

**Česká zemědělská univerzita v Praze**  
**Technická fakulta**  
**Katedra jakosti a spolehlivosti strojů**



Monitorování stavu rotačních strojů pomocí vibrodiagnostiky

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

Autor: Antonín Mareš

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Antonín Mareš

Inženýrství údržby

Název práce

**Monitorování stavu rotačních strojů pomocí vibrodiagnostiky**

Název anglicky

**Monitoring the condition of rotary machines via vibro-diagnostics**

---

### Cíle práce

Cílem bakalářské práce je popsat použití vibrodiagnostiky při diagnostice strojů se zaměřením na moderní online systémy s trvale připojenými snímači.

### Metodika

1. Úvod
2. Cíl a metodika práce
3. Vibrodiagnostika (popis a funkce vibrodiagnostiky, principy měření a vyhodnocení, typy snímačů a jejich upevnění, způsoby měření)
4. Online monitorování stavu ložisek na rotačních strojích (trvalé snímače, vyhodnocovací jednotky, online systém pro měření vibrací)
5. Praktické ukázky (volby stroje, měření hodnot, vyhodnocení)
6. Závěr

**Doporučený rozsah práce**

30-40

**Klíčová slova**

vibrace, online systém, snímače

---

**Doporučené zdroje informací**

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. KATEDRA JAKOSTI A SPOLEHLIVOSTI STROJŮ, – PEXA, M. – ALEŠ, Z. *Technická diagnostika [elektronický zdroj] : cvičení.*

LEGÁT, V. *Management a inženýrství údržby.* [Praha]: Kamil Mařík – Professional Publishing, 2016. ISBN 978-80-7431-163-5.

Předpisy, normy a periodika.

SINHA, A K. – EBRARY (FIRMA). *Vibration of mechanical systems [elektronický zdroj].* Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2010. ISBN 0521518733.

SMETANA, C. *Hluk a vibrace : měření a hodnocení.* Praha: Sdělovací technika, 1998. ISBN 80-901936-2-5.

---

**Předběžný termín obhajoby**

2018/19 LS – TF

**Vedoucí práce**

doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra jakosti a spolehlivosti strojů

---

Elektronicky schváleno dne 20. 11. 2017

**doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 30. 1. 2018

**prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.**

Děkan

V Praze dne 19. 03. 2019

---

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: **Monitorování stavu rotačních strojů pomocí vibrodiagnostiky** vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne 25.3.2019

Podpis.....

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Martinu Pexovi, Ph.D. za metodiku a odborné konzultace při vypracování práce. Dále bych tímto chtěl poděkovat firmě VIBRATEK CZ, s. r.o. za poskytnuté měřicí přístroje a rady a také firmě LAMI KAPPA, spol. s.r.o. za poskytnuté materiály a rady potřebné k realizaci bakalářské práce.

# **Monitorování stavu rotačních strojů pomocí vibrodiagnostiky**

**Abstrakt:** Tato bakalářská práce se zabývá monitorováním stavu rotačních strojů pomocí vibrodiagnostiky a základními metodami využívanými v dané problematice. V první části se zaměřuje na základy vibrodiagnostiky, snímače vibrací a závady způsobující vibrace. Dále se zaměřuje na vybrané využívané metody a servisní úkony s vibrační diagnostikou spjaté. V následující části se práce zabývá off-line a online diagnostickými systémy. Součástí práce jsou zároveň praktická měření a následná analýza. Závěr obsahuje základní shrnutí práce.

**Klíčová slova:** vibrace, technická diagnostika, vibrodiagnostika, snímače, monitorování

# **Monitoring the condition of rotary machines via vibro-diagnostics**

**Abstract:** This bachelor thesis deals with monitoring of rotation machines state using vibrodiagnostics and basic methods used in the given issue. In the first part, it focuses on the basics of vibrodiagnostics, vibration sensors and vibrations. Furthermore, it focuses on selected methods and services associated with vibrational diagnostics. The following part deals with off-line and online diagnostic systems. Part of the work are also practical measurements and subsequent analysis. The conclusion contains a basic summary of the bachelor thesis.

**Keywords:** vibration, technical diagnostics, vibrodiagnostics, sensors, monitoring

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Cíl práce a metodika.....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Vibrodiagnostika.....</b>	<b>3</b>
3.1	Vibrace.....	3
3.1.1	Periodické vibrace .....	3
3.1.2	Stacionární a nestacionární náhodné vibrace.....	6
3.1.3	Složené vibrace a její parametry.....	6
3.1.4	Frekvenční analýza (FFT) .....	7
3.2	Snímače pro měření vibrací .....	9
3.2.1	Piezoelektrické snímače .....	9
3.2.2	Indukční snímače .....	10
3.2.3	Bezdotykové snímače .....	11
3.2.4	Montáž a připevňování trvalých snímačů.....	11
3.2.5	Umisťování snímačů.....	11
3.3	Nejčastější závady způsobující vibrace .....	12
3.3.1	Nekvalitní ustavení stroje .....	12
3.3.2	Nevyvážený rotor .....	13
3.3.3	Mechanické uvolnění, ohnutý hřídel .....	14
3.4	Metody vibrační diagnostiky .....	15
3.4.1	Celková mohutnost vibrací.....	15
3.4.2	Metoda rázových pulzů (Shock pulse method) .....	17
3.4.3	Metoda BCU.....	17
3.4.4	Obálková analýza .....	17
3.4.5	Metoda SEE (Spectral Emitted Energy).....	18
3.5	Servisní úkony ve vibrodiagnostice .....	19
3.5.1	Ustavení hřídelů.....	20
3.5.2	Vyvažování.....	21
<b>4</b>	<b>Monitorování stavu strojů.....</b>	<b>24</b>
4.1	Off-line monitorování .....	24
4.2	Online monitorování .....	25

<b>5 Praktická měření.....</b>	<b>29</b>
5.1 Použité přístroje pro měření.....	29
5.2 Stroje.....	29
5.3 Měřicí body.....	31
5.4 Výsledky .....	33
5.5 Analýza naměřených hodnot .....	37
<b>6 Závěr .....</b>	<b>39</b>
<b>7 Seznam použitých zdrojů .....</b>	<b>40</b>
<b>8 Seznam obrázků.....</b>	<b>44</b>
<b>9 Seznam tabulek .....</b>	<b>45</b>



# 1 Úvod

K potřebnému zajištění údržby patří metody technické diagnostiky. V dnešní době právě technická diagnostika ovlivňuje nejvýrazněji obsah údržby. Technická diagnostika slouží ke zvyšování spolehlivosti a bezpečnosti provozu. Jednotlivé druhy diagnostiky se rozlišují podle sledování různých veličin, které umožňují stanovit kritéria o provozním stavu daného objektu. Mezi jednotlivé druhy patří např. vibroakustická diagnostika, tribodiagnostika, termodiagnostika, defektoskopie a elektrodiagnostika.

První přístroje pro měření vibrací byly vyvinuty kolem roku 1950, ovšem až po roce 1970 s přístupem nových technologií souvisejících se zpracováním digitálního signálu bylo možné využít tyto přístroje v praxi. Bohužel hmotnost těchto přístrojů často činila až desítky kilogramů. S nástupem mikroprocesorů a napájecích článků v roce 1980 se začaly vyvíjet přenosné měřicí přístroje a v těchto letech tedy došlo k významnému rozvoji vibrodiagnostiky v praxi.

Vibrodiagnostika má za cíl sledování vibrací rotujících strojů a poskytnutí informací o provozním a technickém stavu za účelem optimalizace údržby a následné výroby. Vibrace slouží jako indikátor stavu stroje a souvisí s dynamickým namáháním stroje, se stavem ložisek, se stavem soukolí, nesouosostí hřídelů či s nevyvážeností rotoru.

Vibrační diagnostika je moderním nástrojem v proaktivní údržbě. Existuje několik způsobů, jak zařadit vibrační diagnostiku do plánu údržby. Mezi tyto způsoby patří jednorázová měření související se změnou stavu zařízení. Dalším způsobem jsou periodická měření neboli off-line diagnostika, která spočívá v pravidelném měření stroje s určitým časový odstupem (např. týdenním, měsíčním). Nejmodernějším způsobem aplikace vibrační diagnostiky do plánu údržby je online diagnostika, která spočívá v kontinuálním měření vibrací pomocí trvalých snímačů.

Tato bakalářská práce se zaměřuje především na základní poznatky z oboru vibrační diagnostiky, metody měření a aplikaci diagnostických systémů v praxi.

## 2 Cíl práce a metodika

Cílem této bakalářské práce je popsat využití vibrodiagnostiky v praxi za použití off-line a především online diagnostických systémů. Tohoto hlavního cíle bude dosaženo prostřednictvím dílčích cílů:

- popsání základů o vibracích, využívaných snímačích pro měření vibrací, metod a postupů při provádění vibrační diagnostiky.
- popsání problematiky monitorování strojů pomocí off-line a online systémů,
- aplikace online diagnostického systému pro stabilní monitorování strojů v praxi.

Metodika práce bude spočívat v popsání základních poznatků o měření stavu strojů pomocí vibrodiagnostiky. Teoretická část bude zaměřena především na používané snímače vibrací, měřicí body, metody vibrační diagnostiky, nejčastější závady způsobující vibrace a s nimi spojené servisní úkony sloužící ke snížení vibrací.

Metodika praktické části práce bude zaměřena na použití online diagnostického systému pro tři ventilátory poháněné elektromotory přes řemenové převody ve sklárně, které vykazují zvýšené hodnoty vibrací. V podniku je využíván způsob údržby v podobě off-line diagnostického systému, který spočívá v periodickém měsíčním pochůzkovém měření. Zároveň je zaveden online diagnostický systém monitorování. Pro bakalářskou práci bude tento online diagnostický systém pro monitorování zmíněných tří strojů využit po dobu šesti měsíců. Na každý stroj jsou namontovány celkem čtyři trvalé piezoelektrické snímače vibrací (dva snímače na elektromotoru, dva na ložiscích ventilátoru). Po tuto dobu bude tedy probíhat trvalý monitoring stavu strojů. Díky téměř neustálému sledování vibrací bude možné určit, v kterých částech dne jsou hodnoty největší a kdy naopak stroj nevykazuje zvýšené hodnoty vibrací. Celé šestiměsíční sledování stavu stroje bude uvedeno v grafech ukazujících trendy hodnot naměřených pomocí metody rázových pulzů informující o stavu valivých ložisek a RMS metody spočívající v měření efektivních hodnot vibrací. V případě setrvání zvýšených hodnot vibrací nebo zjištění závady způsobující vibrace bude následovat servisní řešení problému, např. seřízení řemenového převodu nebo vyvážení oběžného kola ventilátoru.

## 3 Vibrodiagnostika

Vibrodiagnostikou se rozumí zjišťování stavu strojů na základě vyhodnocování výsledků z naměřených hodnot vibrací. Stroje lze kontrolovat v reálném čase, a proto mohou být ušetřeny častým opravám, což vede k významné úspoře náhradních dílů a času na opravu strojů. Informuje o aktuálním stavu stroje, díky čemuž se může s předstihem naplánovat jeho nejbližší vhodné období odstavení. [4], [13]

Rotační stroje jsou v dnešních průmyslových odvětvích hojně využívány. Ztráta takového stroje, např. během výroby, může mít fatální následky v podobě vysokých nákladů na opravu. K důkladné předpovědi je důležitý kvalitní diagnostický systém, díky kterému se dá nežádoucímu přerušení provozu vyhnout. [13], [33]

Díky včasnému zjištění nežádoucího stavu stroje nebo neustále zhoršujícího se trendu hodnot na základě měření vibrací, se dá vyhodnotit aktuální stav valivých ložisek, nevývahy rotoru nebo nekvalitního ustavení stroje. V těchto případech jsou náklady na opravu či revizi mnohem nižší v porovnání s opravami po havárii celého soustrojí. [4]

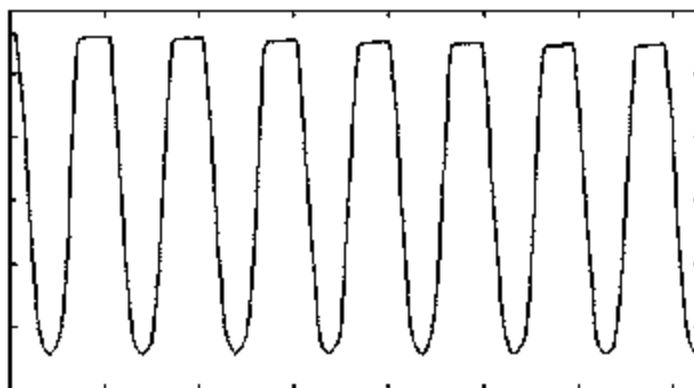
### 3.1 Vibrace

V průmyslovém prostředí je studium vibrací, jejich příčiny a odstraňování velmi důležité pro zachování kvalitní činnosti a dlouhé provozní životnosti rozhodujících výrobních agregátů. Monitorování a vyhodnocování vibrací patří k základním metodám technické diagnostiky. [16]

Mechanické vibrace slouží jako výborný indikátor stavu strojů, protože zahrnují vliv dynamického zatížení a základního chování stroje. Většina vibrací rotujících zařízení nastává z důvodu nesprávné vyváženosti rotoru nebo nekvalitně ustaveného stroje, což vede ke špatnému vystředění hřídelů. [5], [13], [16]

#### 3.1.1 Periodické vibrace

Vibrace jsou všeobecně považovány za pohyb hmoty nebo tělesa okolo jeho klidné polohy. Periodické vibrace se vyskytují tehdy, když se vlastní vibrace opakují v pravidelných časových intervalech. [1]



Obr. 1 Odezva signálu pro periodickou vibraci [3]

Časový úsek jednoduchého cyklu vibrace je znám jako perioda vibrací  $T$ . Převrácené hodnota  $1/T$  je známa jako frekvence vibrací a vyjadřuje se v cyklech za sekundu nebo v hertzech (Hz). Následující sinusová funkce popisuje netlumené periodické vibrace [1], [13]:

$$x(t) = \hat{x} \sin(\omega t + \varphi) \text{ [m]} \quad (3.1)$$

Kde:

$x(t)$ :	výchylka, okamžitá hodnota vibrace	(m)	
$\hat{x}$ :	amplituda, maximální okamžitá hodnota výchylky	(m)	
$\omega$ :	úhlová frekvence	(rad/s)	
$t$ :	čas	(s)	
$\varphi$ :	fázový úhel, počáteční poloha oscilace v čase $t = 0$	(rad)	[1]

Uvedená rovnice indikuje výchylku vibrací jako funkci času.

Rychlost vibrace  $v$  je změna výchylky  $x$  za periodu času. Její tvar vlny je posunut o  $90^\circ$  od polohy výchylky, např. rychlost dosahuje svého minima ( $v = 0 \text{ mm/s}$ ), když je amplituda největší. Rychlost dosahuje svého maxima, když systém osciluje kolem své nulové hodnoty [1], [21]:

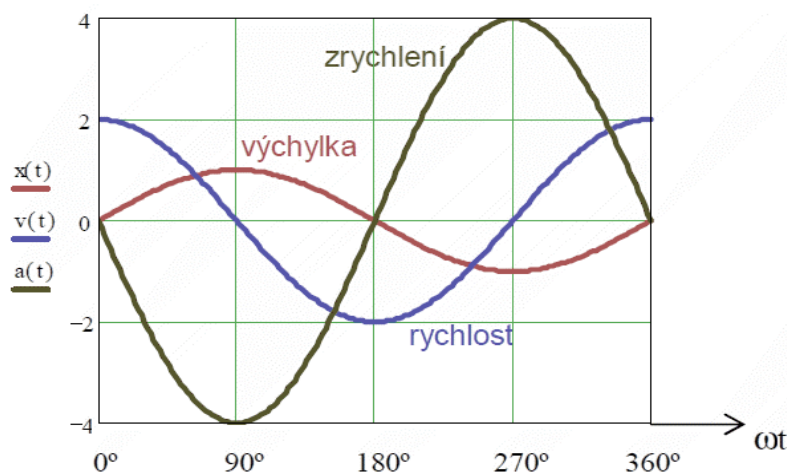
$$v(t) = x \omega \cos(\omega t + \varphi) \text{ [m/s]} \quad (3.2)$$

Zrychlení vibrace  $a$  je změnou rychlosti v čase. Z matematického hlediska jde o druhou derivaci výchylky vzhledem k času. Tvar vlny zrychlení je posunut o  $90^\circ$  od odpovídající rychlostní vlny (a tedy o  $180^\circ$  od výchylkové křivky). To znamená, že zrychlení dosahuje svého maxima, když je výchylka v minimu; obě funkce procházejí nulovým bodem ve stejném čase [1], [21]:

$$a(t) = -x \omega^2 \sin(\omega t + \varphi) \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (3.3)$$

Samotná amplituda výchylky může být uvažována následovně:

Výchylka vibrace	$x$	[ $\mu\text{m}$ ]	(mikrometry)
Rychlost vibrace	$v$	[mm/s]	
Zrychlení vibrace	$a$	[mm/s <sup>2</sup> ]	[1]



Obr. 2 Vzájemná závislost veličin [5]

### 3.1.2 Stacionární a nestacionární náhodné vibrace

Stacionární náhodné vibrace jsou vibrace, které mají vždy jinou velikost, stěží se dají vyjádřit funkcí a jsou neperiodické. Jejich statistické charakteristiky se nemění s časem. Statistické charakteristiky jako např. směrodatná odchylka, střední hodnota či charakter špičatosti by měly být v průběhu času konstantní nebo alespoň téměř konstantní. [1], [23]



*Obr. 3 Stacionární náhodné vlnění [23]*

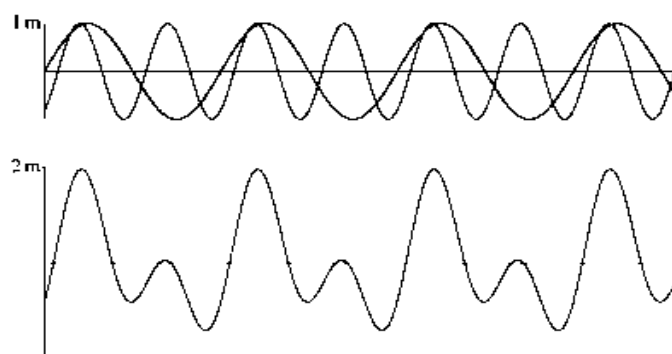
U nestacionárních náhodných vibrací se statistické charakteristiky mění v čase velice zřetelně. Výchylka těchto vibrací se prudce mění v čase. Nejběžnější metodou pro měření těchto vibrací je metoda složeného průměrování. V určitém časovém úseku se naměří více hodnot, které se následně zprůměrují do výsledku s určitou chybou. [1], [23]



*Obr. 4 Nestacionární náhodné vlnění [23]*

### 3.1.3 Složené vibrace a její parametry

Vyskytuje-li se několik periodických vibrací současně, jejich výsledkem je následně složená vibrace, která je také periodická. V praxi je tento typ komplexních vibrací nejběžnější. [1], [13]



*Obr. 5 Složené vlnění [3]*

Amplituda, frekvence a fázový úhel determinují skutečný tvar sinusové vlny. Frekvence vibrací je jednou z nejdůležitějších informací pro správnou diagnostiku strojů. Fázový úhel  $\varphi$  popisuje počáteční polohu oscilujícího bodu v počátečním čase. Fázový úhel a fázový rozdíl mezi dvěma měřenými místy je důležitý pro diagnostiku strojů, např. vyvážení rotoru a měření vibrací. [1], [4], [13], [16]

#### 3.1.4 Frekvenční analýza (FFT)

Je-li vibrační signál složen z několika současně vyskytujících se vlnění, poté jeho časový signál neposkytuje mnoho informací týkajících se jeho individuálních složek. Ovšem frekvenční diagram získaný z toho samého časového signálu je už mnohem užitečnější. Zřetelněji ukazuje individuální frekvenční složky (vibrace), které vytvářejí komplexnější signál. [1], [13], [21]

Jean Baptiste Fourier (francouzský matematik) přišel s metodou pro rozložení jakéhokoliv tvaru vlny na sérii sinusových vlnových složek a obráceně. Každá periodická křivka může být určena jako součet sinusových křivek, které jsou harmonickými složkami daného průběhu. Vibrace strojů mohou být analyzovány tak, aby bylo zřetelné, na jakých částech celkové měřené vibrace se podílejí různé frekvence. Fourierův vzorec poskytuje matematický základ pro transformování časového signálu na frekvenční spektrum. [4], [5], [13]

Nejrozšířenějším a nejpoužívanějším způsobem stanovení vibrací je díky své přesnosti, rychlosti a srozumitelnosti tzv. Rychlá Fourierova Transformace (FFT).

Díky viditelnému znázornění frekvenčního spektra jsou všechny jednotlivé složky vibrace snadno čitelné. [4], [5], [13]

Frekvenční analýza je tedy metoda, která v časovém průběhu vibračního signálu najde periodické pravidelně opakující se děje, které následně ve frekvenčním spektru zobrazí jako jednotlivé čáry, viz Obr. 6. Ve většině případů je zapotřebí počítač se softwarem k simulaci daného problému. Aby bylo možné tento krok provést, musí se signál převést do digitální podoby. Převod analogového signálu do digitálního se provádí A/D převodníkem. A/D převodník pracuje jako rychlý voltmetr, který v krátkých časových intervalech měří napětí. Výsledky následně zpracuje matematický filtr a zpětným výpočtem lze získat skutečnou úroveň měřeného signálu. [1], [5], [13]

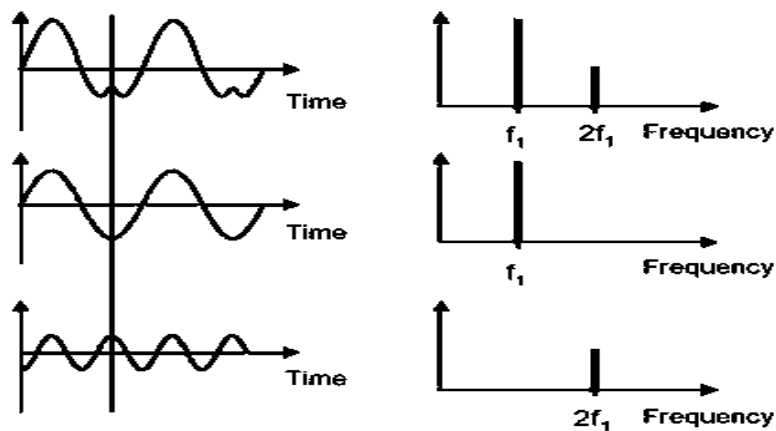
Při měření celkových vibrací se zpravidla užívají následující termíny:

- Peak (špička)                      Vzdálenost mezi nulou vodorovné osy a vrcholem vlny.
- Peak to peak                      Rozdíl mezi nejnižším a nejvyšším vrcholem vlny.
- Average (průměrná hodnota)
- RMS (root mean square value), neboli efektivní hodnota  
Druhá odmocnina čtverců okamžitých hodnot jednotlivých amplitud frekvenčního spektra (Norma ČSN ISO 10816-3). [8], [13]

Cílem frekvenční analýzy je rozložení komplexního vibračního signálu na jeho jednotlivé frekvenční složky podle jejich relativní síly. Frekvenční spektrum (viz Obr. 6 vpravo) ukazuje tentýž signál, pouze z jiného pohledu. Aktuální signál osciloskopu není viditelný. Viditelná je pouze jeho úroveň daná výškou svislé úsečky. Pozice úsečky souhlasí s frekvencí signálu. [1], [4]

Frekvenční spektrum poskytuje názorné zobrazení vibrací. [5], [13]





Obr. 6 Transformace na frekvenční diagram [13]

### 3.2 Snímače pro měření vibrací

Snímače vibrací transformují mechanické pohyby na odpovídající elektrické signály. Prvním krokem k úspěšné analýze je tedy volba vhodného snímače. Možný použitelný rozsah frekvencí a dynamický rozsah se u každého z jednotlivých typů snímačů liší. Každý typ snímače má své vlastní výhody a nevýhody v závislosti na konkrétní aplikaci (např. zda se měří vibrace valivých ložisek, hřídele nebo vibrace strojní skříně) a na frekvenčním rozsahu. Bezkontaktní snímače výchylky jsou limitovány horní frekvencí přibližně 2000 Hz. Snímače rychlosti limitovány frekvencemi cca 10-1500 Hz. Největší frekvenční rozsah mají snímače zrychlení (akcelerometry). Ty bývají horně limitovány frekvencí až 30 kHz. [5], [11]

#### 3.2.1 Piezoelektrické snímače

Piezoelektrické snímače neboli akcelerometry je možno použít k měření většiny mechanických vibrací. Poskytují přesná měření pro široký rozsah frekvencí. Konstrukce těchto snímačů je robustní, ale funkční. Rezonanční frekvence snímačů leží nad rozsahem běžného pracovního měření. Jelikož neobsahují volné částice, jsou vysoce odolné vůči opotřebení a poškození. Jejich instalace je vcelku jednoduchá. [2], [11]

Když je piezoelektrický krystal mechanicky zatížen, dochází k jeho deformaci a emituje elektrické napětí. Toto napětí je přímo úměrné stupni zatížení. Druhý Newtonův zákon říká,

že „Síla je rovna hmotě násobené zrychlením“. Po převedení do problému lze říci, že síla může být měřena v podobě elektrického signálu, který je emitován piezoelektrickým krystalem. Tento elektrický signál je na výstupu ze snímače přímo úměrný zrychlení pro velmi široký rozsah frekvencí. [2], [11]



*Obr. 7 Tandemový piezoelektrický snímač [27]*

Nejvyšší měřená frekvence by neměla převýšit třetinu rezonanční frekvence. Mohlo by dojít ke zkreslení, které ovlivní naměřené hodnoty. Důležitou funkci má také předzesilovač, který slouží k získání využitelného signálu. Dolní hranice frekvence je totiž závislá na zvuku generovaném právě předzesilovačem. [13]

Akcelerometry se běžně využívají při měření pro rozsah frekvence 10 Hz až 10 kHz. [5], [13]

### 3.2.2 Indukční snímače

Indukční snímače neboli snímače rychlosti, mají malou rezonanční frekvenci, a proto bývají používány pro měření vibrací nad touto frekvenční hodnotou. [11], [13]

Využitelný frekvenční rozsah těchto snímačů bývá 10 Hz až 2000 Hz. Není potřeba používat předzesilovač, protože úroveň vstupního signálu je velmi vysoká. Indukční snímače jsou ovšem velmi citlivé na účinky magnetického pole, a proto podléhají únavě. [13]

Využívají se dva hlavní typy snímačů rychlosti. U prvního typu snímače je permanentní magnet senzoru napojen přes svůj plášť přímo na měřený objekt. Magnet dodává magnetické pole a vibruje spolu s objektem. Cívka osciluje volně relativním pohybem okolo magnetu. Elektrické napětí indukované v cívkce je přímo úměrné rychlosti. U druhého typu snímače je cívka instalována stacionárně na stroji a magnet volně osciluje okolo cívky. [11]

### 3.2.3 Bezdotykové snímače

Bezdotykové neboli výchylkové snímače se často využívají v případě, kdy je potřeba měřit vibrace na velkých strojích s masivními kryty a pevnými ložisky. Měření vibrací na povrchu těchto krytů není efektivní. Naměřené hodnoty bývají menší, než reálné. Hřídel může v ložisku ve skutečnosti velmi silně vibrovat. [4], [13]

Metoda využívá vířivé proudy, které proudí v elektricky vodivém předmětu díky elektromagnetickému poli, který se vytváří, když cívkou protéká střídavý proud. Vstupní signál, který prochází jádrem, se mění úměrně vzdálenosti mezi špičkou snímače a měřeným objektem. Měří se tedy signál střídavého proudu, který je úměrný vrcholové hodnotě vibrace. [11], [13]

Využitelný rozsah frekvence je od 0 Hz do 250 Hz. [14]

### 3.2.4 Montáž a připevňování trvalých snímačů

Frekvenční charakteristika a dynamický rozsah snímačů vibrace může být ovlivněn metodou jejich instalace. Slabé spojení vede k tlumení a omezení frekvenčního rozsahu.

Pro statické měření vibrací existují dvě nejčastější metody instalace snímačů. První metodou je závitové připevnění, druhou nejčastější metodou je připevnění snímače lepidlem na montážní základ. V obou případech je potřeba dbát na správný normovaný postup. Montážní povrch musí být kvalitně očištěn, povrch snímače taktéž. V případě závitového připevnění musí být celý závrtný šroub snímače zašroubován do otvoru. U druhé metody se k připevnění nejčastěji používá dvousložkové epoxidové lepidlo. [16]

Dnešní nejčastější metodou připevňování snímačů jsou permanentní magnety. Magneticky připevňované snímače poskytují rychlé a jednoduché připevnění. Dají se snadno přesouvat. Ovšem nevýhodou je rozsah měření, který je horně omezen hodnotou přibližně 2000 Hz. [11]

### 3.2.5 Umístování snímačů

Snímače by měly být umístovány na nerotujících částech ložisek nebo alespoň v jejich blízkosti (ložiskový domek, ložiskový stojan). Označení a orientace snímačů musí být jednoznačné, aby se zabránilo chybám při opakování měření. Měření musí být prováděno za provozních

podmínek. Měření vibrací u strojů s proměnlivými otáčkami se provádí za mezních podmínek při větším dynamickém namáhání. [13]

Vibrace by měly být měřeny ve vertikálním, horizontálním a axiálním směru. V horizontálním směru bývají vibrace největší. V této rovině bývá stroj nejpoddajnější a lze indikovat např. nevyváženost rotoru. V axiálním směru lze indikovat nesouososti. Nejmenší vibrace lze většinou naměřit ve vertikálním směru z důvodu tuhosti a hmotnosti konstrukce. [13]

### 3.3 Nejčastější závady způsobující vibrace

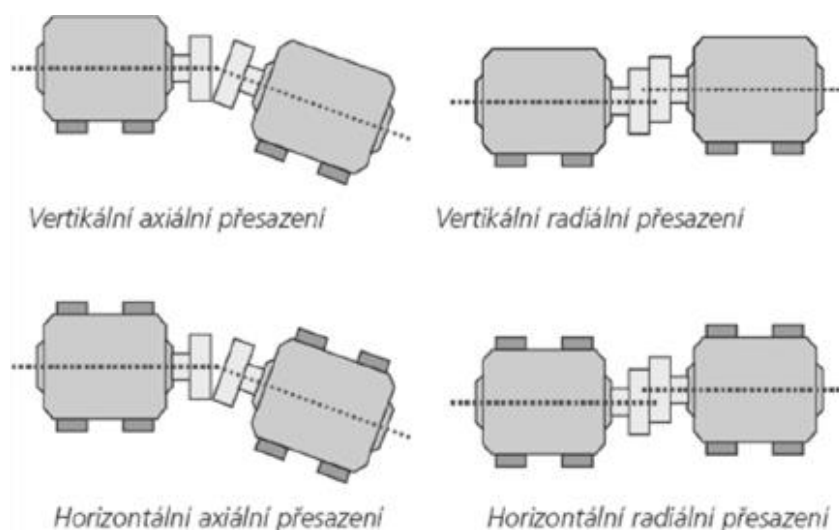
Mezi nejběžnější důvody, které způsobují vibrace, patří především nevyváženost rotujících částí a nesouosost hřídelů. Dalšími závadami způsobující vibrace mohou být např. uvolněné části soustrojí, asymetrie pole, či ohnutý hřídel, který ovšem povětšinou souvisí s nesouosostí hřídelů, díky které tento problém často vzniká.

#### 3.3.1 Nekvalitní ustavení stroje

Existují dva druhy nesouosého ustavení. Axiální a radiální přesazení. Každý z těchto typů nesouososti se ještě dělí na horizontální a vertikální. V praxi se často jedná o kombinaci těchto druhů nesouososti. Následkem může být až ohnutí hřídelů. Úkolem osového vyrovnání je nastavit dvě strojní jednotky s rotujícími hřídeli tak, aby osy hřídelů byly v přímce. Pokud stroj pracuje za běžných provozních podmínek, měly by osy rotace obou hřídelů procházet bodem, ve kterém se přenáší výkon z jednoho hřídele na druhý. [13], [21], [36]

Provoz a spolehlivost stroje závisí do značné míry právě na souososti hřídelů. Nesouosé hřídele mohou způsobit moment, který vytváří nežádoucí dynamické síly v ložiskách, kterým díky tomu výrazně klesá životnost. [5], [13]

Dalším závažným problémem může být také porušení těsnění ložiska. V tomto případě mohou vniknout do ložiska nečistoty a výrazně zkrátit jeho životnost. Je-li ve frekvenčním spektru vibrací jasně zřetelná složka s dvojnásobnou otáčkovou frekvencí, ve většině případů se jedná právě o nesouosé ustavení hřídelů. [5], [13], [36]



Obr. 8 Varianty nesouososti [14]

### 3.3.2 Nevyvážený rotor

Příčinou nevyváhy je nerovnoměrné rozložení hmoty kolem osy rotace, kdy těžiště hřídele neleží v ose rotace. Díky tomu vzniká odstředivá síla, která se snaží vychýlit osu rotace. Tato odstředivá síla rotuje společně s hřídelem, jelikož je s ním pevně spojena. [1], [13]

Nevývaha je jednou z nejčastějších základních příčin vibrací. Její vznik může být způsoben vůlí mezi hřídelem a instalovaným nábojem, díky čemuž bude osa rotace mimoběžná s geometrickou osou. [1], [13]

Dalším důvodem vzniku nevyváhy mohou být usazeniny na rotoru, či přílišné opotřebení. Na lopatkách ventilátorů se může usazovat nečistota, a pokud se neusazuje rovnoměrně, může dojít k tomuto problému. Nerovnoměrné rozložení hmoty v tělese způsobené chybou ve výrobě vede také ke značným problémům, jelikož geometrická osa tělesa neprochází těžištěm. Odstranění této nevyváhy je velice obtížné, zodpovídá za ni výrobce a nemělo by tedy k tomuto problému často docházet. [1], [13], [21], [22]

Pokud se stroj vyváží, vibrace způsobené nevyváhou klesnou a rovněž klesnou i sekundární vibrace. Pokud jsou vibrace způsobené nevyváhou vyšší než 2,8 mm/s, rotor by měl být vyvážen. Při zkoumání spektra je vždy důležité zkontrolovat, zda nejsou viditelné i sekundární vibrace. Ty bývají způsobeny přítomností uvolněných částí.

Mezi základní druhy nevyváhy patří nevyváženost statická, momentová a dynamická. U staticky nevyváženého rotoru je hlavní osa setrvačnosti posunutá od osy rotace a obě osy jsou si navzájem rovnoběžné. Díky jednoduché diagnostice ji lze snadno určit. Momentově nevyvážený rotor je takový rotor, jehož těžiště leží ve středu osy rotace, ale osa setrvačnosti je s osou rotace různoběžná. Dynamická nevyváženost je v praxi nejběžnější a je kombinací obou předchozích typů, statické i momentové. Osa setrvačnosti je mimoběžná s osou rotace, výjimečně různoběžná, ale s těžištěm mimo osu rotace. Dynamická nevyváha se projevuje až za provozu. Lze ji učit pouze měřeními vibrací. [13], [21], [22]

Vyvažování je proces, u kterého se z rotoru odebírá či na rotor přidává část hmoty na určité místo pod určitým úhlem. Díky tomu se ztotožní centrální hlavní osa hřídele s její geometrickou osou. Nejčastěji se vyvažují ventilátory, mlýny, oběžná kola a nožové rotory. [1], [13]

### 3.3.3 Mechanické uvolnění, ohnutý hřídel

K mechanickému uvolnění dochází při nesprávné montáži nebo při poddimenzovaném ukotvení konstrukce. Projevuje se jako delší sled neobvyklých příliš vysokých amplitud vyšších harmonických složek, otáčkové frekvence subharmonických složek a interharmonických složek. Lokalizaci závady lze určit pomocí vizuální metody. Pro přesné učení závady lze použít metodu zviditelnění provozních tvarů kmitů. [21]

K ohnutí hřídele může dojít při transportu součástí, při nesprávné montáži, při výrobě, při vyšších krouticích momentech. Průhyb může vzniknout i působením gravitace při vyšší hmotnosti, větší délce a menším průměru hřídele. Při použití metody měření celkových vibrací vypadá frekvenční spektrum obdobně jako při nesouososti hřídelů. Tedy hodnota amplitudy může činit 30 % až 100-200 % amplitudy otáčkové frekvence stroje. [1], [13], [21]

### 3.4 Metody vibrační diagnostiky

Vibrace strojů a soustrojí jsou buzeny zvnějšku dynamicky nebo kinematicky. Intenzita a pravidelnost buzení závisí na opotřebení a technickém stavu stroje.

Pro správný a bezporuchový chod stroje se používá nespočet diagnostických metod měření vibrací, díky kterým lze snadno lokalizovat poruchu či problém. Aby byla zachována kvalita měření vibrací, je potřeba zvolit vhodnou metodu měření a správný typ snímače. [4], [5], [13]

Nejdůležitější metodou ve vibrodiagnostice je frekvenční analýza, viz 3.1.4. Touto problematikou se ale zabývá mnoho jiných metod, např. celková mohutnost vibrací, metoda rázových pulzů, metoda BCU, obálková analýza, metoda SEE. [13]

Většina metod byla vyvinuta výrobcí ložisek a diagnostických systémů. [13]

#### 3.4.1 Celková mohutnost vibrací

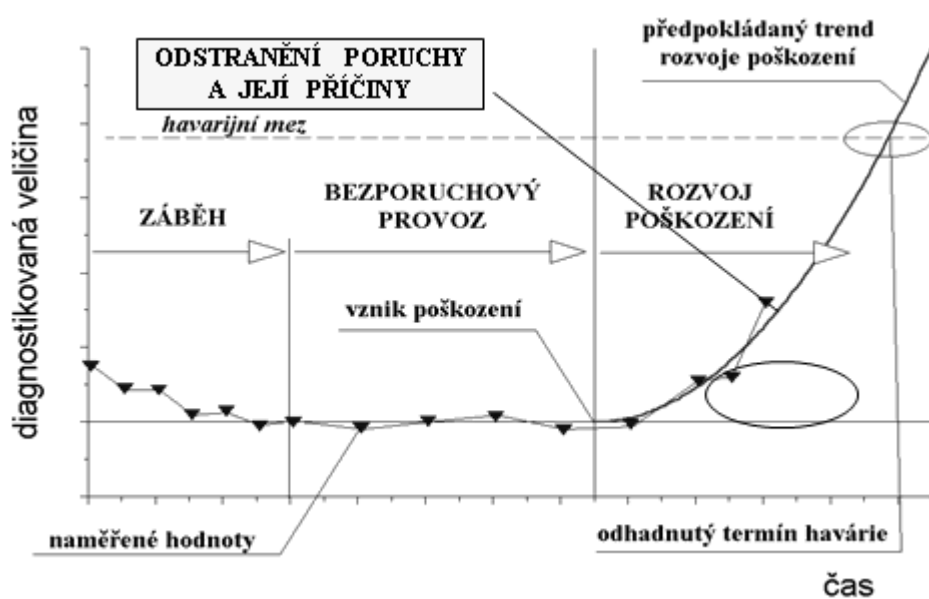
Celkové vibrace znázorňují kinetickou energii v určitém frekvenčním rozsahu 0-1000 Hz. Při měření celkové mohutnosti vibrací se porovnávají naměřené hodnoty s normovanými (viz *Tab. 1*) a z následujících výsledků se zjišťují závady, které zvýšené vibrace způsobily. [1]

Celková intenzita neboli mohutnost kmitů znamená hodnotu nebo hodnoty naměřené na nejdůležitějších místech stroje. Tyto hodnoty se následně vynášejí do funkční závislosti velikosti vibrací na čase do grafu. Takto se získá tzv. vanová křivka, viz obr. 9. Z vanové křivky lze předpovídat zbylou časovou životnost stroje nebo soustrojí a díky tomu naplánovat nejbližší revizi stroje. K určení zbylé životnosti z vanové křivky je zapotřebí volba limitních hodnot vibrací. Tyto limitní hodnoty bývají určeny výrobcem, normou a danými podnikovými předpisy. [13]

Z vanové křivky lze tedy určit limitní stavy. Mezi tyto limitní stavy patří záběh (dobrý stav), bezporuchový provoz, zhoršený stav a porucha. Překročení limitních hodnot je tedy důležité patřičně analyzovat a následně správně vyvodit odpovídající závěry. [13]

Tab. 1 Klasifikace mohutnosti vibrací pro stroje skupiny 2 podle ISO 10816-3 [8]

Klasifikace uložení	Hranice pásma	Efektivní hodnota rychlosti [mm/s]
Tuhé	A/B	1,4
	B/C	2,8
	C/D	4,5
Pružné	A/B	2,3
	B/C	4,5
	C/D	7,1



Obr. 9 Vanová křivka [9]



### 3.4.2 Metoda rázových pulzů (Shock pulse method)

Metoda rázových pulzů, známá také jako SPM, je patentovanou technikou pro efektivní monitorování stavu strojů. Od inovace z roku 1969 se nyní rozvíjí a je nyní celosvětově uznávanou metodou pro sledování stavu valivých ložisek a údržby strojů. [36]

Poskytuje informace o možném stupni poškození ložiska, jeho správné montáži a mazání. Je to velmi rychlá a spolehlivá metoda. [7], [36]

Funguje na principu měření maximální hodnoty pulzů nebo počtu pulzů, jejichž hodnota je vyšší než referenční. Probíhá odfiltrování slabých impulzů pod 30 kHz. Rázové impulsy se snímají v rozmezí 30-40 kHz. Snímá se tzv. prahová úroveň měřená v [dBc] a špičková úroveň měřená v [dBm]. Poslední částí je zpracování signálu a přepočítání na analogové impulsy. Tento proces poskytuje signál, který lze použít k určení stavu ložisek. V případě překročení 35 dB lze považovat ložisko za vadné, jelikož se riziko poruchy zvyšuje. [7], [13],[36]

### 3.4.3 Metoda BCU

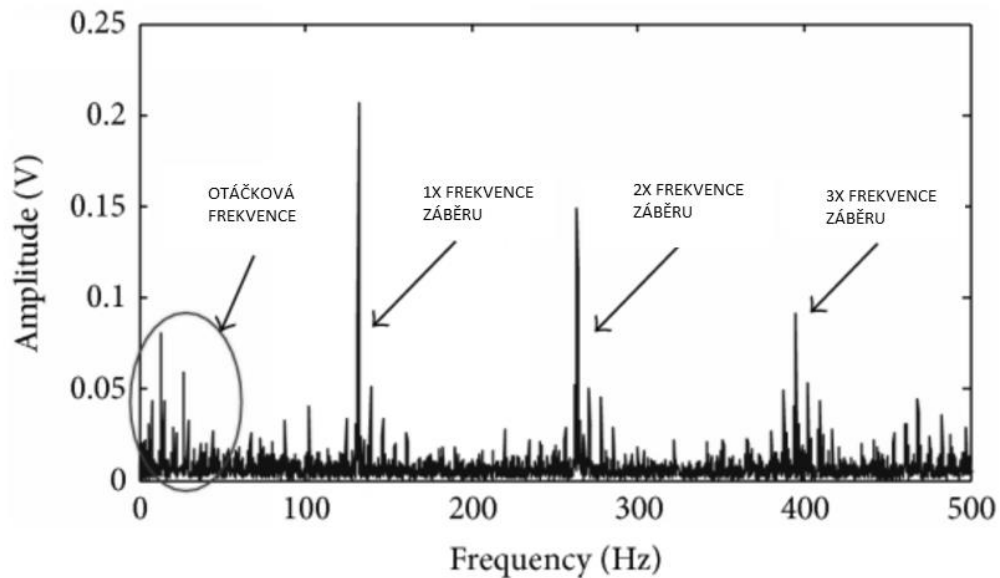
BCU neboli Bearing condition unit je metoda využívána k detekci trhlin a mikrotrhlin vně ložiska. Metoda je založena na principu využití rezonanční frekvence snímače k zesílení signálu, který je způsoben poškozením ložiska. [4]

Pro přesné měření je důležité znát přesné rozměry ložiska. Pro vytvoření hodnoty BCU se vyhodnocují různé doby odezvy a četnost rázů. [4]

### 3.4.4 Obálková analýza

Obálková metoda neboli envelope spectrum slouží k odhalení defektů na ložiscích. Práce ložisek a záběr ozubených kol mají opakující se charakter, a proto vytváří vibrační signály s mnohem nižšími amplitudami a naopak mnohem vyššími frekvencemi. U frekvencí způsobených buzením konstrukcí nebo otáčkami jsou tyto frekvence mnohem nižší. Při detekci závady na ložisku při vyšších frekvencích způsobených defektem, například valivého tělesa ložiska, má naměřený signál tak nízkou energii, že se v celkovém frekvenčním spektru vytratí, viz Obr. 10.

Ke správné diagnostice těchto defektů a získání spektra obálky je zapotřebí FFT analyzátor, který obsahuje informaci o kinematické frekvenci ložiska. [13], [17]



Obr. 10 Obálková analýza frekvenčního spektra [12]

### 3.4.5 Metoda SEE (Spectral Emitted Energy)

Metoda SEE slouží ke včasné indikaci závad na ložiscích a převodech ozubených kol pomocí měření tzv. akustických emisí. Tyto akustické emise bývají způsobovány částmi kovového abraziva. [13]

Důvody vedoucí ke vzniku akustické emise mohou být například:

- defekty ložiska,
- tření ložisek,
- styk kovu s kovem,
- nekvalitní mazání,
- kavitace,
- elektrický šum. [13]

Metoda SEE využívá speciální snímače akustické emise, které jsou schopné zaznamenat akustickou emisi způsobenou poškozením valivého elementu ložiska. Tato metoda kombinuje vysokofrekvenční akustiku s obálkovou analýzou ve frekvenční oblasti 200–450 kHz. Tento signál není charakterizován jako vibrační, spíše se považuje za zvuk o vysoké frekvenci. Snímače by měly být umístěny ideálně na ložisku, případně co nejbližší ložisku. [13]

V případě zvýšení hodnot SEE se ložisko monitoruje mnohem podrobněji (měření teploty, multiparametrické monitorování) a zkracují se intervaly měření. [17]

Jelikož signál snímá defekty v blízkosti snímače, je zapotřebí dobrá znalost monitorovaného stroje. Naměřené hodnoty SEE mohou být např. ovlivněny v případě, kdy k monitorovanému ložisku přiléhá převodovka. Následné naměřené hodnoty akustické emise mohou být součtem akustických emisí převodovky a ložiska. [13]

Všeobecně ale platí, že vyšší než normální hodnoty, indikují závadu na ložisku. Výrobci elektromotorů a ložisek často maximální přípustné hodnoty uvádí. [13], [17]

V případě, že není znám normální průběh signálu SEE, používá se následná stupnice:

- 0–3               Není detekována závada na ložisku
- 3–20             Mírný problém s mazáním, nízký defekt ložiska
- 20–100          Značné znečištění ložiska, závada ložiska
- >100            Závada na ložisku [13]

### 3.5 Servisní úkony ve vibrodiagnostice

Nedílnou součástí vibrodiagnostiky je i k ní vázaný servis strojů. Na základě vyhodnocení výsledků měření se vyhodnotí stav stroje a potřebné provozní operace, které napomohou revizi daného objektu. K nejběžnější a nejdůležitějším úkonům v této části patří ustavování hřídelů a provozní vyvažování rotujících objektů. [1], [4]

### 3.5.1 Ustavení hřídelů

Zvyšující se výroba klade neustále větší nároky na spolehlivost strojů. Nesouosost bývá nejčastější příčinou vzniku nežádoucích vibrací a to až v 70 % případů. Proto je důležité dbát na kvalitní souososti hřídelů už při prvním uvedení stroje do provozu a při následných kontrolách. [4], [5], [13], [17]

Pokud stroj pracuje za běžných podmínek, měly by osy rotace obou hřídelů procházet bodem, ve kterém se přenáší výkon z jednoho hřídele na druhý. [5], [13], [17]

Při provozu stroje se ustavení mění. Může k tomu vést řada důvodů, např. vnitřní pnutí materiálů způsobené vyšší teplotou, teplotní růst a následná roztažnost materiálů, zatížení a posuv ložiska. Při měření souososti se otáčí hřídelí ve stejném směru, jako při kterém rotuje stroj za provozu. Tolerance pro ustavování bývají předepsané většinou od výrobce. U každého stroje se tolerance mohou lišit, závisí na parametrech a rozměrech. [5], [13], [17].

Ustavování se dělí do tří fází. První fází je příprava, tzv. pre alignment, která obvykle zahrnuje volbu vhodné ustavovací metody, kontrolu teploty a možného teplotního nárůstu, kontrolu opotřebení spojky a hřídelů. Druhou fází je hrubé ustavení, tzv. rough alignment. V této fázi se za pomoci pravítek a vizuální metody zajišťuje alespoň přibližné zajištění stavu, kdy jsou hřídele soustrojí v ose. Třetí fází je přesné ustavení, tzv. precision alignment, kdy dochází k přesnému ustavení hřídelů a spojek za pomoci různých metod. [5], [13], [17]

V dnešní době existuje široká škála metod zajišťujících kvalitní ustavení stroje. Lze je rozdělit do těchto skupin:

- Mechanické metody (lístkové a kalibrované kužele, průměrná pravítka)
- Číselníkové úchylkoměry (reverzní obvodová metoda, čelně obvodová metoda)
- Laserové metody (za pomoci optiky a laseru), viz *Obr. 11* [13]

Laserové metody jsou v dnešní praxi nejpoužívanější díky své rychlosti a přesnosti. Laserové přístroje měří s přesností až 1/1000 mm. [13]

Výhody při ustavování strojů laserem jsou především snížení vibrací, prevence proti poruchám, zlepšení spolehlivosti a plánování v údržbě, minimální ztráty na produkci a snížení nákladů na náhradní díly. Nevýhodou mohou být vyšší pořizovací náklady při koupi daných přístrojů. [13], [17]



*Obr. 11 Laserové ustavování v praxi [29]*

### 3.5.2 Vyvažování

Provozní vyvažování rotorů je důležitou součástí vibrodiagnostiky. Provádí se, je-li na rotoru indikována nevyváha, viz 3.3.2. Většina rotorů bývá správně vyvážena při výrobě, ovšem během transportu a díky jiným teplotním podmínkám a jiným provozním vlivům může k nevyváženosti dojít. V dnešní době lze provádět korekci nevyváženosti rotoru přímo za provozu stroje. [1]

Moderní přístroje pro měření vibrací bývají vybaveny zabudovanými programy pro vyvažování. [1]

Pro vyvažování je důležitá příprava daného objektu, která zahrnuje vizuální prohlídku stroje, správné dotažení soustrojí a především vibrační analýzu, která určí, zda je skutečně problémem nevyváha. Po sběru dat z vibrační analýzy se určí o jaký typ nevyváhy se jedná (viz 3.3.2). Nevyváženost lze indikovat za předpokladu, že hodnota celkových vibrací a hodnota dominantní vibrace je rovna nebo se alespoň přibližuje otáčkové složce frekvence. [1]

Provozní vyvažování klade určité požadavky, mezi něž patří:

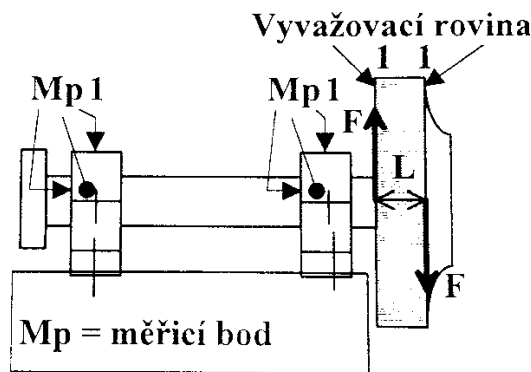
- možnost roztočení a zastavení rotoru,
- možnost přidávat nebo ubírat hmotu z rotoru (navarování, vyvrtávání),
- bezpečnost. [1]

Pro odstranění nevyváhy existuje několik metod, např. metoda vyvažování v jedné rovině a metoda vyvažování ve dvou rovinách. [1]

### **Metoda vyvažování v jedné rovině**

Způsob vyvažování v jedné rovině je vhodný, je-li průměr rotoru výrazně větší, než jeho axiální délka. Předpokládá se, že axiální rozměr rotoru je tak malý, že síly leží přibližně ve stejné rovině. Na rotoru tedy zůstává pouze statická nevyváha. Vyvažovací rovina je kolmá na osu hřídele rotoru, kam se umísťují zkušební závaží. Důležitá je i volba měřicího bodu. Ten by měl být zvolen ideálně na ložiskovém domku v blízkosti rotoru, viz Obr. 12. [1]

Metoda vyžaduje nejprve změřit úroveň vibrací ve zvoleném měřicím bodě. Ve vybrané vyvažovací rovině se umístí zkušební závaží a opět se změří vibrace v předem zvoleném měřicím bodě. Přístroj na základě vektorové vyvažovací metody určí umístění vyvažovacího závaží o určité hmotnosti. Nakonec se opět změří vibrace. Jestliže je postup správně dodržen, hodnota vibrací nebude indikovat větší nevyváhu. Bude-li nevyváženost stále zřetelná, lze postup opakovat nebo upravit polohu vyvažovacího závaží. [1]

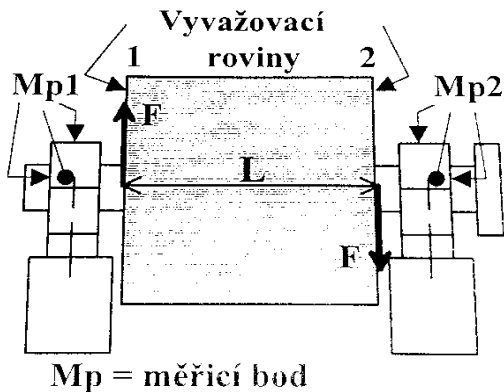


Obr. 12 Vyvažování v jedné rovině [1]

### Vyvažování ve dvou rovinách

Způsob vyvažování ve dvou rovinách je vhodný, pokud je indikována statická i dynamická neváha rotoru a pokud má rotor značnou axiální délku. Aby bylo možné uskutečnit tento typ vyvažování, je zapotřebí zvolit si 2 měřicí body (na ložiscích z jedné a druhé strany rotoru. [1]

Metoda vyžaduje změření vibrací v obou zvolených bodech, kde jsou vibrace důsledkem neváhy. Následně se do jedné roviny umístí zkušební závaží a v obou bodech se změří hodnoty vibrací po umístění prvního zkušební závaží. V druhé vyvažovací rovině se umístí závaží a opět se změří úroveň vibrací. Následně se vypočítá umístění vyvažovacích závaží do obou rovin a tato závaží o známé hmotnosti se umístí do vypočítaných poloh. Nakonec se opět změří úroveň vibrací v obou rovinách a případně se upraví poloha závaží. [1]



Obr. 13 Vyvažování ve dvou rovinách [1]

## 4 Monitorování stavu strojů

Monitorování vibrací je důležité nejen z hlediska dlouhodobé kvalitní údržby strojů, ale výrobci ložisek a strojů společně s prodejem vyžadují diagnostické měření ohledně záruční lhůty v případě poruchy. Monitorování stavu strojů se v dnešní praxi rychle vyvíjí. Staré metody jsou nahrazovány novými, rychlejšími a přesnějšími. Trend v poptávce podniků po vibrační diagnostice roste. [4], [5], [13], [33]

Technická diagnostika slouží k určení technického stavu objektu, jeho provozuschopnosti a k predikci poruchy, která by zapříčinila ukončení funkčnosti daného objektu. Je používán soubor metod pro sledování signálů a měření jejich odezev. Stav objektů se zkoumá pomocí diagnostických prostředků. Těmito prostředky mohou být senzory, měřicí přístroje, testery a řídicí jednotky. Tyto prostředky společně s diagnostickými algoritmy, potřebným softwarem s matematickými modely tvoří diagnostické systémy. Tyto systémy slouží k řadě diagnostických procesů. Mohou sloužit k vyhodnocování stavu strojů pomocí např. termodiagnostiky, tribodiagnostiky a především vibrodiagnostiky. [13], [16], [17], [18], [20]

Stav strojů lze monitorovat off-line a online. Za off-line monitorování je považováno plánované měření v určitých předem stanovených intervalech, k jehož výsledkům není okamžitý online přístup. Online systémy fungují na principu měření, vyhodnocování a ukládání dat do paměti, ke kterým je následně okamžitý přístup pomocí ethernetu a internetu. [6], [10], [13], [16], [17]

### 4.1 Off-line monitorování

Off-line monitorování stavu strojů pomocí vibrační diagnostiky se vyznačuje sledováním a průběžným měřením stavu stroje. Jak bylo výše uvedeno v kapitole 5.2, diagnostika v praxi vyžaduje určitý obecný návrh vibrodiagnostického systému. [13], [16]

Důležité je definování samotného diagnostikovaného objektu (stroje). Ke správné metodice je důležité určení provozní spolehlivosti, znalost technické dokumentace, vytížení a důležitost stroje pro výrobu a vyhodnocení možných přínosů po nasazení metod vibrační diagnostiky. [19]

Po výběru strategických objektů pro diagnostiku je důležité zpracování metodiky měření.



Ke správné metodice je zapotřebí volba vhodných měřicích míst a především jejich správné označení pro následující měření. Pro správnou a korektní volbu měřicích míst je zapotřebí dobrá znalost stroje a volba vhodné metody měření, viz 3.4. Po výběru vhodné měřicí metody přichází na řadu určení druhu snímačů vibrací, způsobů uchycení a výběr měřicích směrů (vertikální, horizontální, axiální). Ke správnému postupu při měření je samozřejmě důležité určení měřicího přístroje a způsobu monitorování. Při off-line diagnostice se volí časový cyklus pro měření vibrací. Toto časové okno je navrženo diagnostikem. Ovšem závisí především na podniku, který si službu objednává. Časové cykly pro měření vibrací bývají většinou týdenní, měsíční a čtvrtletní. Po každém měření se vytvoří protokol o stavu strojů, z kterého se následně vyvodí další postupy. Záleží na důležitosti, vytíženosti a strategičnosti stroje. [13]

Výhodou off-line měření je nižší cena oproti online diagnostice. Nevýhodou je nemožnost měření vibrací v reálném čase.

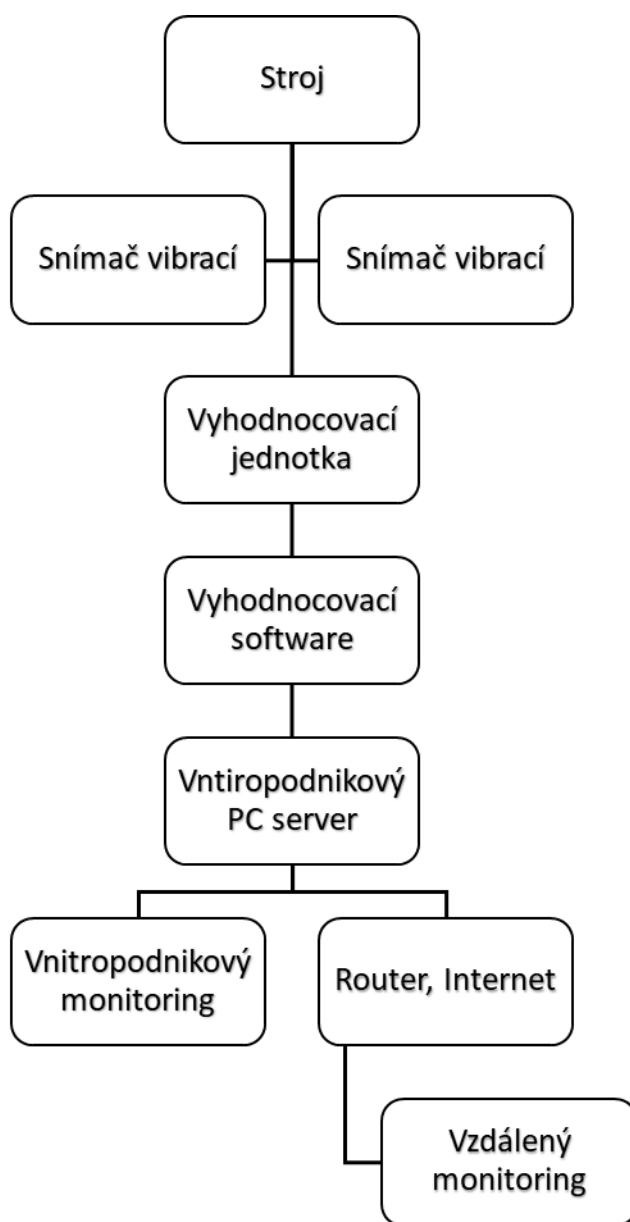
## 4.2 Online monitorování

Vibrační diagnostika obecně přispívá k efektivnímu plánování údržby a zvýšení provozní spolehlivosti výrobních zařízení. Při online diagnostice se používá monitorovací systém, který měří a vyhodnocuje vibrace trvale či v určitých intervalech [24], [25]

Online diagnostické systémy (viz Obr. 14) se používají zejména pro tzv. nejstrategičtější stroje, jejichž neplánované odstavení způsobí výrazný pokles výroby a tedy i zisků. V dnešní době jsou tyto systémy cenově dostupnější, než dříve. Jsou ovšem stále dražší, než off-line systémy. Neplánované odstávky se tedy výrazně omezí. Díky online systémům se také snižují náklady na skladovací prostory a zvyšuje se bezpečnost při provozu. Online systémy umožňují spolehlivé upozornění na kritické situace, monitorování nepřístupných měřicích míst a hlavně analýzu stroje vzdáleně (tzv. tele-diagnóza). [24], [25], [26]

Nesporným kladem online vibrodiagnostiky je nepřetržité měření v reálném čase a kontrola technického stavu bez nutnosti lidské obsluhy. V případě náhlého zhoršení provozních parametrů, které nemusí být pochůzkovou formou diagnostiky včas zachyceno, je pomocí online diagnostického systému závada identifikována ihned. [6]

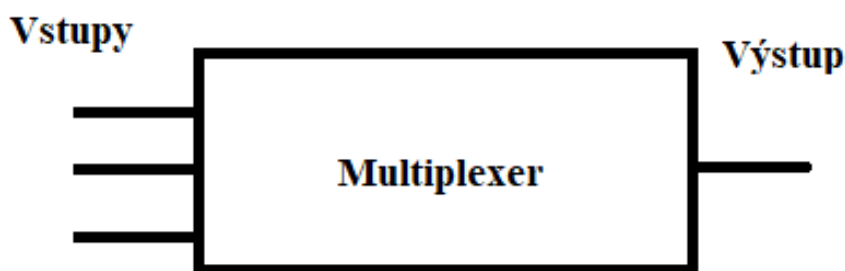
Velkým přínosem může být i následná integrace naměřených dat do řídicího systému. Výhoda tkví v tom, že pokud např. systém vyhodnotí závadu na ložisku s potenciálem brzké havárie, řídicí systém sníží otáčky stroje, aby závadě dočasně předešel. Vzdálený přístup k informacím a datům umožňuje řadu výhod. Moderní monitorovací systémy upozorní uživatele chybovým hlášením např. pomocí emailu, či SMS zprávy. [25], [26]



Obr. 14 Obecné schéma online diagnostického systému

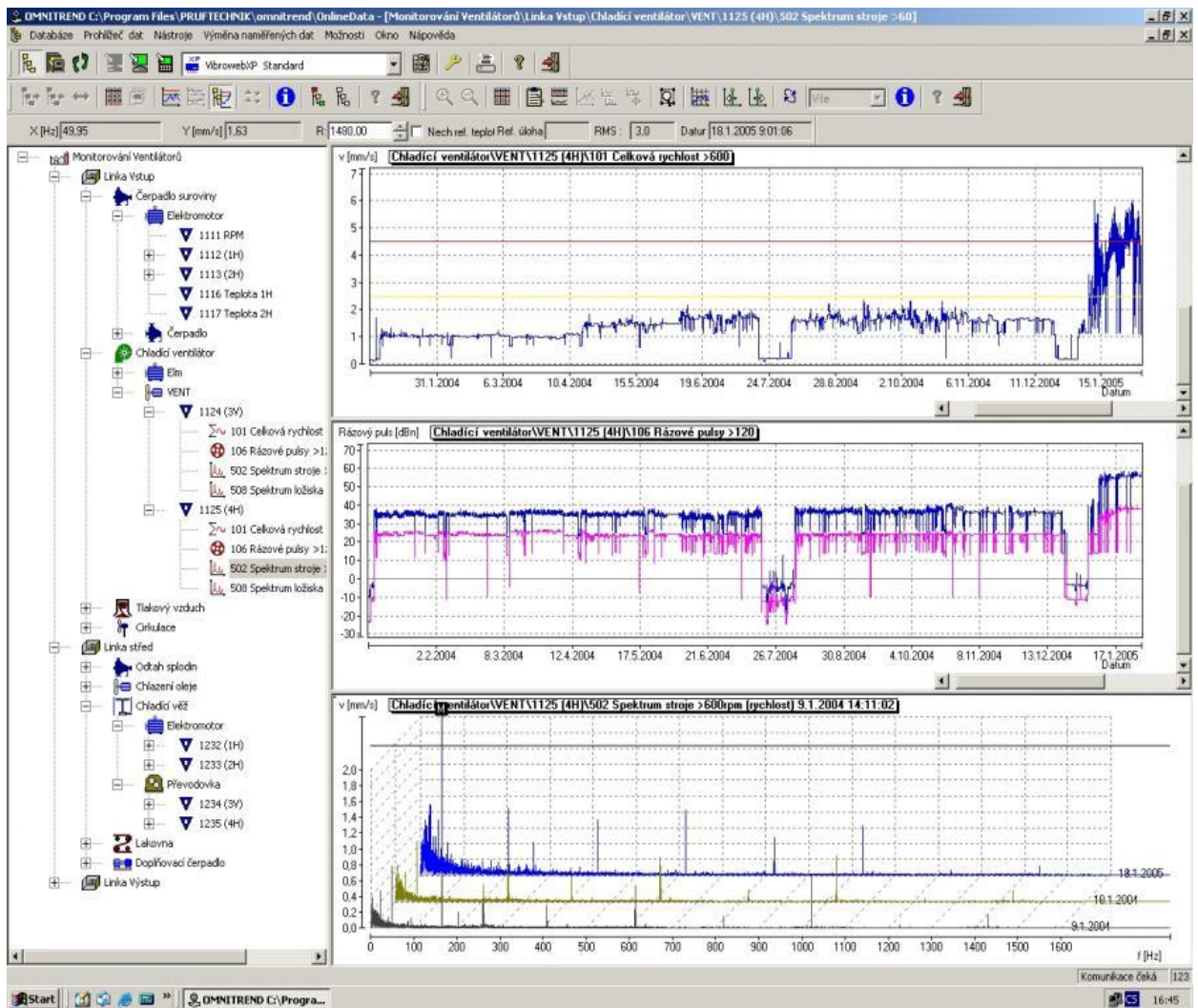
Naměřené hodnoty putují do řídicí jednotky a po vyhodnocení jsou výsledky následně pomocí převodníků přeneseny po určité lince do počítače s potřebným softwarem. Naměřená data se poté ukládají do paměti. Nainstalovaný software se používá pro konfiguraci měřicích míst a k programování cyklů měření. Program také vyhodnocuje, dokumentuje a archivuje naměřené hodnoty, které následně převádí do potřeb uživatele (trendová analýza, časový signál, frekvenční spektrum) viz 3.4. [24], [25], [26]

V oblasti online vibrodiagnostiky jsou důležité tzv. multiplexery, které fungují na principu obvodu s několika signálovými vstupy, ale pouze s jedním výstupem (viz Obr. 15). Signálovými vstupy může být připojeno několik snímačů, ovšem výstup je pouze jeden. Aby byla nasbírána data ze všech snímačů, multiplexer v jednotkách milisekund mění a odesílá informace z každého snímače zvlášť. Vzhledem k nízkým časovým intervalům se tato technologie považuje za stabilní trvalý online monitorovací systém. [15], [26]



*Obr. 15 Multiplexer - schéma*

K realizaci online systému je zapotřebí tedy určitý hardware a software. Hardware zahrnuje potřebné snímače, kabeláž a především řídicí a vyhodnocovací jednotku, která obsahuje analogové vstupy, digitální výstupy a vstupy, určitý frekvenční rozsah a rozlišení pro definovaná měření, operační paměť, ethernet/internetové rozhraní a samozřejmě počítač s monitorem pro grafické znázornění výsledků. Z hlediska softwaru je zapotřebí určitý program většinou dodávaný společně s celou sadou online diagnostického systému (viz Obr. 16). Většina softwarů bývá kompatibilní s ostatními přístroji pro vibrační diagnostiku zakoupenými od stejné firmy. [6], [19], [26]



Obr. 16 OMNITREND - software pro online diagnostiku [28]

Mezi největší výhody online systémů tedy patří měření vibrací v reálném čase, možnost měření vibrací na nedostupných místech pro pochůzková měření a výrazné snížení pracovní síly. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena online systému. Přestože oproti minulým letům cena výrazně klesla, stabilní monitorování stále patří mezi dražší diagnostické systémy. [6], [13], [19] [26]

## 5 Praktická měření

Pro praktická měření byly vybrány tři shodné ventilátory poháněné elektromotory přes řemenové převody. Stroje slouží k chlazení dna lázně vany ve sklárně. Zdokumentované měření bylo prováděno v časovém rozmezí od 25. 4. 2018 do 23. 10. 2018.

### 5.1 Použité přístroje pro měření

Měření vibrací bylo prováděno pomocí piezoelektrických akcelerometrů trvale ukotvených na ložiscích motorů a ventilátorů. Snímače jsou přivedeny do řídicí a vyhodnocovací jednotky (viz Obr. 17) a naměřené hodnoty posílány přes interní síť podniku a internetu do počítače pomocí online diagnostického systému. Výstupy byly pro všechny tři stroje efektivní hodnoty rychlosti vibrací (viz 3.1.4) a SPM metoda vyhodnocování stavu valivých ložisek, viz 3.4.2.



*Obr. 17 Skříň vyhodnocovací jednotky stroje č. 1*

### 5.2 Stroje

Stroje byly vybrány na základě neustále zhoršujícího se trendu celkové mohutnosti vibrací. Všechny tři stroje mají shodné výkony i rozměry. Slouží k chlazení dna lázně vany ve sklárně a jsou tedy důležitým prvkem ve výrobě podniku. Jelikož byly stroje vzhledově, výkonově a rozměry totožné, je na Obr. 18 fotografie stroje číslo dva. V Tab. 2 jsou uvedeny základní technické parametry strojů.

*Tab. 2 Technické parametry strojů*

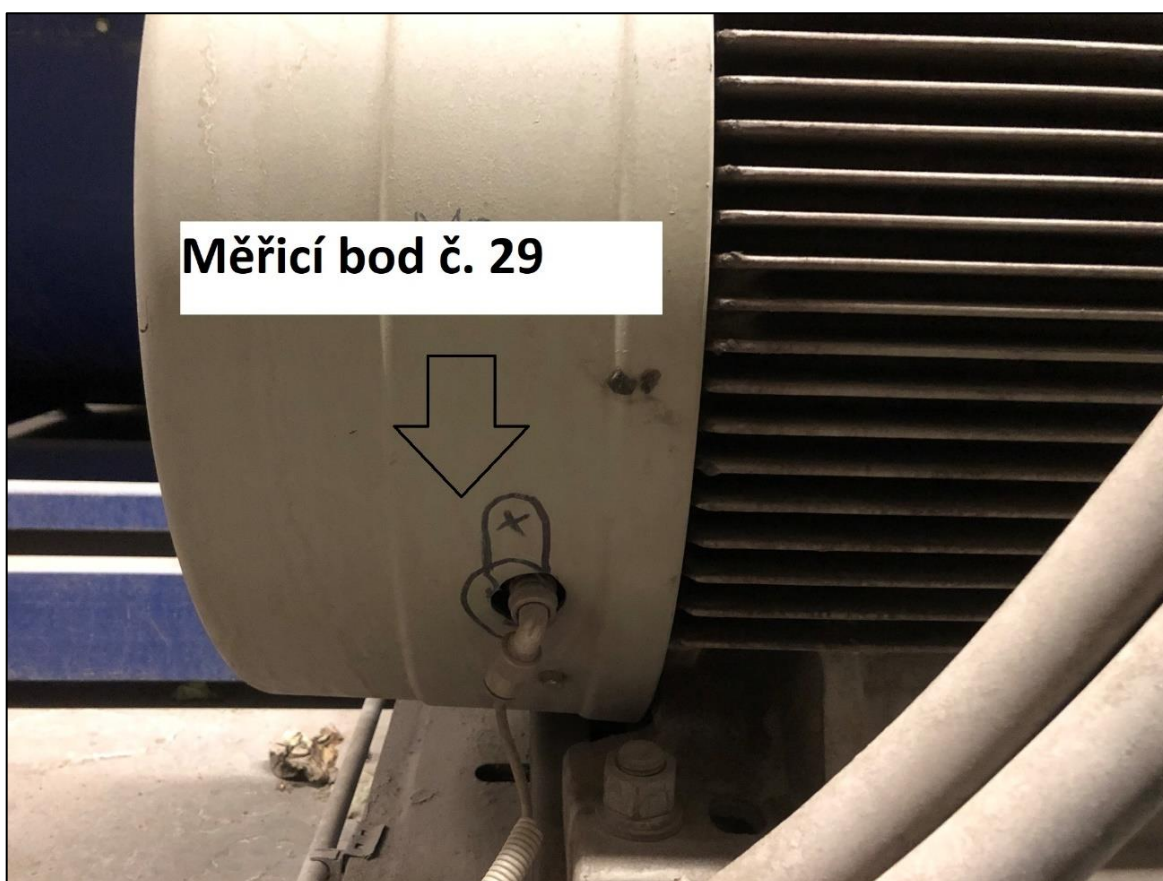
Rok výroby:	2007
Hmotnost ventilátoru:	4000 kg
Kapacita:	195.000 m <sup>3</sup> /h
Tlak:	1.379 Pa
Otáčky ventilátoru:	828 ot/min
Otáčky motoru:	1.488 ot/min
Výkon motoru:	110 kW
Typ řemenu:	SPC 6700



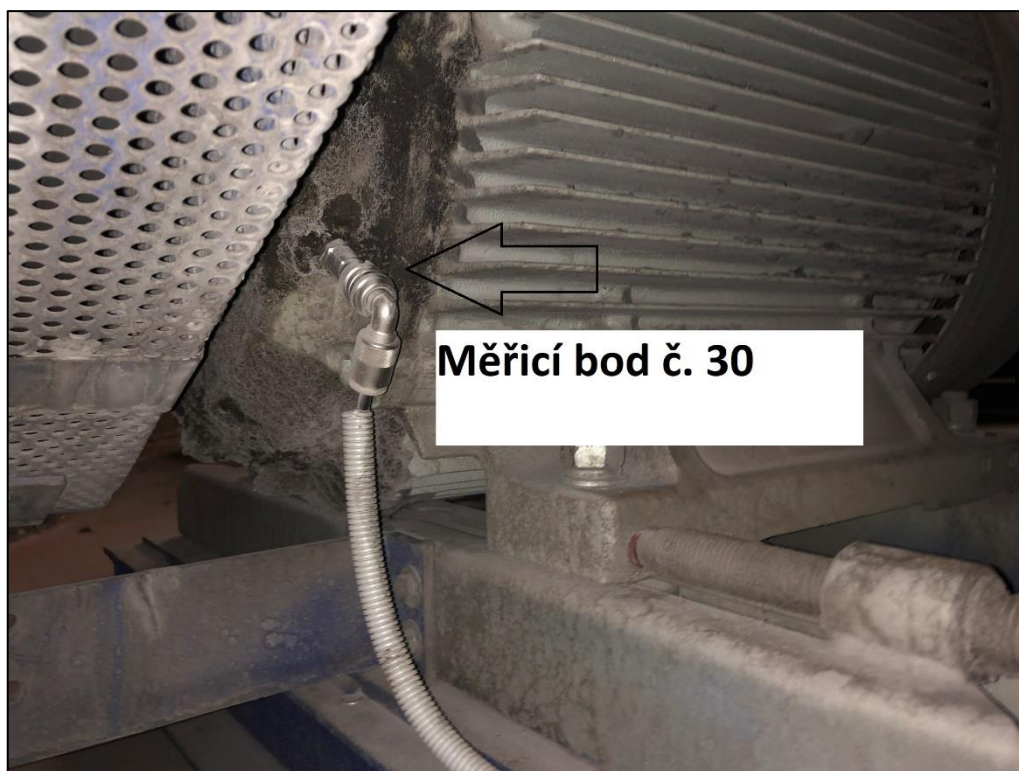
*Obr. 18 Fotografie stroje č. 2*

### 5.3 Měřicí body

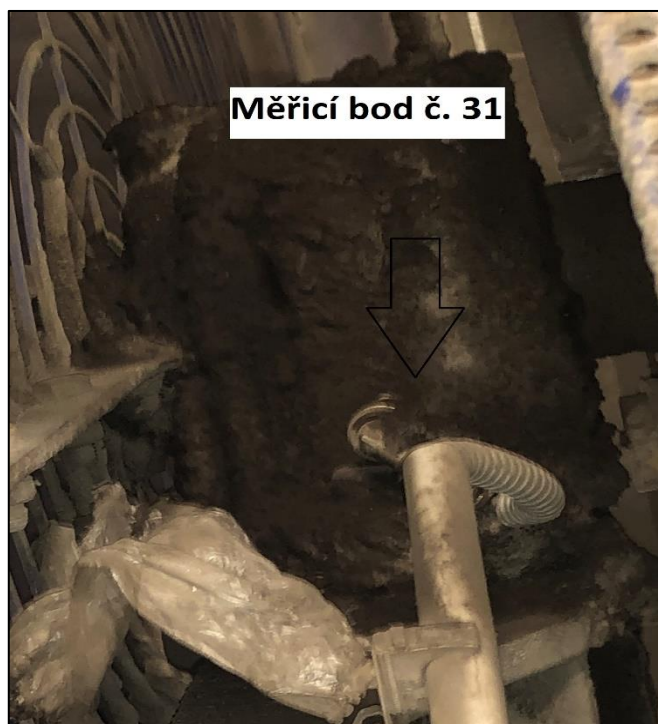
Pro měření byly použity piezoelektrické akcelerometry připevněné navrtáním převážně v horizontálním směru k domkům valivých ložisek strojů. Každý stroj má tedy 4 valivá ložiska. Dvě valivá ložiska elektromotoru a dvě valivá ložiska na hřídeli ventilátoru. Jelikož měření probíhalo na třech strojích, bylo nainstalováno celkem dvanáct snímačů. Naměřená data ze snímačů byla přiváděna pomocí kabeláže do vyhodnocovacích jednotek. Každý stroj měl vlastní vyhodnocovací jednotku. Měřicí body stroje č. jedna jsou označeny čísly vzestupně od č. 29 po č. 32. Měřicí body stroje č. 2 jsou označeny čísly 33 až 36 a měřicí body stroje č. 3 jsou označeny čísly 37 až 40. Snímače jsou na každém stroji umístěny na shodných místech, a proto jsou na následujících obrázcích vyfocené měřicí body pouze stroje číslo jedna.



*Obr. 19 Měřicí bod č. 29*

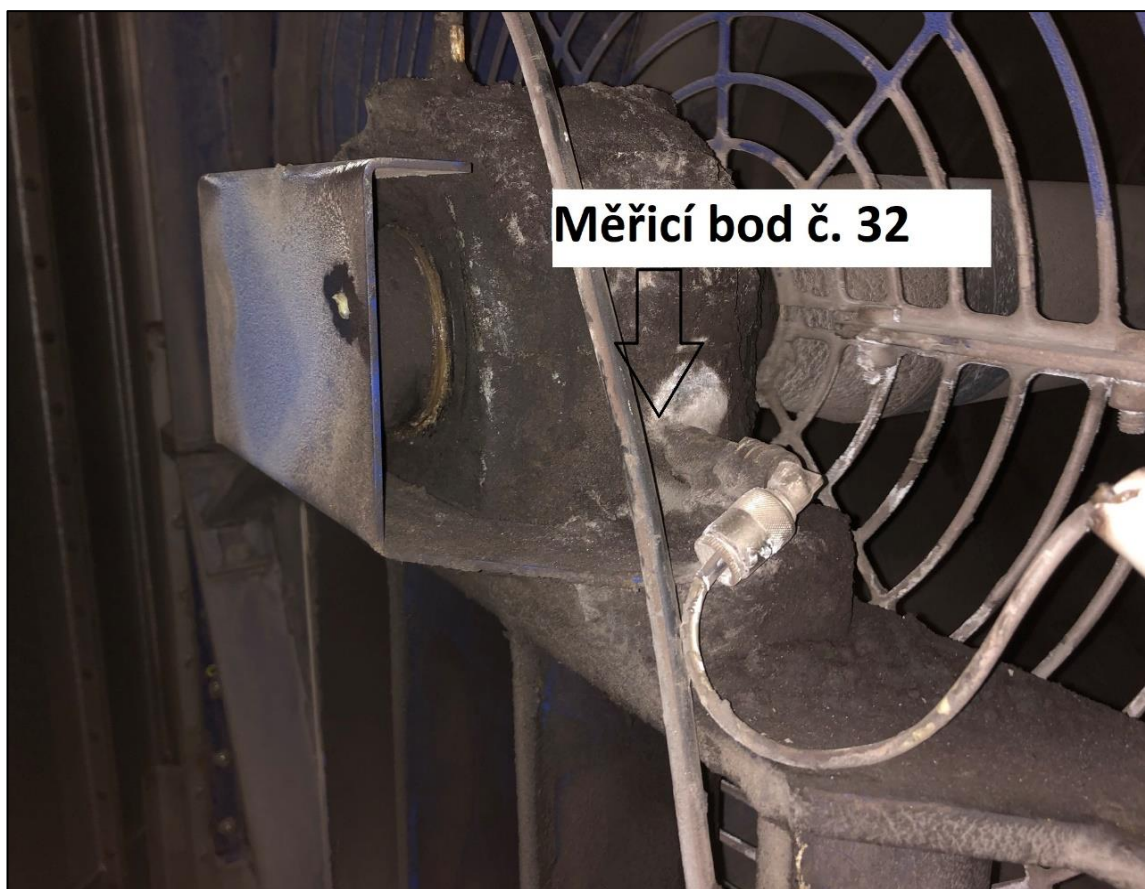


*Obr. 20 Měřicí bod č. 30*



*Obr. 21 Měřicí bod č. 31*

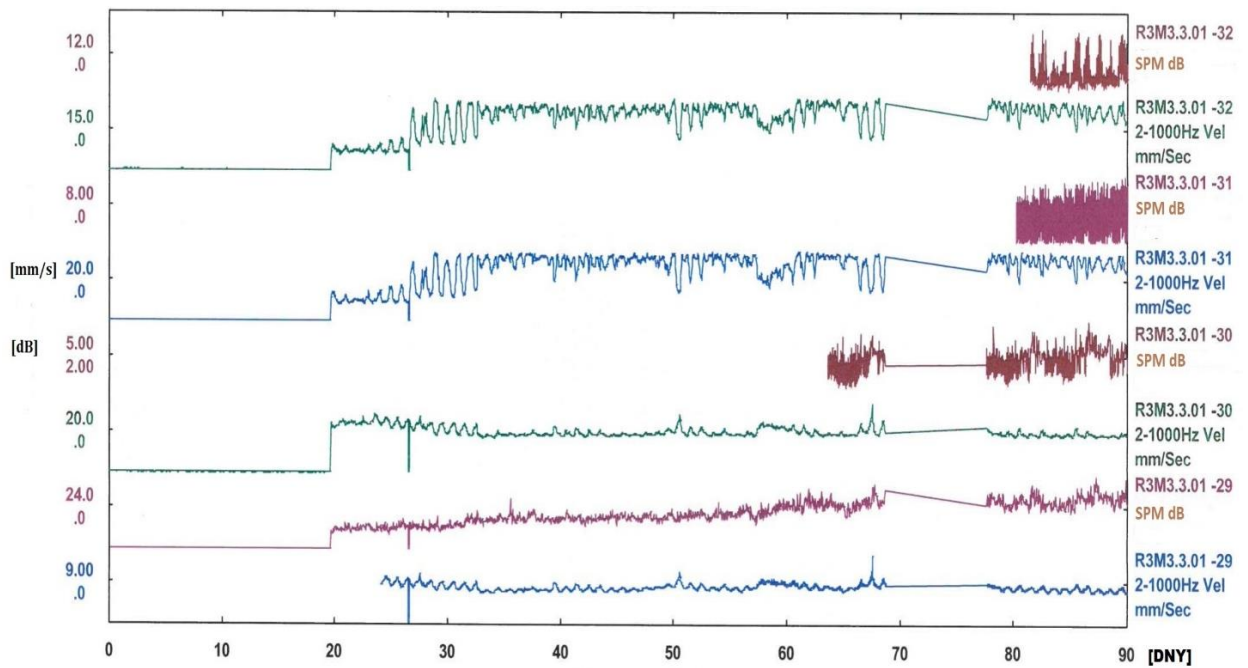




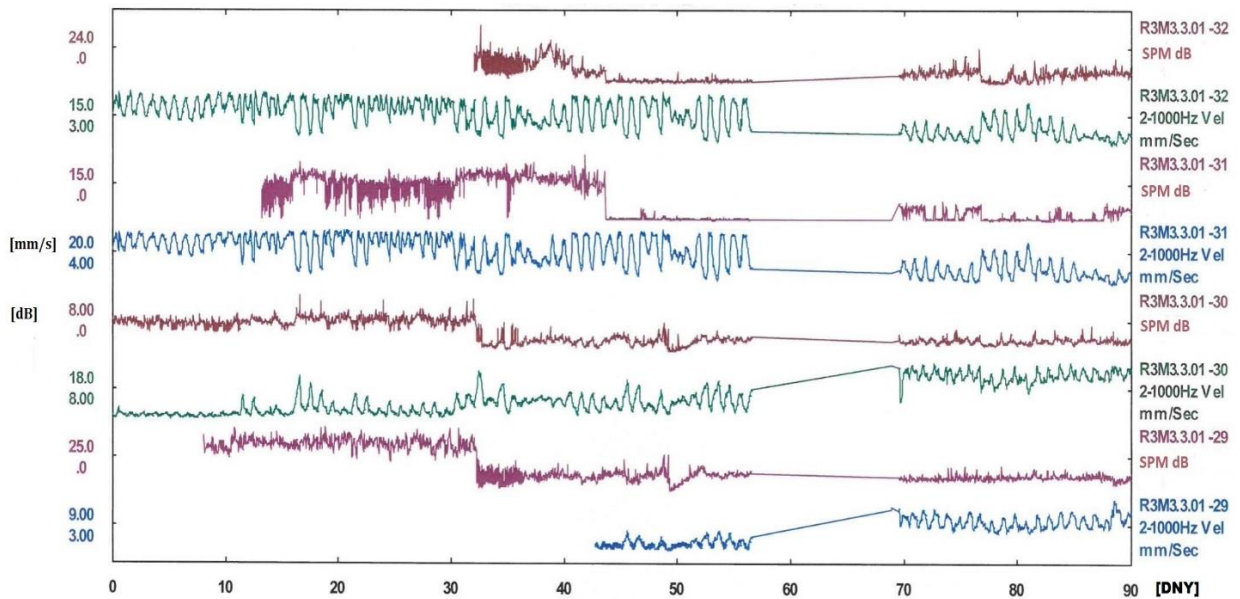
*Obr. 22 Měřicí bod č. 32*

## 5.4 Výsledky

Na následujících snímcích jsou vyobrazeny efektivní hodnoty rychlosti vibrací v mm/s a ložiskové hodnoty naměřené pomocí SPM metody v dB. Veškeré hodnoty jsou uvedeny v trendu v závislosti na čase. Obr. 23 uvádí trend naměřených hodnot stroje číslo jedna v časovém rozmezí od 25. 4. 2018 do 24. 7. 2018. Obr. 24. přímo navazuje a uvádí trend v časovém rozmezí od 25. 7. 2018 do 23. 10. 2018. Obr. 25 uvádí trend naměřených hodnot stroje číslo 2 v časovém rozmezí od 25. 4. 2018 do 24. 7. 2018 a Obr. 26 opět přímo navazuje a uvádí trend naměřených hodnot v časovém rozmezí od 25. 7. 2018 do 23. 10. 2018. Obr. 27 uvádí trend naměřených hodnot v časovém rozmezí od 25. 4. 2018 do 24. 7.2018 a obr. 28 opět přímo navazuje a uvádí trend naměřených hodnot v časovém rozmezí od 25. 7. 2018 do 23. 10. 2018.

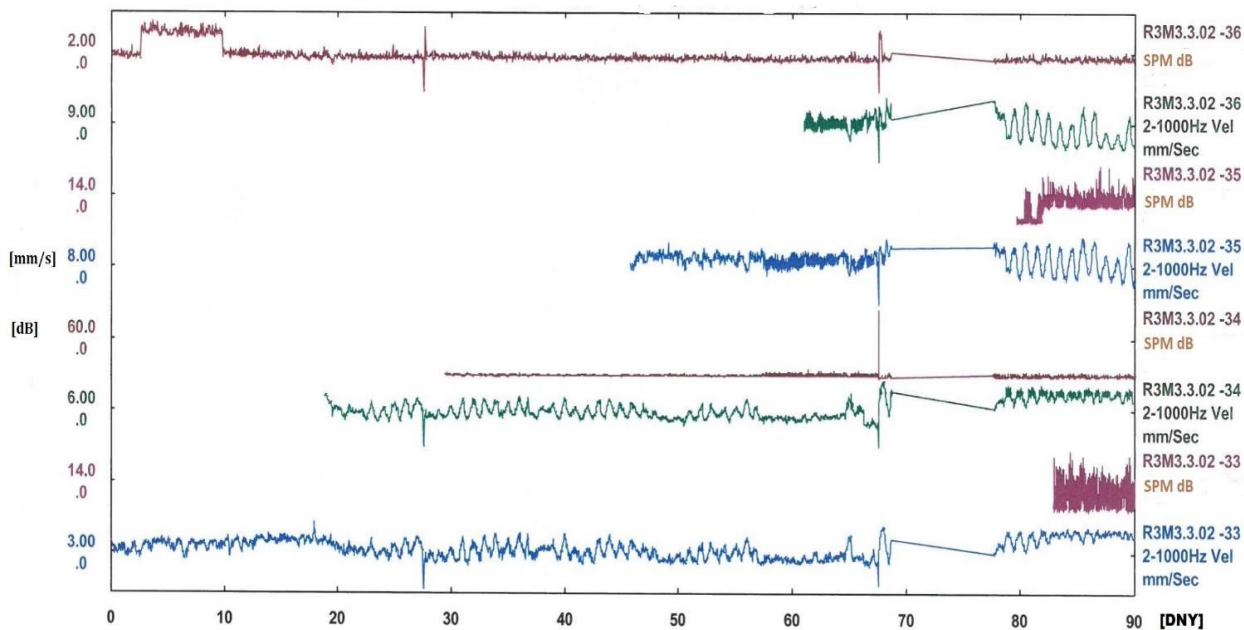


Obr. 23 Trend naměřených hodnot stroje č. 1 (25. 4 - 24. 7. 2018)

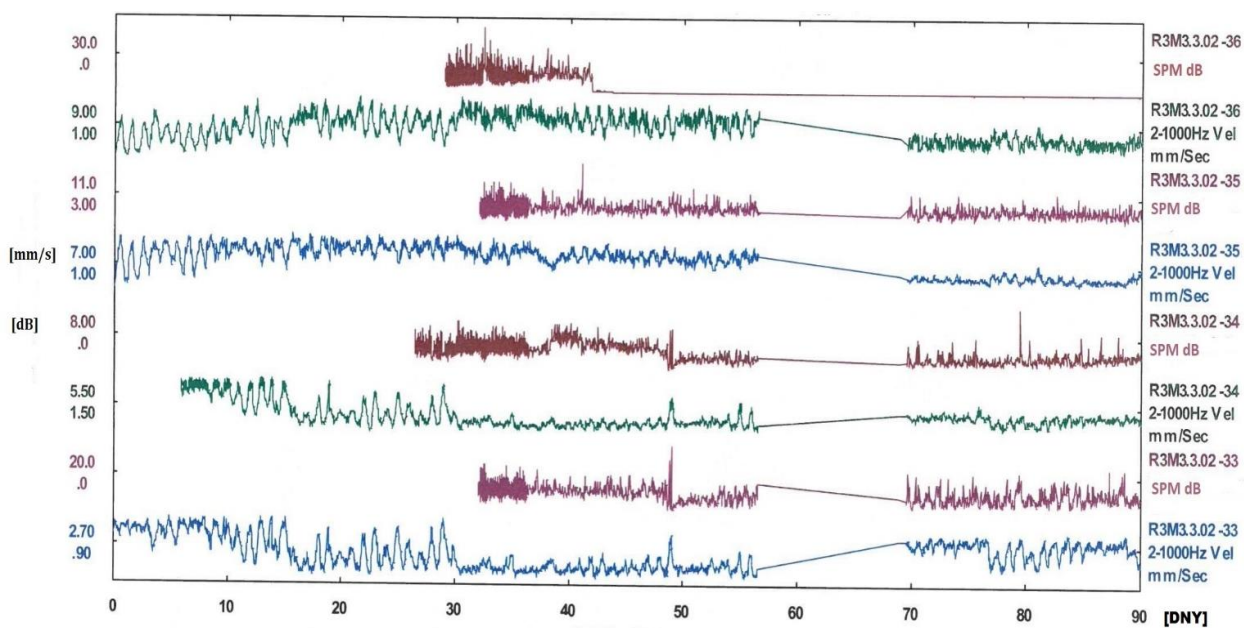


Obr. 24 Trend naměřených hodnot stroje č. 1 (25. 7 - 23. 10. 2018)

- SPM [dB] - Stav valivých ložisek, viz 3.4.2
- $V_{ef}$  [mm/s]- Efektivní hodnota (RMS), viz 3.1.4

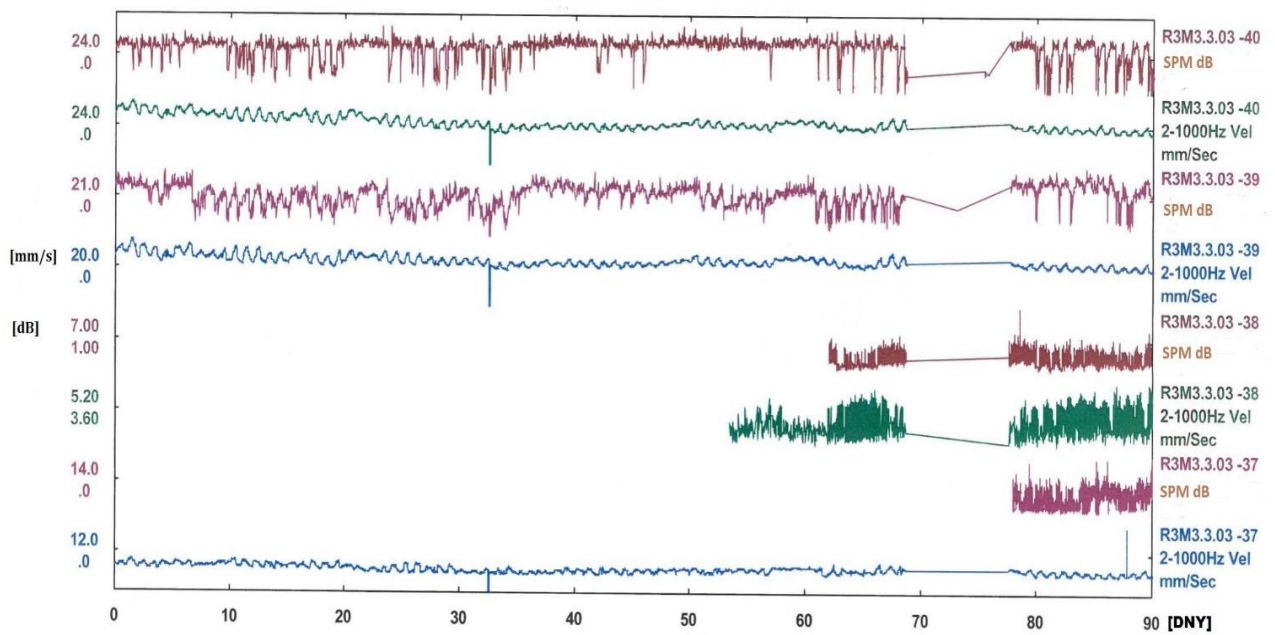


Obr. 25 Trend naměřených hodnot stroje č. 2 (25. 4. - 24. 7. 2018)

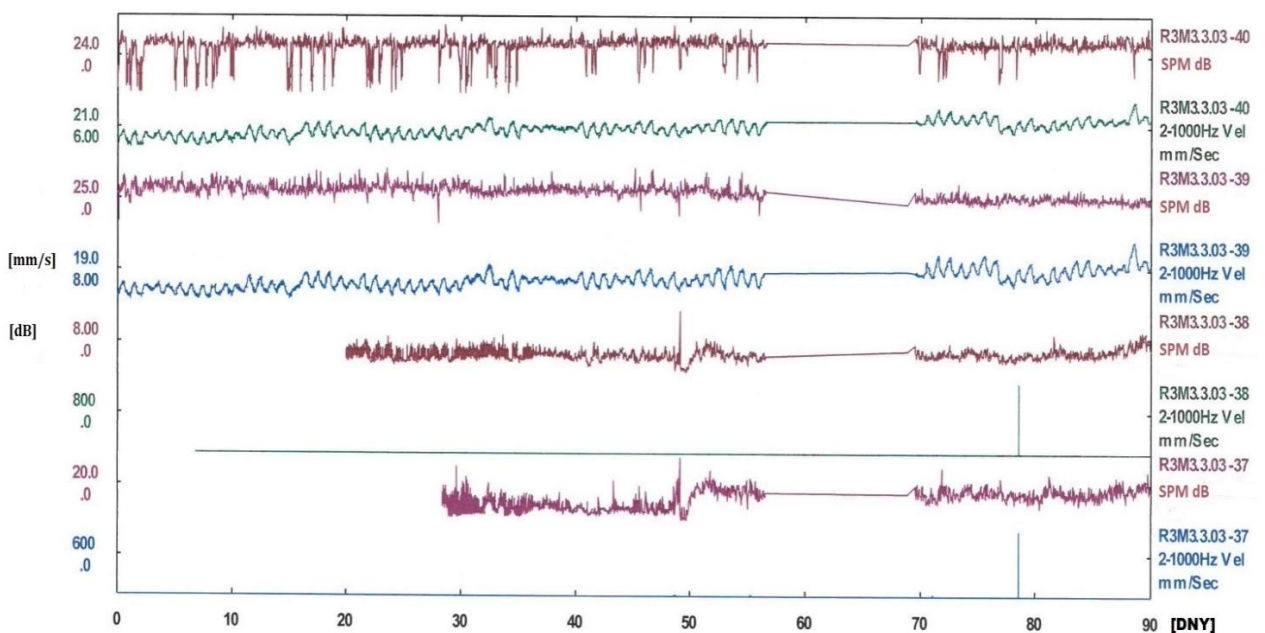


Obr. 26 Trend naměřených hodnot stroje č. 2 (25. 7 - 23. 10. 2018)

- SPM [dB] - Stav valivých ložisek, viz 3.4.2
- $V_{ef}$  [mm/s]- Efektivní hodnota (RMS), viz 3.1.4



Obr. 27 Trend naměřených hodnot stroje č. 3 (25. 4. - 24. 7. 2018)



Obr. 28 Trend naměřených hodnot stroje č. 3 (25. 7 - 23. 10. 2018)

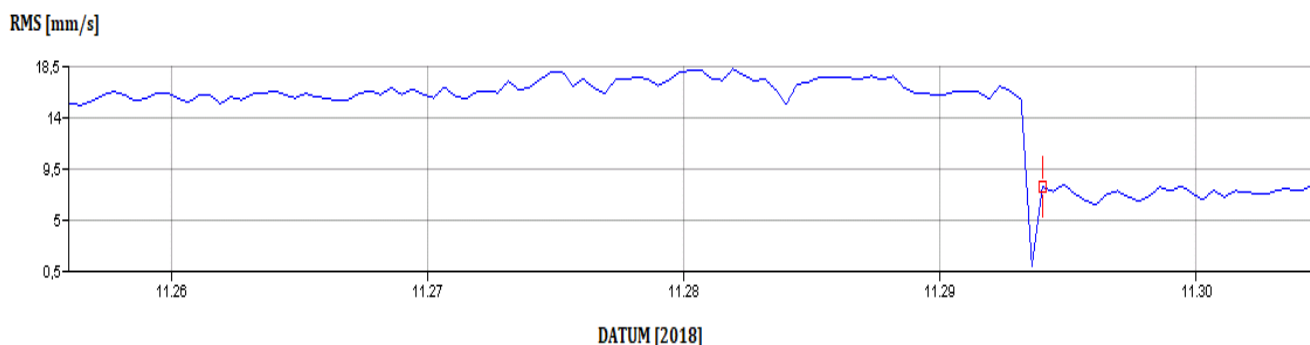
- SPM [dB] - Stav valivých ložisek, viz 3.4.2
- $V_{ef}$  [mm/s]- Efektivní hodnota (RMS), viz 3.1.4

## 5.5 Analýza naměřených hodnot

Z Obrázků 23 až 28 je patrné, že nejvyšší hodnoty vibrací vykazuje stroj číslo jedna. Podle normy ČSN ISO 10816-3 se naměřené hodnoty vibrací pohybují v nebezpečném pásmu D. Celková mohutnost vibrací výrazně kolísá. Ventilátor pravidelně dosahuje hodnot od 6 mm/s do 17 mm/s ve stejném bodě s odstupem jeden den. Vždy okolo sedmnácté hodiny dosahuje maximálních hodnot a okolo osmé hodiny minimálních. Viditelná změna stavu nastala 7. 9. 2018 okolo deváté hodiny. Vibrace ventilátoru se snížily přibližně o 3 mm/s, ale vibrace elektromotoru vzrostly přibližně o 2 mm/s.

Ventilátor tedy nebyl provozně bezpečný a bylo doporučeno provozní vyvážení oběžného kola ventilátoru. Amplitudu vibrací elektromotoru ovlivňují vysoké vibrace ventilátoru.

Dne 29. 11. došlo k provoznímu vyvážení oběžného kola ventilátoru. Hodnoty vibrací zaznamenaly mírné zlepšení. Hodnoty měřené na ložisku č. 32 po provozním vyvážení rotoru zlepšily z 16 mm/s na 8 mm/s (viz Obr. 29). Na ventilátoru zůstalo patrně přítomné mechanické uvolnění, které zjevně brání dalšímu snížení vibrací. Dalším důvodem způsobujícím zvýšené hodnoty vibrací mohou být nečistoty a prach usazující se na oběžném kole. Bylo tedy doporučeno průběžné čištění a omývání oběžného kola.



Obr. 29 Trend efektivních hodnot rychlosti vibrací před a po vyvážení rotoru dne 29.11.

Stroj č. 2 vykazuje vzhledem k sousedním strojům nízké hodnoty vibrací, jelikož je povětšinu času odstaven. Stroj č. 2 je používán jako rezervní. Na Obr. 25 až 26 je patrné zvýšené vibrační rušení díky přenosu vibrací blízkých strojů s vysokými amplitudami vibrací.

Naměřené hodnoty vibrací stroje číslo tři na ložiscích č. 37 a 38 elektromotoru se pohybují do 5 mm/s. Jsou patrně nižší, než hodnoty na stroji číslo jedna, ale podle ČSN ISO 10816-3 leží v pásmu C. Na ložiscích ventilátoru č. 39 a 40 se efektivní hodnoty rychlosti vibrací pohybují do 16 mm/s. Leží tedy v pásmu D. Příčinou vysokých vibrací je oběžné kolo ventilátoru a tedy jeho nevyváženost. Ventilátor není provozně bezpečný. Doporučení ke snížení vibrací je, obdobně jako u stroje číslo jedna, provozní vyvážení oběžného kola ventilátoru a vyčištění ventilátoru od nečistot a prachu.

Ložiskové hodnoty naměřené pomocí SPM metody neindikovaly pro žádný stroj zhoršený stav valivých ložisek.

## 6 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala metodami vibrační diagnostiky. Pro objasnění dané problematiky byly nejdříve popsány základní informace o vibracích a jejich vlivech na dynamické namáhání strojů. Dále byly vysvětleny a uvedeny základní typy snímačů, jejich umístění a připevňování. Následující kapitola popisuje vybrané metody vibrační diagnostiky a jejich vhodné použití v praxi. V následující části se práce věnuje základním servisním úkonům ve vibrodiagnostice. Byly popsány metody ustavování hřídelů a vyvažování rotoru v jedné a ve dvou rovinách. Dále práce přechází na část zabývající se monitorováním stavu strojů a diagnostickými systémy pomocí off-line a online metod. Poslední část práce se zaměřuje na praktická měření tří elektromotorů a ventilátorů pomocí online diagnostického systému.

Z výsledků měření je zřejmé, že vysoké hodnoty vibrací jsou způsobeny téměř neustálou nevyváhou ventilátorů. Jelikož hmotnost každého ventilátoru činí 4000 kg, působí na stroj velké dynamické síly a v případě sebemenšího nevyvážení dochází ke zvýšení hodnot vibrací. Důvodem časté nevyváhy rotorů je to, že stroje slouží ke chlazení dna lázně vany a proto pracují v prašném prostředí. Na povrch lopatek se neustále nanášejí nečistoty včetně prachu a mastnoty, které mají za následek zmíněnou nevyváhu. Proto bylo doporučeno podnikovému týmu údržby měsíční očištění lopatek ventilátoru. Jelikož je jeden ze strojů využíván jako rezervní, nemusí docházet k odstavení provozu.

Z informací obsažených v bakalářské práci je zřetelné, že vibrodiagnostika je nedílnou součástí proaktivní údržby. Její zásadní výhoda spočívá především v univerzálnosti použití k určení stavu stroje bez nutnosti demontáže. V posledních letech se vyvinuly moderní online diagnostické systémy, které sice nevyžadují téměř žádnou obsluhu, ale je důležité si uvědomit, že lidský faktor je ve vibrační diagnostice nezaměnitelný.

## 7 Seznam použitých zdrojů

- [1] ANDERSSON, Jan. *Základní příručka o vibracích*. Norrköping, Sweden: VMI AB, 1997.
- [2] ANDREEV, Y S, N A DEMKOVICH, R M ISAEV, A A TSELISCHEV a S D VASILKOV. Effect of the Method for Treatment of the Functional Surface of a Piezoelectric Vibration Sensor on its Sensitivity. *Procedia Engineering* [online]. 2017, 176, 96–106. ISSN 1877-7058. Zdroj: doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.277>.
- [3] BARTŮNĚK, Filip a kol. [www.fyzika007.cz](http://www.fyzika007.cz) [online]. [cit. 28.10.2018]. Dostupný na WWW: <http://www.fyzika007.cz/mechanicke-kmitani-a-vlneni/slozene-kmitani>.
- [4] Beneš Š.: *Technická diagnostika*, skripta, Liberec 1997
- [5] BILOŠ, Dr. Ing. Jan a Ph.D. MGR. ING. ALENA BILOŠOVÁ. *Vibrační diagnostika*. In: *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část Vibrační diagnostika*. 2012, s. 142. ISBN 9788024827551.
- [6] BOČEK, P.: *Prvky řídicích systémů v podání ifm electronic*. Automa, 2014, č. 1, s. 54–56.
- [7] BROCH, Jens Trampe. *Mechanical vibration and Shock measurements*. 2.Dánsko: Brüel and Kjaer, 1984, 3. ISBN 87-87355-34.
- [8] ČSN ISO 10816-3 (011412). *Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech – Část 3: Průmyslové stroje se jmenovitým výkonem nad 15 kW a jmenovitými otáčkami mezi 120 1/min a 15000 1/min při měření in situ*. Praha, 2010.
- [9] EKOSOFTWARE. [www.ekosoftware.cz](http://www.ekosoftware.cz) [online]. [cit. 5.2.2019]. Dostupný na WWW: <https://www.ekosoftware.cz/analyza-trendu>.
- [10] GIERLAK, Piotr, Andrzej BURGHARDT, Dariusz SZYBICKI, Marcin SZUSTER a Magdalena MUSZY. On-line manipulator tool condition monitoring based on vibration analysis [online]. 2017, 89, 14–26. Dostupné z: doi:10.1016/j.ymssp.2016.08.002.



- [11] GRIPP, JAB a DARADE. Vibration and noise control using shunted piezoelectric transducers: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing* [online]. 2018, **112**, 359–383. ISSN 0888-3270. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.04.041>.
- [12] HAIPING, Li; JIANMIN, Zhao. *www.researchgate.net* [online]. [cit. 6.2.2019]. Dostupný na WWW: [https://www.researchgate.net/figure/Envelope-analysis-of-original-signal\\_fig4\\_277929850](https://www.researchgate.net/figure/Envelope-analysis-of-original-signal_fig4_277929850).
- [13] HELEBRANT, František; ZIEGLER, Jiří. *Technická diagnostika a spolehlivost II.: Vibrodiagnostika*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005. 178 s. ISBN 80-248-0650-9.
- [14] HRABEC, L; BLATA, Jan. *www.udrzbapodniku.cz* [online]. [cit. 11.1.2019]. Dostupný na WWW :[http://udrzbapodniku.cz/index.php?id=47&no\\_cache=1&tx\\_ttnews%5btt\\_news%5d=6926&cHash=b1aa97b8f8&type=98](http://udrzbapodniku.cz/index.php?id=47&no_cache=1&tx_ttnews%5btt_news%5d=6926&cHash=b1aa97b8f8&type=98).
- [15] CHLUBNÝ, Jaroslav. *Multiplexery* [online]. [cit. 10.2.2019]. Dostupný na WWW: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=36186&revision=-1&instance=1>.
- [16] JANOUŠEK I., Kozak J., Taraba O.: *Technická diagnostika*, SNTL, Praha 1988, 04-236-88.
- [17] KREIDL, M., Šmid R.: *Technická diagnostika*, BEN, Praha 2006, ISBN 80-7300-158-6.
- [18] MOHANTY, Amiiya R.. *Machinery condition monitoring: principles and practices*. 20141104. New York: CRC press, 2015, ISBN 978-1-4665-9304-6.
- [19] MUŽÍK, Martin; TRNKA, Pavel. *Návrh online diagnostického systému* [online]. [cit. 8.2.2019]. Dost. na WWW: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/30718/1/Muzik.pdf>

- [20] PEJRYD, Lars, Joakim LARSSON a Mikael OLSSON. Process monitoring of wire drawing using vibration sensing. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* [online]. 2017, 18, 65–74. ISSN 1755-5817. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.09.006>.
- [21] PEXA, Martin, Bohuslav PETERKA a Zdeněk ALEŠ. Technická diagnostika [online]. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2011 [cit. 2018-11-08]. ISBN 978-80-213-2177-9.
- [22] PEXA, Martin a Zdeněk ALEŠ. *Technická diagnostika: cvičení* [online]. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2011 [cit. 2018-11-08]. ISBN 978-80-213-2176-2.
- [23] PIRNER, Miloš. Životní prostředí technická seizmicita. Časopis stavebnictví [online]. 2009, 03/09, [cit. 2011-04-20]. Obrázek editován a rozdělen do více částí. Dostupný z WWW: <http://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2755-1.pdf>.
- [24] PRÜFTECHNIK. Manuál – Vibrex, Pružnost v ochraně a monitorování strojů. 1997.
- [25] PRÜFTECHNIK. Manuál - Vibronet online monitorování. 2002.
- [26] PRÜFTECHNIK. Manuál - Vibroweb monitorování online. 2004.
- [27] PRÜFTECHNIK. [www.lamikappa.cz](http://www.lamikappa.cz) [online]. [cit. 2019-01-03]. Dostupný na WWW: <http://www.lamikappa.cz/akcelerometry/>.
- [28] PRÜFTECHNIK. [www.lamikappa.cz](http://www.lamikappa.cz) [online]. [cit. 10.2.2019]. Dostupný na WWW: <http://www.lamikappa.cz/sw-omnitrend/>.
- [29] PRÜFTECHNIK. [www.pruftechnik.com](http://www.pruftechnik.com) [online]. [cit. 2019-01-05]. Dostupný na WWW: <https://www.pruftechnik.com/products/alignment-systems-for-rotating-machinery/shaft-alignment-systems/shaftalign-os3.html>.
- [30] PUTHA, Kishore; DANTALA, Dinakar a kol. *researchgate.net* [online]. [cit. 31.1.2019]. Dostupný na WWW: [https://www.researchgate.net/figure/Response-of-the-sensor-for-the-periodic-vibration-of-the-beam\\_fig7\\_257802020](https://www.researchgate.net/figure/Response-of-the-sensor-for-the-periodic-vibration-of-the-beam_fig7_257802020)

- [31] PU, Yuxue, Huanlin ZHOU a Zeng MENG. Multi-channel adaptive active vibration control of piezoelectric smart plate with online secondary path modelling using PZT patches. *Mechanical Systems and Signal Processing* [online]. 2019, 120, 166–179. ISSN 0888-3270. Dostupné z: doi:10.1016/j.ymsp.2018.10.019
- [32] SAPIETOVÁ, Alžbeta a Vladimír DEKÝŠ. Dynamic Analysis of Rotating Machines in MSC.ADAMS. *Procedia Engineering* [online]. 2016, 136, 143–149. ISSN 1877-7058. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.188
- [33] VISHWAKARMA, Manish, Rajesh PUROHIT, V HARSHLATA a P RAJPUT. Vibration Analysis & Condition Monitoring for Rotating Machines: A Review. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2017, 4(2, Part A), 2659–2664. ISSN 2214-7853. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.140
- [34] WANG, Teng, Guoliang LU a Peng YAN. Multi-sensors based condition monitoring of rotary machines: An approach of multidimensional time-series analysis. *Measurement* [online]. 2019, 134, 326–335. ISSN 0263-2241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2018.10.089
- [35] ZATLOUKAL, J. – HEISIG, L.: On-line diagnostika obráběcích strojů. *Automa*, 2013, č. 8, s. 63–65.
- [36] ZHEN, Li, He ZHENGJIA, Zi YANYANG a Chen XUEFENG. Bearing condition monitoring based on shock pulse method and improved redundant lifting scheme. *Mathematics and Computers in Simulation* [online]. 2008, 79(3), 318–338. ISSN 03784754. Dostupné z: doi:10.1016/j.matcom.2007.12.00

## 8 Seznam obrázků

Obr. 1 Odezva signálu pro periodickou vibraci [3] .....	4
Obr. 2 Vzájemná závislost veličin [5] .....	5
Obr. 3 Stacionární náhodné vlnění [23].....	6
Obr. 4 Nestacionární náhodné vlnění [23].....	6
Obr. 5 Složené vlnění [3].....	7
Obr. 6 Transformace na frekvenční diagram [13] .....	9
Obr. 7 Tandemový piezoelektrický snímač [27] .....	10
Obr. 8 Varianty nesouososti [14].....	13
Obr. 9 Vanová křivka [9].....	16
Obr. 10 Obálková analýza frekvenčního spektra [12].....	18
Obr. 11 Laserové ustavování v praxi [29] .....	21
Obr. 12 Vyvažování v jedné rovině [1] .....	23
Obr. 13 Vyvažování ve dvou rovinách [1] .....	23
Obr. 14 Obecné schéma online diagnostického systému .....	26
Obr. 15 Multiplexer - schéma.....	27
Obr. 16 OMNITREND - software pro online diagnostiku [28] .....	28
Obr. 17 Skříň vyhodnocovací jednotky stroje č. 1 .....	29
Obr. 18 Fotografie stroje č. 2.....	30
Obr. 19 Měřicí bod č. 29 .....	31
Obr. 20 Měřicí bod č. 30 .....	32
Obr. 21 Měřicí bod č. 31 .....	32
Obr. 22 Měřicí bod č. 32 .....	33
Obr. 23 Trend naměřených hodnot stroje č. 1 (25. 4 - 24. 7. 2018) .....	34
Obr. 24 Trend naměřených hodnot stroje č. 1 (25. 7 - 23. 10. 2018) .....	34
Obr. 25 Trend naměřených hodnot stroje č. 2 (25. 4. - 24. 7. 2018).....	35
Obr. 26 Trend naměřených hodnot stroje č. 2 (25. 7 - 23. 10. 2018) .....	35
Obr. 27 Trend naměřených hodnot stroje č. 3 (25. 4. - 24. 7. 2018).....	36
Obr. 28 Trend naměřených hodnot stroje č. 3 (25. 7 - 23. 10. 2018) .....	36
Obr. 29 Trend efektivních hodnot rychlosti vibrací před a po vyvážení rotoru dne 29.11. ....	37

## 9 Seznam tabulek

Tab. 1 Klasifikace mohutnosti vibrací pro stroje skupiny 2 dle ISO 10816-3 [8] .....	16
Tab. 2 Technické parametry strojů .....	30