

Západočeská univerzita v Plzni  
Fakulta aplikovaných věd  
Katedra kybernetiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Analýza vibračních signálů za  
účelem určení životnosti lopatek  
turbín

Plzeň 2015

Petr Uher

Originální zadání

# Prohlášení

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

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

V Plzni dne .....

.....

## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Jaromíru Strnadovi za ochotu, podnětné připomínky a cenné rady. Toto poděkování patří také panu Ing. Jindřichu Liškovi, Ph.D. za vzorné vedení mé bakalářské práce. Jejich konzultace a zasvěcení do dané problematiky mi velmi pomohly při zpracování této práce.

## **Anotace**

Pro úspěšné snížení nákladů elektráren na údržbu lopatek je žádoucí monitorovat jejich kmitání a ze získaných dat odhadovat stupeň poškození a zbývající životnost lopatek. Cílem této práce je navrhnout, implementovat a otestovat vhodnou metodu pro určení životnosti lopatek.

## **Klíčová slova**

parní turbína, lopatky, kmitání, životnost, metoda stékajícího deště

## **Abstract**

It is necessary to monitor the vibration of blades and estimate the degree of damage and remaining lifetime of the blades to reduce costs of power stations for maintenance of the blades. The goal of this work is to find suitable method to determine of lifetime of blades, implement and test them.

## **Keywords**

stream turbine, blades, vibration, lifetime, Rainflow

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Lopatkový stroj</b>	<b>2</b>
2.1	Parní turbína . . . . .	2
2.1.1	Lopatky turbín . . . . .	3
2.1.2	Bandáže . . . . .	4
2.1.3	Ucpávky . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Opotřebení lopatek v turbíně</b>	<b>6</b>
3.1	Kmitání lopatek . . . . .	6
3.2	Dynamika lopatkových disků . . . . .	6
3.3	Prostředky pro měření kmitání lopatek . . . . .	8
3.3.1	Kontaktní způsob měření kmitů . . . . .	8
3.3.2	Bezkontaktní způsob měření kmitů . . . . .	9
3.4	Únava materiálu . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Metody výpočtu stupně poškození</b>	<b>12</b>
4.1	Fourierova transformace . . . . .	12
4.2	Způsob výpočtu stupně poškození a životnosti . . . . .	12
4.2.1	Hypotézy kumulace poškození . . . . .	14
4.2.2	Schematizace zatížení . . . . .	15
<b>5</b>	<b>Způsob určení životnosti lopatek</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>Výsledky</b>	<b>27</b>
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>29</b>

# 1 Úvod

Moderní svět si již nelze představit bez elektřiny, proto je potřeba zajistit stabilní chod elektráren, které tento potřebný zdroj zajišťují. Nezbytnou součástí elektrárny jsou turbíny v jakékoli formě, protože princip každé elektrárny je prakticky stejný (až na solární elektrárny). Nějaké pracovní médium roztáčí turbínu a ta přeměňuje danou energii na energii mechanickou. S tím jsou však spojené pravidelné odstávky elektrárny a údržba turbín.

Turbínu neboli lopatkový stroj můžeme rozdělit do dvou kategorií a to podle umístění lopatek bez skříně a se skříní. Typický příklad lopatkového stroje bez skříně je větrná turbína [1]. U těchto typů turbín může být poškození lopatky viditelně zřejmé na první pohled. Ovšem u druhého typu turbín jsou uloženy v nějaké „skříní“, proto je těžší určit poškození lopatek.

Ať už v samotném provozu, nebo v najíždění turbíny na pracovní otáčky, je na lopatky turbíny vytvářeno obrovské mechanické namáhání, které má vliv na životnost lopatek. Toto namáhání je potřeba měřit, abychom předešli zbytečné neplánované odstávce elektrárny. Tyto odstávky si mohou vyžádat velmi velké náklady na opravu či výměnu turbíny. Případy neplánované odstávky jsou nepříjemné pro jakoukoli elektrárnu.

Cílem této bakalářské práce je navrhnout vhodnou metodu, která určí zbytkovou životnost lopatek. Navrženou metodu budeme implementovat a také testovat na datech z elektrárny Počerady (paroplynový cyklus).

V této práci se nejprve seznámíme s parními turbínami a jejich lopatkami v kapitole 2. Dále pak v kapitole 3 vysvětlíme problematiku kmitání lopatek a jejich opotřebování. V kapitole 4 se zabýváme samotnými metodami výpočtu stupně poškození. Náš navrhovaný postup určení životnosti lopatek a implementace metody je uvedena v kapitole 5. Výsledky na testovaných datech jsou pak uvedeny v kapitole 6.

## 2 Lopatkový stroj

První lopatkový stroj je starý více než 2000 let, ale už tehdy se jednalo o turbínu. Samozřejmě dnešní turbíny vypadají zcela odlišně, ale dovolím si říci, že princip těchto strojů se prakticky nezměnil. Proto můžeme mlýnské kolo označit jako nejjednodušší turbínu vůbec.

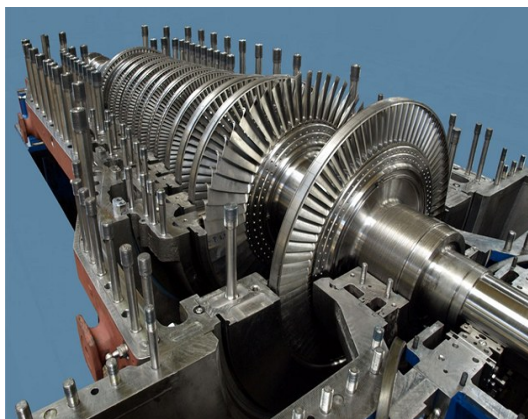
Lopatkovým strojem nejsou jen turbíny, do této kategorie můžeme zařadit i lopatkové stroje, které jsou hnané dalším strojem jako čerpadla, motory, kompresory či ventilátory [2]. V této práci se zaměříme pouze na turbíny parní.

### 2.1 Parní turbína

Parní turbíny jsou dnes převážně využívány v tepelných a jaderných elektrárnách, ale své zastoupení mají také v průmyslu. Pracovním médiem parní turbíny je nejčastěji vodní pára, ale může jít i o páry jiného složení. Přivedená pára roztáčí lopatkové kolo umístěné na hřídeli. Hřídel vede mechanickou energii na generátor, který vyrábí elektrickou energii [2].

Parní turbíny lze dále rozdělovat dle různých kritérií. Například podle počtu stupňů turbíny, podle způsobu přeměny energie nebo podle využití výstupní páry. Jednostupňové turbíny se používají jako turbíny pro nižší dosahované výkony na rozdíl od turbín vícestupňových.

Parní turbína se skládá z rotorové a statorové části. Rotorová část obsahuje hřídel, oběžné lopatky a další komponenty, u statorové části jsou nejvýznamnější rozváděcí lopatky a skříň parní turbíny [3]. Ukázka parní turbíny je zobrazena na obr. 2.1.



Obrázek 2.1: Ilustrační obrázek parní turbíny, kterou dodá plzeňská firma Škoda Power maďarské firmě Hamburger Hungaria Power. Převzato z [18].



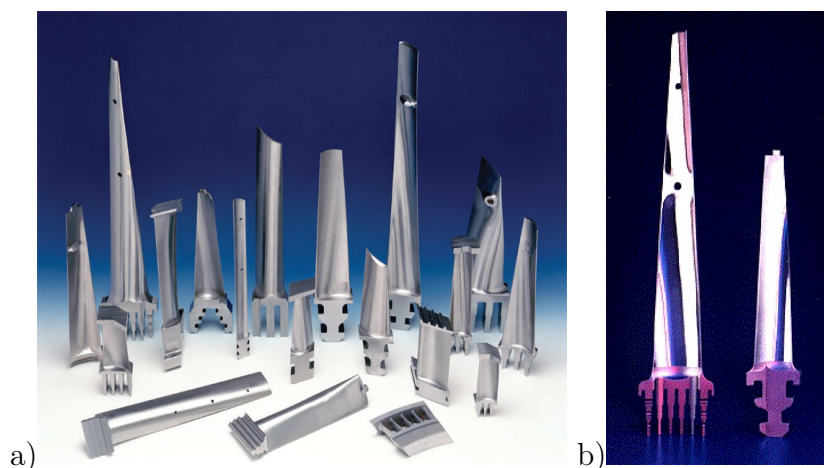
### 2.1.1 Lopatky turbín

#### Oběžné lopatky

Tyto lopatky jsou součástí pohyblivého lopatkového kola umístěného na rotoru a vytváří kanály, ve kterých proudí pracovní tekutina. Nejčastěji se lopatky vyrábějí samostatně a do rotoru a statoru jsou montovány tak, aby vytvořily kanály požadovaných rozměrů (tzv. lopatkovou mříž) [5].

Lopatky se dělí podle jejich umístění v turbíně. Lopatky ve vysokotlakovém dílu jsou krátké a nejsou tak tolik namáhány od odstředivých sil. Nízkotlakové lopatky jsou delší a naopak od vysokotlakých pracují za nižších teplot. Nízkotlakové lopatky mohou dosahovat délek až 1000 mm, například nejdelší oběžná lopatka měří 1200 mm a je součástí turbíny v jaderné elektrárně Temelín [3]. Delší lopatky je nutné nakrucovat, aby byl úhel náběhu po celé délce lopatky stejný. V každé lopatce jsou vyfrézovány drážky, které mají vliv na rovnoměrný rozvod páry v turbíně. Různými geometrickými vlastnostmi lopatek můžeme ovlivňovat funkci lopatkové mříže. Různé tvary oběžných lopatek jsou zobrazeny na obr. 2.2 a).

K disku kola turbíny jsou lopatky upevňovány pomocí tzv. závěsů. Ty mají různá konstrukční provedení, zpravidla se používá stromečkový, vidličkový nebo rybinový typ (viz obr. 2.2).



Obrázek 2.2: a) Různé tvary lopatek a závěsů, b) vidličkový a stromečkový závěs. Převzato z [3].

#### Rozváděcí lopatky

Tento druh lopatek je umístěn na rozváděcím kole (statorové lopatky), mění směr páry a převádí proud páry na lopatky oběžné, aniž by se při tom samy

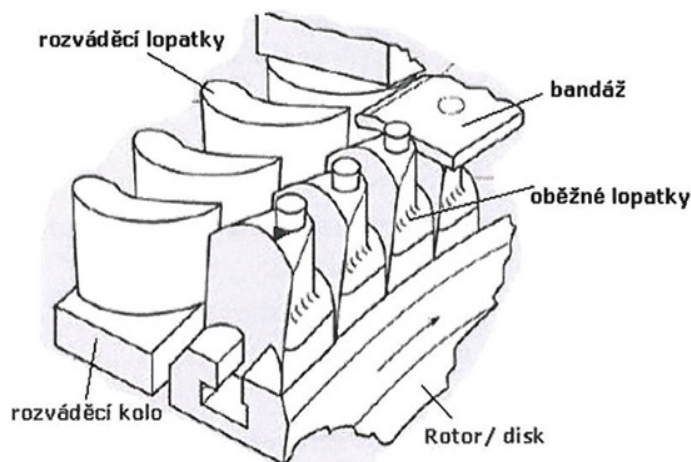
otáčely. Tím je dosaženo optimální rychlosti, tlaku a náběžného úhlu páry pro oběžné lopatky a získáme nejvyšší účinnost.

### 2.1.2 Bandáže

Lopatky turbín mohou navíc také obsahovat bandáže, jejichž úkolem je vymezení kmitání lopatek tak, aby za provozu nevznikalo v lopatkách nepřipustné dynamické kmitání. Jsou to nevyhnutelné prvky i přesto, že z termodynamických, aerodynamických a technologických hledisek jsou bandáže nežádoucí. Bandáže jsou konstrukčně velmi náročné části lopatek, jejich volba a rozměry jsou stanoveny dynamickým výpočtem lopatek, který je navíc doplněn o experimentální měření.

Bandáže je možné umisťovat na konci lopatek nebo u velmi dlouhých lopatek do jejího středu. Bandáže mohou také sloužit jako výztužné prvky, které pevně spojují jednotlivé lopatky a vznikají tak svazky lopatek. Existuje mnoho druhů bandáží a o tom, jaký druh bandáže se použije na daný typ lopatky rozhoduje konstruktér. Pro krátké lopatky jsou nejčastěji používány integrované bandáže. Součástí lopatkových listů přetlakových lopatek se používají výztužné dráty, které jsou pevně spojeny s lopatkami. U dlouhých lopatek lze použít integrální bandáž, tu je však zapotřebí vyrobít spolu s lopatkou. Příklady bandáží spolu s jejich popisem je možno dále nalézt v [10].

Použitím bandáží také zabráníme volnému přetékání páry přes horní okraj oběžných lopatek a můžeme tak docílit významného snížení ztrát. Popis struktury rozváděcích, oběžných lopatek a bandáží je znázorněn na obr. 2.3.



Obrázek 2.3: Řez parní turbínou. Převzato z [12].

### 2.1.3 Ucpávky

Ucpávky parních turbín zabraňují průniku okolního vzduchu do turbíny, případně oddělují části turbín s různým tlakem v zúžených místech. Minimalizují tak ztráty tlaku páry a tedy ztráty energie páry bez využití [10].

Pro utěsnění hřídelů se používají labyrintové ucpávky, které jsou bezkontaktní a nevznikají na nich podstatné ztráty třením. Mají tak velmi vysokou životnost.

## 3 Opotřebení lopatek v turbíně

Mechanické namáhání lopatek zkracuje jejich předpokládanou životnost, ta posléze vede k porušení materiálu a celkové poruše stroje. Proto je velmi důležité monitorovat kmitání lopatek a stanovovat úroveň poškození a zbytkové životnosti. V této kapitole se budeme tedy zabývat příčinami poškození lopatek jako je únava materiálu a kmitání lopatek.

### 3.1 Kmitání lopatek

Dále se budeme zabývat pouze oběžnými lopatkami. Kmitání těchto lopatek můžeme rozdělit do několika skupin, dle tvaru a typu lopatky.

Buzení lopatek je vyvoláno jednak mechanickými a aerodynamickými kmity. Mechanické kmitání je dáno chvěním celé rotorové soustavy (disku). Kmitání lopatek je vázáno na kmity hřídele. Budící frekvence jsou u mechanického buzení dány Fourierovým obrazem kmitů hřídele. Aerodynamické kmity jsou buzeny v průtočné části turbíny. K rozkmitání lopatky na vysoké frekvenci dochází kvůli rychlým změnám úhlu náběhu tekutiny do lopatky způsobené turbulentním prouděním tekutiny, ve kterém vektor rychlosti ve všech místech nemá konstantní směr a velikost [10].

Na frekvenci vznikajících kmitů má také vliv počet statorových a rotorových lopatek. Nadměrné dynamické namáhání a zkracování životnosti lopatek způsobuje stav rezonance, kdy vlastní frekvence lopatky se blíží budící frekvenci. V této situaci pak amplitudy kmitů lopatek výrazně rostou. K posunu rezonanční frekvence nebo ke snížení amplitudového převýšení při rezonanční frekvenci se využívá různých typů bandáží [10]. Bandáže navíc ovlivňují chování lopatek z pohledu otáček, vnášejí do systému přídavné tření a to často způsobuje nelineární chování lopatek [13].

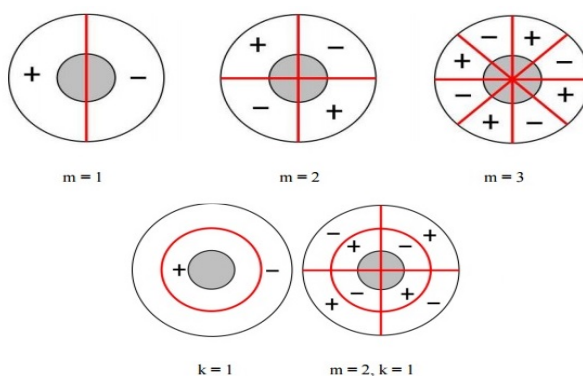
### 3.2 Dynamika lopatkových disků

Na olopatkované kolo nahlédneme jako na celek, kde se lopatky navzájem ovlivňují. Kmitání disků dělíme na stojaté vlnění, vlny běžící a vlny fixní. Stojaté vlnění je vytvořeno uzly a kmitny na disku, které v čase nemění svoji polohu vůči disku. U tohoto vlnění některé lopatky vůbec nekmitají, jiné zase kmitají s maximální amplitudou. Všechny lopatky kmitají na stejné frekvenci. Uzly a kmitny, které mění v čase svoji polohu vůči disku, vytvářejí běžící vlny. Lopatky při tomto

kmitání mají stejnou frekvenci a amplitudu, ale jinou fází a právě změna fáze mezi lopatkami tvoří dojem běžící vlny. Speciální případem běžící vlny je fixní vlna, která se ale z prostoru mimo rotující kolo zdá stojící. K fixní vlně dochází, pokud frekvence kmitání lopatek je shodná s frekvencí otáčení kola [13].

„Disk jakožto kontinuum má nekonečný počet vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitání.“ [11]. Tyto tvary můžeme charakterizovat uzlovými průměry a také uzlovými kružnicemi. Definujme tato místa jako místa, která budou v klidu při vlastní frekvenci. Na lopatkovém kole je možné pozorovat uzlové průměry až  $m$ -tého řádu. Teoreticky lze  $m \rightarrow \infty$ , avšak prakticky u lopatkového kola má význam uzlový průměr do řádu  $m = \frac{1}{2}N$ , kde  $N$  je počet lopatek. Při provozu turbíny lopatkové kolo kmitá všemi uzlovými průměry. Většina uzlových průměrů je však zanedbatelná, neboť kmitá s nízkou amplitudou. Kritická úhlová rychlost je rychlost otáčení lopatkového kola, při níž dochází k výraznému buzení uzlových průměrů, a nastává, pokud frekvence kmitání lopatkového kola v uzlovém průměru  $m$ -tého řádu se blíží  $m$ -tému násobku frekvence otáčení kola. Proto oběžné kolo musí být konstruováno tak, aby se vyvarovalo kritické rychlosti lopatkového kola. Při najíždění turbíny na pracovní otáčky je zapotřebí co nejrychleji přejít frekvence otáčení, které se blíží kritickým [10].

Uzlové kružnice vznikají pomocí uzlových průměrů. U uzlových průměrů kmitajících s vyšší frekvencí dochází k vybuzení vyšších tvarů kmitů na lopatkách a vznikne tedy uzel. Tyto uzly lze následně propojit koaxiálními kružnicí s oběžným kolem. Na obr. 3.1 jsou ukázány tvary kmitání a kombinace uzlových průměrů a uzlových kružnic.



Obrázek 3.1: Ukázka kombinace uzlových průměrů ( $m$ ) a uzlových kružnic ( $k$ ). Převzato z [11].

Při skládání lopatkového kola je důležité, aby lopatek se stejnými rezonančními vlastnostmi vedle sebe bylo co nejméně, neboť pokud by byly všechny lopatky stejně naladěné, došlo by k tomu, že by byly buzené přesně na své vlastní frekvenci ostatními lopatkami. Tím by došlo k zvětšení zesílení kmitů celého lo-

patkového kola a tedy i jednotlivých lopatek. To by mohlo vést až ke zničení lopatek. Lopatka s odlišnou rezonanční frekvencí v určité skupině lopatek tedy působí na tuto skupinu jako tlumící člen. Toto rozladění pak prodlužuje životnost lopatek a označuje se jako tzv. mistuning [10],[13].

### 3.3 Prostředky pro měření kmitání lopatek

Měření kmitů je velmi žádoucí, neboť příliš často plánované odstávky turbín spojené s kontrolou stavu lopatek a stroje jsou velmi nákladné na údržbu a zvyšují ztráty způsobené zastavením výroby. Naopak občasnými odstávkami a nedostatečnou kontrolou může dojít až k poruše stroje, která se časově a finančně velmi prodraží. Tento problém můžeme minimalizovat tím, že budeme monitorovat stav lopatek a predikovat jejich životnost a tím minimalizovat náklady na údržbu a provoz turbíny.

Kmity lopatek je potřeba měřit především při nájezdu na pracovní otáčky a doběhu. Parametry turbíny se v průběhu změn rychlosti otáčení mění a je potřeba úseky otáček, kde by mělo u lopatek docházet k rezonanci, překonat rychleji. Měření kmitů lopatek při těchto akcích nám také poskytuje informaci, zda vše probíhá podle předpokladů. Nesmíme však opomenout ani měření kmitů při běžném provozu turbíny, neboť se její parametry také pomalu mění. Pomalá změna je však velmi nebezpečná, protože ji člověk nemusí běžnými prostředky zpozorovat. Parametry turbíny se navíc mohou změnit skokově z důvodu nějaké poruchy a je potřeba stroj neprodleně odstavit a opravit [10].

#### 3.3.1 Kontaktní způsob měření kmitů

Tento způsob měření má hlavní nevýhodu v tom, že měřící prvky musí být přímo v kontaktu s rotujícími a kmitajícími součástmi stroje. Tato podmínka sebou nese problémy s přenosem informací od senzorů mimo stroj. Každá možnost kontaktního měření sebou také nese obrovské nároky na odolnost senzorů a vodičů, kterými spojujeme snímače ve stroji s elektronikou vně stroje. Sensory musí být odolné vůči vysoké teplotě a tlaku.

Jedním z nejčastěji používaných senzorů jsou tenzometry. Tyto součásti mohou být jak kovové, tak i polovodičové. Tenzometry, které jsou napájeni střídavým nebo stejnosměrným proudem, změni svůj ohmický odpor, pokud jsou vystaveny mechanické deformaci způsobené měřenou veličinou. Kovové tenzometry mění svůj ohmický odpor, pokud se mění průřez drátku (fólie) měřící mřížky a její délky. Polovodičové mění svůj odpor díky změně měřeného odporu. Tuto změnu

můžeme také nazvat primárním projevem piezorezistivního jevu [10].

### 3.3.2 Bezkontaktní způsob měření kmitů

Bezkontaktní měření vibrací lopatek je dnes jedním z nejčastěji používaných způsobů monitorování. Jak je patrné z názvu této metody měření, tak tato metoda nevyžaduje přímý kontakt senzorů s kmitajícími lopatkami. Tedy senzory se nepohybují s rotující částí turbíny, ale jsou pevně umístěny ve statoru turbíny. Takto umístěné senzory potom převádí informace primárně o vzdálenosti lopatky od senzoru. Z těchto informací pak můžeme stanovit přesný čas průletu lopatky pod senzorem.

Bezkontaktní systémy kmitání lopatek označovány také jako Tip-Timing systémy, se využívají k měření nestacionárních jevů i k monitorování zvýšených vibrací. Tip-Timing pracuje na principu měření časových diferencí mezi skutečnými a očekávanými průchody lopatek pod senzory. Pokud by lopatka vibrovala, čas průchodu pod senzorem by se měnil s každým průletem. Amplituda i frekvence by se pak vypočítala z odchylek časů průletů od předpokládaného času. Předpokládaný čas průletu je čas, ve kterém by lopatka prolétla, kdyby lopatka nekmitala. Tedy časová diference by byla nulová [10].

V dnešní době existuje celá řada snímačů, které jsou schopny měřit vibrace, ale kvůli využití metody Tip-Timingu se jejich počet jistým způsobem redukuje. V této oblasti se spíše využívají speciální snímače, přizpůsobeny přímo na danou aplikaci, které vykazují nejlepší výsledky. Tyto snímače můžeme rozdělit do dvou skupin:

- a) bodové snímače
- b) přímkové snímače

Bodové snímače jsou většinou přesnější, ale požadují přesnou výrobu hran lopatky. Různé opracování může dopomoci k neodstranitelným chybám při měření, oproti tomu přímkové snímače nejsou tak citlivé, ale potřebují delší hranu orientovanou rovnoběžně s detektorem uvnitř snímače [13].

V následující tabulce 3.1 si ukážeme různé druhy snímačů a jejich vlastnosti.

## 3.4 Únava materiálu

Únavu materiálu můžeme definovat jako mechanické poškození materiálu, které vzniká opakovaným namáháním. Pokud budeme opakovaně materiál vy-

Senzor	Max.měřicí vzdálenost [mm]	Odezva	Průměr snímané oblasti[mm]
optický - laserový (s čočkou)	25	0.01 $\mu s$	0.2-0.4
optický (bez čočky)	10	0.01 $\mu s$	2-4
elektromagnetický	5	20 $\mu s$	10-30
vířivé proudy	5	10 $\mu s$	10-30
kapacitní	2	3 $\mu s$	10-30
<b>Požadavky pro lopatky parních turbín</b>	<b>10-15</b>	<b>0.1-0.01 <math>\mu s</math></b>	<b>0.5-1</b>

Tabulka 3.1: Přehled používaných snímačů a jejich vlastnosti. Převzato z [10].

stavovat určitému působení síly, můžeme toto namáhání nazývat cyklickým.

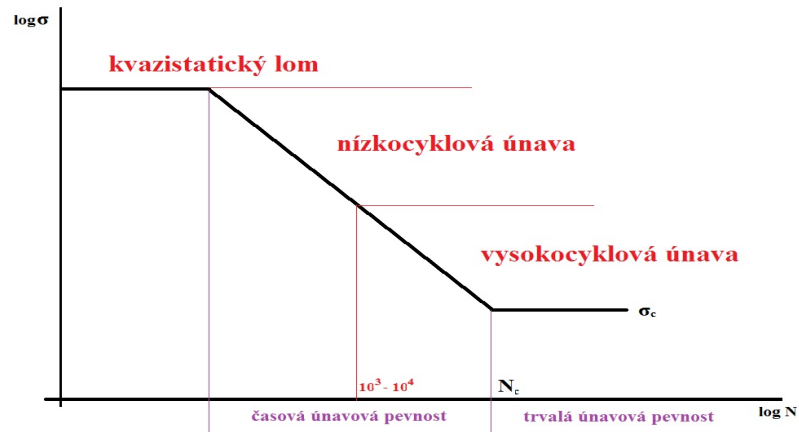
Únavu materiálu můžeme rozdělit do čtyř skupin [7]:

- Vznikání změn mechanických a fyzikálních vlastností
- Vznik trhlin
- Vznik únavových trhlin - hlavní trhlina, která se dále šíří ve směru hlavního napětí.
- Vznik nestabilních trhlin - trhliny se rychle rozšiřují a rostou, a poté následuje zlom materiálu.

### Wöhlerova křivka

Wöhlerova křivka je dodnes používaná únavová charakteristika, kterou stanovil železniční inženýr August Wöhler na základě svých experimentů v letech 1852-1870. Jde o závislost amplitudy napětí  $\sigma$  na počet cyklů  $N$  do porušení vynesena do diagramu obvykle v logaritmických souřadnicích. Někdy se Wöhlerova křivka označuje také jako N-S křivka. Mez únavy  $\sigma_c$  je stav, kdy v důsledku působení časově proměnných zatížení dojde k poškození [14].





Obrázek 3.2: Wöhlerova křivka.

Wöhlerova křivka se člení na tyto oblasti:

- Oblast kvazistatického lomu - k lomu dojde už po několika desítkách cyklů.
- Oblast nizkokycklové únavy - k lomu dochází v rozmezí  $10^3 - 10^4$  cyklů.
- Oblast vysokocycklové únavy - k lomu dojde až v rozmezí  $10^6 - 10^7$  cyklů.

## 4 Metody výpočtu stupně poškození

Při zpracování dat ze senzorů, které měří kmitání oběžných lopatek, se využívá také Fourierova transformace, proto se v následující části popíše.

### 4.1 Fourierova transformace

Fourierova transformace slouží k převodu signálu mezi časovými a frekvenčními okamžiky vyjádřenými pomocí harmonických signálů (tj. goniometrické funkce *sin* a *cos*). Tato transformace je definovaná ve tvaru:

$$X(\omega) = F[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (4.1)$$

Podobně můžeme definovat inverzní Fourierovu transformaci, která převádí signál z frekvenční oblasti do oblasti časové a je ve tvaru:

$$x(t) = F^{-1}[X(\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (4.2)$$

Dále si uvedeme vlastnosti, které platí pro spektrum reálného signálu.

- Amplitudové spektrum je sudou funkcí
- Fázové spektrum je funkcí lichou
- Spektrum sudého signálu je reálnou funkcí
- Spektrum lichého signálu je imaginární funkcí

### 4.2 Způsob výpočtu stupně poškození a životnosti

Pokud budeme chtít určit stupeň poškození lopatky je zapotřebí její zatížení naškálovat na určité množství hladin. Předpokládáme následující zjednodušení [8]:

- a) Stupeň poškození na každé hladině je přímo úměrný počtu zátěžových cyklů.
- b) Pro každou hladinu je stejné celkové množství práce, které je nutné ke vzniku lomu.
- c) Na všech hladinách jsou rovnocenná poškození a platí  $D = \sum D_i$ , kde  $D$  je výsledný stupeň poškození lopatky a  $D_i$  jsou dílčí poškození na jednotlivých hladinách.

Velikost stupně poškození je možné také získat pomocí již zmíněné Wöhlerovy křivky. Rovnice šikmé větve Wöhlerovy křivky je možno definovat vztahem:

$$\sigma_a^q \cdot N_{w,a} = \sigma_c^q \cdot N_{lim} = konst, \quad (4.3)$$

kde  $\sigma_a$  je hodnota amplitudy napětí na určité hladině,  $q$  exponent Wöhlerovy křivky,  $N_{w,a}$  počet cyklů do lomu pro amplitudu napětí  $\sigma_a$ ,  $\sigma_c$  je mez únavy a  $N_{lim}$  je limitní počet cyklů v bodě zlomu Wöhlerovy křivky.

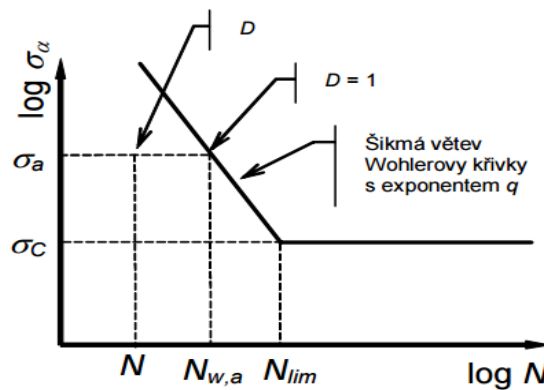
Počet zátěžových cyklů do poruchy  $N_{w,a}$  je možné určit podle vztahu:

$$N_{w,a} = \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_a} \right)^q \cdot N_{lim} \quad (4.4)$$

Stupeň poškození  $D$  je potom možné stanovit podle vztahu:

$$D = \left( \frac{N}{N_{w,a}} \right) \quad (4.5)$$

Na obrázku 4.1 je vidět, že k poruše součásti dojde při počtu cyklů  $N = N_{w,a}$ , tj. při stupni poškození  $D = 1$ . Stupeň poškození nabývá hodnot na intervalu  $< 0, 1 >$ , kde  $D = 0$  reprezentuje stav dosud nezatížená součásti.



Obrázek 4.1: Stanovení počtu cyklů do poruchy při konstantní amplitudě  $\sigma_a$ . Převzato z [8].

Výše uvedené vztahy lze aplikovat na jednotlivých hladinách  $i$ , pak výsledné poškození lopatky je dáno součtem dílčích hladinových poškození podle vztahu:

$$D = \sum_{i=1}^h D_i = \sum_{i=1}^h \left( \frac{N_i}{N_{w,i}} \right), \quad (4.6)$$

kde  $h$  je počet hladin,  $N_i$  je počet zátěžových cyklů na jednotlivých hladinách  $i$  a  $N_{w,i}$  je počet cyklů do lomu pro amplitudu napětí  $\sigma_i$ .

Životnost lopatky se pak vypočte podle vztahu:

$$L = \frac{L_s}{D}, \quad (4.7)$$

kde  $L_s$  je doba provozu lopatky, pro kterou je stanoven stupeň poškození  $D$ . Obecně tato doba provozu může být stanovena buď časově, ve vzdálenosti nebo v závislosti na potřebě způsobu použití dané součásti. Životnost je pak ve stejných jednotkách. V našem případě jde o čas [8].

#### 4.2.1 Hypotézy kumulace poškození

Tvar Wöhlerovy křivky předpokládá, že existuje mez únavy  $\sigma_c$  a amplitudy pod touto hodnotu se podílejí na poškození součásti podle různých hypotéz [8].

##### Minerova hypotéza

Minerova hypotéza předpokládá, že amplitudy napětí, které se nacházejí pod mezí únavy  $\sigma_c$ , se na poškození nepodílejí. Při výpočtu se tedy tyto amplitudy ignorují. V praxi se tato hypotéza velmi používá především pro svoji jednoduchost. Funguje především pro velmi agresivní zátěžná spektra, tzn. tam, kde je velký poměr mezi maximální amplitudou zatížení  $\sigma_{max}$  a mezí únavy  $\sigma_c$  [8].

##### Palmgrenova hypotéza

Křivka únavy se uvažuje bez meze únavy a při výpočtu životnosti se započítávají všechny zatěžovací cykly. Palmgrenova hypotéza je používána pro odhad životnosti valivých ložisek.

##### Haibachova hypotéza

Haibachova hypotéza také předpokládá, že existuje mez únavy  $\sigma_c$  a amplitudy, které leží pod touto mezí, poškozují součást. To se však při výpočtu respektuje změnou exponentu Wöhlerovy křivky pro amplitudy zatížení pod mezí únavy. Wöhlerova křivka má tedy dvě šikmé přímky s různou směrnici [viz obr. 4.2 a)]. Exponent se mění podle následujícího tvaru v rov. 4.8.

$$q' = (2 \cdot q - 1). \quad (4.8)$$

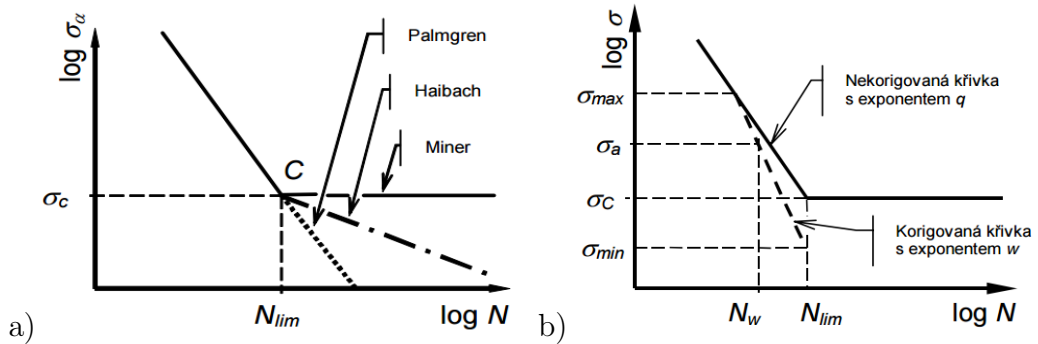
##### Corten-Dolanova hypotéza

Výše uvedené hypotézy měly často neuspokojivé výsledky vzhledem k experimentálním měřením. To dalo tedy vzniknout korigovaným hypotézám, mezi kterými je nejznámější Corten-Dolanova hypotéza. Ta provádí úpravu šikmé větve

s novým exponentem  $w$  v úseku mezi maximální hodnotu amplitudy  $\sigma_{max}$  a hodnotou amplitudy  $\sigma_{min}$ , která se často volí  $\sigma_{min} = 0.5 \cdot \sigma_c$  nebo  $\sigma_{min} = 0$ . Hodnota exponentu  $w$  je pa dána jako  $w = b \cdot q$ , kde součinitel  $b = 0.8, \dots, 1, 2$  je volen z experimentálních výsledků, nebo podle zkušeností.

#### 4.2.2 Schematizace zatížení

Pro možnost stanovení únavové poškození součástí stochastickým zatěžováním na základě Wöhlerovy křivky, je potřeba toto zatěžování vhodným způsobem upravit, ale zároveň musíme dbát na to, abychom zachovali původní parametry. Tyto parametry jsou rozhodující proces, který se nazývá schematizací. Pomocí schematizace dostaneme četnost výskytu různých parametrů, které mají vliv na únavové poškození.



Obrázek 4.2: Hypotézy kumulace poškození. a) Wöhlerova křivka pro hypotézy Palmgren, Haibach a Miner, b) Wöhlerova křivka pro Corten-Dolanovu hypotézu. Převzato z [8].

Pokud budeme provádět schematizaci časového průběhu zatížení je potřeba určit jako první předpětí  $\sigma_m$ , které můžeme označit také jako střední hodnotu. Tento výpočet provádíme dvěma způsoby a to:

- algebraickým průměrem pro zařízení s konstantní periodou podle vztahu

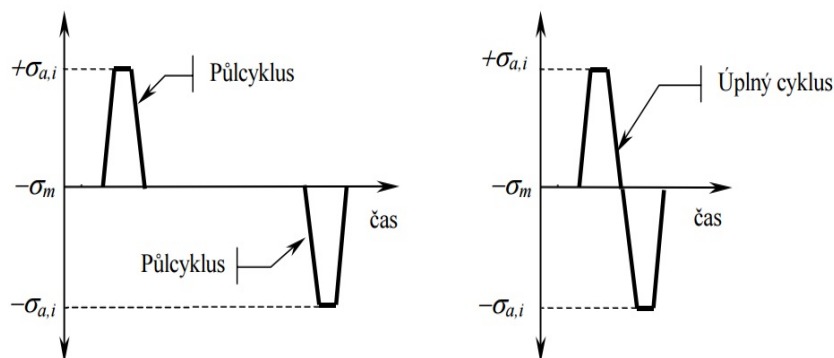
$$\sigma_m = (\sigma_h + \sigma_d)/2 \quad (4.9)$$

kde  $\sigma_h$  je maximální a  $\sigma_d$  minimální hodnota cyklu.

- integrálním průměrem lokálních extrémů pro stochastické procesy

Jako další krok schematizace v záznamu nalezneme výskyt amplitud  $\sigma_{a,i}$ , které jsou nad nebo pod střední hodnotou  $\sigma_m$ . Takto vznikají půlcykly, ze kterých se následně vytvoří úplné zatěžovací cykly jak ukazuje obr. 4.3 [8].

Pokud bude takto nalezených amplitud velké množství, zařadíme každou amplitudu zátěžového procesu do tzv. hladin. Nejprve je ale potřeba zjistit maximální



Obrázek 4.3: Kladná a záporná amplituda, které následně vytvoří úplný cyklus. Převzato z [8]

hodnoty záznamu  $\sigma_{a,max}$ . Díky této informaci potom můžeme zvolit vhodný počet hladin  $h$ , kde budeme rozlišovat kladné  $h^+$  a záporné  $h^-$  hladiny, v rozsahu měření  $-\sigma_{a,max}$  až  $\sigma_{a,max}$ . Potom se v každé hladině zjišťuje počet lokálních extrémů amplitud  $\sigma_{a,i}$ .

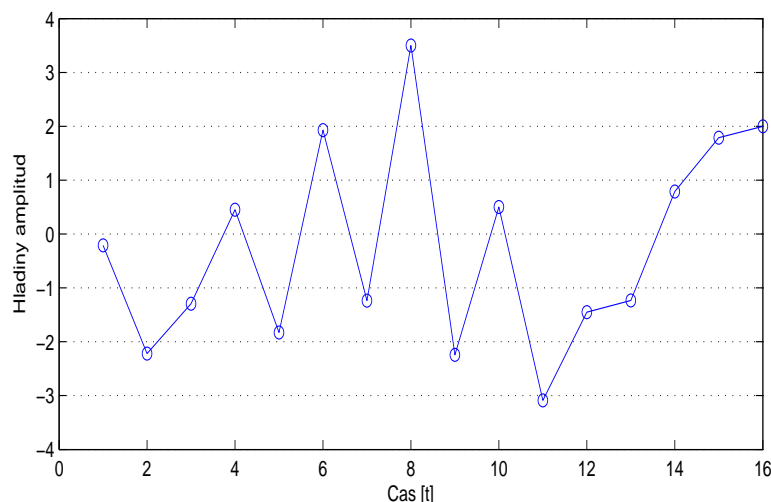
Kladné a záporné půlcykly se převedou na úplné cykly tak, že se součet počtu výskytu ve stejné kladné i záporné hladině podělí dvěma. Tedy jeden cyklus je složen z jednoho kladného a jednoho záporného půlcyklu v odpovídajících hladinách. Nyní projdeme praktické metody schematizace zatížení.

### Metoda relativních vrcholů

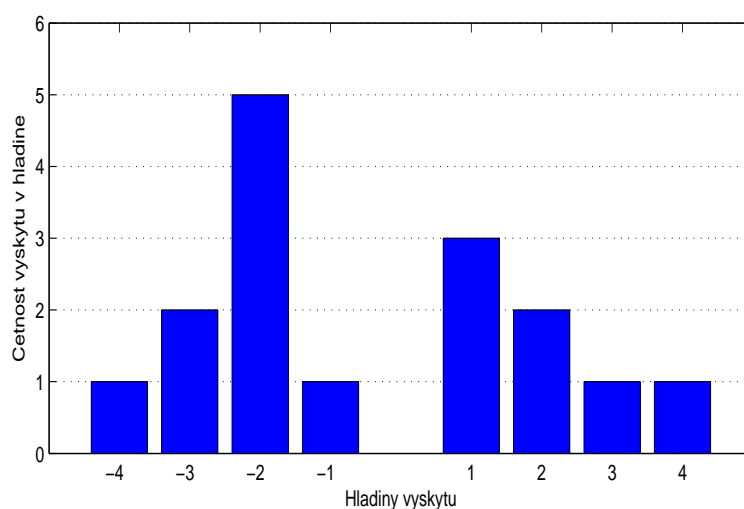
Metoda relativních vrcholů neboli Peak Counting je jedna z jednodušších metod a pracuje na principu, ve kterém se hledají vždy extrémy záznamu v úseku mezi dvěma sousedními přechody záznamu přes střední hodnotu. Na začátku se vhodně zvolí počet hladin  $h$  a jejich rozsah. V ilustračním příkladě náhodného signálu na obr. 4.5 je střední hodnotou nula a jsou zvoleny čtyři kladné a čtyři záporné hladiny a rozsah jedné hladiny je jedna jednotka [8].

Výpočet četností výskytu vrcholů v hladinách je dán počtem vrcholů na úrovni v dané hladině. Například četnost výskytu v hladině  $+1$  je dána počtem vrcholů mezi nulou a hodnotou  $1$ , zatímco četnost výskytu v hladině  $-1$  je dána počtem vrcholů mezi nulou a  $-1$ . Pokud vrchol leží na hranici hladin, inkrementujeme počet vrcholů ve vyšší hladině. Četnost výskytů pro uvedený záznam na obr. 4.4 je zobrazena pomocí histogramu na obr. 4.5.

Počet celých cyklů je určen průměrnou hodnotou počtu výskytů vrcholů v odpovídajících hladinách. Například 2 výskytů vrcholů (půlcyklů) v hladině  $+2$  a 5 výskytů vrcholů v hladině  $-2$  vytvoří 3,5 úplných cyklů v hladině 2.



Obrázek 4.4: Princip vyhodnocení záznamu metodou relativních vrcholů.

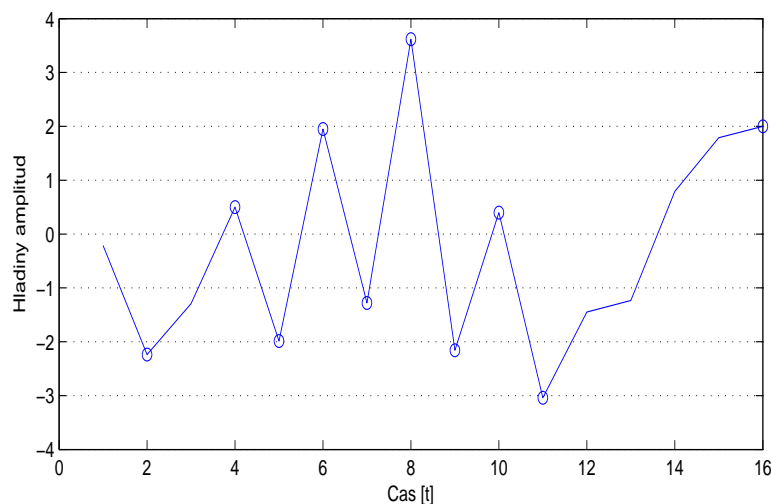


Obrázek 4.5: Četnosti výskytu vrcholů v hladinách pomocí metody relativních vrcholů.

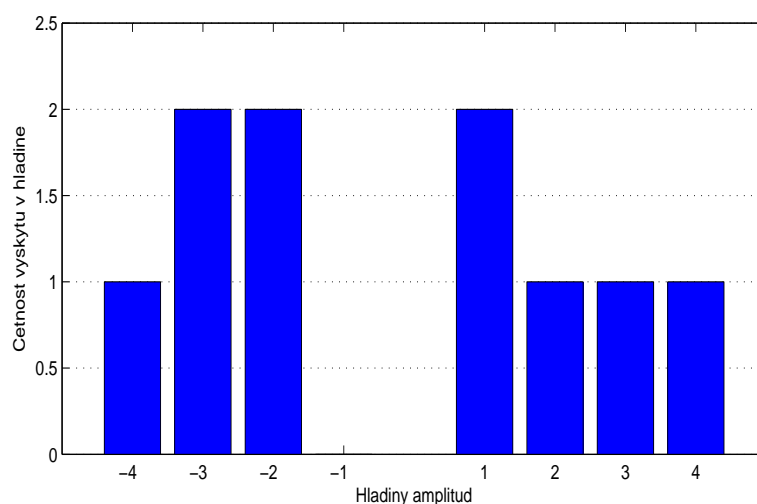
### Metoda maximálních amplitud

Metoda je známá také pod názvem Mean Crossing Peak Counting a započítá do počtu amplitud vždy jen jednu maximální hodnotu z úseku mezi přechody záznamu přes střední hodnotu. Četnost výskytů je určena stejně jako u předchozí metody. Princip vyhodnocení záznamu a histogram četností jsou uvedeny na obr. 4.6, 4.7. Opět je v náhodném signálu střední hodnota nulová a jsou zvoleny čtyři kladné a čtyři záporné hladiny a rozsah jedné hladiny je jedna jednotka [8].

Obě tyto metody mají však své nedostatky. Metoda relativních vrcholů funguje dobře u jednoduchých procesů blízcích se periodickým, avšak u ostatních je nevýhodná, protože započítává i malé bezvýznamné amplitudy, které se potom přeceňují a vzniká větší výpočtové poškození součásti, než je tomu ve skutečnosti. Metoda maximálních amplitud zase započítává pouze velké amplitudy ležící na



Obrázek 4.6: Princip vyhodnocení záznamu metodou maximálních amplitud.



Obrázek 4.7: Četnosti výskytu vrcholů v hladinách pomocí metody maximálních amplitud.

jedné straně střední hodnoty, pak se menší, ale nezanedbatelné amplitudy nezačítávají.

### Metoda relativních rozkmitů

Tato metoda, která je známá též jako Simple Range Counting, odstraňuje nedostatky již zmíněných metod. Výhodou této metody je to, že dává informace o všech jednotlivých amplitudách zatěžovacího procesu. Velikost amplitudy je rovna rozdílu dvou lokálních extrémů procesů.

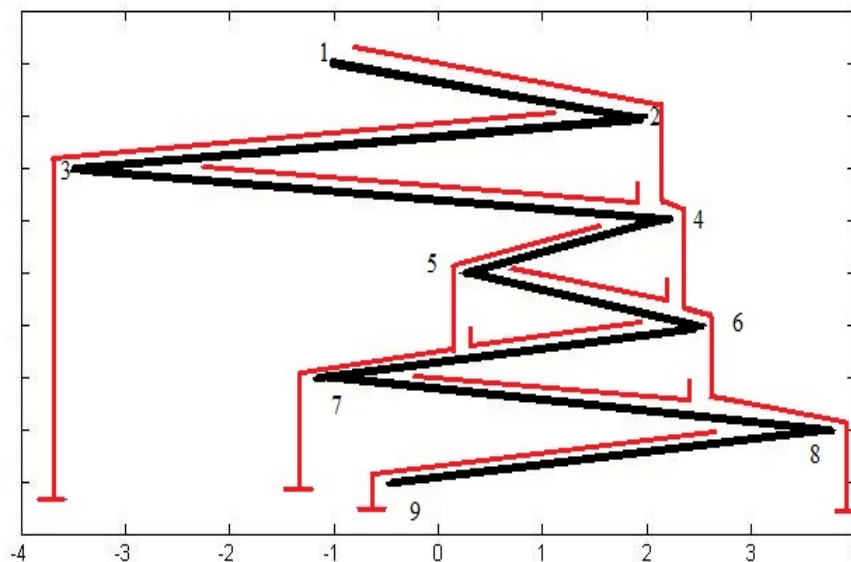
### Metoda stékajícího deště

Metoda stékajícího deště (neboli Rainflow) je dnes jedna z nerozšířenějších metod pro výpočet cyklických deformačních vlastností. Jedná se o metodu vyjadřující počet jednotlivých zatěžovacích hladin amplitud s relativně nejmenší



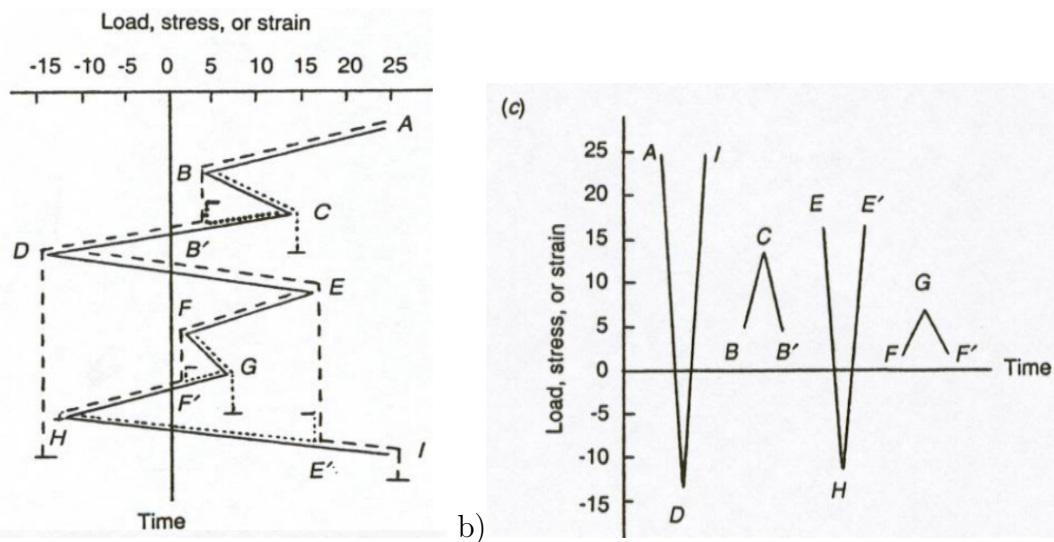
nepřesností. Metoda zvládne správně identifikovat všechny vyskytující se cykly a půlcykly.

Princip této metody, jak je již předvídatelné z názvu metody, vychází z představy stékání deště po a nad sebou uspořádaných stěnách. Počátek „stékání“ začíná v každém vrcholu, který je lokálním extrémem (například bod 1 na obr. 4.8). Tento vrchol může být jak záporný, tak kladný. Jestliže je počátek stékání napětovým minimem, zastaví se proud vody na vrcholu, za kterým následuje vrchol s minimem, které má nižší hodnotu než výchozí minimum. Na ukázkové příkladu na obr. 4.8 tedy bude napětové minimum například bod 1, proud vody se pak tedy zastaví na vrcholu 2, neboť vrchol 3 má nižší hodnotu než vrchol 1. Takto je definována jedna amplituda půlcyklu (1-2). Obdobně pro proud deště v maximum. Proud se zastaví na vrcholu, jehož hodnota je vyšší než hodnota výchozího maxima. Tedy vezmeme-li maximum vrchol 2, pak se proud zastaví na vrcholu 3, protože vrchol 4 má vyšší hodnotu než vrchol 2 a započte se půlcyklus s amplitudou 2-3 (obr. 4.8). Proud deště se také musí zastavit, pokud se střetne s proudem, který stéká z vyšší střechy. Například proud z vrcholu 3 se zastaví, když narazí na proud stékající z vrcholu 2. V tomto případě se započítá půlcyklus s amplitudou 5-4 [8]. Princip metody je zobrazen na náhodném signálu otočeném o  $90^\circ$  na obr. 4.8.



Obrázek 4.8: Princip metody stékajícího deště.

Následující příklad na obr. 4.9 také ilustruje princip metody stékajícího deště a konkrétní výsledky jsou uvedeny v tabulce 4.1.



Obrázek 4.9: Ukázka příkladu záznamu řešeného pomocí metody stékajícího deště, a) princip stékání deště, b) spočtené cykly. Převzato z [15].

Cyklus	Maximum	Minimum	Rozsah	Střed
A-D-I	25	-14	39	5.5
B-C-B'	14	5	9.5	4.5
E-H-E'	16	-12	28	2
F-G-F'	7	2	5	4.5

Tabulka 4.1: Tabulka řešení ukázkového záznamu z obr. 4.9. Převzato z [15].

### Algoritmus metody stékajícího deště [8]:

X je vždy právě uvažovaná hodnota rozkmitu vrcholů, Y je předchozí hodnota rozkmitu vrcholů a S je aktuální startovací bod.

1. Najdi následující vrchol záznamu. Je-li počet načtených bodů menší než tři, opakuj krok 1. Pokud jsi na konci záznamu přeskoč na krok 6.
2. Rozkmit mezi body 1 a 2 aktuálního vrcholu dosaď do hodnoty Y, rozkmit mezi body 2 a 3 aktuálního vrcholu dosaď do hodnoty X. Do S dosaď bod 1.
3. Srovnej absolutní hodnoty rozkmitu X a Y:
  - a) pokud  $X < Y$ , skoč na krok 1,
  - b) pokud  $X \leq Y$ , skoč na krok 4.
4. Pokud rozkmit Y obsahuje startovací bod S, jdi na krok 5, jinak započti rozkmit Y jako jeden cyklus, zapomeň rozkmit i vrcholy Y a jdi na krok 2.

5. Započti rozkmit  $Y$  jako jeden půlcyklus, posuň startovací bod  $S$  na druhý bod rozkmitu  $Y$ , skoč na krok 2.
6. Započti každý rozkmit, který nebyl v předchozích krocích započten, jako půlcyklus.

Pomocí tohoto algoritmu je každá část záznamu počítána pouze jednou. Spočtené poloviční cykly se vždy vyskytují v páru ve stejném rozsahu, což vede k celému cyklu.

## 5 Způsob určení životnosti lopatek

V této části se budeme věnovat samotnému určení životnosti lopatek v turbíně. Data, která zpracováváme, byla naměřena 28.2.2014 v uhelné elektrárně Počerady. Při zpracování těchto dat, budeme vycházet z části práce [10], ve které se Ing. Jaromír Strnad zabýval návrhem optického snímače pro detekci lopatek v turbíně a následně návrhem algoritmu schopného rozeznávat průlet lopatky a zaznamenávat čas průletu. V práci je také navržen algoritmus, který je schopen transformovat naměřená data krátkou Fourierovou transformací z časové oblasti do oblasti frekvenční. Tato data jsou pak různě využívána.

Mezi obdržnými daty byly i informace o vlastních frekvencích čili frekvencích uzlových průměrů. Protože ke každému uzlovému průměru jsou dvě hodnoty, kladná a záporná hodnota. Abychom mohli určit skutečnou hodnotu uzlového průměru musíme rozlišit, jestli se záporná hodnota překlápí či nepřeklápí. Tento jev poznáme změnou velikosti záporného průměru např. druhý záporný uzlový průměr je menší než třetí záporný průměr. Pro jednoduchost budeme označovat uzlové průměry  $ND$ . Skutečnou hodnotu tedy vypočítáme podle vztahů 5.1 a 5.2.

Pokud se záporná hodnota nepřeklápí:

$$ND = \frac{NDp + NDm}{2}, \quad (5.1)$$

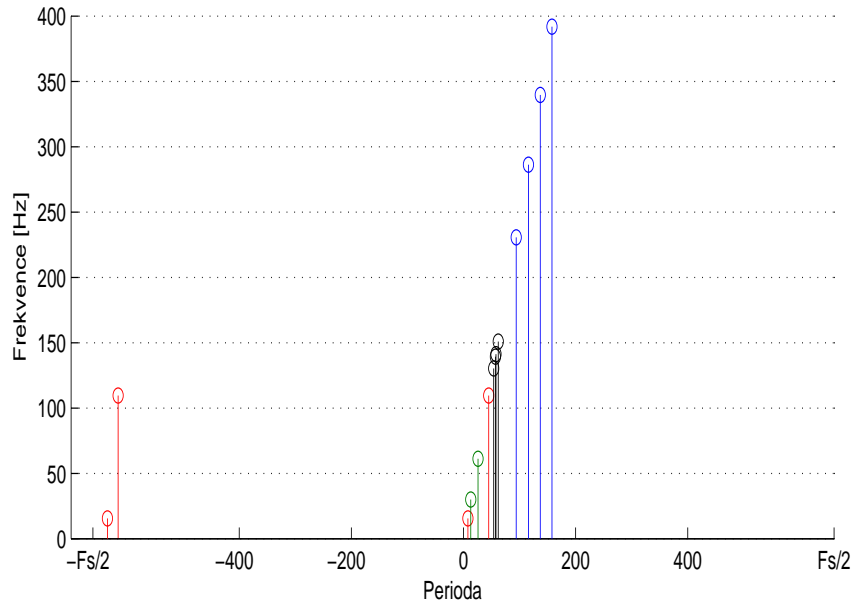
a pokud se záporná hodnota překlápí:

$$ND = \frac{NDp - NDm}{2}, \quad (5.2)$$

kde  $ND$  označuje skutečnou hodnotu uzlového průměru,  $NDp$  označují kladné a  $NDm$  záporné hodnoty uzlových průměrů.

Na obr.5.1 je zobrazena pozice uzlových průměrů. Modrou barvou jsou označeny kladné uzlové průměry, zeleně a červeně jsou zobrazeny záporné uzlové průměry, kde červené byly překlápěny, černou barvou je označena skutečná hodnota uzlových průměrů.

Jelikož tyto hodnoty nejsou úplně zcela přesné důsledkem zaokrouhlovacích chyb, hledáme pro další postupy první vyšší hodnotu ve vektoru amplitud a frekvencí. Nyní máme dvě možnosti, jak zpětně zrekonstruovat časový signál z právě nalezených hodnot.



Obrázek 5.1: Ilustrační příklad překlápění uzlových průměrů.

První možností je použití goniometrických funkcí. Pro tento postup se jednoduše využijeme následující vzorec:

$$IFFT = A \cdot \cos(2\pi Ft + \varphi), \quad (5.3)$$

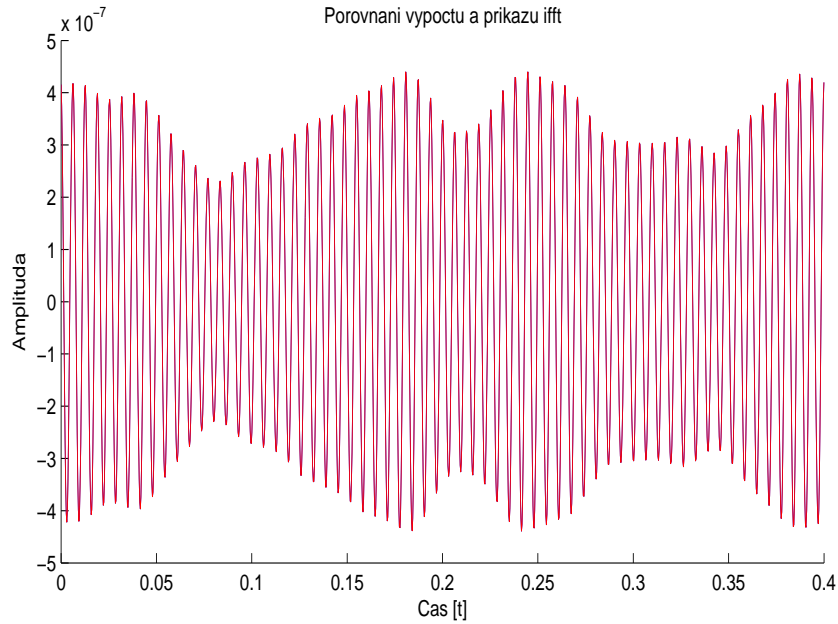
kde  $A$  označuje amplitudu,  $F$  reprezentuje frekvenci, čas značíme  $t$  a  $\varphi$  symbolizuje fázový posun. Pokud budeme mít více průběhů funkcí, použijeme tento postup stejným způsobem. Na každý průběh funkce aplikujeme tento vzorec a následně tyto průběhy sečteme.

Druhá možnost je použití MATLABovského příkazu *ifft*, parametrem funkce musí být komplexní číslo. Opět jako v první možnosti zde využijeme znalost o amplitudě a fázi. Pokud tyto znalosti máme musíme dodržet požadavky na lichost a sudost zmíněných v kapitole 4.1, čili vektor amplitud sudý a fázový vektor lichý. Pro vytvoření komplexního vektoru si nejprve vyjádříme souřadnice  $x$  a  $y$  opět pomocí goniometrických funkcí a to dle vztahu 5.4.

$$\begin{aligned} x &= A \cdot \cos(\varphi) \\ y &= A \cdot \sin(\varphi) \end{aligned} \quad (5.4)$$

Složením těchto vektorů kde souřadnice  $x$  reprezentuje reálnou část a  $y$  část imaginární získáme parametr funkce *ifft*. Pokud budeme mít opět více průběhů můžeme si vytvořit součet všech vektorů a následně použít příkaz *ifft*, nebo udělat *ifft* pro každý průběh zvlášť a poté sečíst.

Pokud si vybereme jednu variantu, můžeme se s jistotou spolehnout, že obě možnosti vrátí stejné výsledky. Toto tvrzení jsme si ověřili a ukážeme na obr. 5.2.



Obrázek 5.2: Porovnání obou metod pro výpočet inverzní Fourierovy transformace.

Jelikož známe frekvence uzlových průměrů a jsme schopni řešit inverzní Fourierovu transformaci, můžeme přejít k dalšímu kroku. Nyní je zapotřebí provést již zmíněnou IFFT pro všechny lopatky, které jsou součástí turbíny.

V tomto kroku si musíme jen uvědomit skutečnost, že každým uzlovým průměrem musí proletět všechny lopatky turbíny. Jelikož tato turbína obsahuje 66 lopatek, musíme počítat pro každý uzlový průměr 66 lopatek. Tento krok se dá vyřešit pomocí následujícího vztahu 5.5.

$$prubeh = A \cdot \cos\left(\frac{n}{N}ND + \varphi\right) \cdot (2\pi Ft), \quad (5.5)$$

kde  $A$  označuje amplitudu,  $n$  je aktuální lopatka,  $N$  je počet všech lopatek,  $ND$  symbolizuje uzlové průměry, fázové posunutí  $\varphi$ , frekvence  $F$  a čas je označený  $t$ . Tímto dostaneme vektor průběhu všech lopatek přes každý uzlový průměr, který bude trojrozměrný. Nyní stačí tento vektor sečíst přes všechny uzlové průměry a dostaneme průběh kmitání lopatek. Vektor bude v rovnici 5.6 označen jako kmit.

$$kmit = \sum_{i=1}^m A \cdot \cos\left(\frac{n}{N}ND_m + \varphi\right) \cdot (2\pi Ft) \quad (5.6)$$

Nyní již nastává samotný problém určení životnosti lopatek. Jelikož tento krok jde řešit mnoha metodami, my jsme si vybrali již zmíněnou metodu a to metodu stékajíciho deště. Tato metoda je dnes jedna z nejpoužívanějších a nejrozšířenějších metod pro určování zbytkové životnosti. Dalším důvodem výběru této metody byly nejpřesnější výsledky. Algoritmus metody stékajíciho deště je volně přístupný v mnoha verzích pro více programovacích jazyků. V naší práci jsme využili kombinaci několika verzí algoritmů pro Matlab, dostupných na [16], [17].

Jelikož průběh kmitání máme již ve tvaru vhodném pro schematizaci, můžeme na něj rovnou použít metodu stékajíciho deště. Metodu stékajíciho deště používáme jen k počítání cyklů, amplitud a středních hodnot. Abychom mohli na této metodě stavět musíme mít připravený také algoritmus, který bude zpracovávat výsledky této metody. Na následující ukázce algoritmu je ukázáno volání metody stékajíciho deště a následně zapsání výsledných vektorů do matice.

```

for i=1:velikost(3)
    k=1;
    [am,e,cykl]=myRain(prumer(1,:,i));
    while ~ isempty(am)
        if k<= length(am)
            amplitudy(i,k) = am(k);
            stredni_hod(i,k) = e(k);
            cyklu(i,k) = cykl(k);
        else
            break;
        end
        k=k+1
    end
end
end

```

V tomto algoritmu se vytváří vektory amplitud, středních hodnot a počty cyklů. Výstupem metody stékajíciho deště nemusí být pokaždé stejně dlouhé vektory, což způsobuje problémy. Tento problém je ošetřen právě pomocí cyklu *while*. Dokud nebude prázdný vektor *am*, který reprezentuje vektor amplitud z metody stékajíciho deště, budeme kopírovat získané data do nových vektorů *amplitudy*. Pokud se budou lišit velikosti dvou po sobě jdoucích vektorů *amplitudy<sub>i</sub>* a vektoru *amplitudy<sub>i-1</sub>* z dalšího kroku, pak volíme větší velikost a na poslední pozice rozdílné délky dosadíme nulu. To samé provedeme i u vektorů cyklů.

Pro výpočet poškození lopatky budeme uvažovat vzorec:

$$D = \sum \binom{n}{N} \cdot \left( \frac{A}{\sigma_c} \right)^m, \quad (5.7)$$

kde  $n$  označuje počet cyklů,  $N$  je mezní počet cyklů, amplitudu cyklu značíme  $A$ , mez poškození označujeme symbolem  $\sigma_c$  a  $m$  označuje křivost Wöhlerovy křivky.

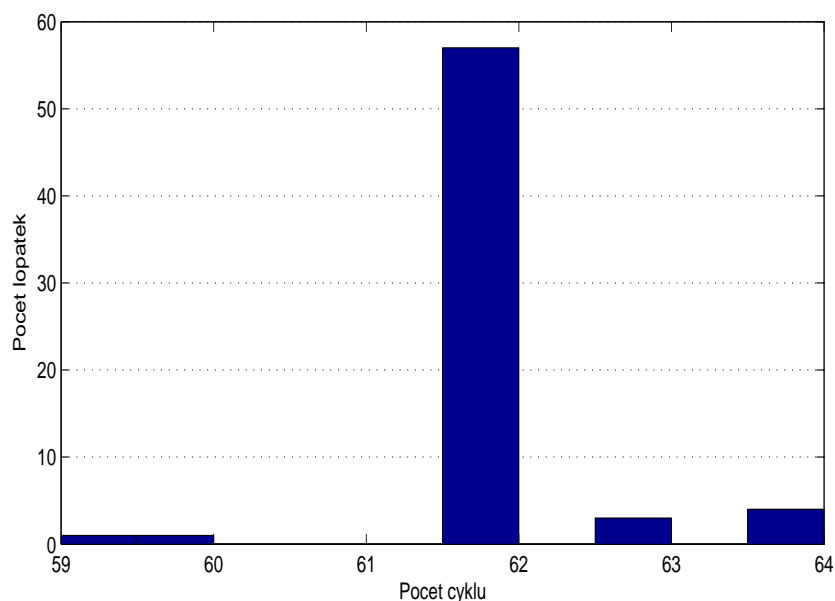
Jelikož jsme v matici amplitud zarovnali jednotlivé řádky na stejnou velikost nulami, v tomto kroku budeme naopak vyžadovat původní velikost jednotlivých vektorů. Tzn. z jednotlivých řádků matice amplitud budeme brát pouze nenulové hodnoty. Z matice cyklů mohou být i nulové hodnoty, z důvodu nulového cyklu, ale vektor musí být stejně veliký jako vektor amplitud.



## 6 Výsledky

V této kapitole uvedeme výsledky, které jsme získali námi navrženým postupem.

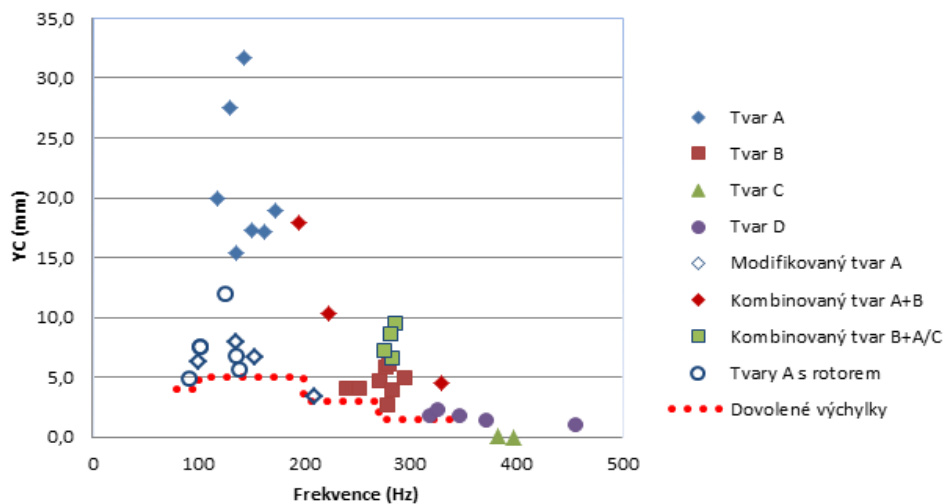
Pomocí metody stékajícího deště jsme získali počet cyklů pro každou lopatku. Na obr. 6.1 je znázorněn histogram počtu cyklů v závislosti na počtu lopatek. To znamená, že u 57 lopatek metoda stékajícího deště vypočetla 62 cyklů. Tyto cykly se však nepodílí na poškození lopatek. Do životnosti lopatek se započítávají až cykly, jejichž amplituda překročí hodnotu dovolené odchylky, která je zobrazena na obr. 6.2. Na tomto obrázku jsou také zobrazeny tzv. rodiny vlastních frekvencí (např. tvar A, tvar B, atd.). Jelikož se příslušné výchylky v dané rodině vlastních frekvencí značně liší (především tvar A), byla zde zavedena již zmíněná dovolená odchylka. Hodnoty dovolené odchylky se liší podle frekvence, pro oblast do 100 Hz je dovolená výchylka 4 mm, v rozmezí 100 - 200 Hz dovolená výchylka odpovídá 5 mm. V rozmezí 200 - 250 Hz 3 mm a pro frekvence v rozmezí 250 - 350 Hz je to 1.5 mm [13].



Obrázek 6.1: Četnost lopatek pro jednotlivé cykly .

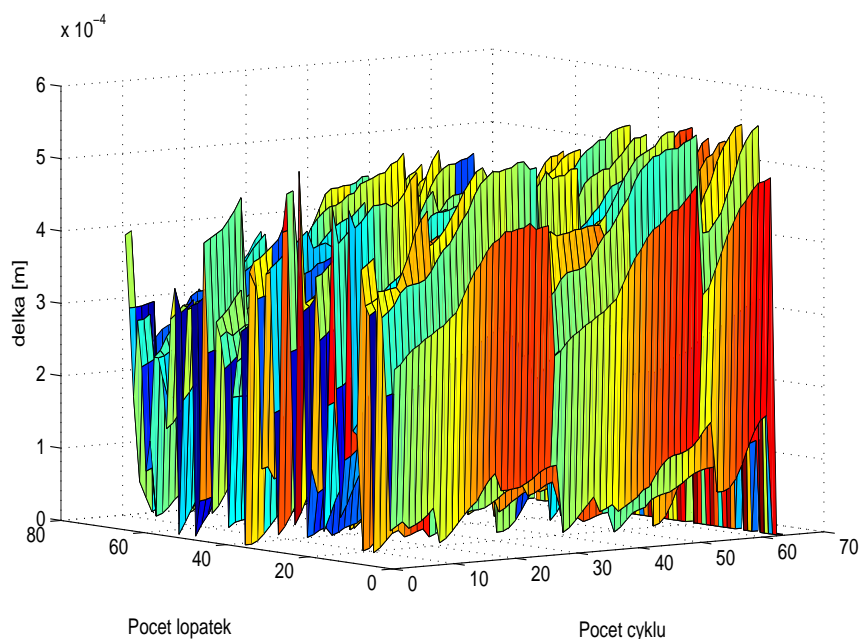
Výstupem metody stékajícího deště je také vektor amplitud. V tomto vektoru otestujeme, zda žádná hodnota nepřesáhne dovolenou výchylku. V našem případě je dovolená výchylka 1.5 mm, což je minimum z výše uvedených hodnot (konzervativní přístup). Pokud by přesáhla nějaká amplituda zvolenou výchylku, měla by vliv na životnost lopatky.

## Připustné výchylky pro vlastní kmity olopatkování Modul 7



Obrázek 6.2: Připustné výchylky kmitání lopatek. Převzato z[13]..

V našich testovaných datech hodnoty amplitud ani v jednom případě nepřesáhli zvolenou výchylku, jak ukazuje obr. 6.3, a proto se nezapočítává ani jeden cyklus, který má vliv na životnost.



Obrázek 6.3: Četnost amplitud 1. lopatky.

Příložené DVD obsahuje veškeré zdrojové kódy a vstupní data.

## 7 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout, implementovat a testovat vhodný postup určení životnosti lopatek. Metoda měla být testována na datech, která nám poskytl Ing. Jaromír Strnad, který se touto problematikou zabývá.

Nejprve bylo zapotřebí se seznámit s problémem kmitání oběžných lopatek v turbíně, dále jsem pak studovali metody schematizace a odhadu životnosti lopatek. Pro odhad zbytkové životnosti jsme zvolili dnes nejrozšířenější metodu schematizace a to metodu stékajícího deště (tzv. Rainflow). Tato metoda poskytuje nejpřesnější výsledky. Pomocí metody stékajícího deště jsme získali počet zátěžových cyklů a jejich amplitudy, pomocí nich pak určíme zbytkovou životnost.

V testovaných datech žádná amplituda nepřesáhla dovolenou výchylku, tudíž žádný cyklus nemá vliv na odčerpání zbytkové životnosti. Z toho plyne, že lopatky v turbíně jsou prakticky nezničitelné, ale opět jen pro námi testovaná data.

## Reference

- [1] **Kadrnožka, J.** *Lopatkové stroje*. Vyd. 1., Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 177 s. ISBN 80-7204-297-1.
- [2] **Škorpík, J.** *Tepelná turbína a turbokompresor, Transformační technologie*, únor 2011, Brno. [online], ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/tepelna-turbina-a-turbokompresor.html> [cit. 28.07.2015].
- [3] **Matouš, P.** *Bakalářská práce - Obrábění pro energetický průmysl - Komponenty parních turbín*. Plzeň, Fakulta strojní ZČU, 2012.
- [4] **Ambrož, J.** *Konstrukce parních turbín*. Vyd. 2., Praha, Fakulta strojní ČVUT, 1977.
- [5] **Michele, F.** *Parní turbíny a kondenzace, plynové turbíny a turbokompresory, konstrukce*. Vysoké učení technické v Brně, 1985.
- [6] **Malenovský, E.** *Studijní opora z předmětu Dynamika rotorových soustav*, 2007, Brno, [online]. Dostupné na: [http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/~pkrejci/opory/dyn\\_rot/index.html](http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/~pkrejci/opory/dyn_rot/index.html) [cit. 6.8.2015].
- [7] **Wikipedie** *Únava materiálu*, 2014, [online]. Dostupné na: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Únava\\_materiálu](https://cs.wikipedia.org/wiki/Únava_materiálu) [cit. 6.8.2015].
- [8] **Folta, Z.** *Habilitační práce - Příspěvek k navrhování strojních součástí na základě vyhodnocení provozního zatížení*. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Ostrava 2004.
- [9] **Kříž, J.** *Bakalářská práce - Tenzometrické měření náprav závodního vozíku*. Praha, Fakulta elektrotechnická ČVUT, 2014.
- [10] **Strnad, J.** *Diplomová práce - Metody bezkontaktního monitorování kmitání bandážovaných lopatek*. Plzeň, Fakulta aplikovaných věd ZČU, 2011.
- [11] **Drahý, J.** *Diplomová práce - Modální analýza turbínového kola pro letecký motor*. Vysoké učení technické v Brně, 2010.
- [12] **Míšek, T.** *Disertační práce - Dynamická analýza olopatkovaných disků axiálních turbosoustrojí*. Plzeň, Fakulta aplikovaných věd ZČU, 2011.
- [13] **Kubín, Z.** *Bezkontaktní monitorování oběžných lopatek turbín – samobuzené kmitání*. Práce ke státní doktorské zkoušce. Plzeň, Fakulta aplikovaných věd ZČU, 2015.

- [14] **Kudelka, M.** *Bakalářská práce - Únavové vlastnosti konstrukční oceli 11523*  
Vysoké učení technické v Brně, 2012.
- [15] **Ali Fatemi** *Fatigue from variable amplitude loading* [online prezentace].  
University of Toledo. Dostupné na: [https://www.efatigue.com/training/Chapter\\_9.pdf](https://www.efatigue.com/training/Chapter_9.pdf) [cit. 6.8.2015].
- [16] **Matlab Central** *Algoritmus metody stékajícího deště pro Matlab, verze 1.*  
[online]. Dostupné na <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/38834-simple-rain-flow-counting-algorithm/content//myRainFlow.m> [cit. 1.8.3015].
- [17] **Matlab Central** *Algoritmus metody stékajícího deště pro Matlab, verze 2.*  
[online]. Dostupné na <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/3026-rainflow-counting-algorithm/content/sig2ext.m> [cit. 1.8.3015].
- [18] **iDNES.cz** *Škoda Power dodá do Maďarska zařízení pro elektrárnu za stovky milionů.* [online]. Dostupné na [http://plzen.idnes.cz/skoda-power-doda-do-madarska-turbinu-a-kondenzator-fwi-/plzen-zpravy.aspx?c=A130404\\_123950\\_plzen-zpravy\\_pp](http://plzen.idnes.cz/skoda-power-doda-do-madarska-turbinu-a-kondenzator-fwi-/plzen-zpravy.aspx?c=A130404_123950_plzen-zpravy_pp) [cit. 7.8.3015].