

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

**System diagnosticke stavu ventilátoru odsávání pánvové
pece**

**The Diagnostic System of Ladle Furnace Exhaustion
Fan Condition**

Student: Bc. Petr Konečný
Vedoucí diplomové práce: Ing. Ladislav Hrabec, Ph.D.

Ostrava 2010

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Konečný**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství

Specializace: 72 Technická diagnostika, opravy a udržování

Téma: **System diagnostiky stavu ventilátoru odsávání pánvové pece**
The Diagnostic System of Ladle Furnace Exhaustion Fan Condition

Zásady pro vypracování:

Na základě požadavků a podkladů zadavatele proveďte návrh a provozní ověření systému diagnostiky stavu ventilátoru odsávání pánvové pece na provozu plynulého odlévání oceli č.2 ve společnosti ArcelorMittal Ostrava a.s..

V rámci zadání zpracujte:

1. Rešerši a analýzu problematiky diagnostiky ventilátorů.
2. Technický návrh řešení daného problému na provozu plynulého odlévání oceli.
3. Praktické provozní ověření navržené diagnostiky na vlastním stroji.
4. Rozbor a analýzu výsledků měření s posouzením stavu zařízení.
5. Výsledné zhodnocení vhodnosti navrženého řešení pro diagnostiku ventilátoru.

Další pokyny a konzultace poskytne firma ArcelorMittal Ostrava a.s., provoz plynulého odlévání oceli č.2.

Seznam doporučené odborné literatury:

KREIDL, M., ŠMÍD, R. *Technická diagnostika*. BEN - Technická literatura, Praha, 2006. 1.vydání, 408s. ISBN 80-7300-157-6.

HELEBRANT, F., ZIEGLER, J. *Technická diagnostika a spolehlivost II - Vibrodiagnostika*. VŠB - TU Ostrava, Ostrava, 2004. I. vydání, 178 s. ISBN 80-248-0650-9.

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.

ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

PETRUŽELKA, J. *Ročníkový projekt. Jak psát bakalářskou práci [online]*. Ostrava: VŠB-TUO, FS, poslední aktualizace 21. 10. 2006 [cit. 2007-04-10]. Dostupný z www: <URL: <http://www.345.vsb.cz/jiripetruzelka/Texty/Jak%20psat.pdf>>.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Ladislav Hrabec, Ph.D.**

Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010



doc. Dr.Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě:

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB –TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěné v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě:

.....

Horní 1481/82, 700 30 Ostrava - Hrabůvka

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

KONEČNÝ, P. Systém diagnostiky stavu ventilátoru odsávání pánvové pece: diplomová práce. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2010, 58 s. Vedoucí práce: Hrabec, L.

Diplomová práce se zabývá technickou diagnostikou ventilátoru odprašovacího zařízení na zařízení pro plynulé odlévání. Nejprve je vysvětlen princip odprašovacího zařízení, jehož součástí je ventilátor. Následuje popis součástí a eventuálních poruch ventilátoru vedoucích ke zhoršení jeho technického stavu s návrhem možných metod technické diagnostiky. Vzhledem k různorodosti zařízení se nejlépe jeví metoda multiparametrické diagnostiky (vibrodiagnostika a termodiagnostika). Jako hlavní diagnostické metody je využito vibrodiagnostiky, kdy měřením absolutních vibrací zařízení a jejich analýzou (trendová analýza, frekvenční analýza, obálková metoda) získáme dostačující údaje o technickém stavu ventilátoru. S termodiagnostikou je uvažováno jako s doplňkovou metodou aplikovanou při zvýšených vibracích, mající původ v elektromotoru.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

KONEČNÝ, P. The Diagnostic System of Ladle Furnace Exhaustion Fan Condition: Master Thesis. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Production Machines and Design, 2010, 58 p. Thesis head: Hrabec, L.

The Master Thesis focuses on technical diagnoses of dust-collecting appliance fan of constant steel casting. First of all, the principle of dust-collecting appliance including the fan is explained. Secondly, there is description of components and possible errors of the fan with negative influence on its technical condition and suggestion of possible methods of technical diagnoses. Due to variability of the device, the best method is supposed to be multiparametric diagnoses (vibrodiagnostics and thermodiagnostic). Vibrodiagnostics is the main diagnoses method during which absolute vibration of the device is measured and analyzed (trend analysis, frequency analysis and envelope method) and brings sufficient information about technical condition of the fan. Thermodiagnostic is considered to be used as additional method applied during stronger vibrations resulting from electromotor.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK:	9
1 ÚVOD	10
2 SOUČASNÝ PROCES ODPRAŠOVÁNÍ PÁNOVÉ PECE ZPO..	12
2.1 SOUČÁSTI ZAŘÍZENÍ PRO ODSÁVÁNÍ A FILTROVÁNÍ.....	12
2.2 FUNKCE ZAŘÍZENÍ PRO ODSÁVÁNÍ A FILTROVÁNÍ.....	14
3 PROBLEMATIKA DIAGNOSTIKY VENTILÁTORU	17
3.1 TEORIE TECHNICKÉ DIAGNOSTIKY V ÚDRŽBĚ.....	17
3.2 VIBRODIAGNOSTIKA	20
3.2.1 Měření signálů vibrací.....	20
3.2.2 Vyhodnocování signálů vibrací.....	23
3.3 TRIBODIAGNOSTIKA.....	24
3.3.1 Sledování opotřebení součástí	24
3.3.2 Sledování degradace oleje	25
3.3.3 Sledování degradace plastického maziva.....	26
3.4 TERMODIAGNOSTIKA	26
3.4.1 Měření teploty.....	26
3.5 HLUKOVÁ DIAGNOSTIKA.....	28
3.6 AKUSTICKÁ EMISE	29
3.7 DIAGNOSTIKA PORUCH VENTILÁTORU	30
3.7.1 Diagnostika oběžného kola ventilátoru.....	30
3.7.2 Diagnostika hřídele ventilátoru	32
3.7.3 Diagnostika valivých ložisek ventilátoru.....	33
3.7.4 Diagnostika elektromotoru ventilátoru.....	35
4 NÁVRH SYSTÉMU DIAGNOSTIKY VENTILÁTORU	37
4.1 VYHODNOCENÍ PROVOZNÍ SPOLEHLIVOSTI.....	37
4.2 TECHNICKÉ PARAMETRY A DOKUMENTACE VENTILÁTORU	37
4.3 ZHODNOCENÍ METOD TECHNICKÉ DIAGNOSTIKY	37
4.3.1 Vibrodiagnostika.....	37
4.3.2 Termodiagnostika	42
4.3.3 Tribodiagnostika.....	42
5 PROVOZNÍ OVĚŘENÍ NAVRŽENÉHO DIAGNOSTICKÉHO SYSTÉMU	44
5.1 VIBRODIAGNOSTIKA	44
5.2 TERMODIAGNOSTIKA	46
6 ANALÝZA VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	48
6.1 VIBRODIAGNOSTIKA	48
6.2 TERMODIAGNOSTIKA	56
7 ZÁVĚR	57
SEZNAM LITERATURY	58

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. č. 1</i>	<i>Jednostranně sací radiální ventilátor RVK 2500.....</i>	<i>12</i>
<i>Obr. č. 2</i>	<i>Elektromotor 1YF600-S-10.....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. č. 3</i>	<i>Hadicový filtr SJV 152/12-18/77.....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. č. 4</i>	<i>Casové průběhy vibračního signálu.....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. č. 5</i>	<i>Absolutní a relativní vibrace.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. č. 6</i>	<i>Model a skutečný piezoelektrický akcelometr.....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. č. 7</i>	<i>Elektrodynamický snímač rychlosti.....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. č. 8</i>	<i>Indukčnostní a optický snímač.....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. č. 9</i>	<i>Kondenzátorový mikrofon.....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. č. 10</i>	<i>Dvouníkový sondy intenzity zvuku.....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. č. 11</i>	<i>Statická nevyváženost a její frekvenční spektrum.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. č. 12</i>	<i>Momentová nevyváženost a její frekvenční spektrum.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. č. 13</i>	<i>Dynamická nevyváženost a její frekvenční spektrum.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. č. 14</i>	<i>Úhlová nesouosost a její frekvenční spektrum.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. č. 15</i>	<i>Rovnoběžná nesouosost a její frekvenční spektrum.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. č. 16</i>	<i>Frekvenční spektrum ohnuté hřídele.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. č. 17</i>	<i>Poškození dráhy valivého ložiska.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. č. 18</i>	<i>Průběh vibrací valivého ložiska.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. č. 19</i>	<i>Frekvenční spektrum valivého ložiska.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. č. 20</i>	<i>On-line snímač vibrací.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. č. 21</i>	<i>Schéma měřících míst a směrů měření.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. č. 22</i>	<i>On-line snímač teploty.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. č. 23</i>	<i>Měrka stavu oleje.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. č. 24</i>	<i>Vibrotest 60.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. č. 25</i>	<i>Infrakamera SAT G90.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. č. 26</i>	<i>Frekvenční spektrum rychlosti vibrací a obálka BCU v bodě L1H-mot.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. č. 27</i>	<i>Frekvenční spektrum rychlosti vibrací a obálka BCU v bodě L2H-mot.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. č. 28</i>	<i>Frekvenční spektrum rychlosti vibrací a obálka BCU v bodě L3H-vent.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. č. 29</i>	<i>Frekvenční spektrum rychlosti vibrací a obálka BCU v bodě L4H-vent.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. č. 30</i>	<i>Termosnímkový elektromotru.....</i>	<i>56</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. č. 1</i>	<i>Základní parametry ventilátoru.....</i>	<i>13</i>
<i>Tab. č. 2</i>	<i>Základní parametry ložisek ventilátoru.....</i>	<i>13</i>
<i>Tab. č. 3</i>	<i>Základní parametry elektromotoru.....</i>	<i>14</i>
<i>Tab. č. 4</i>	<i>Základní parametry elektromotorových ložisek.....</i>	<i>14</i>
<i>Tab. č. 5</i>	<i>Vliv připevnění na výkonnost snímače.....</i>	<i>40</i>
<i>Tab. č. 6</i>	<i>Technická data Vibrotestu 60.....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. č. 7</i>	<i>Technická data snímače AS 060.....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. č. 8</i>	<i>Technická data infrakamery SAT G90.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. č. 9</i>	<i>Klasifikace pásem absolutními vibracemi.....</i>	<i>51</i>

SEZNAM ZÁKLADNÍHO ZNAČENÍ:

Značka	Název	jednotka
B_d	průměr valivého elementu	[mm]
BPFI	poškození vnitřního kroužku	[Hz]
BPFO	poškození vnějšího kroužku	[Hz]
BSF	poškození valivého elementu	[Hz]
FTF	poškození klece	[Hz]
f_0	otáčková frekvence	[Hz]
f_L	lopatková frekvence	[Hz]
n_L	počet lopatek	[-]
P_d	roztečný průměr ložiska	[mm]
p_c	dopravní tlak	[Pa]
Q_v	průtok	[$\text{min}^3 \cdot \text{h}^{-1}$]
RPM	otáčky	[min^{-1}]
t	teplota	[°C]
ϕ	kontaktní úhel	[°]

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK:

BCU	Bearing Condition Unit
CPB	Constant Percentage Bandwidth
FFT	Rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier Transform)
RMS	efektivní hodnota signálu
SM	Siemens-Martinské pece
XMS	Extended Monitoring Software
ZPO	zařízení pro plynulé odlévání

1 Úvod

Výroba oceli je jedním ze základních průmyslových odvětví let minulých, ale i současných, sloužící jako materiálová základna pro strojírenský, stavební a mnoho ostatních průmyslových odvětví.

S rostoucí celosvětovou poptávkou a z toho vyplývajícím zvyšováním objemu výroby oceli, docházelo postupem času k technologickému rozvoji a inovacím ve výrobě oceli. Počínaje výrobou oceli v SM pecích (s největším podílem výroby oceli v šedesátých letech) přes výrobu oceli v kyslíkových konvertorech (největší rozmach na přelomu šedesátých a sedmdesátých let a v současnosti s druhým největším podílem výroby oceli) až po výrobu oceli pomocí zařízení pro plynulé odlévání oceli, které v současnosti zaujímá přes 70% celkové výroby tohoto produktu, a to zejména pro své významné technicko – ekonomické přednosti.

Ve srovnání s ostatními metodami odlévání oceli se plynulé odlévání oceli vyznačuje:

- mnohem komplikovanější a vyšší technickou úroveň výrobních zařízení a pracovníků ve výrobě,
- přísným dodržováním detailních technologických předpisů,
- dodržováním standardních výrobních podmínek,
- spolehlivou měřicí a regulační technikou a dalšími podmínkami.

Na straně druhé se vyznačuje:

- vysokou ekonomickou efektivností výroby oceli (výrazné zvýšení výtěžku oceli na finální výrobek a úsporou energie na jeho výrobu),
- zhospodárněním potřeby práce (vypouštění výrobních mezioperací a podstatně lepší podmínky pro automatizaci technologie),
- vyšší úroveň kultury práce (výrazné snížení podílu fyzicky namáhavé práce s perspektivou možnosti využití lidské práce jen k ovládní),
- zlepšením podmínek pro systematické zvyšování kvality finálního produktu vyloučením subjektivních vlivů na kvalitu výroby.

Jedním z procesů náležejících k výrobě oceli pomocí plynulého odlévání je i výroba a příprava oceli na výchozí kvalitu potřebnou pro úspěšný průběh odlévání oceli. Po zpracování tuhé (ocelový šrot) a tekuté (tekuté surové železo) ocelářské vsázky rafinací

v tavicích agregátech a zařízeních pro pánvovou metalurgii je předupravená tavenina kovu dopravována pomocí převážecího vozu v pánvových pecích k samotnému zařízení pro plynulé odlévání oceli. Zde, za pomoci úprav sekundární metalurgie, musí být docíleno předepsaného chemického složení a čistoty oceli a dále musí být dosaženo optimální teploty a vhodné teplotní homogenity taveniny jako podmínky pro úspěšný průběh odlévání oceli. Při tomto procesu dochází ke vzniku spalin.

Znečišťující látky v koncentrované podobě, tak jak vystupují ze zdroje znečišťování označujeme jako emise. Emise vznikající při procesu sekundární metalurgie jsou tvořeny zejména tuhými znečišťujícími látkami (TZL), tedy prachovými částicemi, benzo(a)pyrenem a těžkými kovy (Hg, Pb, Cd, As), které jsou na prachové částice vázány. Největší vliv na imisní situaci je, dle dostupných zpracovaných rozptylových studií, předpokládán u arsenu a nejmenší u rtuti. Zmíněné prvky se vyskytují především ve formě oxidů. Emise plyných polutantů, které nejsou vázány na emisi prachu SO_2 , CO a NO_x (resp. NO_2) nebudou pravděpodobně tak významné jako polutanty zmíněné výše.

Pro zabezpečení hygienických limitů pracovního a okolního prostředí je součástí procesu sekundární metalurgie také zařízení pro odsávání a filtrování (odprašení) výše zmiňovaných spalin z pánvové pece. Odprašovací zařízení pánvové pece sestává ze sacího a výtlačného potrubí s napojením na radiální ventilátor, který je hřídelí, uloženou ve dvou ložiskových tělesech ventilátoru, spojen přes pružnou spojku VPS s elektromotorem. Součástí sacího potrubí je hadicový filtr, jehož hlavním úkolem je odloučení prachových částic z odsávaných spalin vznikajících při sekundární metalurgii v pánvové peci. Pročištěné spaliny jsou dále přes radiální ventilátor vháněny do výtlačného potrubí napojeného na komín, ze kterého jsou rozptylovány do okolního prostředí.

Cílem této diplomové práce je provedení rešerše a analýzy problematiky diagnostiky ventilátorů, navrhnout možná řešení metod technické diagnostiky daného problému na provozu plynulého odlévání oceli č.2 ve společnosti ArcelorMittal Ostrava a.s. V návaznosti na provedený návrh řešení metod technické diagnostiky bude provedeno praktické ověření navržené metody na vlastním stroji spolu s rozborem a analýzou výsledků měření s posouzením současného stavu zařízení. V závěru diplomové práce bude provedeno zhodnocení vhodnosti navrženého řešení pro diagnostiku ventilátoru.

2 Současný proces odprašování pánvové pece ZPO

Výroba oceli sestává ze dvou na sebe navazujících nezastupitelných postupů. Jak již bylo zmíněno v úvodu, v prvním postupu se jedná o zpracování tuhé (ocelový šrot) a tekuté (tekuté surové železo) ocelářské vsázky rafinací v tavicích agregátech a zařízeních pro pánvovou metalurgii. Zde musí být docíleno předepsaného chemického složení a čistoty oceli a dále musí být dosaženo optimální teploty a vhodné teplotní homogenity taveniny jako podmínky pro úspěšný průběh odlévání oceli. Ve druhém chodu dochází k vlastnímu odlévání oceli, což je technologický postup spojený s procesem tuhnutí taveniny, při kterém se vytavená ocel odleje z lící pánve do předlitků, které jsou svým tvarem a vlastnostmi vhodné pro další zpracování tvářením na hotové výrobky.

Proces sekundární metalurgie, kde dochází k přípravě taveniny na její výchozí kvalitu potřebnou pro další průběh plynulého odlévání, je doprovázen vznikem spalin. Pro zabezpečení hygienických limitů pracovního a okolního prostředí, ale i pro odstranění nežádoucích spalin z taveniny, je nutno vzniklé spaliny z prostoru pánvové pece pomocí odprašovacího zařízení odsávat a filtrovat.

2.1 Součásti zařízení pro odsávání a filtrování

Hlavní součástí tohoto zařízení je jednostranně sací radiální ventilátor RVK 2500 (obr č. 1). Parametry ventilátoru jsou uvedeny v tab č. 1. Ventilátor je složen ze dvou dílů spirální skříně, stojanu, z rámu motoru s uložením, oběžného kola, elektromotoru, sacího hrdla, regulačního ústrojí a krytů.



Obr. č. 1 Jednostranně sací radiální ventilátor RVK 2500

Spodní díl spirální skříně ventilátoru s patkami pro ukotvení a ustavení je posazen na rámu motoru a stojanu ventilátoru. Rám motoru je pomocí kotevních šroubů uložen na vyvýšený betonový základ. Je vypořádán a vyrovnán do vodorovné polohy. Stojan ventilátoru je čtyřmi kotevními šrouby uložen na základ v úrovni podlahy. Rám i stojan je opatřen ustavovacími otvory pro patky spodní části spirální skříně. Ustavení spodního dílu spirální skříně do vodorovné polohy a zajištění správné vůle spodního okraje ucpávky hřídele je docíleno vypořádáním stojanu ventilátoru. Vypořádání rámu i stojanu jsou zalita betonem nad úroveň jejich základů. Na spodní část spirální skříně je přírubovým spojením přichycena vrchní část spirální skříně. Na boku spirální skříně je ze strany sacího hrdla namontováno regulační zařízení, sloužící k regulaci odsávaného množství spalin.

Tab. č. 1 Základní parametry ventilátoru

Typ	Označení	Průtok Q_v	Dopravní tlak p_c	Provozní teplota t	Průměr oběžného kola	Počet lopatek
[-]	[-]	$[m^3 \cdot h^{-1}]$	[Pa]	$[^{\circ}C]$	[mm]	[-]
Radiálně jednostranně sací	RVK 2500- 6N-P-45 $^{\circ}C$	32	4800	180	2500	12

Oběžné kolo jednostranně sacího radiálního ventilátoru RVK 2500 je umístěno uvnitř spirální skříně a nasazeno na hnané hřídeli a pojištěno pojistnou deskou se šrouby na jeho konci. Vedle oběžného kola, vně spirální skříně, je na hnané hřídeli nasazen chladicí kotouč. Hřídel je uložena ve dvou ložiskových tělesech. Ložisková tělesa jsou posazena na obrobené plochy podložek usazených na rámu motoru a pomocí šroubů a kolíků přichycena a ustavena na rámu motoru. Pro získávání okamžitých hodnot teploty a vibrací jsou ložisková tělesa opatřena on-line teplotními a vibračními čidly. V ložiskových tělesech jsou instalována valivá ložiska 22 2332/C3, ČSN 02 4705. Základní parametry ložisek jsou uvedeny v tab. č. 2.

Tab. č. 2 Základní parametry ložisek ventilátoru

Typ	Označení	Vnější průměr	Vnitřní průměr	Roztečný průměr	Počet valivých elementů	Průměr valivých elementů	Kontaktní úhel
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[mm]	$[^{\circ}]$
Soudečkové	22232C	290	160	226,50	19	32	10

Druhý konec hnané hřídele je osazen pružnou spojkou s vinutou pružinou VPS, zajišťující spojení mezi zmiňovanou hřídelí a hnanou hřídelí elektromotoru. Výhoda této pružné spojky je v jejím použití v prašném a vlhkém prostředí, přenáší kolísavé zatížení a dokáže akceptovat i nesouosost spojovaných hřídelí.



Obr. č. 2 Elektromotor 1YF600-S-10

Jak vyplývá z výše uvedeného, druhá část pružné spojky osazuje hnací hřídel elektromotoru. Třífázový elektromotor typu 1YF600-S-10 (obr. č. 2) je posazen na ustaveném rámu motoru a jeho natáčením a podkládáním po celé ploše jeho patek je docíleno vyrovnání spojky, tzn. výchylky přesazení hřídelů a úhlový zlom jsou v tolerancích předepsaných příslušnou normou. Základní parametry elektromotoru a ložisek elektromotoru jsou uvedeny ve dvou následujících tabulkách.

Tab. č. 3 Základní parametry elektromotoru

Typ	Označení	Výkon	Frekvence	Otáčky	Účinnost	Hmotnost
[-]	[-]	[kW]	[Hz]	[min ⁻¹]	[-]	[kg]
Třífázový asynchronní indukční	1YF600-S-10	350	50	750	0,83	3860

Tab. č. 4 Základní parametry elektromotorových ložisek

Typ	Označení	Vnější průměr	Vnitřní průměr	Roztečný průměr	Počet valivých elementů	Průměr valivých elementů	Kontaktní úhel
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[mm]	[°]
Kuličkové	6317	180	85	132,50	8	30,16	0
Válečkové	NU 322E	240	110	177,30	14	14	0

2.2 Funkce zařízení pro odsávání a filtrování

Jediný úkol takto sestaveného hnacího a hnaného soustrojí, kde základním funkčním prvkem je radiální ventilátor, spočívá v dopravě vzdušiny od pánvové pece až po vstup do komína. Z prostoru pánvové pece je vzdušina (spaliny) vzniklá při procesu sekundární metalurgie nasávána podtlakem vyvinutým lopatkami oběžného kola radiálního ventilátoru

do sacího potrubí o vnitřním průměru 1 400 mm. Nasávaná vzdušina prochází na cestě k lopatkám ventilátoru hadicovým filtrem SJV 152/12-18/77 (obr. č. 3), kde jsou ze vzdušiny odfiltrovány nežádoucí prachové částice. Ty se dostávají do prostoru odlučovače, kde ulpívají na plochách filtrových hadic a přečištěná vzdušina pokračuje přes výstupní otvory filtrových hadic zpět do sacího potrubí. Toto potrubí je napojeno na spirální skříň a pomocí oběžného kola ventilátoru dochází v axiálním směru k nasávání vyčištěné vzdušiny a v radiálním směru k jejímu vytlačování. Spirální skříň slouží k zachycování a usměrňování přečištěné vzdušiny do výtlačného potrubí. Výtlačné potrubí je zaústěno do přilehlého komína, ze kterého je přečištěná vzdušina rozptýlována do okolního prostředí.



Obr. č. 3 Hadicový filtr SJV 152/12-18/77

Aby při filtrovacím procesu, tj. při ulpívání prachových částic na vnějších plochách filtrových hadic, nedocházelo k zanášení hadic a následnému zvyšování odporu v sacím potrubí ventilátoru, což by vedlo ke zvýšenému namáhání částí ventilátoru (např. oběžného kola, elektromotoru, hnací a hnané hřídele, ložiskových těles), je hadicový filtr vybaven plně automatizovaným čištěním. To zabezpečuje v pravidelných intervalech vytváření krátkých tlakových impulsů stlačeným vzduchem proti proudění vzdušiny. Tím vznikne v jednotlivých filtrových hadicích přetlak, který způsobí jejich nárazové nadýmání a prach ulpívající vně hadic odpadá do filtrového trychtýře, odkud je filtrovým šnekem vynášen komorou turniketu do připraveného kontejneru.

Jak bylo řečeno ve dvou předešlých odstavcích, úkolem ventilátoru je zajišťování odsávání vzniklých spalin z pánvové pece. Účelem hadicového filtru je zbavování dopravované vzdušiny nežádoucích prachových částic, jejichž vlivem by docházelo

ke zhoršování pracovního a okolního prostředí, ale také ke zkrácení technické životnosti ventilátoru a jeho součástí. Dalším parametrem, který by mohl zkracovat technickou životnost ventilátoru, je teplota dopravované vzdušiny. Ta může v místě sání dosahovat až jednotek tisíců °C. V důsledku dané maximální vstupní teploty vzdušiny procházející hadicovým filtrem, která činí 150 °C, je potřeba odsávanou vzdušinu před vstupem do filtru ochladit. Ochlazení je docíleno jak délkou venkovního vedení hlavního řádu sacího potrubí, tak napojením bočního potrubí k hlavnímu řádu sacího potrubí pro přívod chladnějšího venkovního vzduchu, pomocí něhož se docílí maximální požadované teploty vzdušiny. Na vstupu tohoto potrubí je instalována elektronická klapa, která je v závislosti na vyhodnocení teploty vzdušiny v sacím potrubí otvírána nebo naopak přivírána.

3 Problematika diagnostiky ventilátoru

Ventilátory řadíme mezi rotační, lopatkové stroje. Slouží především k dopravě vzdušín (v tomto případě spalín). Doprava vzdušín je zajišťována přeměnou mechanické energie z elektromotoru na kinetickou energii vzdušiny vlivem dynamického působení lopatek oběžného kola.

Ventilátor se skládá, jak bylo zmíněno v kapitole 2.1, z lopatek oběžného kola, elektromotoru, hnací a hnané hřídele, ložiskových těles a dalších součástí. Vzhledem k různorodosti zařízení a neexistující univerzální metodě ke sledování technického stavu zařízení, bude potřeba použít kombinaci diagnostických metod a prostředků k určení celkového stavu zařízení.

Vědní obor zabývající se diagnostickými metodami a prostředky nazýváme technickou diagnostikou. V základu ji můžeme rozdělit na technickou bezdemontážní diagnostiku a technickou nedestruktivní diagnostiku. V případě ventilátoru odprašovacího zařízení se bude převážně jednat o metody nedestruktivní diagnostiky, uvedené níže v textu. Jako základního diagnostického parametru bude využito hlavně vibrací, které dávají informaci o technickém stavu zařízení.

Závěrem této kapitoly je třeba dodat, že podle [3] je technická bezdemontážní diagnostika především nástrojem objektivizace kontrolně inspekční a revizní činnosti, kterou zjišťujeme míru opotřebení, resp. míru provozní spolehlivosti po stránce kvantifikace.

3.1 *Teorie technické diagnostiky v údržbě*

V souladu se zvyšujícími se požadavky na spolehlivost zařízení za všech provozních podmínek a za současného snižování celkových nákladů na údržbu, je třeba stále širšího uplatňování metod a prostředků technické diagnostiky pro docílení optimálního stavu provozování a využívání.

Základním předpokladem je znalost průběhu opotřebení a určení zbytkové životnosti zařízení. Jedná se o využívání metod a prostředků technické diagnostiky k stanovení těchto požadavků. Tyto metody jsou nedemontážní (vibrodiagnostika, termodiagnostika, tribodiagnostika), resp. nedestruktivní (optická defektoskopie, akustická diagnostika, metoda magnetických a elektromagnetických polí, metody založené na využití elastických kmitů, atd.) a probíhají za běžných provozních podmínek. Z pohledu řešení různých úkolů můžeme technickou diagnostiku rozdělit například na:

-
- Řešení úkolu
 - detekce (odhalení vznikající poruchy),
 - lokalizace (stanovení vadné součásti nebo uzlu),
 - predikce (určení zbytkové životnosti).
 - Nasazení
 - předdemontážní,
 - před uvedením do provozu (oživování a finální kontroly),
 - za provozních podmínek (servisní, kontrolně inspekční, monitoring).
 - Časové rozdělení
 - cyklická,
 - trvalá (monitorování),
 - na objednávku.

Výsledkem řešení zde uvedených úkolů a mnoha jiných jsou získané informace o technickém stavu objektu s předpovědí zbytkové životnosti zařízení.

Poruchy zařízení nemívají náhlý a zcela neočekávaný průběh. Již dlouho dopředu se projevují určité známky změn v provozu zařízení. Například se může jednat o změnu mechanických vibrací, zvýšení hlučnosti, změnu teploty části zařízení, atd. Přítomnost změn umožňuje využití technické diagnostiky, která zjišťuje právě postup těchto změn v chování strojního zařízení. Charakter změny parametrů zařízení nám dělí poruchy na náhlé (nastávají nezávisle na délce provozu a technickém stavu) a postupné (nastávají opotřebením součástí z důvodu dlouhodobého provozu zařízení).

Můžeme také zkoumat podmínky vzniku poruch. Ty mohou vznikat za standardních podmínek (tzn. dodržování zásad správné údržby uvedených v návodu k obsluze a údržbě zařízení) a nestandardních podmínek (tzn. nesprávná činnost obsluhy nebo nepříznivé vnější podmínky).

Strategie procesu vyhledávání poruch a určování technického stavu vytváří soubor určitých diagnostických pravidel. Jako jedny z postupů lokalizace a specifikace můžeme jmenovat tyto typy:

- měření a vyhodnocení signálu (bezdemontážní technická diagnostika),
- zkoušení objektů a prvků (nedestruktivní technická diagnostika),

- nahrazování součástí.

Posledním úkolem technické diagnostiky je vyslovení diagnózy a výsledku vzhledem ke stanoveným ukazatelům oprav. Při stanovování ukazatelů oprav je třeba brát ohledy jak na problémy technické, tak i na ekonomické. Ekonomické vlivy v sobě zahrnují nejen náklady na opravu, ale i náklady na používání diagnostických metod (jednoduchá, přesná, zdvojená atd.). Dále je důležité správné a ekonomické využití informací získaných pomocí technické diagnostiky. Poté lze vyslovit rozhodnutí o následném postupu:

- provést opravu ihned v návaznosti na diagnostickou kontrolu,
- doporučit opravu v termínu plánovaných oprav,
- odložit rozhodnutí do doby další diagnostické kontroly,
- provést měření dalšího diagnostického parametru a zvýšit tím jistotu rozhodovacího procesu.

Zavedením technické diagnostiky je možno získat mnoho různých ekonomických přínosů, a to v důsledku snížení nákladů na údržbu v závislosti na druhu zařízení, prodloužení cyklů oprav zařízení, snížení spotřeby energie, zvýšení bezpečnosti a kulturnosti práce. Vlastní ekonomický přínos zavedením technické diagnostiky na strojním zařízení lze především spatřovat ve:

- snížení nákladů na údržbu využitím vlastních rezerv,
- snížení odstávek z důvodu informovanosti o skutečném stavu zařízení a možném naplánování blížících se poruch do plánovaných odstávek na údržbu,
- zkvalitnění péče o strojní zařízení,
- snížení nebezpečí havárií,
- snížení investic na nová zařízení,
- úspore materiálních prostředků.

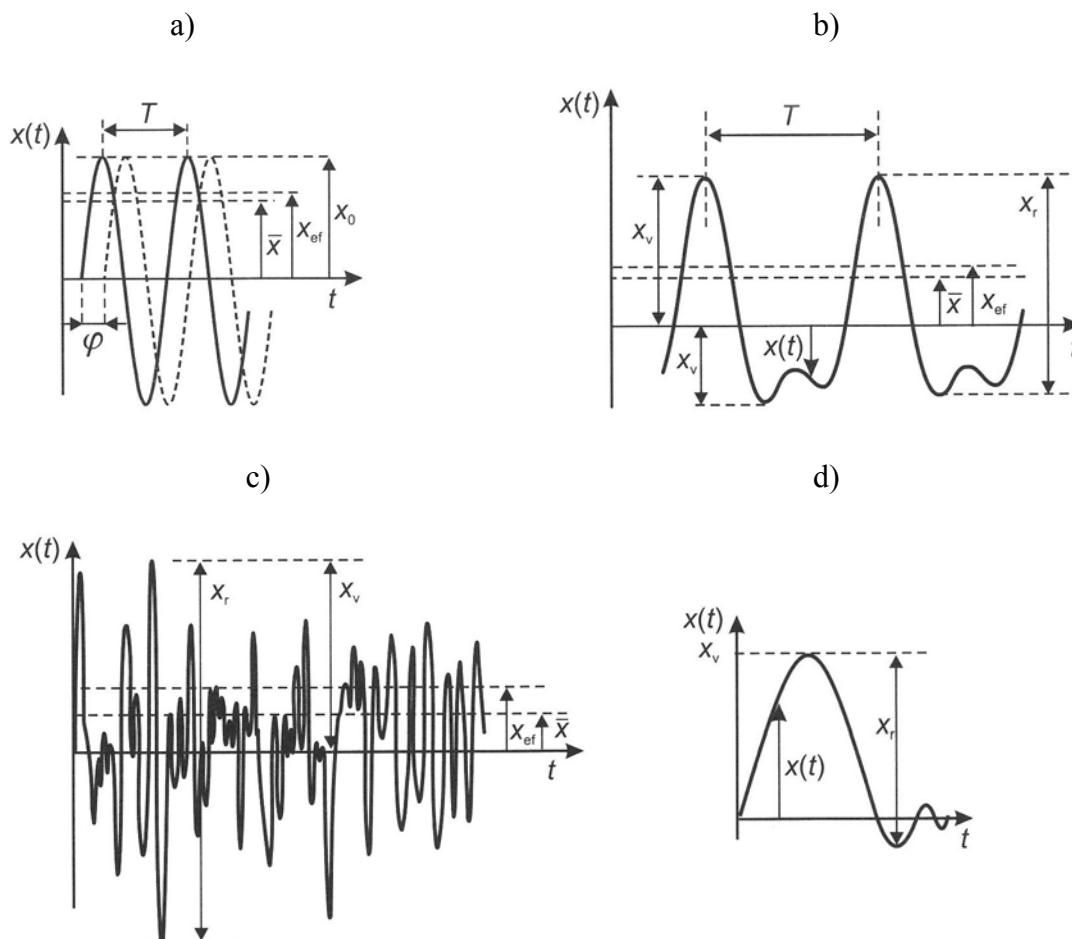
Další přínosy spojené se zavedením technické diagnostiky lze hledat v tzv. nevyčíslitelných přínosech ve:

- zkvalitnění, zrychlení a rozšíření systému kontrolních prohlídek,
- zjednodušení činnosti obsluhy,
- spojení diagnostických výsledků a prognóz.

Hodnocení ekonomických přínosů technické diagnostiky lze řešit pomocí běžně používaných metod. Nutno dodat, že technická diagnostika se vyznačuje určitou specifičností, která spočívá v tom, že nevytváří nové přínosy, ale využívá hospodárný přístup na využitelnosti používaného zařízení.

3.2 Vibrodiagnostika

Vibrodiagnostika využívá ke sledování technického stavu zařízení diagnostického parametru v podobě mechanického kmitání (vibrace). Jedná se o pohyb, při kterém součásti vykonávají pohyb kolem své rovnovážné polohy. Vibrace vznikají u všech strojů s rotujícím pohybem. Ty mohou být zapříčiněny dynamickým namáháním stroje, technickým stavem jednotlivých součástí, nevývahou, nesouosostí a dalšími. Některé časové průběhy vibrací dle [5] máme znázorněny na obr. č. 4.



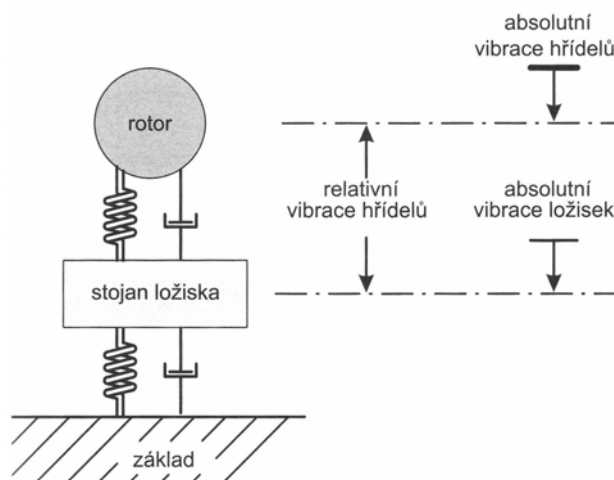
Obr. č. 4 Časové průběhy vibračního signálu

a) harmonický, b) složený periodický, c) náhodný, d) přechodový

3.2.1 Měření signálů vibrací

Při měření vibrací rozlišujeme dva typy snímačů:

- absolutní snímače – jejich výstupem je absolutní míra vibrací,
- relativní snímače – jejich výstupem je vibrační výchylka mezi dvěma elementy součástí.



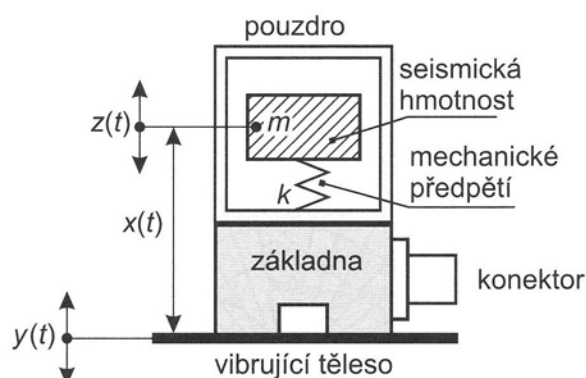
Obr. č. 5 Absolutní a relativní vibrace

Dále snímače rozdělujeme podle požadované měřené veličiny (zrychlení, rychlost, výchylka).

Snímače zrychlení

Nejrozšířenějšími snímači jsou piezoelektrické akcelerometry. Jedná se o snímače zrychlení. Jejich výstupem mohou být i hodnoty rychlosti nebo výchylky. Rychlost dostaneme integrací naměřené hodnoty zrychlení, resp. dvojitou integrací zrychlení získáme hodnotu výchylky.

Princip piezoelektrického snímače spočívá v indukovaní elektrického náboje v důsledku vzniku mechanického napětí na deformačním piezoelektrickém členu. Mechanické napětí je způsobeno pohybem pláště akcelerometru vůči seizmické hmotě snímače (obr. č. 6). Podle směru působení síly na piezoelektrický člen rozeznáváme tlakový a smykový akcelerometr.

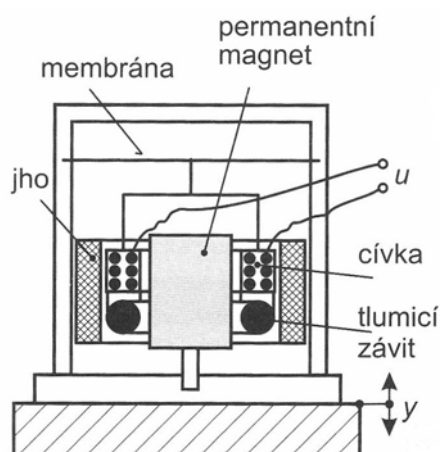


Obr. č. 6 Model a skutečný piezoelektrický akcelometr

Důležitým faktorem piezoelektrických akcelometrů je jejich frekvenční a dynamický rozsah. Frekvenční rozsah je mezi 1 Hz až 20 kHz. Dynamický rozsah může dosahovat 1:10⁶. Piezoelektrické akcelerometry se vyznačují schopností měřit i při vysokých teplotách nebo v silném magnetickém poli.

Snímače rychlosti

Pro měření rychlosti vibrací můžeme použít snímač zrychlení, přičemž hodnotu rychlosti získáme následnou integrací nebo použijeme snímač rychlosti přímo. Typickým snímačem rychlosti je elektrodynamický snímač (obr. č. 7). Uvnitř tohoto snímače je cívka, která vlivem vibrací kmitá v poli permanentního magnetu a dochází k indukci napětí na cívce. Výstupní napětí na cívce je úměrné rychlosti vibrací.



Obr. č. 7 Elektrodynamický snímač rychlosti

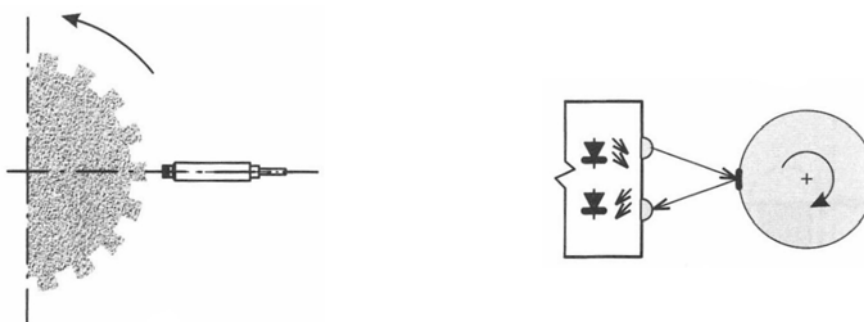
Oproti akcelometrům se snímače rychlosti vyznačují jak menším frekvenčním rozsahem, tak vzhledem k větší hmotnosti i menším dynamickým rozsahem.

Snímače výchylky

Pro měření vibrací ve výchylce se nejčastěji používá bezdotykových snímačů. Nejpoužívanějšími ve vibrodiagnostice jsou indukčnostní snímače výchylky pracující na principu vířivých proudů. Vířivé proudy v elektricky vodivém materiálu generují sekundární magnetické pole. To působí proti intenzitě budící cívky a v závislosti na její vzdálenosti od povrchu součásti se vytvoří výsledné magnetické pole.

Snímače otáček

Nezbytnou veličinou při vyhodnocování vibračních signálů točivých strojů jsou otáčky hřídelů. V současné době se k měření otáček nejčastěji používají optické nebo indukčnostní snímače. Indukčnostní snímače pracují na již zmíněném principu vířivých proudů a optické pracují na principu odrazu impulsů záření od odrazné plochy a měří délku časového intervalu mezi těmito impulsy. Oba snímače jsou znázorněny na následujícím obrázku.



Obr. č. 8 Indukčnostní a optický snímač

3.2.2 Vyhodnocování signálů vibrací

Měřené signály můžeme vyhodnocovat v souhrnných charakteristikách v závislosti na čase (např. vibrace ve zrychlení). Vzhledem k nedostatečné přehlednosti souhrnných charakteristik tyto ještě doplňujeme o frekvenční spektra. Frekvenční spektra (dále jen spektrum) představují podíl jednotlivých harmonických složek v obecném signálu a jsou funkcí frekvence.

Pro vyhodnocování složek z určité frekvenční úrovně nám slouží frekvenční filtry. Podle šířky propustného pásma rozeznáváme dvě základní skupiny analyzátorů:

- s konstantní relativní šířkou pásma (CPB analyzátorů),
- s konstantní absolutní šířkou pásma (FFT analyzátorů).

CPB analyzátory charakterizuje logaritmická frekvenční stupnice. Její výhodou je konstantní rozmístění jednotlivých složek v sloupcovém grafu, což je výhodné pro měření vibrací, které předepisují normy. V diagnostice je jejich frekvenční stupnice nepříjemně hrubá.

FFT analyzátory charakterizuje lineární frekvenční osa. V diagnostice jsou používanější vzhledem k tomu, že je vyžadováno, aby analyzátor pracoval v celém frekvenčním rozsahu s konstantní šířkou propustného pásma. Jejich uplatnění spočívá jak v univerzálních postupech (frekvenční vibrační diagnostika), tak v postupech souhrnných charakteristik (měření provozních tvarů kmitů, měření modálních vlastností mechanických struktur). V těchto metodách je prvním krokem zjištění časového průběhu signálů a jejich spekter.

3.3 Tribodiagnostika

Dalším oborem technické bezdemontážní diagnostiky zabývající se diagnostikou technického stavu součástí je tribodiagnostika. Tribodiagnostika využívá ke stanovení technického stavu součástí informací získaných z maziva. Ty mohou pocházet buď z opotřebením třecích uzlů a z toho vyplývajícího znečištění oleje nebo ze změn kvality maziva určující životnost maziva.

3.3.1 Sledování opotřebením součástí

Opotřebením součástí stroje se z něj uvolňují částice kovu. Se vzrůstajícím opotřebením se zvyšuje jejich koncentrace a částice kolují v mazací soustavě. Tribodiagnostika stanovuje ve znečištěném mazivu koncentrace otěrových kovů nebo se hodnotí morfologie a distribuční rozdělení částic kovu.

Metody stanovení koncentrace otěrových kovů

- atomová spektrofotometrie – analytická metoda, která rozbořením spektra zkoumaného vzorku určuje přítomnost a koncentraci naprosté většiny prvků periodické soustavy v mazivu. Atomovou spektrofotometrii dělíme na emisní a absorpční,
- polarografie – polarografická metoda, která rozbořením polarografického spektra určuje přítomnost a koncentraci většiny prvku periodické soustavy v mazivu,

- částicová analýza – separuje, identifikuje a kvantifikuje jednotlivé druhy otěrových částic pro stanovení převládajícího opotřebením součástí.

3.3.2 Sledování degradace oleje

Stárnutí maziva se projevuje změnou jeho fyzikálně chemických parametrů. Při známých vstupních údajích o mazivu před započítáním provozu součástí můžeme měření a vyhodnocováním změn těchto parametrů určit životnost maziva.

Fyzikálně chemické parametry oleje

- kinematická viskozita – je rozhodující vlastností maziva v oblasti hydrodynamického tření a jedná se o základní zkušební parametr testovaných olejů. Vyšší viskozita způsobuje energetické ztráty, nižší viskozita vede k meznímu až suchému tření s následným větším opotřebením,
- bod vzplanutí – jakostní a bezpečnostní ukazatel čistých maziv, který se opotřebením mění. Používá se převážně pro stanovení množství paliva v oleji u motorových olejů,
- obsah vody – snižuje kvalitu mazacího filmu a zvyšuje korozi mazaných částí,
- číslo alkality a kyselosti – údaj určující podíl chemických složek v mazivu, jejichž obsah ovlivňuje provozní faktory, kvalitu maziva, režim zařízení,
- celkové znečištění – jedná se o smluvní zkoušku vyhodnocující celkové znečištění oleje mechanickými nečistotami, zplodinami termooxidačních reakcí a dalšími nečistotami. K určení celkového znečištění se používá vhodných metod (bod vzplanutí, obsah vody a další). Dále stanoví mechanické nečistoty (filtrace vzorku za podtlaku membránovým ultrafiltrem) a kód čistoty (měření množství a velikosti částic).

Spektrální analýza olejů

Jedná se o metodu založenou na molekulové spektrometrii. Působení infračerveného záření na molekuly způsobuje jejich přechod na vyšší vibrační úroveň, čímž se pohlčí

záření s určitými hodnotami energie, které se projeví vibračními absorpčními pásy ve spektru. Pomocí těchto pásů lze většinu sloučenin jednoznačně identifikovat. Touto metodou lze v oleji stanovit:

- obsah oxidačních, nitračních a sulfatačních produktů,
- úbytek antioxidačních, antikoročních a detergentních složek,
- obsah vody a glykolů,
- pokles bazické rezervy.

3.3.3 Sledování degradace plastického maziva

Jedná se o směs kapalně fáze a tuhých látek vyrobených z ropných olejů. Vzhledem k jejich vlastnostem je použití oproti olejům omezené. Spíše se používají pro krátkodobá mazání. Použití plastického maziva závisí na:

- rozsahu teplotního použití,
- odolnosti proti vodě,
- ochranných schopnostech proti korozi,
- provozní trvanlivosti v závislosti na teplotě použití.

Důležitými vlastnostmi pro hodnocení plastických maziv jsou:

- konzistence – vyjadřuje devět stupňů tuhosti maziva, zjišťuje se penetrační zkouškou. Je ovlivněna druhem a množstvím zpevňovačů,
- teplota skápnutí – jedná se o teplotu, při které dochází k přechodu plastického maziva do kapalného stavu. Podle stálosti dělíme maziva na tepelně stálá, mechanicky stálá a koloidně nestálá.

3.4 Termodiagnostika

Využívá teploty jako diagnostického parametru ke stanovení technického stavu sledované součásti stroje. Uplatňuje se všude tam, kde nastupující porucha součásti stroje zapříčiňuje vznik pasivních ztrát a dochází ke snížení účinnosti nebo vytvoření nového tepelného zdroje.

3.4.1 Měření teploty

Teplotu nelze měřit přímo, ale pouze převodem na jinou fyzikální veličinu. K měření teploty nám slouží teploměry, jejichž součástí jsou teplotní čidla (převádějí teplotu na jinou vhodnou fyzikální veličinu).

Podle fyzikálního principu rozdělujeme teplotní snímače na odporové, termoelektrické, dilatační, optické, chemické a další. Podle transformace signálu z teplotního snímače je dělíme na aktivní (působením teploty jsou zdrojem elektrické energie) a pasivní (pro transformaci signálu potřebují zdroj elektrické energie). V poslední řadě je dělíme podle styku s měřeným objektem na dotykové a nedotykové.

Dotykové měření teploty

Provádí se měřením v přímém kontaktu s povrchem měřené součásti. Existuje nepřehledné množství dotykových teplotních snímačů:

- odporové snímače – jejich princip je založen na teplotní závislosti odporu kovu, kde jediným teplotně závislým parametrem je relaxační čas (platinové, niklové a měděné snímače teploty),
- polovodičové odporové snímače – využívají stejného principu jako odporové snímače s tím rozdílem, že koncentrace nosičů náboje je dominantní závislostí na teplotě (negastory, pozistory, polovodičové monokrystalické snímače teploty),
- termoelektrické články – jsou založeny na Seebeckově jevu (převod tepelné energie na energii elektrickou),
- dilatační teploměry – pracují na principu teplotní roztažnosti pevných látek, kapalin a plynů (bimetalické teploměry, skleněné teploměry, kapalinové, plynné a parní tlakové teploměry aj.),
- indikátory teplot – používají se pro přibližné stanovení teplot (keramické žároměrky, tavné indikátory teplot, barevné indikátory teplot).

Bezdotykové měření teploty

Je založené na snímání povrchové teploty tělesa. Těleso vysílá elektromagnetické záření a bezdotykový snímač přijímá záření o vlnových délkách od 0,4 μm do 25 μm (jde o teplotní rozsah $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $+10000\text{ }^{\circ}\text{C}$). K výhodám bezdotykového měření teploty patří zanedbatelný vliv měřící techniky na měřený objekt, možnost měření na rotujících objektech, měření teplot z bezpečné vzdálenosti a další. K nevýhodám této metody patří

nejistota měření z důvodu parazitního odráženého záření z okolního prostředí, neznalost správné hodnoty emisivity povrchu tělesa atd.

K bezkontaktnímu měření teploty používáme pyrometry a termografii.

Pyrometry

- integrální pyrometry – transformují energii záření v celém spektru vlnových délek. Energetický tok se zaostřuje na detektor soustavou čoček se širokým spektrem propustnosti nebo zrcadlem se širokým spektrem odrazivosti,
- monochromatické – jedná se o spektrálně selektivní pyrometry založené na závislosti spektrálního vyzařování tělesa při dané vlnové délce na teplotě,
- pásmové pyrometry - spektrálně selektivní pyrometry měřící teplotu povrchu tělesa v daném pásmu vlnových délek. Dosahují přesnějších výsledků než pyrometry integrální,
- poměrové pyrometry – vyhodnocují povrchovou teplotu tělesa na základě poměru dvou záření při dvou různých vlnových délkách.

Vizualizace teplotních obrazů

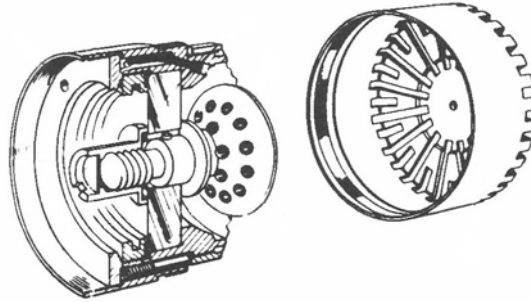
Stejně jako u pyrometrů se i zde využívá sálání tepla z povrchu součástí v oblasti infračerveného záření. Rozdíl je ve výsledném vyobrazení, kdy dochází ke zviditelnění infračerveného záření. Rozlišujeme dva typy systémů vizualizace teplotních obrazů. Jeden pracuje s rozkladem obrazu (termovize) a druhý bez jeho rozkladu.

Využití termovizních kamer je zejména při kontrole žáruvzdorných vyzdívek, zjišťování úniků tepla z budov, ale i ke zjištění opotřebení mechanických prvků vlivem tření (ložiska, převodovky, atd.), v elektrotechnice při diagnostice nepřípustných ohřevů ztrátovým výkonem atd.

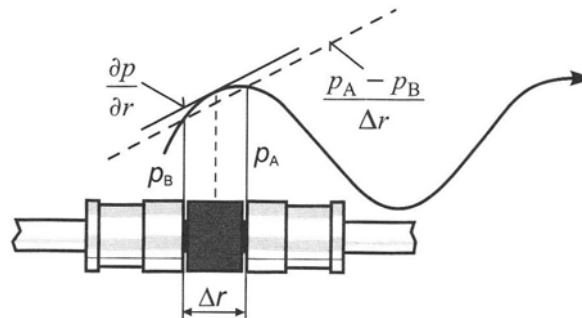
3.5 Hluková diagnostika

Diagnostický parametr hluk, jakožto nežádoucí zvuk ve frekvenčním pásmu 20 Hz až 20 kHz, je při hlukové diagnostice používán ke stanovení technického stavu součástí stroje. Pohybující se součásti strojů budí vibrace, které se z jejich povrchu šíří formou hluku s výrazným směrovým účinkem do okolního prostředí.

Nejčastěji měřenou veličinou je akustický tlak, který měříme zvukoměry, jejichž základem pro hlukovou diagnostiku bývá kondenzátorový mikrofon (obr č. 9), pracující na principu kondenzátoru s proměnnou kapacitou. Pro přesnou lokalizaci zdroje hluku se měří vektorová veličina intenzita zvuku. Tu nelze měřit přímo, proto se používá dvoumikrofonní sonda intenzity zvuku (obr č. 10).



Obr. č. 9 Kondenzátorový mikrofon



Obr. č. 10 Dvoumikrofonní sonda intenzity zvuku

Nevýhodou této metody jsou parazitní odrazy a nelehká lokalizace závady vlivem hluku okolních objektů. Specifickým zdrojem hluku u točivých strojů bývají:

- ložiska – mechanické rázy způsobené vzájemným stykem poškozených prvků, prokluz nedokonalým odvalováním valivých prvků,
- elektricky točivé stroje – aerodynamický hluk ventilátoru, tření kartáčů, magnetostrikce,
- kompresory – nerovnoměrné proudění plynů při sacím a výtlačném procesu.

3.6 Akustická emise

Jedná se o uvolnění energie vlivem působení vnitřních nebo vnějších sil. Uvolněná energie se v podobě elastické napěťové vlny šíří materiálem a na povrchu tělesa se částečně odrazí zpět a zároveň se šíří do okolního prostředí. I když je energie vlny malá, lze ji snímat piezoelektrickými snímači akustické emise. V diagnostice je metoda

používána při diagnostice rotačních součástí (ložiska), lokalizaci úniků tekutin z potrubí, lokalizaci mikrotrhlin a jejich šíření aj. Akustická emise se dělí na:

- nespojitou – jedná se o signál časově oddělené události (např. měnící se trhlina v materiálu),
- spojitou – signál vznikající neoddělenými časovými událostmi.

Nevýhoda metody spočívá v neznámé příčině vzniku vlny, a to z důvodu ovlivnění uvolněné energie tvarem a povrchem tělesa, přenosovou cestou vlny danou strukturou a homogenitou materiálu.

3.7 Diagnostika poruch ventilátoru

V předchozích podkapitolách byly popsány možnosti diagnostických metod aplikovatelných k diagnostice ventilátoru. V následujícím textu budou uvedeny možné příčiny poruch jednotlivých součástí ventilátoru.

3.7.1 Diagnostika oběžného kola ventilátoru

V kapitole 2.1 bylo napsáno, že oběžné kolo jednostranně sacího radiálního ventilátoru RVK 2500 je umístěno uvnitř spirální skříně a nasazeno na hnané hřídeli a je pojištěno pojistnou deskou se šrouby na jeho konci. Úkolem lopatek je dodání kinetické energie dopravované vzdušině. Vzhledem ke styku lopatek ventilátoru se vzdušinou a prašným prostředím v okolí může docházet k ulpívání nánosu na jednotlivých lopatkách a z toho vyplývajícího vzniku nevývahy oběžného kola. Jiná příčina vzniku nevyváženosti oběžného kola může být způsobena mechanickým uvolněním kola. Jedná se o funkční příčiny nevyváženosti. Výrobní a montážní příčiny nevyváženosti mohou být:

- nerovnoměrná hustota materiálu součástí,
- trvalá deformace součástí,
- výrobní úchytky a výstřednosti rotačních ploch vůči ose rotace,
- nekruhovitost ložiskových čepů.

Nevývaha

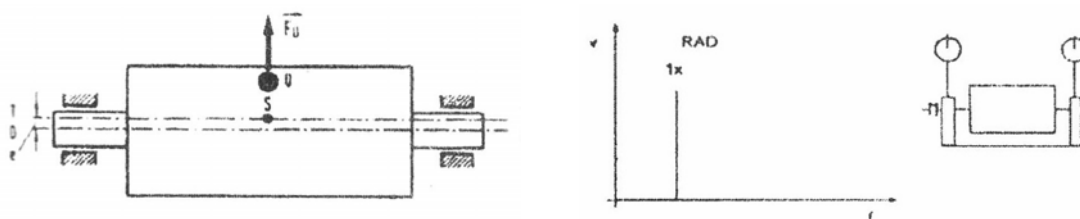
Nevyváženost lopatek oběžného kola může být příčinou vzniku odstředivých sil, projevujících se vibracemi a hlukem. Nevyváženost způsobuje:

- snížení životnosti ložisek,
- zvýšení dynamického namáhání rotoru,

- může způsobit kolizi rotoru se statorem,
- ohrožuje funkci stroje.

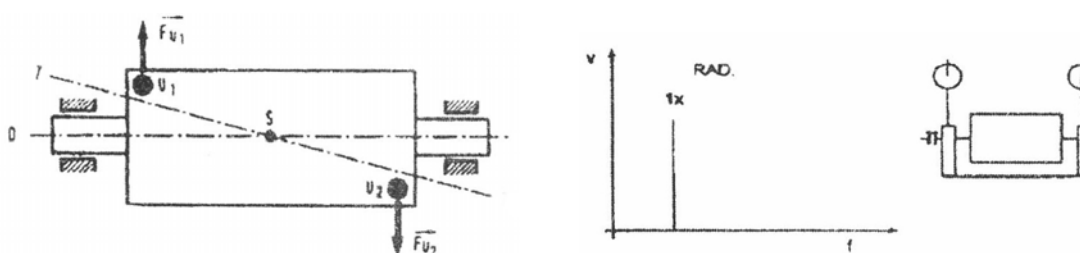
Při nevyváženosti dochází k odklonu hlavní centrální osy setrvačnosti od osy rotace. Osou rotace rozumíme geometrické místo bodů otáčejícího se tělesa, které mají nulovou obvodovou rychlost. Hlavní centrální osou setrvačnosti je osa procházející těžištěm tělesa. Podle typu vzájemného odklonění těchto dvou os rozlišujeme nevyváženost:

- statickou – jedná se o paralelní posunutí hlavní centrální osy vůči ose rotace. Působí zde jedna síla a ve frekvenčním spektru (obr č. 11) se projevuje dominující první harmonická složka otáček, která je na stejném hřídeli ve fázi,



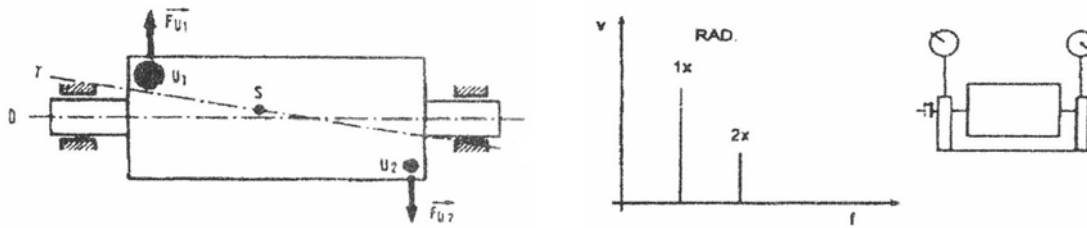
Obr. č. 11 Statická nevyváženost a její frekvenční spektrum

- momentová – jedná se o naklonění hlavní centrální osy setrvačnosti vůči ose rotace o určitý úhel. Přitom se osy protínají v ose těžiště rotoru. Působí zde dvě totožné síly proti sobě, což se ve frekvenčním spektru projevuje posunem fáze na stejném hřídeli o 180° . Stejně jako u statické nevyváhy zde dominuje první harmonická složka,



Obr. č. 12 Momentová nevyváženost a její frekvenční spektrum

- dynamická – nejčastěji vyskytující se typ nevyváženosti v praxi. Jedná se o kombinaci statické a momentové nevyváženosti, tzn. naklonění hlavní centrální osy setrvačnosti vůči ose rotace. Osy se neprotínají v těžišti. Ve frekvenčním spektru opět dominuje první harmonická složka otáček, ale může se vyskytovat i druhá harmonická složka. Fázový posuv při měření na stejné hřídeli je obecný.



Obr. č. 13 Dynamická nevyváženost a její frekvenční spektrum

Velikost všech tří typů nevyváženosti lze zjistit měřením amplitud vibrací na ložiskových tělesech. Abychom přesně diagnostikovali problém související s nevyváhou, je potřeba provést měření celkových vibrací frekvenčního spektra a měření fáze (viz. diagnostika hřídele ventilátoru).

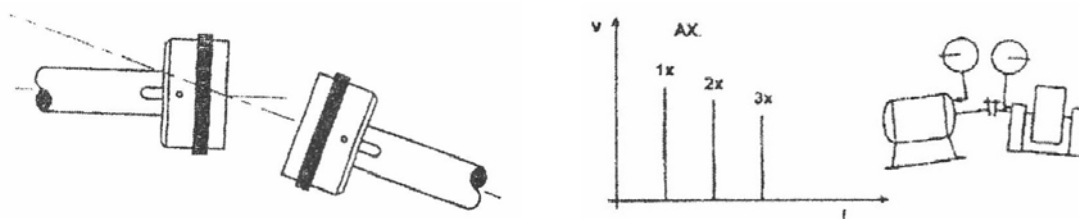
Mechanické uvolnění

Ve frekvenčním spektru se projevuje vysokými amplitudami vibrací vyšších harmonických složek, otáčkové frekvence subharmonických složek a interharmonických složek. K přesnému odhalení závady se využívá metody zviditelnění provozních tvarů kmitů.

3.7.2 Diagnostika hřídele ventilátoru

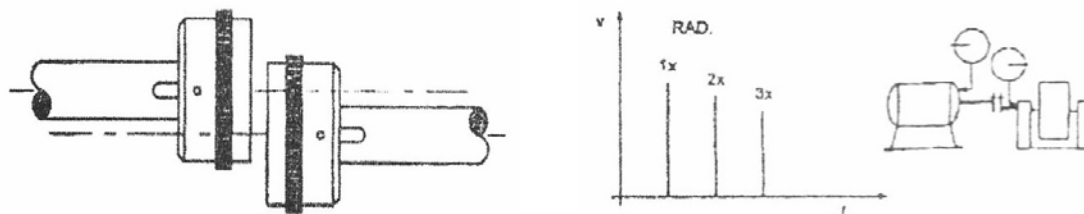
K tomu, aby docházelo k přenosu mechanické energie na lopatky oběžného kola, je nutné mechanické spojení (pružná spojka VPS) hnací a hnané hřídele. Při předpokladu správného ustavení stroje je při spojování nezbytné dodržovat přesnou sousost spojovaných hřídelí a smontovanost spojek. Nedodržením zmiňovaných požadavků dochází ke zvýšenému zatížení součástí stroje (hřídelí, ložisek, základů a spojky), což může vést až k jejich poškození. Příčiny chyb nesousosti mohou být dále způsobeny ložiskovými vůlemi, průhybem hřídele, chybami v montáži, změnou polohy hřídele v provozním stavu oproti montážnímu a dalšími. V závislosti na poloze os hřídelí rozeznáváme dva druhy nesousosti:

- úhlová – projevuje se velkými axiálními vibracemi na první a druhé harmonické složce otáček, které přes spojku mění fázi o 180° ,



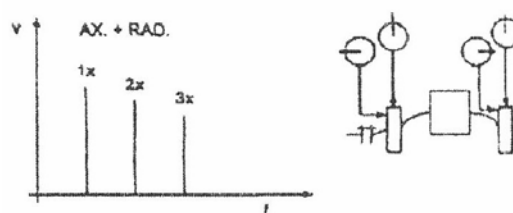
Obr. č. 14 Úhlová nesousost a její frekvenční spektrum

- rovnoběžná – projevuje se radiálními vibracemi v protifázi, s druhou otáčkovou frekvencí větší než první otáčková frekvence. Vzhledem k velikosti přesazení se mohou vyskytovat čtyřikrát až osmkrát vyšší amplitudy než složka otáčkové frekvence.



Obr. č. 15 Rovnoběžná nesouosost a její frekvenční spektrum

Zvýšené vibrace může způsobovat nejen nesouosost hřídelí, ale také ohnutý hřídel. K ohnutí hřídele může dojít nesprávnou manipulací při transportu, vysokým kroučícím momentem, teplotou nebo vlastní hmotností. Ve výsledném frekvenčním spektru se ohnutý hřídel projevuje stejně jako nesouosost. Stejně tak způsobuje zvětšené dynamické namáhání ložisek. K jejich rozlišení je třeba měření fáze.



Obr. č. 16 Frekvenční spektrum ohnuté hřídele

Měřením fáze určíme úhlový posun mezi signálem od referenční značky umístěné na rotujícím hřídeli a vibračním signálem. Provádí se otáčkoměrem a poskytuje informaci o úrovni amplitudy vibrací i poloze hřídele.

3.7.3 Diagnostika valivých ložisek ventilátoru

Valivá ložiska patří mezi jedny z nejpoužívanějších strojních prvků a jsou nedílnou součástí diagnostikovaného radiálního ventilátoru. Řadí se také k prvkům, které jsou spojovány s kritickými procesy. Jejich porucha v krátkém časovém intervalu může mít za následek fatální poruchy. Proto včas detekovaná porucha ložisek může zabránit nákladným odstávkám při katastrofických poruchách nebo prodloužit životnost ložiska na ekvivalent únavové životnosti.

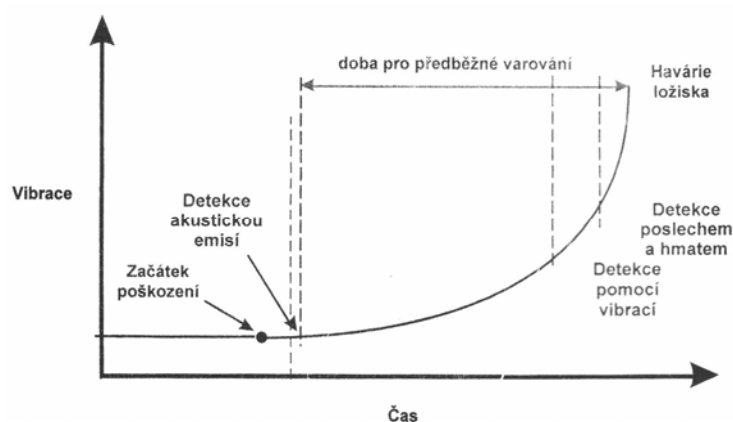
Veškeré vady valivých ložisek jsou doprovázeny zvýšenými vibracemi a hlukem. Ty jsou způsobeny např. silovými impulsy vznikajícími při odvalování valivých členů ložiska po vnější a vnitřní dráze. Na ploše nesoucí zatížení jsou iniciovány trhliny rozšiřující se

k povrchu (pitting) a průchodem valivého elementu přes tuto nerovnost se generují vibrace a hluk.



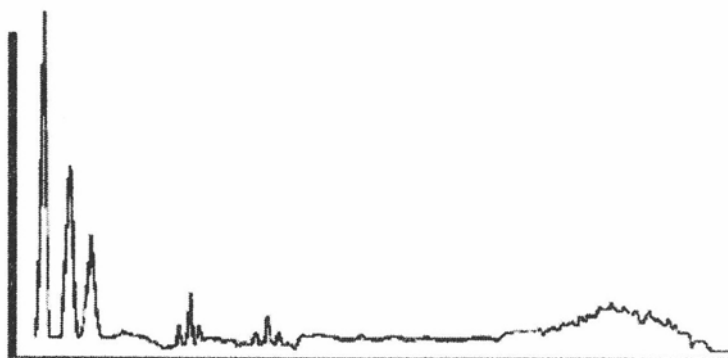
Obr. č. 17 Poškození dráhy valivého ložiska

Následkem nedostatečného mazání nebo nadměrným dynamickým namáháním vzniká další vada, která je vyvolána přetížením povrchu ložiska, čímž dojde ke vzniku povrchové trhliny šířící se do materiálu. Opět jsou průchodem valivého elementu generovány vibrace a hluk.



Obr. č. 18 Průběh vibrací valivého ložiska

Vzhledem k dostatečně dlouhému intervalu mezi počátečním poškozením valivého ložiska až k jeho havárii, dostává při včasné detekci vady valivého ložiska diagnostik dostatek času pro plánování efektivní opravy a ke zjištění příčiny vzniku vady. Problém ovšem nastává při zjišťování vad v raném stádiu. Např. signál akcelerometru je ponořen v šumu. Proto je vyžadováno přístrojové vybavení s velkým dynamickým rozsahem a malým vlastním šumem zesilovače.



Obr. č. 19 Frekvenční spektrum valivého ložiska

Závěrem nutno podotknout, že vady ložisek nejsou ve většině případů prvotní příčinou problémů. Obvykle bývají následkem existence nějaké jiné závady součásti stroje, a to nesouososti nebo nevyváženosti.

3.7.4 Diagnostika elektromotoru ventilátoru

Pro zajištění přeměny elektrické energie na mechanickou energii potřebnou pro pohon oběžného kola, je součástí ventilátoru výše zmiňovaný třífázový asynchronní indukční elektromotor společnosti Siemens typu 1YF600-S-10.

Asynchronní elektromotory patří mezi nejpoužívanější zdroje točivého momentu. Je to z důvodů nízkých výrobních nákladů, vysoké provozní spolehlivosti, šetrnosti k životnímu prostředí, stálosti otáček při proměnlivém zatížení a další. K hlavním součástem asynchronního elektromotoru patří: stator, statorové vinutí, rotor, ložiska, hřídel, ventilátor. Při technické diagnostice elektromotoru se proto zaměřujeme na poruchy a závady vyskytující se v:

- mechanických částech elektromotoru (ložiska, hřídel),
- elektrických obvodech elektromotoru (vinutí statoru a rotoru),
- magnetickém obvodu statoru a rotoru.

Poruchy a vady mechanického původu

Jedná se především o poruchy a vady, které již byly popsány v předešlých kapitolách. Tzn. nevyvážení rotujících částí stroje (nevyváha byla popsána v kapitole 3.7.1), nesouosost elektromotoru a poháněných součástí (kapitola 3.7.2), závady valivých ložisek (kapitola 3.7.3), vady spojené s hřídelí elektromotoru, např. ohnutý hřídel (kapitola 3.7.2) a další.

Poruchy a vady elektromagnetického původu

- statická a dynamická excentricita – způsobuje nevývahu se všemi jejími důsledky pospanými výše. Statická změna vzduchové mezery vzniká nesouosým uložením rotoru a ložiskových těles, dynamická změna vzduchové mezery je způsobena uvolněním rotoru na hřídeli,
- ložiskové proudy – vznikají při poruše izolačního systému. Následným vodivým spojením hřídele a ložiska dochází k průchodu proudu ložiskem, což má za následek narušování povrchu hřídele a valivých tělísek ložiska. Zamezení průchodu ložiskových proudů se provádí odizolováním alespoň jednoho ložiska,
- přerušení rotorové tyče – v rotorových tyčích se indukují napětí, což vytváří vícefázový symetrický systém. Při porušení tyče dochází k nesymetrii systému, která se projeví deformací magnetického pole ve vzduchové mezeře. To se projeví snížením točivého momentu a oteplením vinutí,
- zkratky v magnetickém obvodu – nastávají při špatné manipulaci s rotorem. Dochází k poškození rotorových nebo statorových plechů s následným lokálním zvětšením vzduchové mezery. Zkratky se projevují snížením točivého momentu.

Popsané poruchy a závady elektromotoru se mohou projevovat zvýšenými vibracemi (poškození ložisek, statická a dynamická excentricita, zkratky v magnetických obvodech, vibrace sběrného ústrojí), zvýšeným hlukem (ložiska, nevývahou, kartáči sběrného ústrojí, magnetickými silami, nestejnouměrností vzduchové mezery), oteplením aktivních nebo pasivních částí elektromotoru (vinutí elektromotoru) aj.

4 Návrh systému diagnostiky ventilátoru

Při návrhu diagnostického systému jednostranně sacího radiálního ventilátoru se bude vycházet zejména z jeho dosavadní provozní spolehlivosti, z technických parametrů a dokumentace zařízení (kap. 2.1 a příloha č. 1) a v poslední řadě z vyhodnocení možností a přínosů jednotlivých metod technické diagnostiky (vibrodiagnostika, termodiagnostika, tribodiagnostika a další).

4.1 Vyhodnocení provozní spolehlivosti

Dle informací (za poslední dva roky provozu odprašovacího zařízení) a dosavadních zkušeností provozovatele zařízení, patří mezi nejčastější příčiny poruch ventilátoru nevyváženost (uvolnění některé ze součástí zařízení, zanesení nebo opotřebení lopatek oběžného kola aj.). Poté následují poruchy způsobené vadou ložisek a elektromotoru.

Provoz odprašovacího zařízení je ovlivňován poptávkou, ze které výrobní oddělení vypracovává plán odlévání na ZPO II. Doposud nejdéle zaznamenaný nepřetržitý provoz odprašovacího zařízení trval cca 4 dny a v opačném případě se jednalo o několika denní odstavení provozu. Proto může být četnost poruch v obdobích ekonomické recese nebo naopak ekonomického růstu variabilní a bude k tomu přihlédnuto při návrhu diagnostického systému.

4.2 Technické parametry a dokumentace ventilátoru

Nutné technické parametry a popis funkce odprašovacího ventilátoru byly již uvedeny v kapitole 2. Technická dokumentace je uvedena ve zmiňované příloze č. 1.

4.3 Zhodnocení metod technické diagnostiky

Bylo řečeno, že ventilátory řadíme mezi rotační stroje a provoz rotačních strojů je doprovázen mechanickým kmitáním (vibracemi). Z tohoto dogmatu budeme vycházet při vyhodnocování možností a nasazení metod technické diagnostiky.

4.3.1 Vibrodiagnostika

Nedílnou součástí diagnostického systému bude tedy vibrodiagnostika. V současné době jsou ložisková tělesa opatřena on-line monitorovacími snímači vibrací (obr č. 20). Tyto snímače nám ovšem dávají pouze informace o aktuálním technickém stavu v podobě celkových vibrací v horizontálním směru. Získané informace nám neumožňují přesné zjištění příčiny zvýšených vibrací. Proto bude vibrodiagnostický systém rozšířen

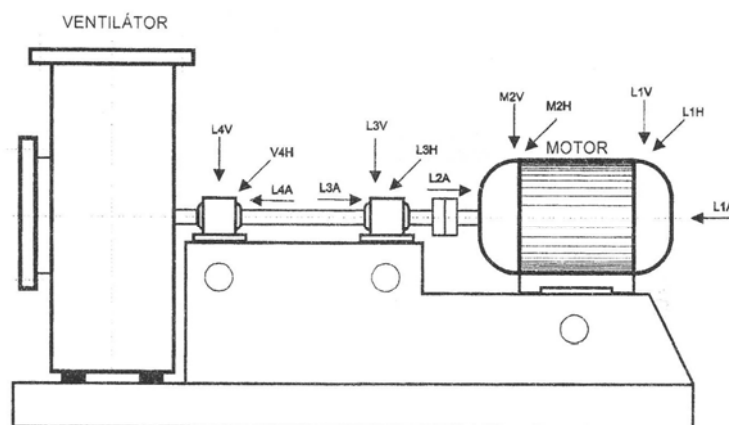
o monitorování vibrací nejen těchto ložisek, ale také budou monitorovány vibrace na elektromotoru.



Obr. č. 20 On-line snímač vibrací

Stanovení měřících míst a měřících směrů

Jak bylo řečeno, měření vibrací bude prováděno na dvou ložiskových tělesech ventilátoru a na dvou místech elektromotoru. Přesné definování měřících míst je patrné z následujícího obr. č. 21.



Obr. č. 21 Schéma měřících míst a směrů měření

K přesnějšímu zjištění dynamického chování zařízení bude měření probíhat ve stanovených místech ve všech měřících směrech, tzn. vertikálně (V), horizontálně (H) a axiálně (A). Měřící místa je doporučeno označit trvanlivou barvou pro zajištění stejnosti měřících míst (posunutí snímače může mít za následek odlišné výsledky).

Výpočet budících frekvencí

Při vyhodnocování naměřených hodnot absolutních vibrací je důležité znát budící frekvence jednotlivých součástí zařízení. Následuje uvedení vzorců pro výpočet hlavních budících frekvencí.

Otáčková frekvence:

$$f_o = \frac{RPM}{60} \quad (4-1)$$

kde: RPM– otáčky elektromotoru.

Lopatková frekvence:

$$f_L = f_o \cdot n_L \quad (4-2)$$

kde: n_L – počet lopatek.

Frekvence vnějšího kroužku:

$$BPFO = \frac{n}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \phi \right) \quad (4-3)$$

Frekvence vnitřního kroužku:

$$BPFI = \frac{n}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \phi \right) \quad (4-4)$$

Frekvence valivého elementu:

$$BSF = \frac{P_d}{2 \cdot B_d} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \right)^2 \cdot \cos^2 \phi \right) \quad (4-5)$$

Frekvence klece ložiska:

$$FTF = \frac{1}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \phi \right) \quad (4-6)$$

kde: n – počet valivých elementů,
 RPM– otáčky,
 B_d – průměr valivého elementu,
 P_d – roztečný průměr,
 ϕ – kontaktní úhel [°].

Druh snímače vibrací

Pro monitorování bude použit snímač zrychlení (akcelerometr). Jedná se o nejběžněji užívaný absolutní snímač vibrací.

Způsob připevnění snímače

Závislost frekvenčního a dynamického rozsahu snímačů je závislá na způsobu jejich uchycení. Zásadami správného připevnění snímačů se zabývá norma ČSN ISO 5348. Vliv připevnění snímače na jeho výkonnost je dle [9] znázorněn v následující tabulce.

Tab. č. 5 Vliv připevnění na výkonnost snímače

Metoda připevnění	Vliv na výkonnost snímače (například snímače s rezonancí 30 kHz)
Tuhý šroubový spoj	Žádné snížení rezonanční frekvence akcelerometru v důsledku připevnění.
Izolovaný šroubový spoj	Pokud je pro zabránění vzniku zemních smyček a jiných vlivů použit tuhý nevodivý materiál, jako je podložka ze slídy, montážní rezonanční frekvence je mírně snížena asi na 28 kHz.
Přilepení tuhým lepidlem	Rezonance je snížena asi na 28 kHz.
Přilepení měkkým epoxidem	Rezonance je snížena asi na 8 kHz.
Připevnění permanentním magnetem	Rezonance je snížena asi na 7 kHz.
Rukou držný snímač (ruční sonda)	Rezonance je snížena asi na 2 kHz, ale tato metoda není doporučena pro měření nad 1 kHz.

Vzhledem k jednoduchosti a nepotřebnosti zásahu do součástí je doporučeno připevnění snímače pomocí permanentního magnetu. Musí však být splněna podmínka, aby rezonanční kmitočet snímače byl minimálně 5 x vyšší než nejvyšší vypočítaná budící frekvence.

Měřená veličina a měřící přístroj

V běžné průmyslové praxi se pro vyhodnocování používá efektivních hodnot rychlostí absolutních vibrací (podrobněji je o hodnocení vibrací pojednáno o odstavce níže). Jelikož byl snímačem vibrací zvolen akcelerometr, jehož výstupem je veličina zrychlení, je nutné, aby zvolený měřící přístroj byl vybaven integračním členem pro převod veličiny zrychlení na veličinu rychlosti. Měřící přístroj musí být také schopen měřit skutečnou efektivní hodnotu absolutních vibrací a umět zpracovat ložiskové signály o vyšších frekvencích metodou obálky.

Hodnocení vibrací

Hodnocení vibrací bude vycházet z normy ČSN ISO 10816, která stanovuje všeobecné podmínky a postupy při měření a hodnocení vibrací pomocí měření prováděných na nerotujících částech. Obecná kritéria této normy se vztahují na provozní monitorování.

Hodnocení je rozděleno do dvou kritérií. První kritérium analyzuje velikost širokopásmových vibrací a definuje meze vibrací v souladu s přípustným dynamickým

zatížením částí zařízení. Posuzuje se nejvyšší naměřená velikost vibrací. Kritérium je dle [10] rozděleno do čtyř pásem hodnocení:

- pásmo A – v tomto pásmu mají obvykle být vibrace nově přejímaných strojů,
- pásmo B – stroje, jejichž vibrace jsou v tomto pásmu, mohou být zpravidla provozovány po neomezeně dlouhou dobu,
- pásmo C – stroje, jejichž vibrace jsou v tomto pásmu, jsou za normálních okolností považovány za neuspokojivé pro dlouhodobý trvalý provoz. Obecně mohou být stroje za takovýchto podmínek provozovány po omezenou dobu, než nastane vhodná možnost nápravy,
- pásmo D – hodnoty vibrací v tomto pásmu jsou za normálních okolností považovány za natolik nebezpečné, že mohou způsobit poškození stroje.

Druhé kritérium sleduje změnu velikosti vibrací vůči referenční hodnotě. Dle [10] se u dlouhodobého provozu stroje doporučuje stanovit provozní meze:

- výstraha – stanovuje se podle poměru referenční hodnoty a meze pásma B,
- přerušení provozu – obecně leží v pásmu C nebo D.

Četnost monitorovacích měření

Vzhledem ke znalostem četností a druhů dosavadních poruch bude monitorování vibrací zařízení prováděno v měsíčních intervalech. V případě, kdy absolutní hodnota naměřených vibrací přesáhne kritérium C, je doporučeno zkrátit interval mezi monitorovacími cykly na polovinu, tzn. monitorování provádět jednou za 14 dní.

Rozsah měření

Předpokládaný frekvenční rozsah měření bude v rozmezí 0 – 1000 Hz. Potvrzení tohoto frekvenčního rozsahu měření bude provedeno v kapitole 6.1.

Provozní podmínky

Veškerá vibrační monitorovací měření musí probíhat za jednotných ustálených provozních podmínek odprašovacího zařízení.

4.3.2 Termodiagnostika

Druhý diagnostický systém použitý ke sledování technického stavu ventilátoru na zařízení pro odsávání a filtrování spalin z pánvové pece bude termodiagnostika.

Ložisková tělesa ventilátoru jsou osazena on-line měřícími čidly teploty (obr č. 22). Ty nám podávají postačující informaci pouze ke stavu ventilátorových ložisek (zda jsou dostatečně mazána, jestli nedochází ke zvýšenému dynamickému namáhání ložisek).



Obr. č. 22 On-line snímač teploty

Teplotu, jako diagnostický parametr pro stanovení technického stavu objektu, můžeme také využít při diagnostikování stavu elektromotoru ventilátoru. V daném případě bude nejefektivnější využití infradiagnostického systému, tzn. použití termovizního systému pro sledování teploty pláště elektromotoru. Nasazení této diagnostické metody je doporučeno při zvýšených vibracích zařízení majících původ v elektromotoru. Pomocí této metody lze lokalizovat vady vnitřních částí elektromotoru.

4.3.3 Tribodiagnostika

Jediný tribologický proces, uskutečňovaný mazací soustavou, je aplikován ve valivých ložiscích ventilátoru. Jedná se o dlouhodobou beztlakovou olejovou mazací soustavu. Vzhledem k výše zmíněnému jde o jednotlivé mazání součástí a není proto nutné u radiálního ventilátoru jakéhokoli nasazení tribodiagnostického systému. Bude zde probíhat pouze pravidelná kontrola množství mazacího oleje.



Obr. č. 23 Měrka stavu oleje

5 Provozní ověření navrženého diagnostického systému

V rámci ověření výše navrženého diagnostického systému (vibrodiagnostika a termodiagnostika), bylo provedeno terénní měření vibrací a snímání teplotních polí na určeném zařízení.

5.1 Vibrodiagnostika

Měření vibrací probíhalo v souladu se zpracovanou metodikou měření v kapitole 4.3.1. K měření byl použit přístroj Vibrotest 60 (obr č. 24) společnosti Brüel & Kjer Vibro. Jedná se o vibrační analyzátor, sběrač dat a provozní vyvažovačku.



Obr. č. 24 Vibrotest 60

Přístroj je vzhledem ke své nízké hmotnosti a kompaktnosti snadno obsluhovatelný a vhodný k provoznímu použití. Vyznačuje se velkou rychlostí a přesností měření a zároveň dovede provádět simultánní zpracování až pěti měření ve třech směrech najednou. Vzhledem k možnostem dalšího rozšiřování měřících funkcí má tento přístroj dlouhou morální životnost a bude použitelný i v budoucnu. Technická data přístroje jsou uvedena v následující tabulce.

Tab. č. 6 Technická data Vibrotestu 60

Měřené veličiny		
<i>Charakteristické hodnoty kmitání</i>	Napětí signálu	<30 V pp
	Šířka pásma	1 Hz ... 20 kHz
	Vyhodnocení signálu	peak, peak-peak, rms, pc, ppc
	Přesnost	2%, vztaženo na měřenou hodnotu
<i>BCU</i>	Přesnost	2%, vztaženo na měřenou hodnotu
<i>Teplota s PT 100</i>	Přesnost	2%, vztaženo na měřenou hodnotu
<i>Procesní veličiny</i>	Šířka pásma	0 Hz ... 20 kHz
	Vstupní napětí	-30 V ... +30 V
	Vstupní odpor	60 k Ω
	Vstupní proud	0/4 ... 20 mA
	Vstupní odpor	100 Ω
	Přesnost	2%, vztaženo na měřenou hodnotu
<i>Spektra</i>	Frekvenční rozsah	0 ... 20 Hz, 0 ... 20 kHz
	Počet čar	100, 200, 400, ... 6400
	Typ oken	Flat Top, Hanning, Pravoúhlé
<i>Otáčky</i>	Napětí signálu	0,2 ... 30 V pp
	Vstupní frekvence	0,25 Hz ... 10 kHz
	Převodní poměr	Impulsy/Otáčky 1 ... 999/1 ... 999
	Rozsah otáček při převodním poměru 1:1	0,25 ... 10.000 ot/s

Jako snímač vibraací byl zvolen snímač zrychlení AS 060 se zabudovaným nábojovým zesilovačem.

Tab. č. 7 Technická data snímače AS 060

Citlivost	10,2 mV/ms ⁻²
Frekvenční rozsah	1 – 15 kHz
Rezonanční frekvence	35 kHz
Rozsah pracovních teplot	-50 - +121 °C
Vnitřní odpor	100 Ω
Hmotnost	0,080 kg
Krytí	IP 66
Napájecí napětí	-20 V

Zpracování naměřených veličin bylo provedeno softwarem Extended Monitoring Software (XMS), což je profesionální software pro optimální zpracování konceptu pro kontrolu stavu zařízení a poskytuje velmi dobrou podporu pomocí inteligentní databáze pro systematické využití veškerých dat získaných měření. Modulární uspořádání XMS softwaru umožňuje využití širokého rozsahu jeho funkcionality podle individuálních požadavků zpracovatele.

Software nabízí dva základní moduly:

- modul sběru dat – výměna dat mezi sběračem a počítačem, archivování dat v databázi, export dat ve standardních formátech, vytváření finálních zpráv,
- modul analýzy a trendování – grafická prezentace a analýzy spektra (jednoduchá spektra, multispektra, kaskádové diagramy), cepstrální analýza, obálková analýza, FFT funkce označení frekvenčních vad atd.

5.2 Termodiagnostika

Termodiagnostické měření bylo provedeno infkakamerou SAT G90 společnosti SATIR Europe.



Obr. č. 25 Infkakamera SAT G90

Infrakamera SAT G90 je lehká, vysoce výkonná infračervená kamera. Společně s odnímatelným a otočným displejem nabízí digitální záznam zvuků a ukládání snímaných teplotních obrazů. Technické parametry infrakamery jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. č. 8 Technická data infrakamery SAT G90

Měřené veličiny	
<i>Měřicí rozsah</i>	-20°C - +600°C, dva rozsahy: do 1500°C nebo +2000°C
<i>Přesnost</i>	±2°C, ±2% měřené veličiny
<i>Korekce emisivity</i>	V rozsahu 0,01 t- 1,00 t (krok 0,001)
<i>Korekce okolní teploty prostředí</i>	Automaticky
Ukazatel systémových funkcí	
<i>LCD displej</i>	Ukazatel stavu nabití baterie, okolní teplota prostředí, čas a datum, ukazatel operace
Laserové ukazovátko	
<i>Typ</i>	Třída 2, polovodičový AlGaInP diodový laser, 1 mw/635 nm červený
Podmínky okolního prostředí	
<i>Rozsah pracovních teplot</i>	-15°C - +50°C
<i>Rozsah skladovacích teplot</i>	-40°C - +70°C
<i>Vlhkost</i>	Pracovní a skladovací vlhkost 10% - 95%, bez kondenzace
<i>Krytí</i>	IP 54
Fyzické parametry	
<i>Hmotnost (včetně baterie)</i>	1,750 kg
<i>Rozměry</i>	0,327 m × 0,143 m × 0,170 m
<i>Třínohý podstavec</i>	1/4' – 20'

6 Analýza výsledků měření

6.1 Vibrodiagnostika

Analýza signálu bude vycházet z naměřených absolutních hodnot vibrací. Ty jsou nezbytné pro zařazení ventilátoru do určitého provozního pásma dle [10]. Tyto hodnoty můžeme také použít k trendové analýze absolutních hodnot vibrací, kdy nám mohou poskytnout výstrahu při výskytu abnormálního stavu ventilátoru.

Dalším nástrojem, pro získání informací o technickém stavu ventilátoru, je frekvenční analýza. Ta nám podá, oproti hodnotám absolutních vibrací, podrobnější analýzu ventilátoru. Tzn. detailnější zjištění příčin změny stavu ventilátoru přiřazením jednotlivých zdrojů budícím frekvencím ve spektru vibrací.

V kapitole 3.7.3. bylo napsáno, že ložiska jsou spojována s kritickými procesy, a jejich porucha může mít v krátkém časovém intervalu fatální následky. Vady ložisek se projevují malými amplitudami na vyšších frekvencích. Abychom se o jejich stavu dozvěděli více, musíme při analýze využít možností obáلكové metody. Tato metoda vede k oddělení malých signálů o vyšších frekvencích od nízkofrekvenčních signálů ventilátoru. Poté je takto oddělený signál ve frekvenčním spektru zvýrazněn.

Abychom mohli analyzovat frekvenční spektra a obáلكy, musíme v první řadě znát jednotlivé frekvence budících zdrojů. Ty vypočteme podle vzorců uvedených v kapitole 4.3.1.

Otáčková frekvence:

$$f_o = \frac{RPM}{60} = \frac{750}{60} \Rightarrow f_o = \underline{\underline{12,5Hz}}$$

Lopátková frekvence:

$$f_L = f_o \cdot n_L = 12,5 \cdot 12 \Rightarrow f_L = \underline{\underline{150Hz}}$$

Budící frekvence soudečkových ložisek ventilátoru

Frekvence vnějšího kroužku:

$$BPFO = \frac{n}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \phi\right) = \frac{19}{2} \cdot \frac{750}{60} \cdot \left(1 - \frac{32}{226,5} \cdot \cos 10\right)$$

$$BPFO = \underline{\underline{132,8Hz}}$$

Frekvence vnitřního kroužku:

$$BPFI = \frac{n}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \phi \right) = \frac{19}{2} \cdot \frac{750}{60} \cdot \left(1 + \frac{32}{226,5} \cdot \cos 10 \right)$$

$$BPFI = \underline{\underline{104,7 Hz}}$$

Frekvence valivého elementu:

$$BSF = \frac{P_d}{2 \cdot B_d} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \right)^2 \cdot \cos^2 \phi \right) = \frac{226,5}{2 \cdot 32} \cdot \frac{750}{60} \cdot \left(1 - \left(\frac{32}{226,5} \right)^2 \cdot \cos^2 10 \right)$$

$$BSF = \underline{\underline{43,6 Hz}}$$

Frekvence klece ložiska:

$$FTF = \frac{1}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \phi \right) = \frac{1}{2} \cdot \frac{750}{60} \cdot \left(1 - \frac{32}{226,5} \cdot \cos 10 \right)$$

$$FTF = \underline{\underline{7 Hz}}$$

kde: n – počet valivých elementů,
 RPM – otáčky,
 B_d – průměr valivého elementu,
 P_d – roztečný průměr,
 φ – kontaktní úhel [°].

Budící frekvence válečkového ložiska elektromotoru

Frekvence vnějšího kroužku:

$$BPFO = \frac{n}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \phi \right) = \frac{14}{2} \cdot \frac{750}{60} \cdot \left(1 - \frac{34}{177,3} \cdot \cos 0 \right)$$

$$BPFO = \underline{\underline{70,72 Hz}}$$

Frekvence vnitřního kroužku:

$$BPFI = \frac{n}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \phi \right) = \frac{14}{2} \cdot \frac{750}{60} \cdot \left(1 + \frac{34}{177,3} \cdot \cos 0 \right)$$

$$BPFI = \underline{\underline{104,28 Hz}}$$

Frekvence valivého elementu:

$$BSF = \frac{P_d}{2 \cdot B_d} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \right)^2 \cdot \cos^2 \phi \right) = \frac{177,3}{2 \cdot 34} \cdot \frac{750}{60} \cdot \left(1 - \left(\frac{34}{177,3} \right)^2 \cdot \cos^2 0 \right)$$

$$BSF = \underline{\underline{31,39 Hz}}$$

Frekvence klece ložiska:

$$FTF = \frac{1}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \phi \right) = \frac{1}{2} \cdot \frac{750}{60} \cdot \left(1 - \frac{34}{177,3} \cdot \cos 0 \right)$$

$$FTF = \underline{\underline{5,05 Hz}}$$

kde: n – počet valivých elementů,
RPM – otáčky,
 B_d – průměr valivého elementu,
 P_d – roztečný průměr,
 ϕ – kontaktní úhel [°].

Budící frekvence kuličkového ložiska elektromotoru

Frekvence vnějšího kroužku:

$$BPFO = \frac{n}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \phi \right) = \frac{8}{2} \cdot \frac{750}{60} \cdot \left(1 - \frac{30,16}{132,5} \cdot \cos 0 \right)$$

$$BPFO = \underline{\underline{38,62 Hz}}$$

Frekvence vnitřního kroužku:

$$BPMF = \frac{n}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \phi \right) = \frac{8}{2} \cdot \frac{750}{60} \cdot \left(1 + \frac{30,16}{132,5} \cdot \cos 0 \right)$$

$$BPMF = \underline{\underline{61,38 Hz}}$$

Frekvence valivého elementu:

$$BSF = \frac{P_d}{2 \cdot B_d} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \right)^2 \cdot \cos^2 \phi \right) = \frac{132,5}{2 \cdot 30,16} \cdot \frac{750}{60} \cdot \left(1 - \left(\frac{30,16}{132,5} \right)^2 \cdot \cos^2 0 \right)$$

$$BSF = \underline{\underline{26,04 Hz}}$$

Frekvence klece ložiska:

$$FTF = \frac{1}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \phi \right) = \frac{1}{2} \cdot \frac{750}{60} \cdot \left(1 - \frac{30,16}{132,5} \cdot \cos 0 \right)$$

$$FTF = \underline{\underline{4,83 Hz}}$$

kde: n – počet valivých elementů,
RPM – otáčky,
 B_d – průměr valivého elementu,
 P_d – roztečný průměr,
 ϕ – kontaktní úhel [°].

V druhé řadě potřebujeme znát, dle stanovené metodiky, číselné hodnoty absolutních vibrací pro zařazení stroje do určitého pásma hodnocení. Vycházíme z normy ČSN ISO 10816-3 Průmyslové stroje se jmenovitým výkonem nad 15 kW a jmenovitými otáčkami mezi 120 min^{-1} a 15000 min^{-1} při měření in situ, podle které řadíme diagnostikovaný

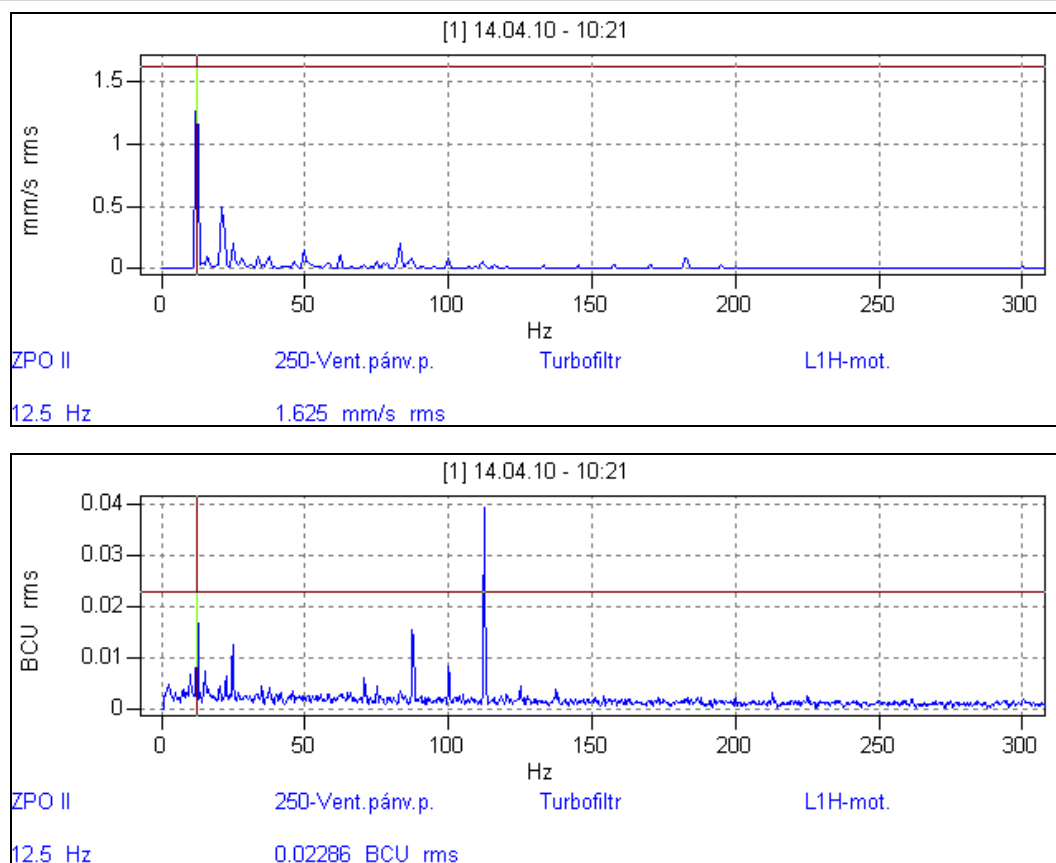
ventilátor odprašovacího zařízení do skupiny 1: nad 300 kW, elektromotory s výškou hřídele $H \geq 315$ mm s tuhým uložením. Pro tento typ strojů jsou hodnoty provozních mezí uvedeny v tabulce č. 9.

Tab. č. 9 Klasifikace pásem absolutními vibracemi

Třída uložení	Hranice pásma	Efektivní hodnota výchylky [μm]	Efektivní hodnota rychlosti [mm/s]
Tuhé	A/B	29	2,3
	B/C	57	4,5
	C/D	90	7,1
Pružné	A/B	45	3,5
	B/C	90	7,1
	C/D	140	11,0

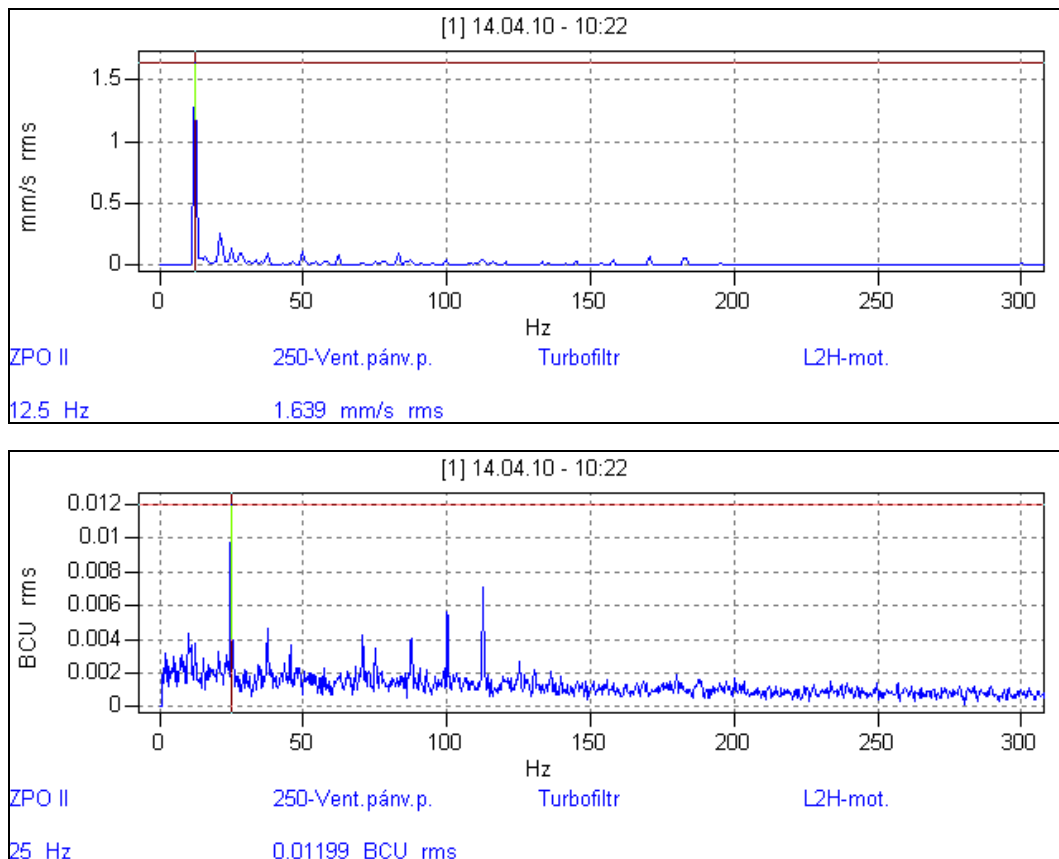
Po takto vypočtených budících frekvencích a určení mezních provozních hodnot absolutních vibrací můžeme přistoupit k samotnému vyhodnocení vlastního vibrodiagnostického měření.

Na následujících obrázcích jsou z provozních měření vybrána některá frekvenční spektra rychlosti vibrací a obálek BCU. Zbylá frekvenční spektra rychlosti vibrací a obálek BCU jsou uvedena v přílohové části této práce. Na obr. č. 26 vidíme efektivní hodnotu (RMS) rychlosti vibrací $1,625 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ na otáčkové frekvenci 12,5 Hz a také vyšší špičku na dvojnásobku otáčkové frekvence. Vyšší hodnota špičky na dvojnásobné otáčkové frekvenci indikuje nesouosost. Efektivní hodnoty obálkového spektra BCU válečkového ložiska elektromotoru indikují poškození vnitřního kroužku, projevující se v oblasti vypočtené budící frekvence 104,28 Hz. Dále je zde vidět i vyšší špička na budící frekvenci vnějšího kroužku (70,72 Hz).



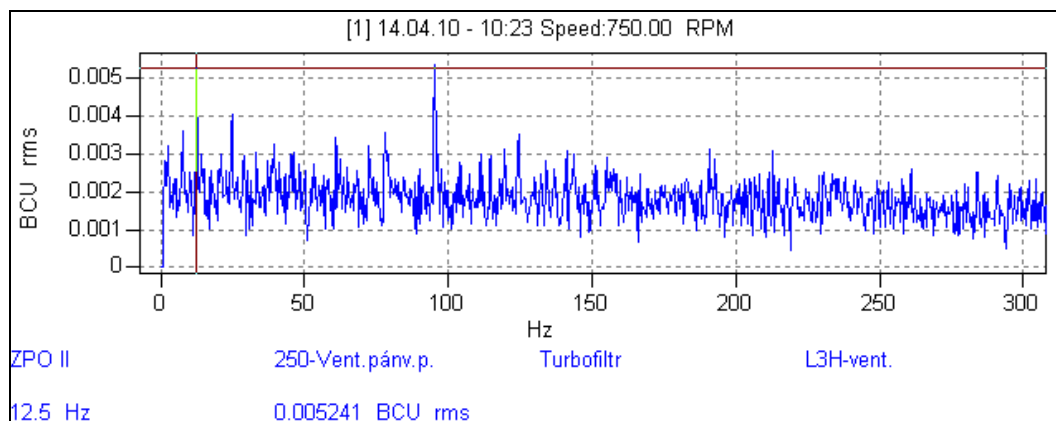
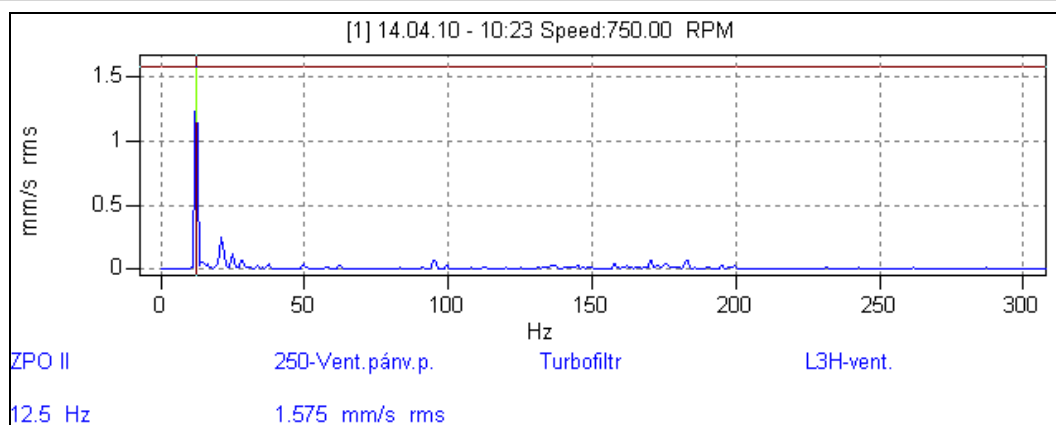
Obr. č. 26 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací a obálka BCU v bodě L1H-mot.

Stejně jako u válečkového ložiska tak i u kuličkového ložiska elektromotoru vidíme ve spektru (obr. č. 27) RMS rychlosti vibrací o velikosti $1,639 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ na první otáčkové frekvenci a také objevující se špičku na jejím dvojnásobku. Obálková analýza BCU tohoto ložiska indikuje nejvyšší špičku $0,01199 \text{ BCU}$ měřeného signálu na budící frekvenci valivého elementu ložiska.

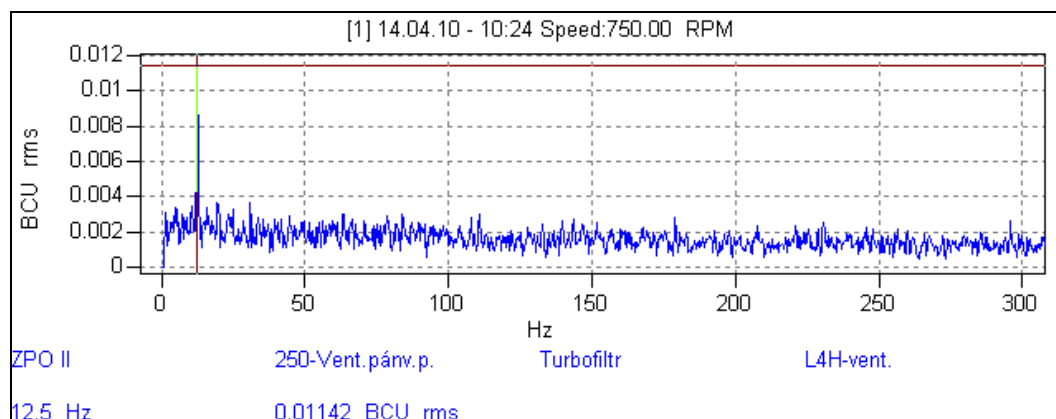
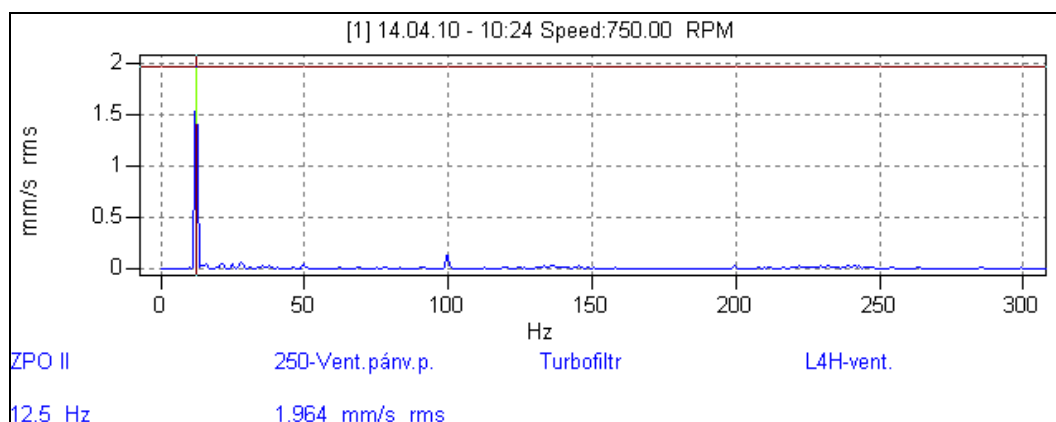


Obr. č. 27 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací a obálka BCU v bodě L2H-mot.

Frekvenční spektra rychlosti vibrací soudečkových ložisek ventilátoru vykazují jak v místě měření L3H-vent. tak i L4H-vent. špičky na otáčkové frekvenci 12,5 Hz o velikosti $1,575 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, resp. $1,964 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. V bodě L3H-vent. je také patrná špička na dvojnásobku otáčkové frekvence, což potvrzuje již zmíněnou počínající nesouosost. Efektivní hodnoty obálky BCU těchto ložisek jsou na velmi nízké úrovni, ale můžeme zde vidět v bodě L3H-vent. špičku o velikosti 0,005241 BCU v oblasti budící frekvence vnitřního kroužku soudečkového ložiska ventilátoru (104,7 Hz). Nejvyšší efektivní hodnota BCU napravo od této špičky odpovídá budící frekvenci vnějšího kroužku ložiska (132,8 Hz). V bodě L4H-vent. je nejvýraznější pouze efektivní hodnota 0,01142 BCU na otáčkové frekvenci 15,5 Hz.



Obr. č. 28 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací a obálka BCU v bodě L3H-vent.



Obr. č. 29 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací a obálka BCU v bodě L4H-vent.

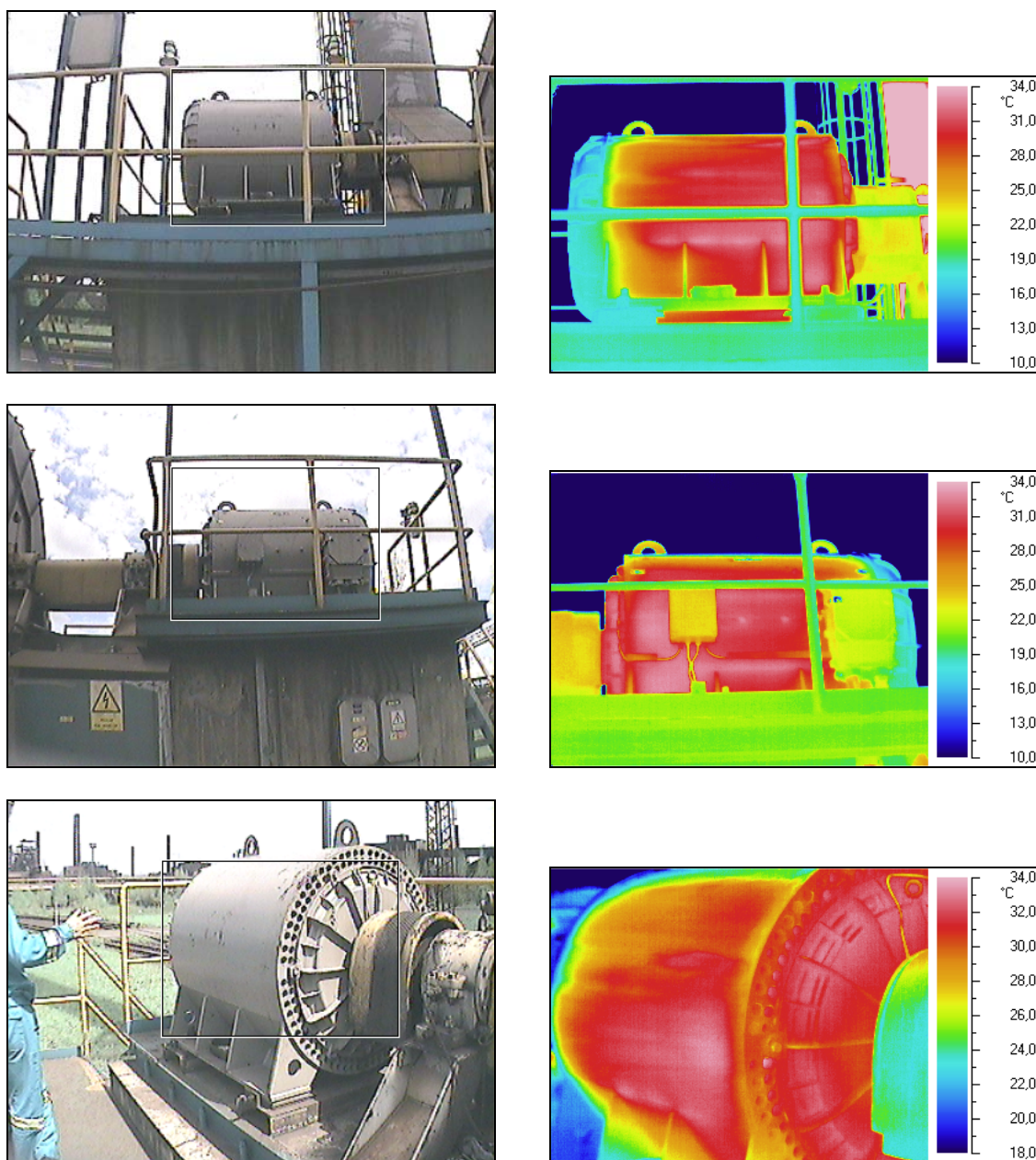
K analýze byla vybrána frekvenční spektra rychlosti vibrací a obálky BCU pouze z měření v horizontálním směru, a to z toho důvodu, že největší vibrace se projevují právě v horizontálním směru. Ze všech tří směrů (vertikální, horizontální a axiální) jsou zařízení v horizontálním směru nejpoddajnější. Proto jsou nadměrné vibrace vznikající v horizontálním směru náležitým indikátorem blížící se změny technického stavu zařízení.

Z frekvenčních spekter rychlosti vibrací je patrné, že v žádném z měřených míst hodnoty nepřekračují kritérium A a absolutní vibrace tedy můžeme zařadit do pásma A. Toto pásmo nám říká, že naměřené absolutní vibrace za normálních podmínek odpovídají nově přejímaným strojům. To nám potvrzuje i pohled na přílohy č. 2 - 6, kde v trendové analýze vidíme, že v závěru roku 2009 byla na ventilátoru zařízení odprašování pánvové pece na ZPO II provedena náprava zvýšených absolutních vibrací.

Zjištěné vibrace se v té době pohybovaly na všech měřených místech v horizontálním směru v pásmu C (stav zařízení je za normálních podmínek neuspokojivý pro dlouhodobý a trvalý chod). Vibrace byly způsobeny nevyváhou oběžného kola ventilátoru. Proto, při plánovaném odstavení provozu ZPO II, bylo provedeno nápravné opatření vedoucí k odstranění závady a s tím související snížení absolutních vibrací do pásma A až do dnešní doby.

6.2 Termodiagnostika

Při zvýšených vibracích je v kapitole *Návrh systému diagnostiky ventilátoru* termodiagnostický systém navrhován jako doplňkový systém technické diagnostiky elektromotoru pro přesnější identifikaci jeho závad. Přestože výsledky z měření vibrací neprokázaly žádné zvýšené hodnoty, bylo i tak termodiagnostické měření elektromotoru pro studijní účely provedeno. Výsledky tohoto měření jsou vidět na obr. č. 30.



Obr. č. 30 Termosnímky elektromotru

Stejně jako u frekvenčních spekter a obálek ani zde nejsou vidět žádné teplotní zdroje, které by iniciovaly vznik závady elektromotoru. Nejteplejší místa v teplotních obrazech elektromotoru dosahují teploty 34 °C.

7 Závěr

Tato diplomová práce se zabývá provedením rešerše a analýzy problematiky diagnostiky ventilátorů s následným návrhem a rozбором možného použití navržených metod technické diagnostiky na odprašovacím zařízení ZPO II ve společnosti ArcelorMittal Ostrava a.s. Po provedeném rozboru navržených metod technické diagnostiky bylo realizováno praktické ověření vybraných metod na vlastním stroji, spolu s analýzou výsledků měření a posouzením současného stavu zařízení.

Vzhledem k různorodosti ventilátorového zařízení a neexistující univerzální metodě ke sledování technického stavu zařízení, bylo uvažováno s použitím kombinace diagnostických metod a prostředků k určení celkového stavu zařízení, tzn. multiparametrická diagnostika. Z navrhovaných alternativ technické diagnostiky (vibrodiagnostika, tribodiagnostika, termodiagnostika, hluková diagnostika a akustická emise) byly pro stanovení technického stavu ventilátoru odprašovacího zařízení vybrány metody vibrodiagnostiky a termodiagnostiky.

Měření absolutních vibrací probíhalo za normálních provozních podmínek na předem určených místech a ve všech měřících směrech. Vyhodnocování absolutních vibrací vycházelo z normy ČSN ISO 10816-3, která předepisuje provozní meze pro zařazení stroje do určitého pásma. V tomto případě se vibrace pohybovaly v nejnižším pásmu. Tzn., že zařízení je ve velmi dobrém technickém stavu. Stejný závěr prokázalo i termodiagnostické měření.

Z provozního ověření navržených diagnostických metod a analýz jejich naměřených výsledků můžeme vyslovit závěr, že použití vibrodiagnostického a termodiagnostického systému pro stanovení technického stavu ventilátoru na odprašovacím zařízení pro ZPO je plně postačující.

SEZNAM LITERATURY

- [1] KONEČNÝ, P.: *Diagnostika výsuvného válečku zařízení pro plynulé odlévání oceli*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008, 48 s. Bakalářská práce.
- [2] NOVÝ, R.: *Ventilátory*. 3. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 2007. 104 s. ISBN 978-80-01-03758-4.
- [3] HELEBRANT, F., ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost II. Vibrodiagnostika*. Dotisk 1. Vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská v Ostravě, 2005. 178 s. ISBN 80-248-0650-9.
- [4] ZIEGLER, J., HELEBRANT, F.: *Technická diagnostika výrobních zařízení*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská v Ostravě, 1992. 182 s. ISBN 80-7078-111-4.
- [5] KREIDL, M., ŠMÍD, R.: *Technická diagnostika. Senzory-metody-analýza signálu*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2006. 408 s. ISBN 80-7300-158-46.
- [6] TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů použitím FFT*. Praha: Sdělovací technika, 1997. 174 s. ISBN 80-901936-1-7.
- [7] ZIEGLER, J., HELEBRANT, F.: *Technická diagnostika a spolehlivost. Tribodiagnostika*. Dotisk 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská v Ostravě, 2004. 158 s. ISBN 80-7078-883-6.
- [8] KREIDL, M.: *Měření teploty. Senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-145-4.
- [9] ČSN ISO 5348. *Vibrace a rázy – Mechanické připevnění akcelerometrů*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 16 s.
- [10] ČSN ISO 10816-3. *Vibrace – 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 15 000 1/min při měření in situ*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. 20 s.
- [11] PETRUŽELKA, J. *Ročníkový projekt. Jak psát bakalářskou práci [online]*. Ostrava: VŠB-TUO, FS, poslední aktualizace 21. 10. 2006 [cit. 2077-04-10]. Dostupný z www: <URL: <http://www.345.vsb.cz/jiripetruzelka/Texty/Jak%20psat.pdf>>.