplikovat klasickou goniometrii. Tímto zjednodušením vznikne ve výpočtech nelineární chyba, která je ale pro většinu případů zanedbatelná. Lopatková kola jsou často velkých průměrů a měření probíhá na velice malé části obvodu kola. Poměr mezi úsekem, na kterém je prováděno měření (mikrometry) a obvodem lopatkového kola (až metry), je tedy velký. Tato chyba tedy klesá s rostoucí velikostí lopatkového kola. Nejprve je změřena odchylka mezi očekávaným a naměřeným průletem lopatky. Ta je označena jako Δt_p . Z této hodnoty je možné vypočítat teoretický posuv lopatky po obvodu. Ten je označen p . Jako Δd je označena změna clearance (rozdíl mezi r_1 a r_2), f_{rot} otáčky turbíny, v je obvodová rychlost lopatek a α poté naklonění senzoru vůči ose spojující zdroj paprsku se středem lopatkového kola. Aproximací krátkého úseku rovinou se výpočet



Obrázek 27: Optická sonda využívající naklonění paprsku)

velice zjednoduší, jelikož je možné aplikovat klasickou goniometrii. Je tedy možné vyjádřit změnu clearance jako

$$\Delta d = \frac{p}{\tan \alpha}. \quad (4.4.1)$$

Lopatkové kolo je nově poloměru r_2 , je možné tedy spočítat jeho obvod a obvodovou rychlost lopatek. Také je možné nahradit posuv p časovou diferencí průletu Δt za znalosti v .

$$o = 2\pi r_2 \quad (4.4.2)$$

$$v = f_{rot} \cdot o \quad (4.4.3)$$

$$p = v \cdot \Delta t_p \quad (4.4.4)$$

Aplikací všech vztahů je změna clearance definována jako

$$\Delta d = \frac{2\pi \cdot r_2 \cdot \Delta t_p \cdot f_{rot}}{\tan \alpha} \quad (4.4.5)$$

Důležitým krokem je ověření, zda je tato konstrukce vůbec použitelná k měření. Je nutné zjistit, zda je teoretické rozlišení sondy dostatečné. Tento požadavek se ověří dosazením do výsledné rovnice. Opět je výpočet proveden pro známou 1MW turbínu s $r = 526,7mm$ při otáčkách $50Hz$. Maximální vzorkovací frekvence dostupného zařízení, které se nyní využívá k měření vibrací, je $100MHz$. Minimální časový rozestup mezi vzorky je

$$\Delta t_p = 10^{-8}[s] \quad (4.4.6)$$

Při měřeních popsaných v kapitole 5 bylo zjištěno, že největší použitelný náklon paprsku u experimentu se pohybuje kolem 15° . Po dosazení do vztahu získáme minimální zjistitelnou změnu clearance

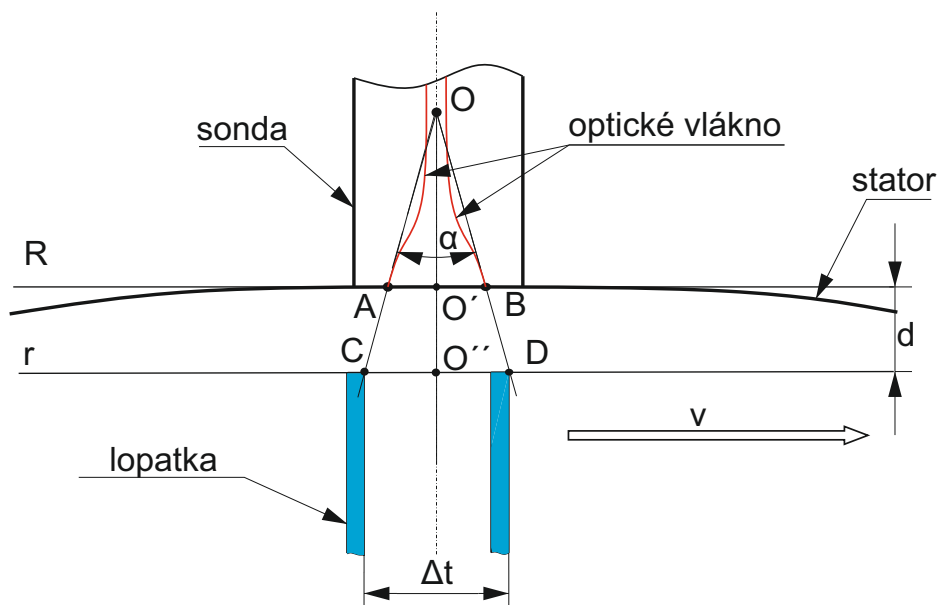
$$\Delta d = \frac{2\pi \cdot r \cdot \Delta t_p \cdot f_{rot}}{\tan \alpha} \doteq 6\mu m \quad (4.4.7)$$

Tato hodnota by měla postačovat pro splnění zadaných požadavků, které počítají se schopností rozeznat změnu clearance alespoň od $10\mu m$. Zvýšení rozlišení lze dosáhnout zvýšením vzorkovací frekvence sondy nebo vyšším náklonem sondy vůči lopatkovému kolu. Nevýhodou tohoto řešení je nutnost přesné znalosti časů očekávaných průletů. Lopatky by tedy měly být naprosto přesně symetricky rozděleny podél obvodu, nebo musí být sonda nejprve kalibrována. Kalibrace může například fungovat tak, že při nízkých otáčkách budou naměřeny polohy náběžných a sestupných hran všech lopatek, které poté budou sloužit k odhadu očekávaných průletů. Potíž ale nastává, jestliže lopatkové kolo vlivem zvyšujících se otáček mění svůj tvar. To se děje například u lopatek, které se se zvyšujícími otáčkami postupně do sebe zamykají a mění se tedy stálá axiální a radiální výchylka. Zde by poté mohly sloužit jako kalibrační data údaje získané na začátku provozu turbíny při provozních otáčkách. Dočasné axiální a radiální výchylky způsobené vibracemi je možné odfiltrovat například dolní propustí, jelikož je očekáváno, že clearance se nebude měnit v čase tak výrazně jako výchylka způsobená vibracemi. Tento typ konstrukce je tedy teoreticky možné použít pro měření clearance na parních turbínách, ale výrazným zlepšením by byla konstrukce, která nevyžaduje apriorní znalost očekávaných průletů lopatek.

4.5 Optická sonda s dvojitým paprskem

Nedostatek konstrukce z minulé kapitoly, který se zmiňuje o potřebě znalosti očekávaných průletů lopatek, řeší sonda s touto konstrukcí. Navíc se řeší problém náklonu sondy. Pomocí dvou paprsků lze dosáhnout teoreticky dvojnásobného úhlu použitelného při výpočtu clearance. To je dáno tím, že celkový úhel je součtem dílčích úhlů naklonění obou sond, kdy jsou sondy stále schopné spolehlivě identifikovat náběžné hrany lopatek. A jak bylo zmíněno, vyšší úhel následně umožní vyšší rozlišení sondy při výpočtu clearance. Následující popis vychází z článku [29], kde autoři z Tianjin University hledali možné konstrukční řešení sondy, která by byla schopná v reálném čase měřit clearance i vibrace a bylo ji možné použít i na vysokootáčkové stroje. Samotné měření je založené na měření času průletu lopatky, resp. její hrany, mezi jednotlivými snímači - Δt . Jak je patrné z obrázku 28, jestliže je lopatka delší než obvykle, první senzor ji detekuje později, kdežto druhý naopak dříve. Rozdíl obou časů se tedy sníží. Při větším clearance je tomu naopak. Výhodou také je, že je možné získat absolutní hodnotu clearance, nikoliv tedy jen změnu jeho velikosti. Výpočet je následující. Okraj lopatkového kola byl opět aproximován rovinou, je tedy možné aplikovat jednoduchou goniometrii. Dva paprsky mají společné ohnisko O a svírají úhel α . Body A a B jsou označena místa, kde paprsek vychází ze sondy. Body C a D naopak označují místa, kde paprsek je v kontaktu s náběžnou hranou lopatky. Označení d nese samotný clearance a O' pak bod, který je průsečíkem osy spojující bod O a střed lopatkového kola s přímkou spojující body A a B . Vzniknou tedy dva trojúhelníky OAB a OCD . Ze znalosti geometrie vychází úměra

$$\frac{\overline{OO'}}{\overline{OO'} + d} = \frac{\overline{AB}}{\overline{CD}}. \quad (4.5.1)$$



Obrázek 28: Optická sonda s dvěma paprsky

Z tohoto tvaru je nutné vyjádřit d . Pomocí goniometrie můžeme definovat OO' jako

$$\overline{OO'} = 0,5 \cdot \overline{AB} \cdot \cot(\alpha/2). \quad (4.5.2)$$

Zpětným dosazením a několika úpravami je poté předpis pro výpočet clearance

$$d = 0,5 \cdot \overline{AB} \cdot \cot(\alpha/2) \cdot \left(\frac{\overline{CD}}{\overline{AB}} - 1 \right). \quad (4.5.3)$$

Při pohledu na rovnici je patrné, že kromě \overline{CD} jsou všechny ostatní proměnné známé. Je tedy nutné proměnnou \overline{CD} také vyjádřit. Tento rozměr ale není nic jiného než vzdálenost, kterou lopatkové kolo urazí za daný měřený časový okamžik. Musí být známe parametry lopatkového kola, jako je jeho poloměr r a otáčky f a z nich vycházející perioda jedné otáčky T . Z těchto hodnot je následně vypočtena obvodová rychlost v . Z těchto vztahů vyplývá výpočet \overline{CD} jako

$$v = 2\pi r \cdot f = \frac{2\pi r}{T} \quad (4.5.4)$$

$$\overline{CD} = v \cdot \Delta t = 2\pi r \cdot \left(\frac{\Delta t}{T} \right) \quad (4.5.5)$$

Dalším dosazením do vzorce 4.5.3 se získá finální tvar pro výpočet clearance

$$d = \pi r \cdot \cot(\alpha/2) \left(\frac{\Delta t}{T} \right) - 0,5 \cdot \overline{AB} \cdot \cot(\alpha/2) \quad (4.5.6)$$

Ze vzorce vyplývá lineární závislost clearance na změřeném času v poměru celé periody. Této linearitě se využije při kalibraci. Kalibrací se odstraní potíže s přesným naměřením rozměrů sondy a úhlu, který paprsky svírají. Proč tomu tak je, ukáže

následující odvození. Nejprve je možné části rovnice 5.3.6 nahradit novými konstantami.

$$k = \pi r \cdot \cot(\alpha/2) \quad (4.5.7)$$

$$b = -0,5 \cdot \overline{AB} \cdot \cot(\alpha/2) \quad (4.5.8)$$

Použitím těchto rovnic lze výpočet clearance definovaný 5.3.6 přepsat na tvar 4.5.9. Z tohoto tvaru je možné poznat směrnicev předpis přímky.

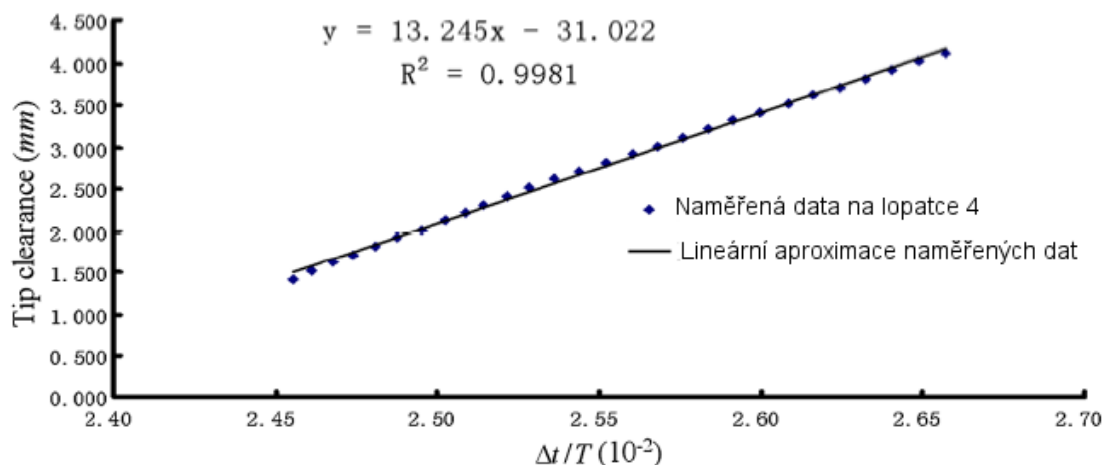
$$d = k * \left(\frac{\Delta t}{T}\right) + b \quad (4.5.9)$$

Pro každou sondu s neznámými nebo nedostatečně přesně určenými parametry je tedy nutné nalézt individuální hodnoty těchto dvou konstant.

Kalibrace by mohla být provedena na testovacím systému obsahující rotující disk. Systém by měl splňovat následující vlastnosti:

- Systém by měl umožnit přesné nastavení otáček.
- Disk by měl být vyroben tak, aby nepodléhal kmitům a prodloužení. Tímto je myšleno, aby disk neměnil při rotaci své rozměry a zároveň byl i natolik tuhý, aby se zabránilo vzniku kmitů.
- Disk by měl obsahovat různě dlouhé lopatky či plošky s různou vzdáleností od osy rotace. Pro přesnou kalibraci by bylo vhodné, aby byly rozměry přesně známé. (s přesností $1\mu m$).

Následně je postupováno tak, že se pro jedny otáčky naměří hodnoty $\Delta t/T$ pro všechny lopatky se známými rozměry. Je zjištěna závislost d na Δt . Tato závislost se proloží přímkou pro zjištění konstant k a b , jenž jsou následně použity v rovnici 4.5.9. Proložení je ukázáno na obrázku 29. Jak je patrné, lineární aproximace



Obrázek 29: Nalezení závislosti mezi $\Delta t/T$ a clearance (převzato z [29])

nemusí být úplně vhodná, jelikož závislost není zcela lineární. Tento problém může

být způsoben i aproximací obvodu lopatkového kola rovinou na měřeném úseku clearance. Je tedy vhodné závislost aproximovat polynomem vyšších řádů. Podle autorů článku došlo v jejich případě ke snížení maximální chyby mezi skutečnou a naměřenou hodnotou clearance z $36\mu m$ na $15\mu m$ při zvýšení řádu polynomu z $n = 1$ na $n = 3$.

Teoretické rozlišení měřící sondy je závislé na velikosti paprsku a maximální využitelné šířce pásma měřící elektroniky. Samotný průměr paprsku ovlivňuje minimální rozlišení tím, že při užším paprsku je možné přesněji detekovat okamžik průletu lopatky, jelikož se sníží minimální čas odlišení náběžné hrany od zbytku signálu. Tato závislost je dána vztahem

$$T_r = \frac{d_f}{v}, \quad (4.5.10)$$

kde d_f je průměr paprsku a v obvodová rychlost lopatkového kola. Z rovnice je patrné, že tato nově vypočtená doba T_r je čas, za který lopatka urazí vzdálenost rovnající se průměru paprsku. Za předpokladu, že poloměr lopatkového kola r a čas jedné otáčky T jsou přesně naměřené, a tedy neovlivní chybu měření, se chyba měření rovná času

$$\delta t = c \cdot T_r, \quad (4.5.11)$$

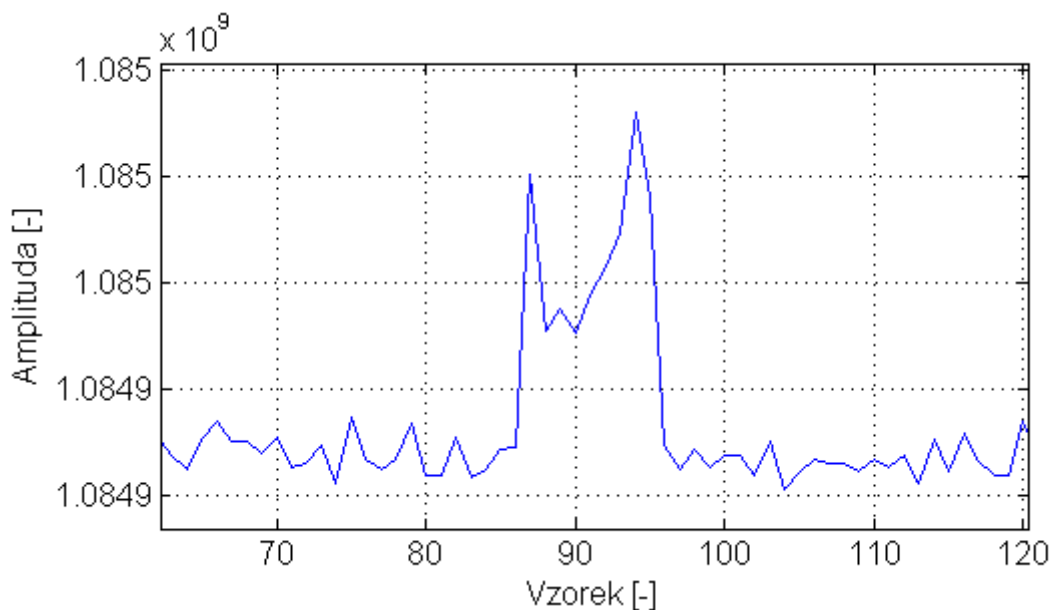
kde c je relativní chyba měření. Po úpravě této rovnice je patrné, že relativní chyba c je vyjádřena jako poměr minimálního času mezi dvěma vzorky a času, po který lopatka urazí vzdálenost rovnající se šířce paprsku. Se znalostí chyby měření v časové oblasti je možné odvodit chybu měření hodnoty clearance δd za pomoci rovnice 5.3.6 jako

$$\delta d = \pi r \cdot \cot(\alpha/2) \cdot \left(\frac{\delta t}{T}\right) = 0.5 \cot(\alpha/2) \cdot c \cdot d_f \quad (4.5.12)$$

Jestliže budou opět uvažovány parametry 1MW turbíny od Škoda Power s.r.o., kde $r = 526,7mm$, $T = 20ms$ a měřícího systému s parametry $f_{vzork} = 100MHz \Rightarrow \delta t = 10ns$, $\alpha = 20^\circ$, pak by teoretické rozlišení měřící sondy podle rovnice 4.5.12 bylo $\approx 4,7\mu m$.

Konstrukce sondy tedy splňuje požadavek na rozlišení a je schopna detekovat změnu clearance menší než $10\mu m$. Hodnotu rozlišení je možné zvýšit použitím vyšší vzorkovací frekvence měřícího zařízení. Rozlišení se ale sníží při měření lopatkového kola s větším průměrem či o vyšších otáčkách.

Výhodou této konstrukce je tedy dostatečné rozlišení a přímý výpočet absolutní hodnoty clearance. Další výhodou je nezávislost chyby měření clearance na vlastnostech paprsku, jako je jeho amplituda či na proměnlivé odrazivosti lopatky zejména kvůli vhodně zvolenému prahu rozpoznání náběžné hrany při zpracování signálu. Problém ale může nastat v případě, kdy hrana lopatky nebude dostatečně kvalitní. Při průletu lopatky před senzorem totiž právě ona hrana odrazí nejvíce signálu zpět do sondy. To je dáno tvarem hrany, kdy malá zaoblená plocha hrany lopatky bude na okamžik nastavena kolmo k sondě. Po průletu náběžné hrany lopatky sonda dál zaznamenává zvýšenou intenzitu přijímaného signálu, ale amplituda je již nižší než u hrany. Naopak u sestupné hrany se amplituda opět zvýší. Tato situace je zřetelná



Obrázek 30: Průběh intenzity signálu na přijímači při průletu lopatky

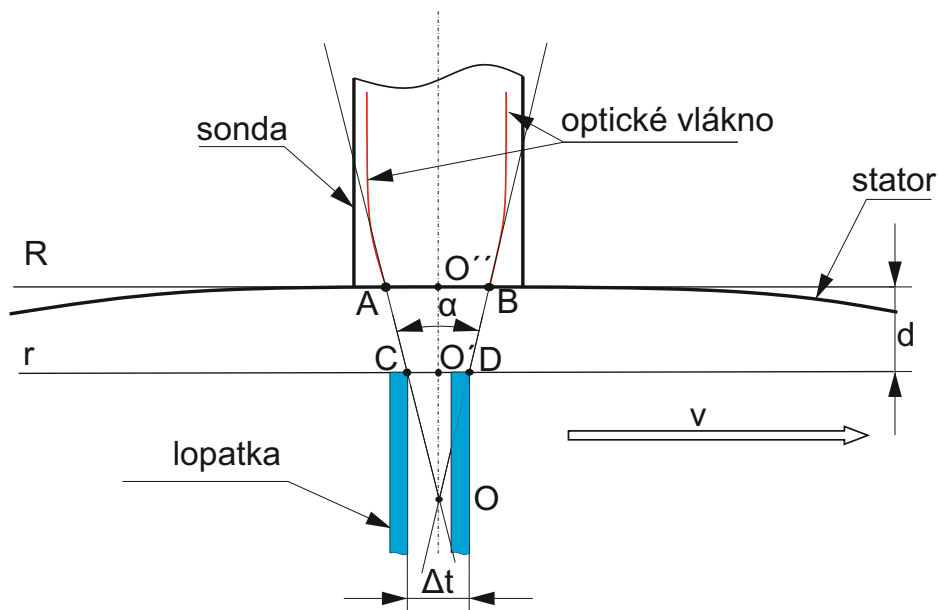
na obrázku 30. Tato sonda je nakloněna jako pravé optické vlákno na obrázku 28. Jestliže tyto špičky budou chybět, je nutné nastavit práh tak, aby zachytil i amplitudu odraženého signálu mezi hranami. Naopak při významném poškrábání lopatky by bylo možné zaznamenat další falešnou hranu.

4.6 Optická sonda s dvojitým paprskem - modifikovaná verze

Tato konstrukce vychází z klasického přístupu uvedeného v předchozí kapitole a je vyobrazena na obrázku 31. Modifikace by však mohla řešit některé nedostatky, které původní přístup z principu přinášel. První výhodou je, že vzdálenost \overline{CD} je zde kratší, tudíž chyba vzniklá aproximací této části oblouku rovinou se sníží. Druhou výhodou je lepší možnost změření polohy bodu O , jelikož je možné využít průsečíku obou paprsků na stínítku.

Možnou nevýhodou této konstrukce je ovlivnění přijímače jednoho paprskem druhým. Jestliže totiž bude úhel, vzdálenost paprsků a clearance ve vztahu, aby se paprsek z jednoho senzoru odrazil do senzoru druhého, může dojít k úplnému překrytí signálů. Ať už částečné nebo úplné překrytí signálů způsobí snížení rozestupu užitečného signálu od šumu a opět může nastat problém s nemožností rozeznat hrany lopatek.

Postup výpočtu clearance z naměřených hodnot časů je velice podobný původnímu přístupu. Výpočty se liší v principu změny Δt vůči změně clearance.



Obrázek 31: Modifikace optické sondy se dvěma paprsky

Jestliže se clearance zvýší, sníží se Δt a naopak.

$$\frac{\overline{OO''}}{\overline{OO''} - d} = \frac{\overline{AB}}{\overline{CD}} \quad (4.6.1)$$

$$d = 0,5\overline{AB} \cdot \cot(\alpha/2) \left(1 - \frac{\overline{CD}}{\overline{AB}}\right) \quad (4.6.2)$$

$$\overline{CD} = v \cdot \Delta t = 2\pi r \cdot \frac{\Delta t}{T} \quad (4.6.3)$$

$$d = 0,5\overline{AB} \cdot \cot(\alpha/2) - \pi r \cdot \cot(\alpha/2) \cdot \frac{\Delta t}{T} \quad (4.6.4)$$

Za použití substitucí

$$k = \pi r \cdot \cot(\alpha/2) \quad (4.6.5)$$

$$b = 0,5\overline{AB} \cdot \cot(\alpha/2) \quad (4.6.6)$$

je konečná rovnice pro výpočet clearance

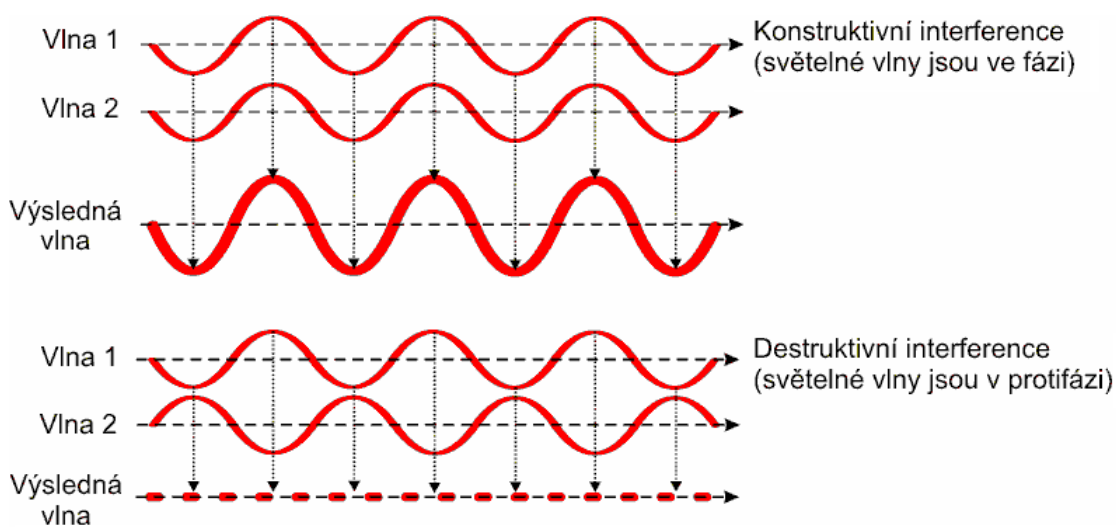
$$d = -k \cdot \frac{\Delta t}{t} + b \quad (4.6.7)$$

Výpočet maximálního rozlišení sondy, je totožný jako pro původní přístup a je definován rovnicí 4.5.12. I zde tedy platí další vlastnost původní sondy, že zvýšení rozlišení je možné navýšením vzorkovací frekvence měřícího systému či změnou velikosti paprsku. Snížení rozlišení je dáno zvětšením průměru lopatkového kola a jeho otáčkami.

4.7 Optická sonda využívající optické interferometrie

Tato konstrukce sondy nevyužívá principu blade tip-timing, nýbrž principu optické interferometrie. Tato metoda je založena na vlastnostech světla jako elektromagnetického vlnění. Popis konstrukce vychází z článku [27], kdy dále [20] poskytuje základní teoretické principy.

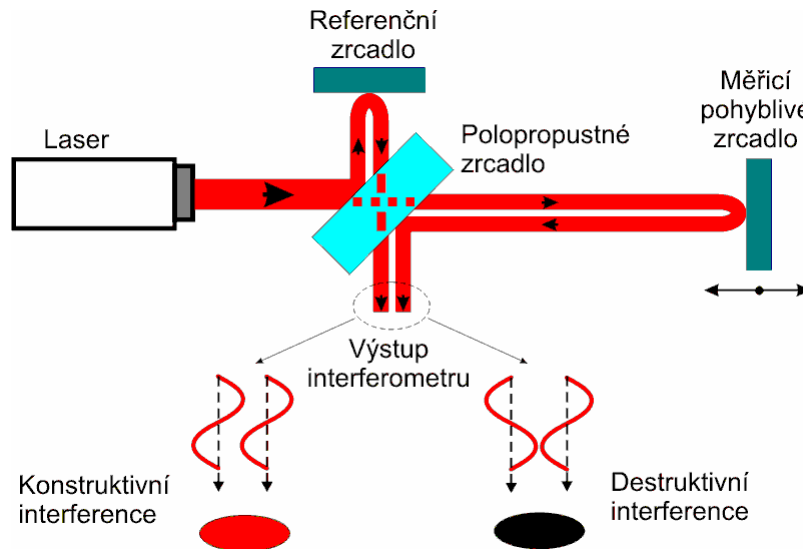
U elektromagnetického vlnění vždy může být definována jeho amplituda, vlnová délka a fáze. Princip interference vlnění spočívá v superpozici dvou nebo více světelných paprsků. Paprsek může být superponován i se sebou samým při jeho odrazu. Interference se dělí na konstruktivní a destruktivní. Při konstruktivní interferenci jsou obě vlnění ve fázi, tudíž výsledné vlnění bude mít dvojnásobnou amplitudu. Destruktivní interference uvažuje dvě vlnění v protifázi a jejím výsledkem je signál s nulovou amplitudou. Tento princip je ukázán na obrázku 32.



Obrázek 32: Popis interference dvou optických signálů (převzato z [20])

Při klasické interferometrii pro zjištění vzdáleností se používá zdroj laserového monochromatického (jedna vlnová délka) signálu. *Zcela základním laserovým interferometrem je Michelsonův laserový interferometr (obrázek 33)*. Zdrojem je laser, který generuje světlo na vstup interferometru, které dopadá na polopropustné zrcadlo. Následně se vytvoří měřicí a referenční svazek, který je odrážen fixním referenčním zrcadlem a pohyblivým měřicím zrcadlem zpět na polopropustné zrcadlo. Podle rozdílu délky ramen se vytváří na výstupu interferometru konstruktivní či destruktivní interference. Perioda, s jakou se tyto dvě limitní situace opakují, je polovina vlnové délky laserového paprsku. Je to dáno tím, že světlo, které prochází měřicí větví, prochází tímto prostorem $2x$. Změní li se tak poloha měřicího zrcadla o $\lambda/2$, je výsledná změna fáze po průchodu měřicí větví o 1λ . [20] Pro doplnění dodejme, že například vlnové délky viditelného spektra se pohybují v pásmu mezi $0,4$ až $0,7\mu\text{m}$. Z kapitoly 4.1 je známo, že použití právě vlnových délek na úrovni viditelného spektra je vhodné z důvodu nízké hodnoty absorpčního koeficientu prostředí turbíny. Z posunutí fází signálu o jedné vlnové délce je možné zjistit změnu clearance. Ačkoliv metoda umožňuje měření malých změn clearance, není možné spolehlivě zjistit jeho absolutní hodnotu. Jak bylo totiž řečeno, výstup z interferometru při pomalé změně

clearance kolísá mezi dvěma limitními stavy. Jestliže je znám přesný počáteční clearance a jsou detekovány limitní stavy, je možné zjistit i absolutní hodnotu clearance. Nebezpečím jsou ale skokové změny clearance, kdy se skokově změní fáze paprsku z pohyblivého zrcadla. Měřící zařízení může zachytit jen několik přechodů limitních stavů, ačkoliv reálná změna je vyšší.



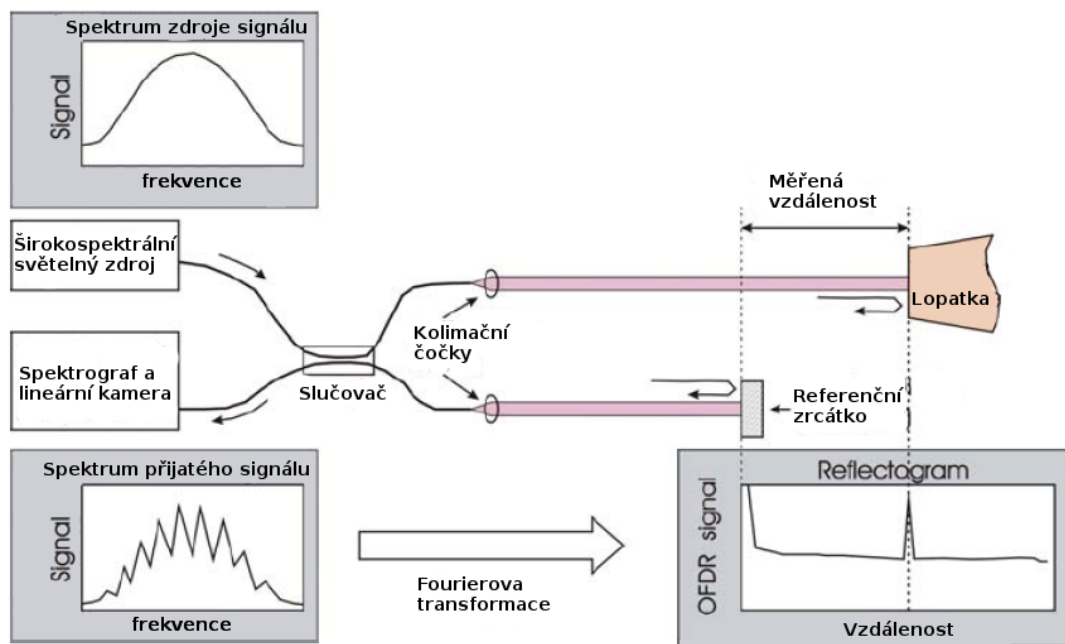
Obrázek 33: Princip Michelsonova interferometru (převzato z [20])

Vylepšením klasické interferometrie je OFDR (Optical Fourier Domain Reflectometry). Změnou je, že se nevyužívá pouze jedna vlnová délka, ale zdroj signálu pokrývá široké spektrum vlnových délek. Jak je viditelné na obrázku 34, nejprve je tento paprsek s daným intenzitním spektrem vyslán pomocí optických vláken do zařízení, který tento paprsek rozdělí. Jedna část je poté namířena na referenční zrcátko a druhá na zrcátko měřící. Paprsky jsou následně superponovány a rozloženy na mřížce podle vlnové délky. Vznikne tak nové intenzitní spektrum. Jak je patrné, získané spektrum se liší od původního. Interference totiž probíhá pro každou vlnovou délku obsaženou v paprsku. Některé vlnové délky (frekvence) se interferencí zeslabí, některé naopak zesílí. Spektrum zaznamenané pomocí lineární kamery se poté vyhodnotí za užití Fourierovy transformace, která umožní najít periodicitu ve spektru, z níž můžeme určit clearance.

Výpočet vyhodnocení jednoho odraženého vzorku je dán rovnicí

$$I(z, k) = I_O(R_{LO}R(z))^{1/2} \cdot \cos(2nkz - \phi), \quad (4.7.1)$$

kde z je hledaná vzdálenost, $k = 2\pi/\lambda$ úhlové vlnové číslo, $I(z, k)$ intenzita přijatého signálu pro určité z a k , n efektivní index lomu pro prostředí, ve kterém se šíří paprsek, R_{LO} a $R(z)$ jsou intenzity odrazů signálu od referenčního zrcátka a od lopatky, I_O intenzita zdroje signálu a ϕ libovolná počáteční fáze signálu. Je patrné, že při pevném clearance z bude výstupní intenzita signálu obsahovat sinusoidu s argumentem k . Tato frekvence je právě ona hledaná, ze které lze vypočítat clearance. Rozlišení sondy je dáno šířkou pásma $\Delta\lambda$ a střední vlnovou délkou zdroje signálu λ_c . Větší šířka pásma poskytne vyšší rozlišení, vyšší střední vlnová délka naopak



Obrázek 34: Princip měření clearance pomocí OFDR (převzato z [27])

tuto schopnost sníží. Vztah pro rozlišení vypadá následovně.

$$\Delta z = (2 \ln 2 / \pi) (\lambda_c^2 / \Delta \lambda) \quad (4.7.2)$$

Maximální měřicí rozsah je určen spektrálním rozlišením měřícího systému jako

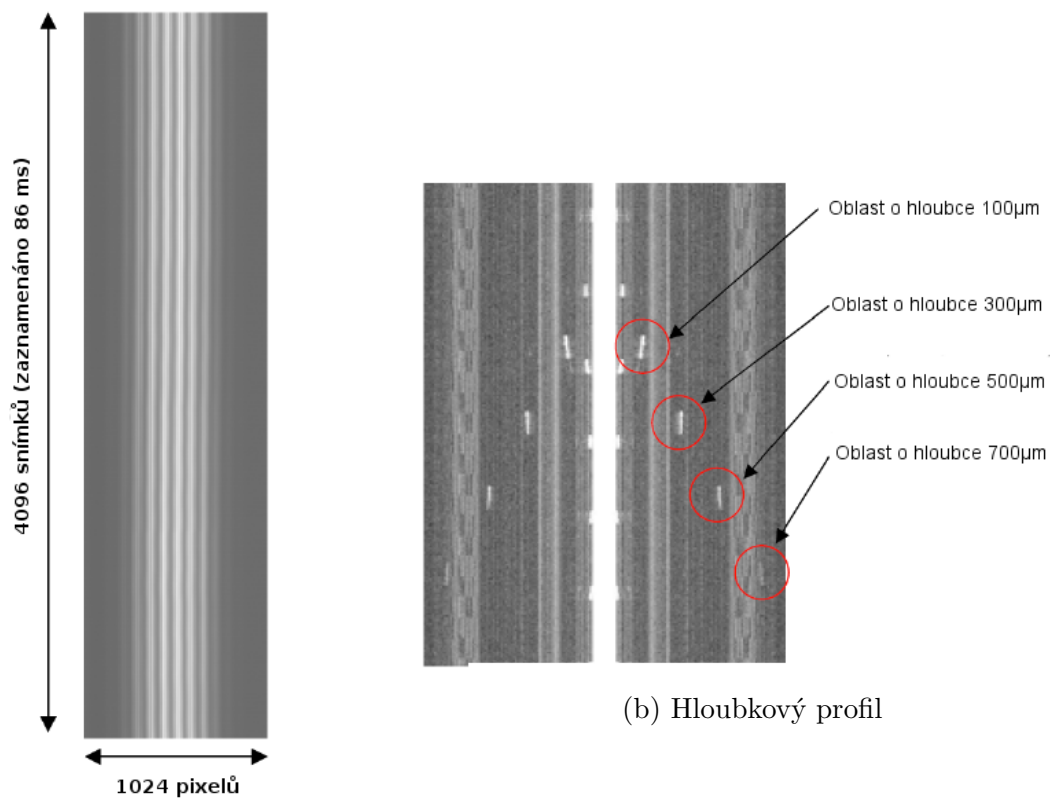
$$z_{max} = (1/\lambda_{min} - 1/\lambda_{max})^{-1} (N - 1) / 4, \quad (4.7.3)$$

kde λ_{min} a λ_{max} jsou okraje zpracovaného spektra a N je rozlišení (počet pixelů) detektoru odrazu spektra. Při vyšších vzdálenostech nastávají ve spektru kmity o vyšších frekvencích. Pro měření větších vzdáleností je tedy nutné použít vyšší rozlišení detektoru.

Detektor zachycující spektrum tak musí činit s patřičnou frekvencí, aby zachytil každou lopatku. V prostředí parních turbín, kde se pohybují lopatky obvodovou rychlostí kolem $400 m/s$ a průměr snímané plochy je často jen v řádech mm či cm , je potřeba snímání v řádech desítek, maximálně i několika stovek kHz . To je v dnešní době splnitelné. Například společnost TELEDYNE Dalsa nabízí mnoho typů lineárních kamer počínaje základními modely jako je *Spyder3 1k, 68 kHz*, konče výkonnými jako je *Piranha3 16k HS, 72 kHz*. Princip tohoto postupu je na snímku 35a, kde je v čase zachycen průběh 4096 zaznamenaných spekter s rozlišením 1024 pixelů. Výsledné vyhodnocení spektrogramu může být vyjádřeno například obrázkem 35b, kde jsou jasně patrné hodnoty clearance u testovacího disku, kdy disk obsahoval vyfrézované drážky o hloubkách 100, 300, 500 a 700 μm . Tento hloubkový profil však neodpovídá uvedenému spektrogramu.

Autoři zmiňují, že jejich experimentálním měřením bylo dosaženo rozlišení menšího než $10 \mu m$ při měřené vzdálenosti $1 mm$. Zmiňují také možnost zlepšení těchto hodnot, zejména měřícího rozsahu, který je ovlivněn rozlišením detektoru.

Dalším důležitým poznatkem je zanedbatelné ovlivnění spektra teplotou prostředí, ve kterém se šíří paprsek. Sníží se jen nepatrně amplituda v celém spektru, ale nikoliv rozložení špiček přijatého signálu. Problémem však může být usazování nečistot na čočce sondy, což to může přivodit snížení amplitudy jen u některých vlnových délek.



(a) Spektrogram - posloupnost spekter v čase

Obrázek 35: Výstupy měření pomocí OFDR (převzato z [20])

5 Testování optických sond

5.1 Měřicí systém

Měřicí systém by měl umožnit ověřit teoretické předpoklady. V této práci by mělo být ověřeno, zda je možné měřit absolutní hodnotu clearance či jeho změnu pomocí 3 konfigurací měřicího systému využívajícího optické sondy. Konfigurace jsou následující

- Sonda s jedním paprskem - kapitola 4.4
- Sonda se dvěma paprsky - kapitola 4.5
- Sonda se dvěma paprsky - modifikovaná verze - kapitola 4.6

Všechny tyto metody využívají optické sondy a jejich použití tak, jak je popsáno v kapitole 3.3.4. Je tedy využito principu tip - timingu ke zjišťování průletů lopatek. Měřicí elektronika vyhodnocuje s frekvencí $f_{vz} = 100MHz$ informace o aktuálním stavu osvětlení sondy. Průběh dat je znázorněn na obrázku 30. Uživatelem je nastavena optimální mez a druh hrany, jejíž čas průletu má být zjištěn. Můžou být zjišťovány jak náběžné, tak sestupné hrany. Měřicí systém také zaznamenává fázovou značku. Pomocí fázové značky je od sebe možné rozlišit jednotlivé otáčky snímaného disku. Pro každou otáčku kola je vygenerován datový paket s potřebnými informacemi.

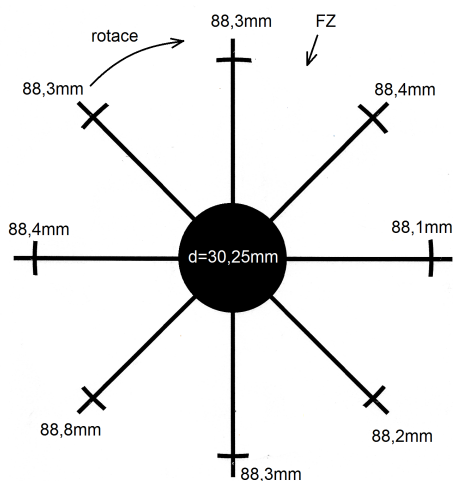
Pro zpracování datových paketů byly vytvořeny skripty v Matlabu. Po zadání vstupních parametrů je poté pomocí skriptu *nacitaci_skript.m* vytvořena datová struktura s jednotlivými informacemi. Datová struktura je ve výchozím nastavení pojmenována ve workspace jako *usedata*. Použité informace obsažené v datové struktuře jsou tyto

- *timevektor*
Tento vektor obsahuje absolutní časy indikací fázové značky vztažené vůči poslední půlnoci jako poměr aktuálního času vůči trvání jednoho dne a pohybuje se tedy od 0 do 1. Tato informace slouží k orientaci v datech.
- *cislotacky*
Vektor obsahuje informace o indexu otáčky. Diference mezi indexy by měly být rovny 1. Jestliže není diference rovna 1, signalizuje tento stav chybu způsobenou například absencí některého paketu.
- *fazovka*
V tomto vektoru jsou uvedeny periody jednotlivých otáček. Pomocí těchto hodnot je možné vypočítat rychlost otáčení měřeného kola.
- *citac_lopatek*
Čítač lopatek obsahuje informace, kolik lopatek bylo v průběhu jedné otáčky identifikováno přijímači. Každá řádka obsahuje informace pro jeden přijímač. Pomocí čítače lopatek je možné zjistit, zda je práh snímání hran správně nastavený. Aby tomu tak bylo, musí se rovnat naměřený údaj skutečnému počtu lopatek. Jinak nemohou být data brána jako validní.

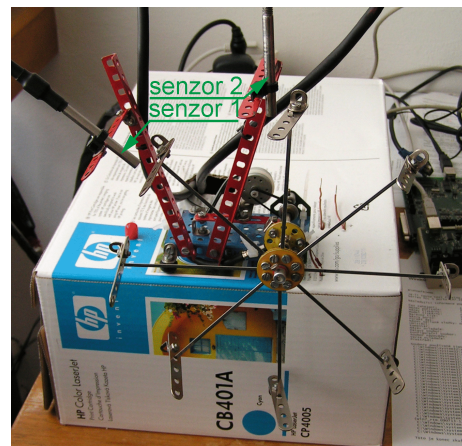
- *lopatky*
Toto trojrozměrné pole obsahuje naměřené časy průletů lopatek pod jednotlivými přijímači. Časy průletů se měří od počátku otáčky, tedy od identifikace fázové značky.
- *snímacu*
Informace o počtu použitých snímačů.

5.1.1 Stand - Merkur

Tento stand byl takto nazván z důvodu využití stavebnice Merkur pro jeho konstrukci. Kolo obsahuje 8 lopatek s různými délkami. Tyto jsou znázorněny na obrázku 36a. Délky jsou měřeny od uchycení lopatky (černý kruh na obrázku 36a). Rozestupy těchto lopatek nejsou pevně dané. Na tomto standu byla provedena měření s jedním i dvěma senzory. Je možné měnit jak polohu senzorů, tak jejich úhel, který svírají vůči přímce protínající střed lopatkového kola. Fázová značka je realizována pomocí optické závory. Lopatkové kolo je poháněno stejnosměrným motorem, který umožňuje plynule měnit otáčky. Při zvyšujících se otáčkách je očekáváno snižování clearance, jelikož jsou lopatky uchyceny pomocí málo tuhé konstrukce. Konstrukce standu je na obrázku 36b.



(a) Merkur - rozměry lopatek



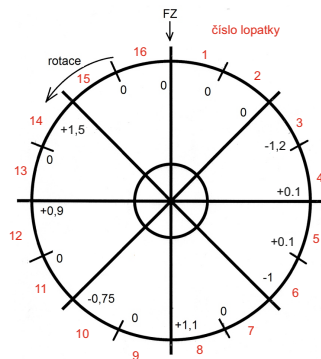
(b) Merkur - pohled na měřicí stand

Obrázek 36: Měřicí stand Merkur

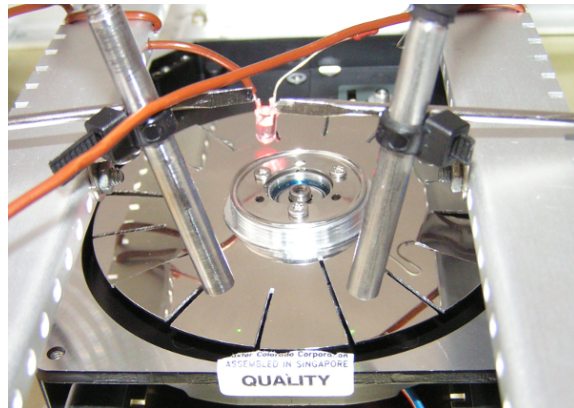
5.1.2 Stand - HDD

Stand nazvaný HDD je vyroben z pevného disku pro osobní počítače. U tohoto standu bylo měření prováděno v axiálním směru k rotaci. Plotna disku byla nařezána na 16 částí reprezentujících 16 lopatek, které jsou různě ohnuté v axiálním směru a simulují tak rozdílné délky - rozdílný clearance. Při testování se měřily průlety sestupných hran lopatek. Výchylinky lopatek na těchto hranách jsou uvedeny na obrázku 37a. Ke standu je možné připojit 2 optické senzory. Je možné měnit polohu senzorů a úhel, který svírají vůči disku. Z důvodu možností upevnění senzorů

byla na tomto standu testována modifikovaná verze sondy se dvěma paprsky. Fázová značka je zde realizována pomocí jedné prodloužené drážky a optické závory. Disk je poháněn původním motorem a prozatím není možné regulovat jeho otáčky. Ty se pohybují okolo hodnoty 5400 min^{-1} . Výhodou této konstrukce je nižší chvění celého standu. Díky tomu je možné dosáhnout vyšších rychlostí otáčení než u Merkuru. Také není v tomto případě nutné aproximovat měřenou část lopatkového kola rovinnou, jelikož senzory nejsou umístěny radiálně vůči lopatkovému kolu. Konstrukce stendu je znázorněna na obrázku 37b.



(a) HDD - vychýlení lopatek

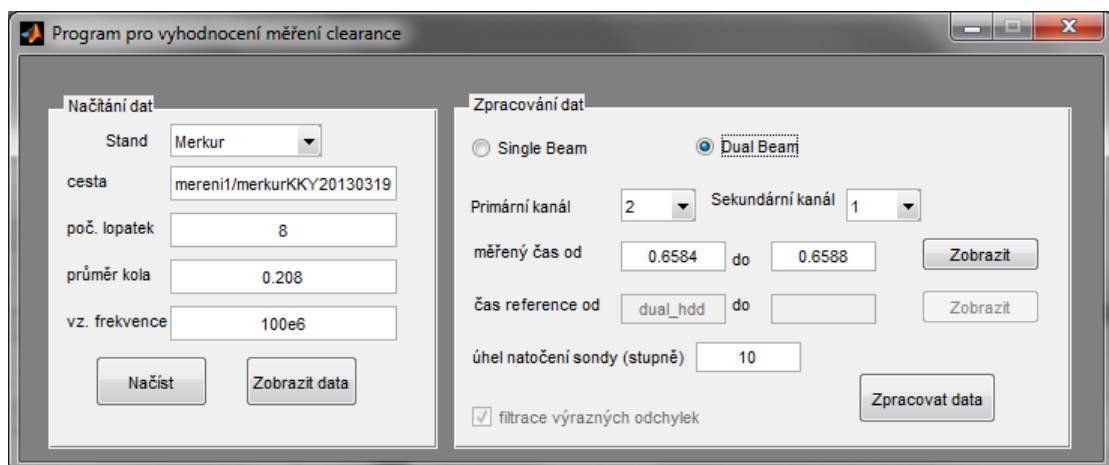


(b) HDD - pohled na měřící stand

Obrázek 37: Měřící stand HDD

5.1.3 Uživatelské rozhraní pro testování

Pro zjednodušení práce při testování sond pro různé parametry bylo vytvořeno jednoduché uživatelské rozhraní. Rozhraní umožňuje vybrat stand, parametry vstupních dat, druh použité sondy, nastavit kanály, editovat časy měření, změnit úhel senzorů či vybrat parametr zpracování signálu. Náhled rozhraní je na obrázku 38.



Obrázek 38: Uživatelské rozhraní pro zpracování dat

5.2 Sonda s jedním paprskem

Sonda s jedním paprskem byla testována z důvodu ověření teorie, že se bude clearance při zvyšování otáček snižovat. Pro testování byl využit stand Merkur.

5.2.1 Zpracování dat

Algoritmus zpracování dat pro sondu s jedním paprskem je rozdělen na dvě části. První část je zaměřená na vyjádření změny clearance při postupném zvyšování otáček vzhledem k daným referenčním otáčkám. Druhá část porovnává clearance mezi dvěma konstantními (přibližně konstantními) hodnotami otáček. Pro vyhodnocení dvou konstantních hodnot otáček je nutné zvolit v uživatelském rozhraní volbu *filtrace výrazných odchylek*.

Nejprve jsou z editačních polí v uživatelském rozhraní načtené časy měření, kdy chceme signál zpracovat. Referenčním úsekem by měla být nejlépe část, kde se kolo otáčí konstantní rychlostí. Měřenou částí, v případě analýzy změny clearance v závislosti na otáčkách, by měl být úsek, kde kolo zrychluje. V případě zjištění změny clearance pro dvoje otáčky by měl druhý úsek obsahovat také konstantní otáčky. Pomocí načtených časů jsou vypočteny indexy mezí, mezi kterými leží požadovaná data. Poté jsou úseky procházeny částí algoritmu, která hledá pakety, jež nesplňují podmínky validity. Mezi tyto podmínky patří, že počet zjištěných lopatek se rovná skutečnému počtu. Tato část algoritmu je vypsána ve Zdrojovém kódu 1. Je zde také zjištěno, kolik paketů nevyhovuje zadání.

```
1 iterator=1;
2 pocetneplatnychotacek=0;
3 for i=k_start:k_stop
4     lopatky=vsedata.citac_lopatek(primar,i);
5     if (lopatky==parametry.lopatek)
6         data(:,iterator)=[vsedata.fazovka(i);vsedata.lopatky(:,i,primar)
7         ];
8         iterator=iterator+1;
9     else
10        pocetneplatnychotacek=pocetneplatnychotacek+1;
11 end
```

Zdrojový kód 1: Jeden paprsek - filtrace chybných paketů

Dalším úkolem je odstranit pakety, kde jsou otáčky výrazně odlišné od zbytku sady dat. Jestliže se testují dvě konstantní hodnoty, filtrace probíhá v obou sadách. Jestliže je testována závislost změny clearance na otáčkách kola, je naopak nutné zachovat i trend, který nemá konstantní průběh. Proces filtrace začíná výpočtem střední hodnoty period otáček a jejich směrodatné odchylky. Pakety, jejichž perioda neleží v intervalu $E \pm STD$, jsou odfiltrovány. Tento postup je prováděn za pomoci Zdrojového kódu 2.

```
1 mean_fazovka = mean(data(1,:));
2 std_fazovka = std(data(1,:));
3
4 iterator=1;
5 for i=1:size(data,2)
```

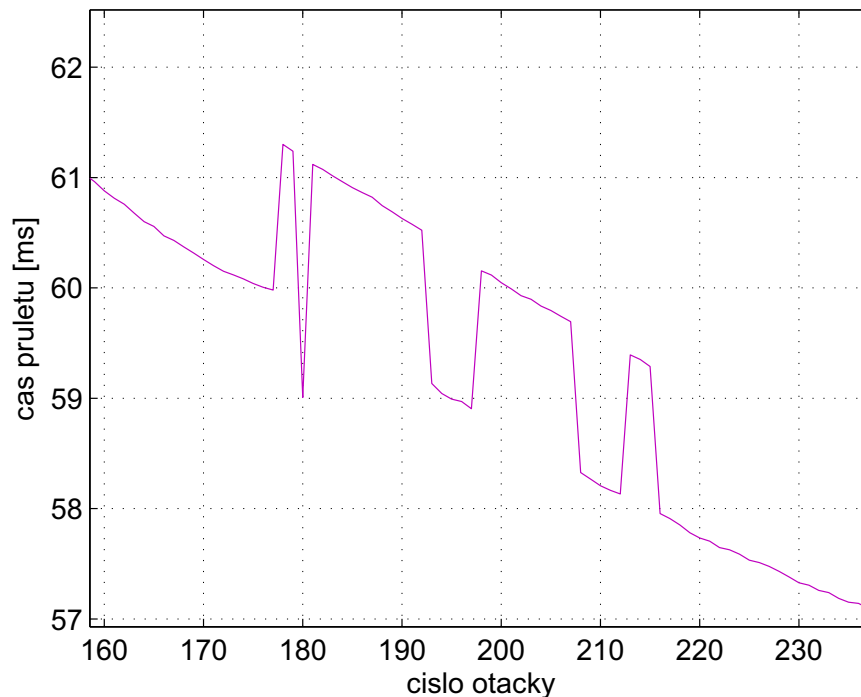
```

6     if abs(data(1,i)-mean_fazovka)<=std_fazovka
7         filtrdata(:,iterator)=data(:,i);
8         iterator=iterator+1;
9     end
10    end

```

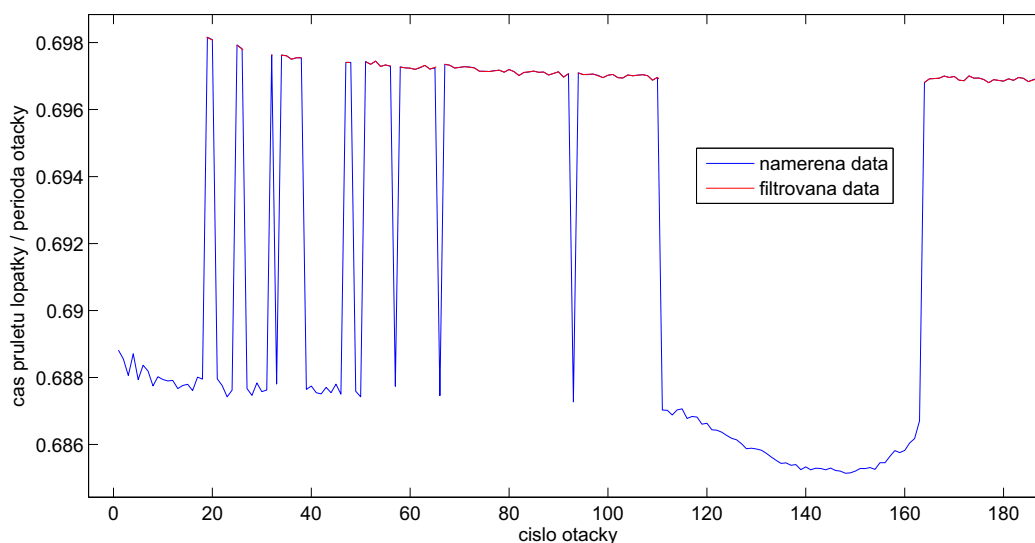
Zdrojový kód 2: Jeden paprsek - filtrace paketů s výrazně jinou periodou otáčení

Naměřené časy průletů lopatek jsou následně převedeny do poměrů vůči periodě otáčky. Pohybují se tedy v intervalu od 0 do 1. Při konstantním clearance a absenci vibrací by měl být poměr pro každou lopatku konstantní. Změna clearance naopak tento poměr ovlivní. Poměr je ale bohužel ovlivněn i chybami měření. Jednou z chyb, která se při měření vyskytla, bylo, že měřicí systém zaznamenával čas průletu nejen požadované hrany. Místo toho byl změřen čas průletu díry uprostřed dílu Merkura nebo již spodní hrany u boční plochy dílu. Tato chyba se na naměřených datech projevila tak, jak je znázorněno na obrázku 39. Tuto chybu je výhodnější



Obrázek 39: Chyba měření času průletu lopatky č.4 způsobená změřením času průletu díry v dílu Merkura

filtrvat až v datech obsahujících poměry. Tyto hodnoty se nemění s otáčkami a chyba je vyjádřena přibližně konstantní změnou poměru vůči periodě otáčky. Za znalosti rozměru boční hrany ($\sim 1\text{mm}$) a umístění hrany díry lopatky ($\sim 6,5\text{mm}$) je možné pomocí rovnice 4.4.1 a znalosti rozměrů kola zjistit přibližnou hodnotu změny poměru vůči periodě otáčky. Boční hrana se projevovovala změnou ~ 0.0005 a hrana díry v lopatce změnou 0.01 poměru. Možností filtrace těchto odchylek je několik. Zde byly poměry výrazně se lišící od ostatních vyhozeny. Příklad filtrace znázorňuje obrázek 40. Pravděpodobnost zaznamenání spodní hrany boční plochy lopatky se zvyšuje při zvyšování úhlu α .



Obrázek 40: Filtrace chyby způsobené zaznamenáním díry v dílu merkura u lopatky č.4

Z poměrných hodnot průletů lopatek referenčního signálu vůči periodám otáček je spočtena střední hodnota pro každou lopatku. Tato hodnota udává očekávaný průlet lopatky při nulovém clearance. Jestliže jsou porovnávány konstantní otáčky, jsou spočteny střední hodnoty i pro měřená data. Odečtením středních hodnot referenčního signálu od měřeného signálu je vypočten parametr p . Použitím rovnice 4.4.1 je poté spočtena změna clearance. Při měření závislosti změny clearance na měnících se otáčkách je nutné odečítat střední hodnotu referenčních poměrů od poměrné hodnoty každého průletu lopatek. A z těchto hodnot opět za použití rovnice 4.4.1 je vypočítána změna clearance. Pro upřesnění je tento postup uveden ve Zdrojovém kódu 3.

```

1   for i=1:size(pomery,2)
2       p(:,i)=pomery(:,i)-mean_ref_pomery;
3   end
4   p=p.*pi.*parametry.pruumer;
5   d=p./tand(uhel);

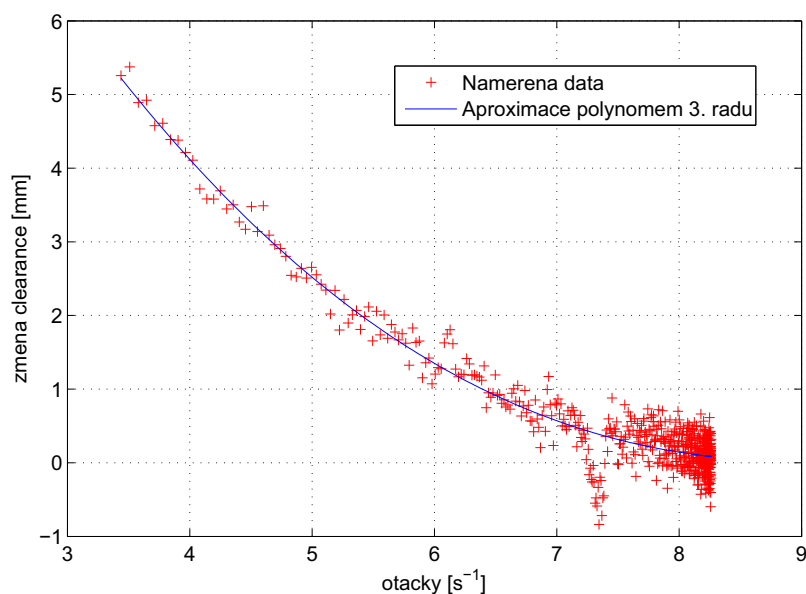
```

Zdrojový kód 3: Jeden paprsek - výpočet clearance

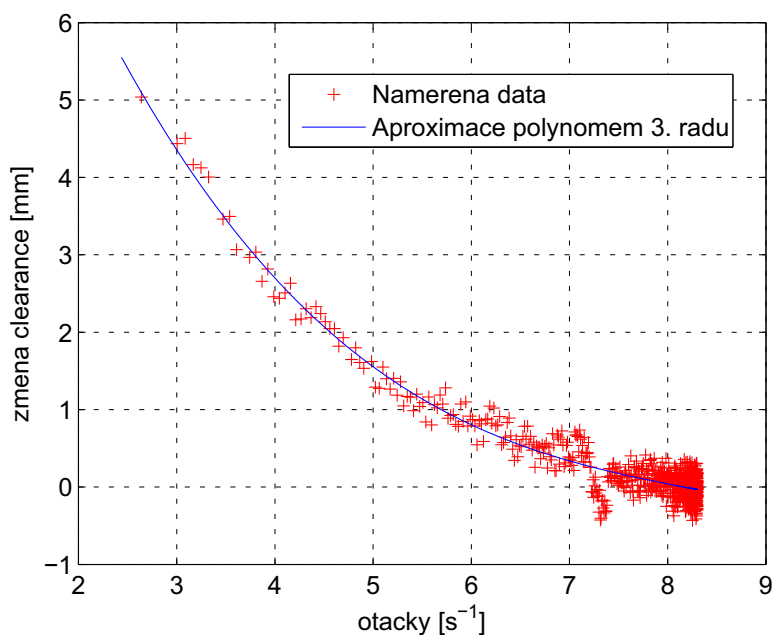
5.2.2 Výsledky

Při výpočtu změny clearance v závislosti na otáčkách byly otáčky měněny od 3 s^{-1} do referenční hodnoty. Pro každou otáčku byl spočten clearance a pak byla vypočtena vhodná aproximace vypočtených hodnot. Aproximováno bylo polynomem 3. řádu. Průběh změny clearance lopatky č.7 pro úhel $\alpha = 10^\circ$ a lopatky č.1 pro úhel $\alpha = 15^\circ$ je znázorněn na obrázcích 41a a 41b.

Vhodné je vyjádřit změnu clearance pro všechny lopatky na určených frekvencích, jak je zobrazeno na obrázku 42. Stejný graf může být použit pro vyjádření změny clearance mezi dvěma konstantními otáčkami jak je zobrazeno na obrázku 43.



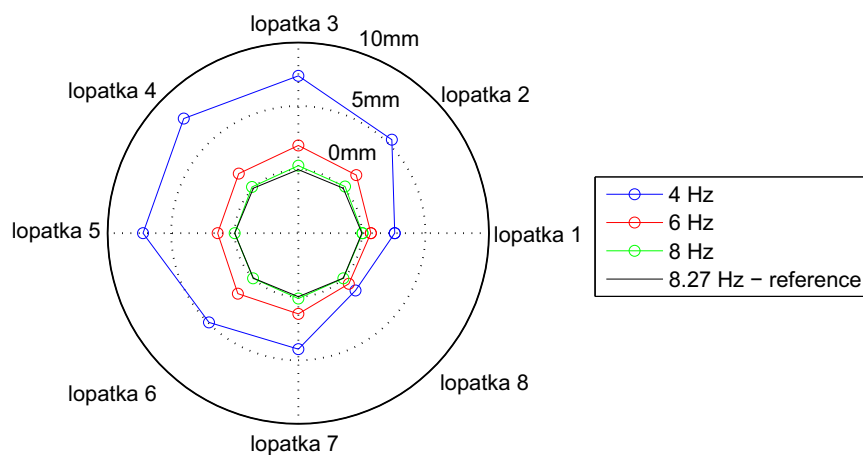
(a) Sonda s jedním paprskem - změna clearance lopatky č.7 pro $\alpha = 10^\circ$



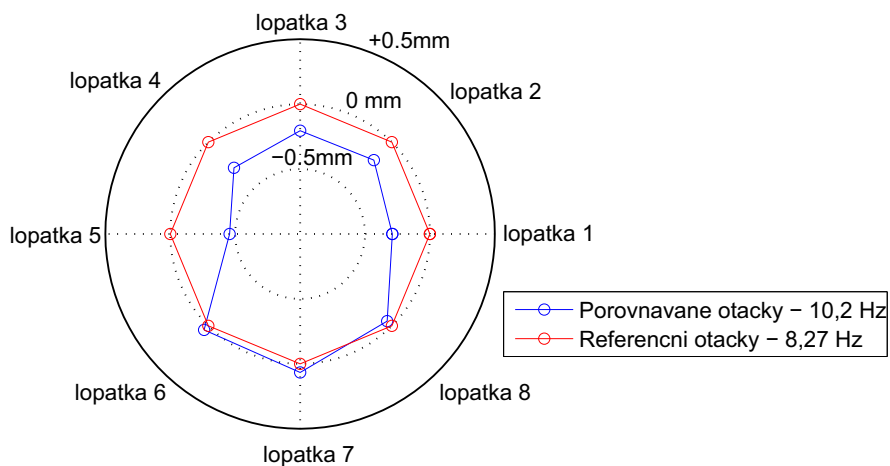
(b) Sonda s jedním paprskem - změna clearance lopatky č.1 pro $\alpha = 15^\circ$

Obrázek 41: Změna clearance v závislosti na změně otáček.

Pomocí sondy s jedním paprskem tedy lze identifikovat změnu clearance u lopatkového kola. Není však možné určit jeho absolutní hodnotu. Naměřené hodnoty nemusí přesně odpovídat změně clearance z několika důvodů. Prvním z nich je fakt, že stand při vyšších otáčkách začal silně vibrovat a jak je i z výsledků patrné, rozptyl naměřených hodnot je zde vyšší. Druhým důvodem je možnost dopuštění se nepřesností při korekci chyb vzniklých naměřením špatné hrany na lopatce. A v neposlední řadě musí být při výpočtu clearance brán v potaz člen



Obrázek 42: Sonda s jedním paprskem - změna clearance všech lopatek v závislosti na otáčkách



Obrázek 43: Sonda s jedním paprskem - změna clearance všech lopatek mezi dvěma konstantními otáčkami

rovnice $\frac{1}{\tan \alpha}$. Jedná se vlastně o kotangens úhlu α , který se v okolí použitých úhlů výrazně mění. Malá nepřesnost v měření α způsobí velkou nepřesnost v měření clearance. Pro přesné určení změny clearance je tedy nutné znát úhel α přesně nebo nejprve provést kalibraci.

5.3 Sonda se dvěma paprsky

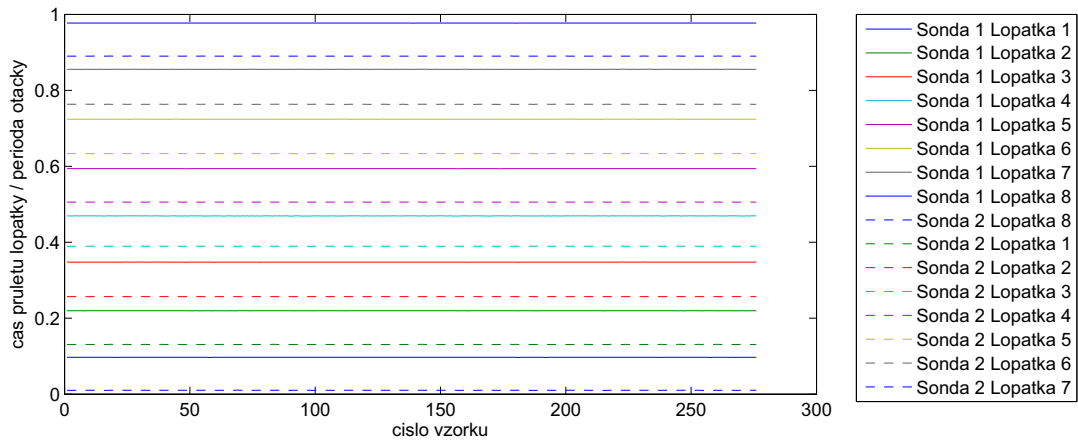
Sonda se dvěma paprsky byla testována z důvodu ověření, zda se naměřené hodnoty clearance rovnají či alespoň blíží hodnotám závislým na délkách jednotlivých lopatek. Pro testování byl použit stand Merkur a clearance byl měřen při přibližně konstantních otáčkách. Parametry sondy a měřeného kola jsou $\alpha = 20^\circ$, $\overline{AB} = 19,5 \text{ mm}$ a $d = 208 \text{ mm}$.

5.3.1 Zpracování dat

Zpracování dat pro sondu se dvěma paprsky je v počátku shodné s postupem použitým u sondy s jedním paprskem. Nejprve jsou opět načteny hodnoty z editačních polí v uživatelském prostředí a vypočtou meze indexů, odkud kam je požadováno data zpracovat. Důležité je, že se nyní načítají data pro obě sondy pro stejný úsek. Také se v datech odfiltrují ty bloky, u nichž některá sonda detekovala jiný počet lopatek, než ve skutečnosti je. Tímto se dostanou data obsahující časy průletů náběžných hran lopatek pro obě sondy. Časy průletů lopatek se podělí periodou dané otáčky, a vzniknou tak hodnoty poměrů časů průletů lopatek vůči periodě otáček. Tyto poměrné hodnoty opět obsahují chyby způsobené naměřením jiné hrany lopatky, než je žádaná. U sondy č.1 opět nastával problém s detekcí spodní hrany u boční plochy lopatky. Ale hlavní problém nastal zejména při měření náběžné hrany lopatky sondou č.2. Paprsek této sondy je nakloněn ve směru rotace kola. Snímání náběžné hrany není tedy jednoznačné a senzor často zachytí hranu sestupnou či otvor v lopatce. Zpracování tedy muselo být doplněno o algoritmus, který tyto chyby detekoval a alespoň částečně odstranil.

Lze tedy říci, že u sondy č.1 jsou zachyceny chybné hrany, které chodí dříve, než je žádané náběžné hrany a u sondy č.2 naopak později než u náběžné hrany. Algoritmus nejprve vypočte střední hodnotu u každé posloupnosti poměrů časů vůči periodě. Poměry poté roztřídí do dvou skupin podle toho, zda je hodnota vyšší nebo nižší než vypočtená střední hodnota. Pro obě získané skupiny se vypočtou střední hodnoty a určí se jejich rozdíl. Tento rozdíl by měl reprezentovat rozdíl mezi chybnými a správnými daty a uvažuje, že velikost chyby se v čase nemění. U sondy č.1 se tento rozdíl přičte k hodnotám nižším než vypočtená střední hodnota celé posloupnosti, jejichž odchylka od střední hodnoty celé posloupnosti je navíc vyšší než uživatelem definovaná hodnota. U sondy č.2 se rozdíl naopak odečte od všech hodnot, které byly vyšší než střední hodnota a zároveň jejich odchylka od střední hodnoty byla vyšší než uživatelem definovaná hodnota. Tímto se z dat odstraní výrazné odchylky. Pro zjemnění filtrace se musí tento algoritmus znovu opakovat s nižší uživatelsky definovanou hodnotou. Po filtraci dostaneme data zobrazená na obrázku 44.

U sondy se dvěma paprsky je nutné znát rozdíl časů průletů mezi sondami. Tyto časové difference určují po přepočtu hodnotu clearance. Nejprve je ale nutné tyto difference upravit. Úprava je nutná z důvodu aproximace lopatkového kola rovinou, jelikož zde byla aproximována velká část obvodu kola. Vzdálenost mezi body CD je možné definovat úsečkou CD spojující tyto body nebo délkou oblouku L_{CD} body



Obrázek 44: Sonda se dvěma paprsky - poměry časů průletů lopatek vůči periodě otáček pro oba senzory

spojujícího. Vzdálenost L_{CD} byla dříve v kapitole 4.5 definována jako

$$L_{CD} = v \cdot \Delta t = 2\pi r \cdot \left(\frac{\Delta t}{T} \right) \quad (5.3.1)$$

Tato hodnota zde odpovídá části obvodu, který kolo urazí za čas $\frac{\Delta t}{T}$. Když není obvod lopatkového kola aproximován rovinou, je nutné hodnotu \overline{CD} vypočítat. Tento výpočet vychází z obrázku 45, kde je znám úhel naklonění paprsku $\alpha/2$, rozměr lopatky r a vzdálenost mezi vrcholem úhlu naklonění sondy a středem lopatkového kola \overline{OS} . Pomocí sinové věty je nutné vyjádřit úhel γ jako

$$\gamma = \arcsin \frac{\overline{OS} \cdot \sin \alpha/2}{r} \quad (5.3.2)$$

Úhel β se vypočte z rovnosti

$$\beta = 180 - \alpha - \gamma \quad (5.3.3)$$

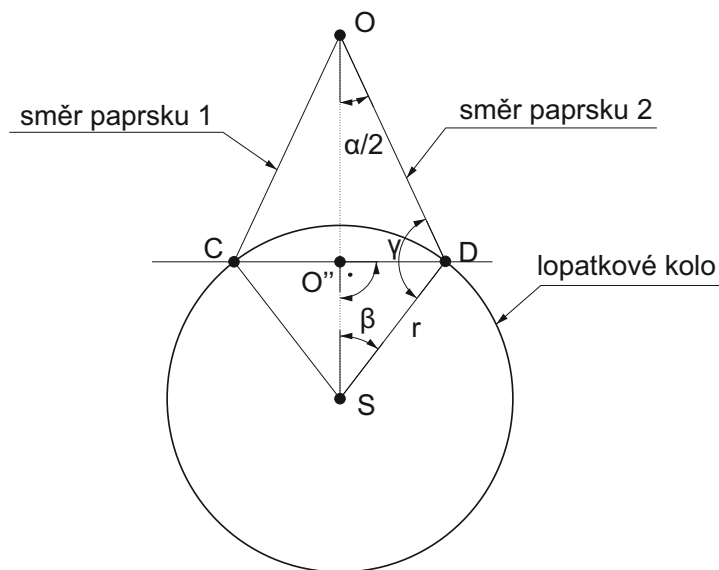
Vytvořený trojúhelník $O''DS$ je pravoúhlý a je u něj známa délka strany r a úhel β . Je tedy možné vypočítat délku strany $O''D$ pomocí funkce sinus jako

$$\overline{O''D} = r \cdot \sin \beta \quad (5.3.4)$$

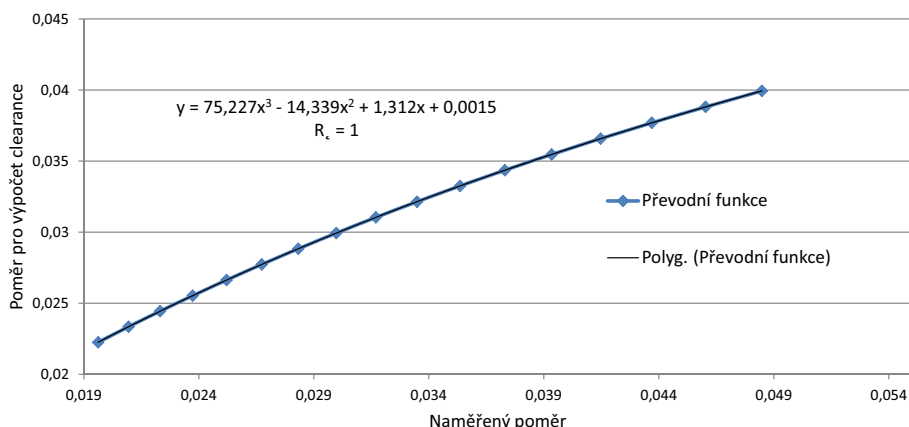
Celková délka strany CD je poté dvojnásobkem strany $O''D$.

$$\overline{CD} = 2 \cdot \overline{O''D} \quad (5.3.5)$$

Mezi \overline{CD} a L_{CD} existuje vztah, který je nutné zjistit. Jelikož je ale r součtem délky lopatky a jejího prodloužení, bude se poměr mezi \overline{CD} a L_{CD} měnit, a je tak nutné zjistit průběh závislosti. Tyto vzdálenosti je vhodné vyjádřit v poměru vůči obvodu kola. Tyto hodnoty totiž vyjadřují i vztah mezi naměřenými diferencemi časů vůči periodě a následně přepočtenými diferencemi časů vůči periodě pro výpočet clearance. Pro testovanou sondu s parametry $\alpha = 20^\circ$, $\overline{AB} = 19,5 \text{ mm}$ a $d =$



Obrázek 45: Sonda se dvěma paprsky - znázornění kola a senzorů k výpočtu \overline{CD}



Obrázek 46: Sonda se dvěma paprsky - převodní charakteristika \overline{CD} vůči obvodu kola a L_{CD} vůči obvodu kola

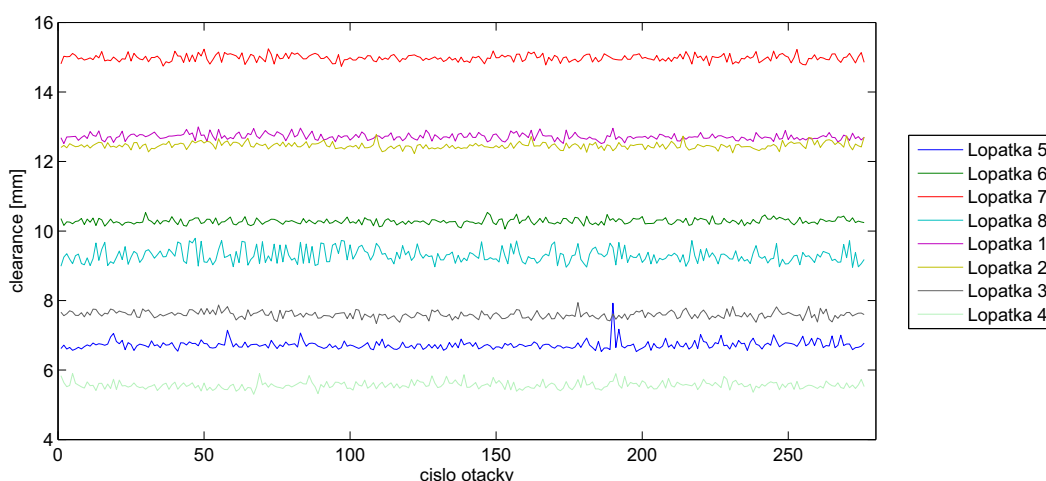
208 mm je závislost zobrazena na obrázku 46, kde bylo několik hodnot pro různý clearance proloženo polynomem 3. řádu.

Při znalosti nových poměrů časových diferencí vůči periodám otáček byla spočtena střední hodnota těchto poměrů pro každou lopatku a z těchto hodnot byl vypočten clearance.

5.3.2 Výsledky

Průběh clearance v čase pro každou lopatku je zobrazen na obrázku 47.

Jak je patrné, clearance jednotlivých lopatek se pohybuje přibližně mezi hodnotami 6 až 15mm. Tyto hodnoty jsou bohužel odlišné od rozdílu nejdelší a nejkratší lopatky na kole, který je roven 0,7 mm. I kdyby bylo bráno v úvahu rozdílné prodloužení lopatek a excentricita části standu, na kterém jsou uchyceny lopatky, bylo



Obrázek 47: Sonda se dvěma paprsky - průběh clearance pro všechny lopatky pro přibližně konstantní otáčky

odhadnuto, že rozsah clearance by neměl být větší než 2 mm .

Jestliže je clearance počítán ze vztahu

$$d = \pi r \cdot \cot(\alpha/2) \left(\frac{\Delta t}{T} \right) - 0,5 \cdot \overline{AB} \cdot \cot(\alpha/2) \quad (5.3.6)$$

a jsou definovány koeficienty

$$k = \pi r \cdot \cot(\alpha/2) \quad (5.3.7)$$

$$b = -0,5 \cdot \overline{AB} \cdot \cot(\alpha/2), \quad (5.3.8)$$

je možné zjistit, který parametr by snížil rozptyl naměřených hodnot clearance. Koeficient b tento rozptyl neovlivní, jelikož jen posouvá všechny hodnoty clearance nezávisle na poměru naměřeného času vůči periodě. Kdežto koeficient k toto dokáže a změna jeho hodnoty mění i rozptyl clearance. Koeficient k je možné měnit pomocí hodnoty r a $\cot(\alpha/2)$. Změna parametru r působí však jen lineárně na hodnotu k . Kdežto změna úhlu α způsobí kvůli vztahu $\cot(\alpha/2)$ změnu významnější.

Přes tento nezdar je na obrázku 47 možné najít závislost mezi naměřeným clearance a skutečnými rozměry lopatek. Například lopatka č.4 je nejdelsí a pro tuto lopatku byla nalezena nejnižší hodnota clearance. Naopak je tomu u lopatky č.7, která byla nejkratší a clearance byl pro ní naměřen největší. Je tedy možné říci, že princip sondy fungoval. Pro přesné určení clearance je ale nutné znát naprosto přesné rozměry měřicího zařízení nebo je nutné sondu před použitím kalibrovat. Princip kalibrace je popsán v kapitole 4.5.

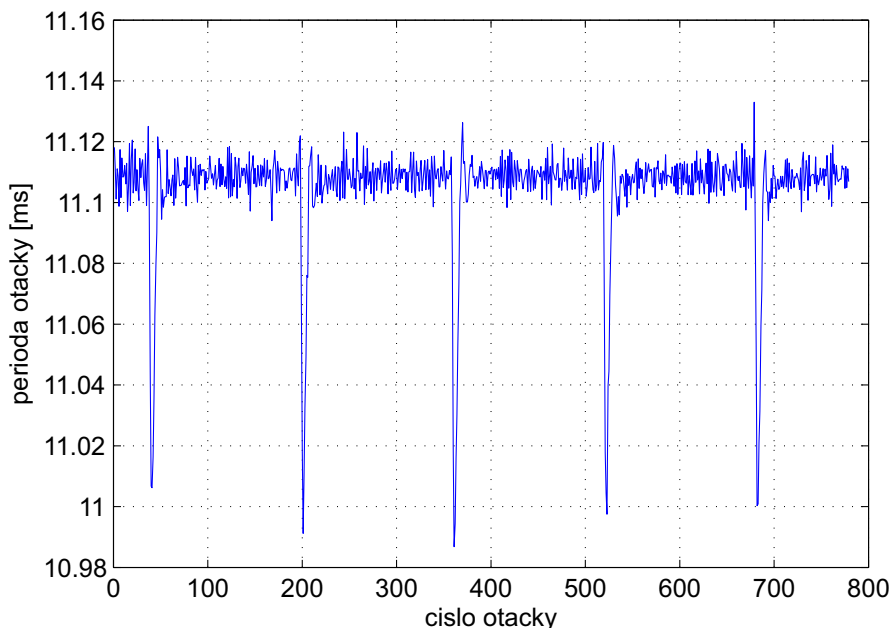
5.4 Sonda se dvěma paprsky - modifikovaná verze

Modifikovaná varianta sondy se dvěma paprsky byla testována z důvodu ověření, zda se naměřené hodnoty clearance rovnají či alespoň blíží hodnotám závislým na vychýlení jednotlivých lopatek. Pro testování byl využit stand HDD. Parametry sondy a měřeného disku jsou $\alpha = 15^\circ$, $\overline{AB} = 35 \text{ mm}$ a $d = 85 \text{ mm}$.

5.4.1 Zpracování dat

Opět byla nejprve načteny data, které je potřeba zpracovat. Získány jsou tedy časy průletů lopatek pro oba senzory a periody jednotlivých otáček. Je opět nutné projít získaná data a ověřit, zda v některých otáčkách nedošlo chybě a každá sonda identifikovala tolik lopatek, kolik je jich ve skutečnosti.

Ačkoliv má plotna disku přibližně konstantní otáčky, elektronika disku ho v pravidelných intervalech mírně zrychluje. Jelikož chceme měřit clearance při konstantních otáčkách, je nutné tyto úseky s vyšší rychlostí odstranit. Proces pravidelného zrychlování plotny je vidět na obrázku 48.



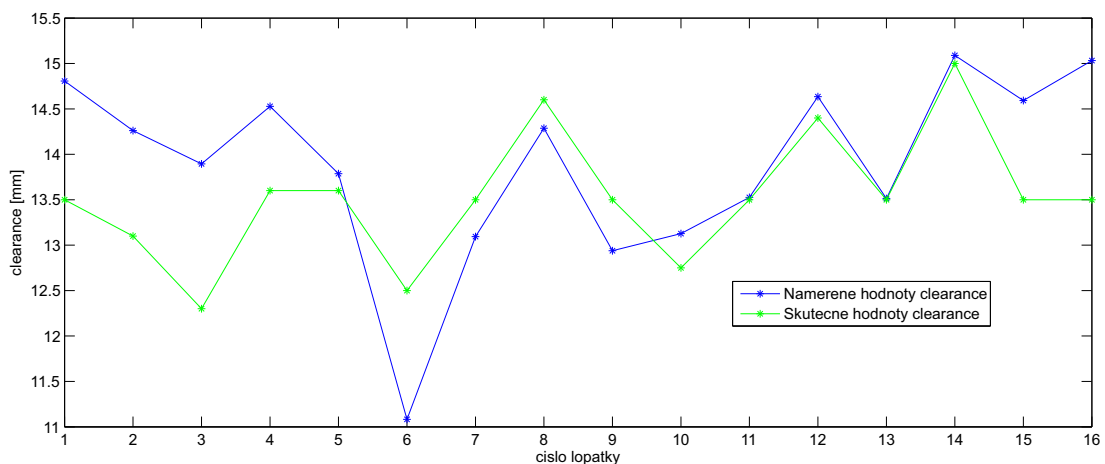
Obrázek 48: Sonda se dvěma paprsky, modifikovaná verze - perioda každé otáčky

Změřené časy průletů lopatek jsou opět převedeny do hodnot, které udávají poměr naměřených časů vůči periodě stejné otáčky. Odečtením těchto hodnot mezi sondami vzniknou hodnoty, které se budou při změně clearance měnit. Jestliže se clearance zvýší, hrana lopatky prolétne kolem levé sondy později a naopak kolem pravé sondy dříve. Čas průletu mezi sondami Δt se tedy zkrátí a tím pádem bude i menší poměr tohoto času vůči periodě otáčky. Jen je nutné dbát, aby byly mezi sebou odečteny správné časy, jelikož každý senzor zachytí během otáčky jiné pořadí lopatek. Na obrázku 37b je možné toto pořadí zjistit. Lopatky jsou očíslovány od

1 do 16, kdy č.1 je první lopatka vedle fázové značky ve směru hodinových ručiček. Jestliže bychom nyní točili diskem proti směru hodinových ručiček, nejprve by pravá sonda zachytila hranu lopatky č. 16, poté levá sonda hranu lopatky č. 2, pravá sonda hranu lopatky č. 1, levá sonda hranu lopatky č. 3 a tak dále. Jelikož se u několika lopatek objevilo snímání nesprávné hrany (jako sestupná hrana byla identifikována nejspíše až spodní hrana boční plochy lopatky), musely být průběhy rozdílů poměrů času průletů lopatek korigovány. Z korigovaných hodnot byly spočteny střední hodnoty. Z těchto hodnot byly již poté vypočteny průměrné hodnoty clearance pro každou lopatku.

5.4.2 Výsledky

Vypočtený clearance je vykreslen a porovnán se skutečnými hodnotami na obrázku 49. Jak je z obrázku patrné, naměřená hodnota reflektuje změnu skutečné hodnoty clearance, ale často se liší v absolutní hodnotě. Tato chyba může být způsobena změřením nesprávné hrany. Jelikož byla tato hrana měřena trvale, nebylo možné posoudit korektnost. Odchytky také mohou být způsobeny tím, že sondy nesnímají hrany na stejné vzdálenosti od středu plotny a drážky v plotnách nemusí být dokonale rovné. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, nepřesně změřené parametry α a \overline{AB} také ovlivní přesnost vypočtených hodnot clearance. Maximální odchylka naměřené a skutečné hodnoty ($1,59 \text{ mm}$) vznikla na lopatce č.3. Pro zlepšení přesnosti sondy by muselo být vysledováno, zda senzory nedetekují špatné hrany a také by bylo nutné znát přesně zejména hodnoty α a \overline{AB} . Nejúčinnějším řešením by pak byla kalibrace sondy. Přesnější údaje z testování sondy na HDD standu než na Merkur standu mohou být způsobeny i vysokými amplitudami vibrací, kterými při vyšších rychlostech Merkur na rozdíl od HDD kmital.



Obrázek 49: Sonda se dvěma paprsky, modifikovaná verze - srovnání naměřeného a skutečného clearance

6 Závěr

V práci je shrnut základní popis konstrukce parních turbín. Důraz je kladen na důvod vzniku a možnosti snímání vibrační lopatkového kola. Také je v práci pojednáno o výrazu clearance. Tento anglický výraz označuje mezeru mezi rotorovými lopatkami a statorom parní turbíny. Pomocí monitorování clearance je možné předejít kontaktu rotoru se statorom, konstruovat efektivnější turbíny či odhalit závadu na lopatkovém kole.

V další části je nastíněno, že měření vibrační tenzometry není vhodné zejména kvůli jejich krátké operační době. Jsou navrženy metody bezkontaktního snímání vibrační a clearance. V současné době je pro tyto účely využíváno převážně sond kapacitních, indukčních, mikrovlnných a optických. Z důvodů dostatečné přesnosti, dostatečného měřicího rozsahu, nízké ceny, snadné aplikace a snadného zpracování naměřených dat byly vybrány k použití měření clearance optické sondy.

Byla analyzována oblast aplikace optických snímačů na měření vzdálenosti a zjištěno několik aplikovatelných konstrukcí. Dále bylo otestováno, zda teoretické parametry těchto sond splňují požadavky pro měření clearance parních turbín. Tyto požadavky splňují zejména sondy využívající nakloněného paprsku, sondy se dvěma nakloněnými paprsky a sondy využívající optické interferometrie.

Z důvodu možnosti použití měřicího systému využívajícího optické sondy a principu blade tip - timingu byly testovány sondy, které dokáží odhalit změnu clearance či jeho absolutní hodnotu z naměřených časů průletů jednotlivých lopatek. Jedná se tedy o sondu s jedním nakloněným paprskem a o sondu se dvěma nakloněnými paprsky. Byla také odvozena modifikovaná verze sondy využívající dvou nakloněných paprsků.

Sondy byly testovány na dvou standech. Na standu Merkur byla testována sonda s jedním nakloněným paprskem a se dvěma nakloněnými paprsky. Na standu HDD byla z důvodu odlišného uchycení sond testována modifikace dvoupraprskové sondy.

Z výsledků testování sondy s jedním paprskem vyplývá, že je možné měřit změnu clearance vůči referenční hodnotě. Není však ale možné měřit absolutní hodnotu. Problémy při měření způsobuje zejména snímání nesprávné hrany lopatek. Je tedy nutné s těmito chybami počítat a při zpracování je vhodnou metodou odstranit. Naměřené hodnoty clearance pomocí sondy využívající dvou nakloněných paprsků sice reflektují různou délku lopatek, ale absolutní hodnota clearance je velmi vzdálená od skutečné. Bylo zjištěno, že pro přesnější výsledky by bylo nutné znát přesné rozměry sondy a jejího umístění vůči lopatkovému kolu. Jako další varianta pro zpřesnění výsledků přichází v úvahu kalibrace sondy. Modifikovaná verze sondy se dvěma paprsky dosáhla pro některé lopatky relativně dobré přesnosti, kdy se chyba pohybovala v řádech desetin milimetru. Maximální chyba byla ale až $\sim 1,6 \text{ mm}$. Tato nepřesnost je způsobena opět snímáním nesprávné hrany lopatky, které často nejde spolehlivě odhalit a nepřesnými údaji o rozměrech sondy a jejím umístění vůči měřené plotně. Pro přesnější výsledky by bylo nutné sondu kalibrovat.

Z výsledků vyplývá, že testované metody zjištění clearance fungují, ale v testované podobě se jejich přesnost neblížila přesnosti požadované. V budoucnu by bylo vhodné zkonstruovat hlavu sondy využívající dvou nakloněných paprsků. Pro zpřesnění měření je také nutné zhotovit kalibrační mechanismus.

Seznam obrázků

1	Řez parní turbínou (převzato z [1] a upraveno)	3
2	Rozdíl mezi rovnotlakou (nalevo) a přetlakovou (napravo) turbínou (převzato z [1] a upraveno)	5
3	Sekundární okruh JETE (převzato z [2])	6
4	Druhy odběru páry z turbíny: vlevo - regulovaný, vpravo - neregulovaný (převzato z [12])	7
5	Směr proudění páry turbínou : (a,e)-axiální, (b,f) - centripetální, (c,g) - diagonální, (d,h) - radiální (převzato z [10])	7
6	Typy bandáží (převzato z [10] a upraveno)	8
7	Integrální bandáž lopatky se zámkem na turbíně od Doosan Škoda Power s.r.o.	9
8	Schéma labyrintových ucpávek (převzato z [8])	10
9	Typy budících sil a jejich vibrační odezvy: A - periodická budící síla, B - impulsní budící síla, C - budící síla náhodného průběhu, D - samobuzené kmitání (převzato z [4] a upraveno)	12
10	Trendy absolutních vibrací (převzato z [4])	13
11	Způsob měření vibrací na hřídeli - vlevo: relativní, vpravo: absolutní (převzato z [4])	13
12	Nultý uzlový průměr (UP), první uzlový průměr, druhý uzlový průměr a první uzlová kružnice (UK)(převzato z [18])	15
13	Typy kmitů (převzato z [18])	16
14	Campbellův diagram(převzato z [19])	16
15	Voštinová nadbandážová ucpávka (převzato z internetové adresy www.turbineaviation.com)	17
16	Kapacitní sonda(převzato z www.vibrosystem.com a upraveno)	22
17	Mikrovlnná sonda(převzato z [15])	23
18	Uspořádání vláken v optické sondě: uprostřed - výstup paprsku, v kruhu - příjem paprsku	25
19	Vyzařovací charakteristika bodu ozářeného laserem nakloněným –20C° ke kolmici plochy (převzato z [16]	25
20	Konstrukce hlavy optické sondy vyvinuté ve spolupráci ZČU a Doosan Škoda Power (převzato z [16] Jednotlivé části jsou rozlišeny podle barvy: Pouzdro sondy, krycí safírové sklíčko, sférická čočka, pevně spojený svazek vláken, pružina, průchodka a matka	26
21	Optická sonda v kolmém směru k lopatkám	27
22	Oba obrázky převzaty z [17]	28
23	Napětí na fotodiodě v závislosti na typu povrchu. Vzdálenost sondy je 5mm od povrchu lopatky. (převzato z [17])	29
24	Napětí na fotodiodě v závislosti na velikosti clearance (převzato z [17])	29
25	Optická sonda využívající principu triangulace	30
26	Optická sonda využívající principu měření času odrazu signálu a průletů lopatek	32
27	Optická sonda využívající naklonění paprsku)	34
28	Optická sonda s dvěma paprsky	36

29	Nalezení závislosti mezi $\Delta t/T$ a clearance (převzato z [29])	37
30	Průběh intenzity signálu na přijímači při průletu lopatky	39
31	Modifikace optické sondy se dvěma paprsky	40
32	Popis interference dvou optických signálů (převzato z [20])	41
33	Princip Michelsonova interferometru (převzato z [20])	42
34	Princip měření clearance pomocí OFDR (převzato z [27])	43
35	Výstupy měření pomocí OFDR (převzato z [20])	44
36	Měřicí stand Merkur	46
37	Měřicí stand HDD	47
38	Uživatelské rozhraní pro zpracování dat	47
39	Chyba měření času průletu lopatky č.4 způsobená změřením času průletu díry v dílu Merkura	49
40	Filtrace chyby způsobené zaznamenáním díry v dílu merkura u lopatky č.4	50
41	Změna clearance v závislosti na změně otáček.	51
42	Sonda s jedním paprskem - změna clearance všech lopatek v závislosti na otáčkách	52
43	Sonda s jedním paprskem - změna clearance všech lopatek mezi dvěma konstantními otáčkami	52
44	Sonda se dvěma paprsky - poměry časů průletů lopatek vůči periodě otáček pro oba senzory	54
45	Sonda se dvěma paprsky - znázornění kola a senzorů k výpočtu \overline{CD}	55
46	Sonda se dvěma paprsky - převodní charakteristika \overline{CD} vůči obvodu kola a L_{CD} vůči obvodu kola	55
47	Sonda se dvěma paprsky - průběh clearance pro všechny lopatky pro přibližně konstantní otáčky	56
48	Sonda se dvěma paprsky, modifikovaná verze - perioda každé otáčky	57
49	Sonda se dvěma paprsky, modifikovaná verze - srovnání naměřeného a skutečného clearance	58

Použité zdroje

- [1] *Parní turbíny v elektrárnách*. [Online]. URL: <http://strojarna.webnode.cz>
- [2] “Skriptu předmětu Jaderné elektrárny KEE/JE, FEL, ZČU.”
- [3] M. Balda, “Zjišťování příčin zvýšených vibrací rotorů turbosoustrojí,” Ústav termomechaniky AVČR + ZČU, Techn. rep., 1999.
- [4] J. Biloš a A. Bilošová, *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část Vibrační diagnostika*, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012, studijní materiály pro studijní obor Aplikovaná mechanika Fakulty strojní.
- [5] J. P. Bindon, “The measurement and formation of tip clearance loss,” University of Natal, Techn. rep., 1989.
- [6] L. Cohen, *Time - frequency analysis*. Prentice - Hall PTR, 1995.
- [7] J. Císler, “Monitorování a diagnostika vibrací lopatek v parních turbínách,” Diplom. pr., Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, 2010.
- [8] A. Ščegljajev, *Parní turbíny*. SNTL Praha, MIR Moskva, 1983.
- [9] J. Gallego-Garrido, G. Dimitriadis, I. B. Carrington, a J. R. Wright, “A class of methods for the analysis of blade tip timing data from bladed assemblies undergoing simultaneous resonances - part ii: Experimental validation,” Rolls - Royce PLC and The University of Manchester, Techn. rep., 2006.
- [10] Y. Kadoya, M. Mase, Y. Kaneko, S. Umemura, T. Oda, a M. C. Johnson, “Non-contact vibrational measurement technology of steam turbine blade,” Setsunan University and Mitsubishi Heavy Industries and Westinghouse Electric Corporation, Techn. rep., 1995.
- [11] J. Škorpík, “Lopatkový stroj,” Transformační technologie, Techn. rep., 08 2009. [Online]. URL: <http://www.transformacni-technologie.cz/lopatkovy-stroj.html>
- [12] —, “Tepelná turbína a turbokompresor,” Transformační technologie, Techn. rep., 02 2011. [Online]. URL: <http://www.transformacni-technologie.cz/tepelna-turbina-a-turbokompresor.html>
- [13] P. Kracík, “Kondenzační parní turbína,” Diplom. pr., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011, vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.
- [14] J. Kučera, *Možnosti zvýšení účinnosti průtočné části parních turbín*.
- [15] D. Kwapisz, M. Hafner, a S. Queloz, “Calibration and characterization of a cw radar for blade tip clearance measurement,” in *Proceedings of the 7th European Radar Conference*, 2010.

- [16] J. Liška a Z. Kubín, “Monitoring kmitání lopatek,” Západočeská univerzita v Plzni and Škoda Power, Techn. rep., 2011.
- [17] J. Liška, J. Strnad, a E. Janeček, “Bezkontaktní měření vibrací bandážovaných lopatek s využitím laserového snímače,” Západočeská univerzita v Plzni, Techn. rep., 2011.
- [18] P. Lošák a E. Malenovský, “Analýza dynamických vlastností vysokotlakého stupně parní turbíny,” Vysoké učení technické v Brně, Techn. rep., 2007.
- [19] M. Méner, “Návrh a implementace funkcionalit systému pro monitorování lopatek,” Diplom. pr., Západočeská univerzita v Plzni, 2011.
- [20] O. Číp a Z. Buchta, “Přesné měření délek pomocí optické interferometrie,” Vysoké učení technické v Brně, Techn. rep., 2011.
- [21] A. Pesatori, M. Norgia, a C. Svelto, “Optical instrument for real time monitoring of steam turbine grinding,” Politecnico di Milano, Techn. rep., 2008.
- [22] T. Pfister, B. L., J. Czarske, H. Krain, a R. Schodl, “Turbo machine tip clearance and vibration measurements using a fibre laser doppler position sensor,” Dresden University of Technology and German Aerospace Center, Techn. rep., 2006.
- [23] M. Saňka, “Využití parních turbin,” Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, 2012.
- [24] A. G. Sheard, “Blade by blade tip clearance measurement,” Flakt Woods Limited, Techn. rep., 2010.
- [25] P. Skoupý, “Parní turbína,” Diplom. pr., Vysoké učení technické v Brně, 2009.
- [26] J. Strnad, “Metody bezkontaktního monitorování kmitání bandážovaných lopatek,” Diplom. pr., Západočeská univerzita v Plzni, 2011.
- [27] A. B. Vakhtin, S.-J. Chen, a S. M. Massick, “Optical probe for monitoring blade tip clearance,” American Institute of Aeronautics and Astronautics, Techn. rep., 2009.
- [28] W. Wiser, *Energy Resources: Occurrence, Production, Conversion, Use*. Springer Verlag, 2000. [Online]. URL: <http://books.google.cz/books?id=UmMx9ixu90kC>
- [29] D.-C. Ye, F.-j. Duan, H.-t. Guo, Y. Li, a K. Wang, “Turbine blade tip clearance measurement using a skewed dual-beam fiber optic sensor,” Tianjin University, Techn. rep., 2012.
- [30] M. Zárbybnická, “Jednostupňová parní turbína,” Bachelor Thesis, Vysoké učení technické v Brně, 2009.