

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra výrobních strojů a konstruování

Multiparametrická diagnostika zařízení pro přepravu kapalin  
Multi-Parametric Diagnosis of Devices for Transport of Liquids

Student:

Bc. David Novák

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan Blata, Ph. D.

Ostrava 2017

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. David Novák**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství

Specializace: 72 Technická diagnostika, opravy a udržování

Téma: **Multiparametrická diagnostika zařízení pro přepravu kapalin**  
**Multi-Parametric Diagnosis of Devices for Transport of Liquids**

Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

Vibrační diagnostika je jednou z nejvýznamnějších metod pro určování technického stavu strojních zařízení. Využijte proto vhodné postupy, případně jiné vhodné metody a dostupná zařízení pro určování technického stavu čerpadel. V rámci diplomové práce se zabývejte problematikou týkající se čerpadel, dále se zabývejte problematikou možnosti identifikace vznikajících závad. Změřená data analyzujte a proveďte následná vyhodnocení.

### V rámci zadání zpracujte:

1. Rešerši a analýzu dané problematiky.
2. Ideově technický návrh řešení dané problematiky.
3. Zpracujte aplikaci na daný objekt.
4. Proveďte potřebná měření.
5. Proveďte konkrétní provozní vyhodnocení.

Podrobnější specifikaci zadání nebo jeho úpravy provede vedoucí práce.

### Seznam doporučené odborné literatury:

JENČÍK, J. – VOLF, J. A KOL.: *Technická měření*. ČVUT v Praze 2003, 212 s., ISBN 80-01-02138-6

HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika*. VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2004, 1. vydání, 178 s., ISBN 80 – 248 – 0650 – 9.

TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Sdělovací technika Praha 1997, 174 s., ISBN 80-901936-1-7.

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

KREIDL, M. a kol.: *Diagnostické systémy*. ČVUT v Praze, Praha 2001, 352 s., ISBN 80-01-02349-4

BLATA, J. – Juraszek, J. *Metody technické diagnostiky, teorie a praxe. Metody diagnostyki technicznej, teoria i praktyka*. Ostrava: REPRONIS, s.r.o., 2013, 133 stran, ISBN 978-80-248-2997-5

Podkladové materiály firem - ADASH s.r.o., Brüel Kjaer, SKF Ložiska a.s.

ČSN ISO 10 816 *Vibrace-Hodnocení vibračních strojů na základě měření na nerotujících částech*. Praha: Český normalizační institut, 1998.

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, 1999. 32 s.

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

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Blata, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017



doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář  
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

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 nevydělečně 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 kvalifikační práci 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 ..... 7.5.2017



podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. David Novák

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Hankeho 267, Holešov



Místopřísežné prohlášení studenta

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

V Ostravě ..... 15.5.2017

..... David Nový

podpis studenta

## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Bc. NOVÁK, D. *Multiparametrická diagnostika zařízení pro přepravu kapalin: Diplomová práce*. Ostrava: katedra výrobních strojů a konstruování, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2017, 101s. vedoucí práce: Ing. Blata, J.

Diplomová práce se zabývá diagnostikou horizontálních odstředivých čerpadel používaných v technologických procesech zpracování chemických výrobků v provozu Koksovna Svoboda. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části jsou stručně popsány různé druhy zařízení pro dopravu kapalin a jejich princip činnosti. Dále se zde zabývám základy vibrodiagnostiky a termodiagnostiky. Také jsou zde uvedeny běžné poruchy točivých strojů a jejich projevy. V praktické části jsou uvedeny základní informace o podniku vlastním měřené stroje a informace o umístění jednotlivých strojů. Následují informace o použitém diagnostickém vybavení a způsobu měření a vyhodnocení dat. V hlavní části jsou zaznamenána nasbíraná data jednotlivých strojů. Závěrem práce je shrnutí výsledků měření a technického stavu strojů.

## **ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS**

Bc. NOVÁK, D. *Multi-Parametric Diagnosis of Devices for Transport of Liquids : Diploma Thesis*. Ostrava: Department of Production Machines and Design, Faculty of Mechanical Engineering VSB – Technical University of Ostrava, 2017, 101p. Thesis Head: Ing. Blata, J.

The diploma thesis deals with the diagnostics of horizontal centrifugal pumps used in technological processes of chemical products processing in operation Coking plant Svoboda. The thesis is divided into the theoretical and practical part. In the theoretical part are briefly described various types of devices for transport of liquids and their principle of operation. I also deal with the basics of vibro-diagnostics and thermodiagnosics. Also, there are mentioned conventional rotating machinery faults and their manifestations. The practical part provides basic information about the company owning the measured machines and information on the location of individual machines. The following are information about the diagnostic equipment used and the method of measuring and evaluating data. In the main section, the collected data of individual machines are recorded. The conclusion of the thesis is a summary of the measurement results and the technical condition of the machines.

# Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů .....	8
Úvod .....	10
1 Základní rozdělení čerpadel .....	11
1.1 Hydrostatická čerpadla .....	11
1.2 Hydrodynamická čerpadla .....	13
1.3 Ostatní druhy čerpadel .....	15
2 Multiparametrická technická diagnostika .....	16
2.1 Termodiagnostika .....	17
2.1.1 Kontaktní měření teploty .....	17
2.1.2 Bezkontaktní měření teploty .....	18
2.1.3 Termografie .....	20
2.2 Vibrodiagnostika .....	22
2.2.1 Používané snímače mechanických vibrací .....	22
2.2.2 Vibrodiagnostický signál a jeho zpracování .....	24
2.3 Vady rotačních strojů a jejich projevy .....	27
2.3.1 Nevývaha .....	27
2.3.2 Nesouosost .....	30
3 Diagnostika zařízení v areálu OKK a.s. ....	32
3.1 Základní údaje o podniku .....	32
3.2 Diagnostikovaná zařízení a použité metody .....	33
3.2.1 Termodiagnostika .....	34
3.2.2 Vibrodiagnostika .....	36
Závěr .....	96
Poděkování .....	99
Použitá literatura .....	100

## Seznam použitých zkratek a symbolů

A	axiální směr
ACMT	ADASH Compressed Time
$B_d$	průměr valivého tělesa [mm]
BPFI	frekvence závady na vnitřním kroužku [Hz]
BPFO	frekvence závady na vnějším kroužku [Hz]
BSF	frekvence závady na valivém elementu [Hz]
FFT	rychlá Fourierova transformace
FTF	frekvence závady klece [Hz]
$f_o$	otáčková frekvence rotoru [Hz]
$H_E$	intenzita vyzařování reálného tělesa [ $W/m^2$ ]
$H_{EO}$	intenzita vyzařování absolutně černého tělesa [ $W/m^2$ ]
IT	izolovaná síť (isolé terré)
NTC	negativní teplotní koeficient
n	počet valivých těles
$P_d$	roztečný průměr
PTC	pozitivní teplotní koeficient
RMS	efektivní hodnota (root mean square)
V	vertikální směr
$W_{atm}$	zářivý tok atmosféry [W]
$W_{obj}$	zářivý tok objektu [W]



$W_{\text{refl}}$	zářivý tok odrazu okolí [W]
$\alpha$	teplotní koeficient [ $\text{K}^{-1}$ ]
$\varepsilon_T$	emisivita [-]
$\varphi$	kontaktní úhel

# Úvod

Přeprava kapalin je nedílnou součástí nesčetného množství průmyslových odvětví, petrochemickým průmyslem počínaje a potravinářským průmyslem nekonče. Ať už potřebujeme dopravit kapaliny o vysoké teplotě nebo hluboko pod bodem mrazu, nebezpečné směsi nebo pouhou vodu, vždy nám k tomu spolehlivě poslouží čerpadla. Pro zabezpečení provozní spolehlivosti jednotlivých provozů je nezbytně nutné znát technický stav jednotlivých strojů a plánovat dle něj údržbu. Důležitým prostředkem k této analýze je technická diagnostika.

Vhodnými bezdemontážními diagnostickými metodami lze sesbírat množství různých dat o stroji, ze kterých lze určit aktuální technický stav daného zařízení. Máme-li dostatek těchto informací za širší časové období, můžeme s určitou pravděpodobností určit další vývoj stavu stroje a včas tak zjistit případné začínající poruchy konstrukčních prvků. To nám umožní budoucí strategické plánování další údržby, čímž je možné vyhnout se zbytečným pořizovacím nákladům a také ztrátám při případné nečekané nutnosti odstávky zařízení z důvodu náhlé poruchy.

# 1 Základní rozdělení čerpadel

Pro tvorbu této kapitoly byly využity zdroje [4], [5], [6], [7], [12].

Podle způsobu předání energie pohonné jednotky hnané kapalině můžeme čerpadla rozdělit do tří základních druhů:

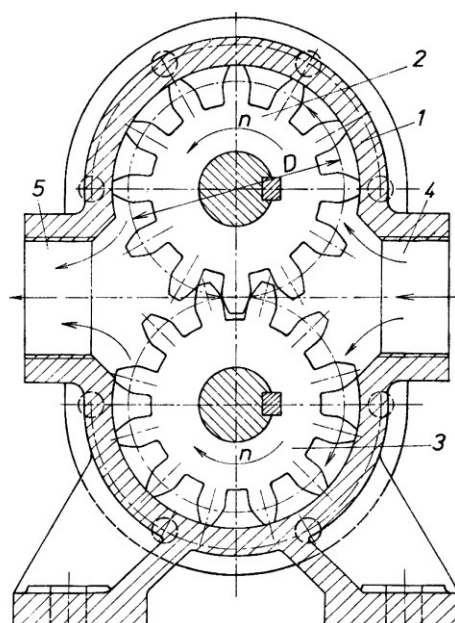
- Hydrostatická čerpadla
- Hydrodynamická čerpadla
- Ostatní

## 1.1 Hydrostatická čerpadla

V hydrostatických čerpadlech dochází k přímé přeměně mechanické energie pracovního elementu na tlakovou energii kapaliny. Směr průtoku čerpané kapaliny určují jednocestné ventily na sání a výtlaku nebo geometrie funkčních prvků čerpadla. Ke změně objemu čerpané kapaliny nelze použít škrtkící klapu na výtlaku – čerpadla mají tzv. tvrdou charakteristiku. Podle typu čerpadla je však možno měnit průtok změnou rychlostí otáček nebo výškou zdvihu pístů, popř. přepouštěcími ventily umožňujícími cirkulaci kapaliny mezi výtlakem a sáním.”

### ROTAČNÍ ČERPADLA

Tento typ čerpadel využívá ke své funkci rotační pohyb pracovních ploch rotoru. Tyto části zároveň plní funkci uzavírání a otevírání sání a výtlaku čerpadla, odpadá zde tedy nutnost použití jednosměrných rozvodových ventilů. Velikost čerpadla je definována jeho geometrickým objemem, což je teoretické množství čerpané kapaliny, které proteče čerpadlem během jedné otáčky.

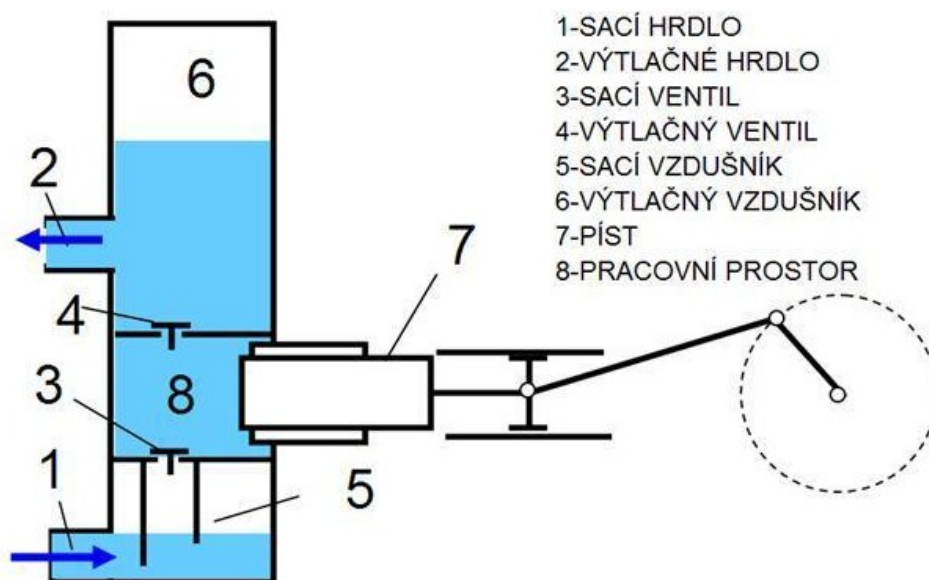


Obr. 1 Zubové čerpadlo, 1 – skříň, 2 – hnací ozubené kolo, 3 – hnané ozubené kolo, 4 – sání, 5 – výtlak [4]

Průtok čerpaného média je plynulý a není nutno použití kompenzace pulzů na potrubí. Rotační čerpadla umožňují čerpání převážně čisté kapaliny za vysokého tlaku a relativně malých objemů, jsou proto vhodná pro hydraulické obvody apod. V praxi se používá několik konstrukčních typů lišících se provedením rotoru a způsobem čerpání kapaliny (zubová, lamelová, vřetenová, šroubová, s rotujícími nebo odvalujícími se písty).

### ČERPADLA S VRATNÝM POHYBEM

Akční člen těchto čerpadel koná pulzující pohyb v uzavřené obvykle válcové komoře. Pokud je vzhledem ke stěnám komory utěsněn těsnícími členy konajícími pohyb, nazýváme tyto čerpadla pístová. Alternativně je také možné použití tzv. plunžru – pístu nevyplňujícímu celý prostor válce. Pohyb akčního členu obstarává ve většině případů klikové soustrojí převádějící rotační pohyb motoru na vratný. V případě membránového čerpadla je možné použití elektromagnetických vibrací působících přímo na membránu. Čerpaná kapalina vstupuje a opouští komoru skrz sací a výtlačný ventil. Jelikož je průtok kapaliny nerovnoměrný, je nutno podle aplikace použít kompenzace pulzujícího tlaku na sání a výtlačku – tzv. větrníku. Tímto se omezí riziko kavitace při sacím pohybu a nepřiměřeně vysokému tlaku kapaliny při výtlačku. Pro dosažení většího čerpaného objemu je možné použití vícekomorových (víceválcových) čerpadel.

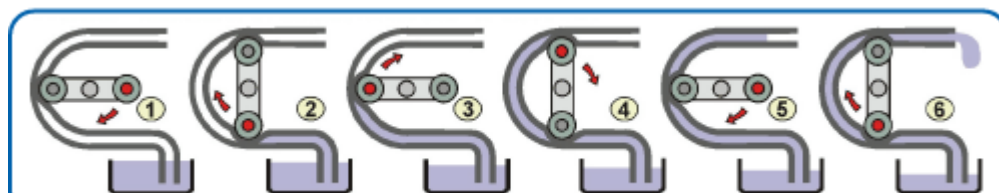


Obr. 2 Schéma pístového čerpadla [11]



## PERISTALTICKÁ ČERPADLA

Tento typ čerpadla se skládá z půlkruhové komory, po jejímž obvodu je vedena hadice schopná elastické deformace. Pomalu se otáčející rotor dosedá na několika místech na hadici a vytváří tak postupující komory. Dopravované médium nepřichází do kontaktu s žádnými součástmi čerpadla, pouze s hadicí. Tento typ čerpadla je tedy obzvláště vhodný k laboratornímu použití, kdy je nutno zachovat čistotu čerpané látky a umožnit přesné dávkování relativně malých objemů.



Obr. 3 Postup operace peristaltického čerpadla [12]

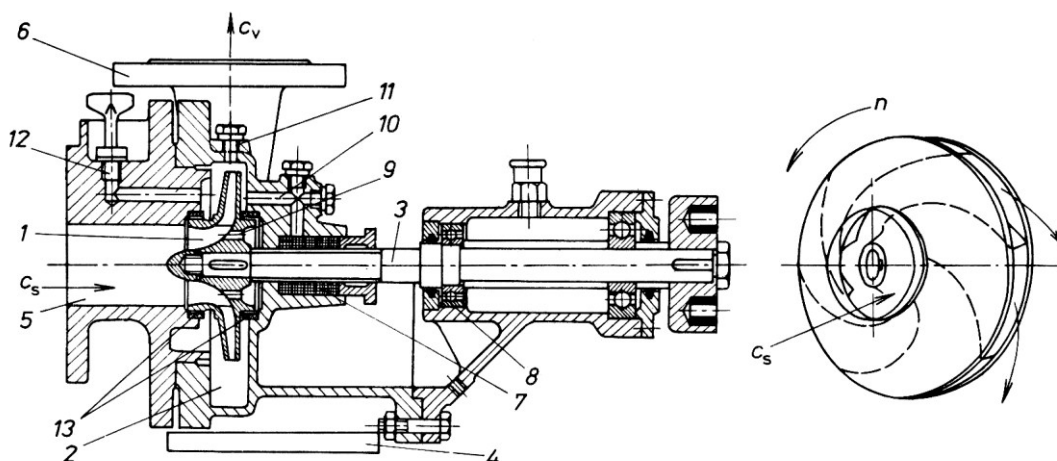
## 1.2 Hydrodynamická čerpadla

Tento druh čerpadel využívá nepřímé přeměny mechanické energie. Principem těchto čerpadel je udělení kinetické energie čerpané kapalině, která se následně v další části čerpadla (difuzor nebo spirálová konstrukce skříně) mění na potenciální a tlakovou energii. Vyznačují se měkkou charakteristikou, což znamená, že průtok kapaliny čerpadlem lze regulovat škrtícím ventilem na výtlačném potrubí. Průtok kapaliny čerpadlem je plynulý, a není tedy nutno použití expanzních prvků pro vyrovnání tlaku na sání a výtlačku.

### ODSTŘEDIVÁ ČERPADLA

Tento typ čerpadla sestává z oběžného kola vybaveného zakřivenými lopatkami umístěného ve spirální skříně. Oběžné kolo běžně dosahuje otáček 1500 – 3000 ot/min. Čerpaná kapalina vstupuje axiálně do oběžného kola. Zde se zvýší její rychlost a následně je odstředivou silou tlačena do výstupního hrdla tangenciálně umístěného k spirální skříně. Z důvodu zvětšení průtočného profilu se dle Bernoulliho rovnice kinetická energie kapaliny mění v potenciální.

Podle směru výstupu pracovní kapaliny vzhledem k ose oběžného kola rozlišujeme diagonální a radiální čerpadla. Odstředivá čerpadla mohou mít i více oběžných kol řazených v sérii. Vícestupňová čerpadla dovolují dosažení vysokých výtlačných tlaků v řádu desítek MPa. Slabý sací efekt bez ohledu na počet stupňů však vyžaduje zaplavení čerpadla i sacího potrubí. Dojde-li při provozu k poklesu tlaku v sání pod tlak nasycených par čerpané kapaliny, dochází ke kavitaci, jejímž následkem je poškození materiálu lopatek oběžného kola. Při návrhu sacího potrubí čerpadla je tedy nutno dbát na dodržení minimální sací výšky pro daný typ čerpané kapaliny uvedený výrobcem. Účinnost odstředivých čerpadel je určena jak jejich mechanickou, tak hydraulickou účinností. Roli zde také hrají ztráty způsobené prostupem kapaliny z výtlaku do sání. Celková účinnost se pohybuje pod 90%. Díky své jednoduchosti, nízkým pořizovacím nákladům a možnosti čerpat široké spektrum kapalin a suspenzí jsou tyto čerpadla nejrozšířenějším typem. Podle uspořádání čerpadla a jeho pohonné jednotky rozlišujeme stroje na horizontální a vertikální. Všechny stroje, jejichž diagnostikou se v této práci zabývám, spadají do kategorie jednostupňová horizontální odstředivá čerpadla s radiálním výtlakem.

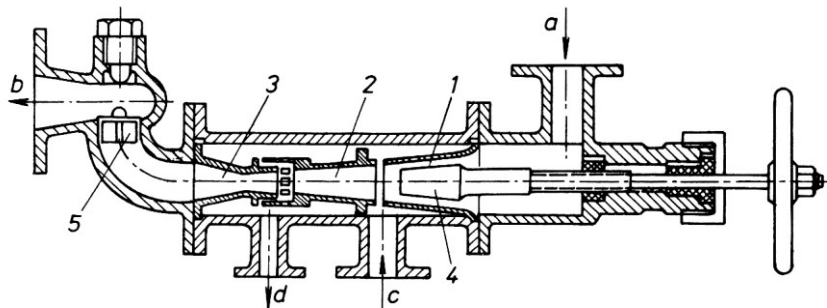


Obr. 4 Odstředivé čerpadlo 1 – oběžné kolo, 2 - spirální skříň, 3 – hřídel, 4 – stojan, 5 – sací hrdlo, 6 - výtlačné hrdlo, 7 – ucpávka, 8 – ložiska, 9 – vyrovnávací otvor, 10 – zavodnění ucpávky, 11 – odvzdušňovací otvor, 12 – zavodňovací otvor, 13 – těsnící kroužky [4]

## PROUDOVÁ ČERPADLA

Podstatou funkce je využití pracovní kapaliny nebo plynu, který je vysokou rychlostí vstříkván tryskou do směšovací komory. Díky náhlé změně průtočného průřezu prudce klesá tlak a do směšovací komory je tak přisávána čerpaná kapalina. Touto jednoduchou

konstrukcí čerpadla je možno čerpat i značně znečištěné kapaliny. Tlak na výtlaku však nedosahuje značných hodnot a efektivita je vlivem nutnosti použít velké množství pracovního média jen okolo 10%. Proudové čerpadlo lze použít pouze v případě, že v dané aplikaci neuškodí smísení čerpané kapaliny s hnací.



Obr. 5 Parní injektor 1 - tryska, 2- směšovač, 3 - tlačná tryska, 4 - regulační ventil, 5 - zpětný ventil, a – výstup páry, b – výtlak, c – sací hrdlo, d – odpad [4]

### 1.3 Ostatní druhy čerpadel

Pro čerpání kapalin se speciálními vlastnostmi nebo z jiných důvodů můžeme využít řadu dalších typů čerpadel, které se svým principem činnosti liší od dříve uvedených běžně používaných strojů. Můžeme mezi ně zařadit například různé jednoduché trkače, mamutová čerpadla pracující na principu změny hustoty kapaliny naředěním pracovním plynem, šneková čerpadla, plynotlaká čerpadla, ejektorové odsávače, nebo čerpadla pro roztavené kovy pracující na principu elektromagnetické indukce v elektricky vodivé čerpané látce.

## 2 Multiparametrická technická diagnostika

Pro tvorbu této kapitoly byly využity zdroje [1].

Principem tohoto způsobu bezdemontážní diagnostiky je kombinace několika (minimálně dvou) metod technické diagnostiky. Toto nám umožní nasbírat o diagnostikovaném objektu větší množství dat, a zjistit tak děje a poruchy, jejichž detekce by použitím pouze jedné metody nebyla možná. Díky tomu můžeme mnohem přesněji určit diagnózu daného objektu a prognózu vývoje jeho stavu v budoucnu. Dá se tedy říct, že mezi cíle multiparametrické diagnostiky patří zvýšení jistoty při rozhodování o okamžitém technickém stavu objektu a tím i zvýšení jeho provozní spolehlivosti.

Na multiparametrickou diagnostiku se dá pohlížet z více úhlů. Dá se za ni považovat například využití několika vnitřních metod jedné konkrétní technické diagnostiky. Při aplikaci vibrodiagnostiky můžeme tedy třeba kromě běžného spektra použít obálkovou metodu, bez které bychom jen těžko objevili počátky vady valivých elementů ložisek. Jiný pohled na věc umožňuje kombinace několika hlavních diagnostických metod, například termodiagnostiky s vibrodiagnostikou, jak je tomu v případě této práce, nebo zkoumáním odebraných vzorků maziv – tribodiagnostikou. Data nasbíraná pomocí různých metod poté při výsledné analýze poskytnou komplexní pohled na diagnostikovaný objekt.

Protože je v praktické části této práce použita především kombinace různých vibrodiagnostiky a optické termodiagnostiky, budu se blíže věnovat zejména těmto metodám.

### *DIAGNOSTICKÁ TERMINOLOGIE*

- **Diagnóza** – proces zjištění aktuálního technického stavu a provozuschopnosti objektu. Patří mezi ni zejména detekce vznikající poruchy, lokalizace konkrétního místa, bližší specifikace detekované poruchy a predikce zbývající životnosti zařízení
- **Diagnostický systém** – souhrn diagnostických prostředků, diagnostických objektů a obsluhy. Může být buďto přenosný (OFF-LINE) nebo trvale umístěný na zařízení (ON-LINE). Možná je také kombinace trvale umístěných diagnostických senzorů a periodického měření.
- **Diagnostická veličina** – poskytuje informace o aktuálním technickém stavu diagnostikovaného objektu (např. rychlost vibrací, teplota...)



- **Technický stav** – je určen jak pomocí diagnostické veličiny a jejího vývoje v čase, tak i souhrnem dalších technických parametrů a vybraných vlastností
- **Provozeroschopnost** – stav objektu, ve kterém je schopen provádět stanovené funkce za daných podmínek
- **Porucha** – událost ukončující provozuschopnost objektu

## 2.1 Termodiagnostika

Pro tvorbu této kapitoly byly využity zdroje [17].

Termodiagnostika je metoda bezdemontážní technické diagnostiky využívající informaci o teplotě měřeného objektu. Tuto lze změřit mnoha způsoby, ať už kontaktními teploměry pracujícími na principech změny fyzikálních vlastností látek se změnou teploty, tak bezkontaktními pyrometry a termovizními systémy snímajícími objektem vyzařované infračervené záření.

### 2.1.1 Kontaktní měření teploty

Podle principu využívaného k měření je můžeme rozdělit do několika skupin:

#### *DILATAČNÍ*

Měří pomocí roztažnosti látek, a to jak pevných (tyčové, bimetalické), kapalných (klasické skleněné teploměry, teploměry s kapilárou,...) tak plyných (parní, plynové)

#### *ODPOROVÉ*

Principem je změna elektrického odporu vodičů nebo polovodičů v závislosti na jejich teplotě. To vyjadřuje teplotní součinitel odporu  $\alpha(K^{-1})$ . Nejčastěji se k jejich konstrukci využívá čistých kovů v uspořádání vhodném pro konkrétní měření. Při použití kovových prvků elektrický odpor s teplotou lineárně roste. Pro citlivější měření je možno použít polovodičové termistory, jejich teplotní součinitel se však s teplotou mění. Termistory jsou dvojího typu, a to NTC (negativní  $\alpha$ ) a PTC (pozitivní  $\alpha$ ).

## TERMOELEKTRICKÉ

Využívají termoelektrického jevu – vzrůst napětí termočlánku s teplotou. Termočlánky jsou vyrobeny z dvojic kovů nebo slitin podle daného použití a teplotního rozsahu. Při měření se detekuje buďto termoelektrické napětí naměřené milivoltmetrem upravené o úbytek na elektrickém obvodu, nebo přímo napětí článku měřeného kompenzátořem.

## SPECIÁLNÍ

Využívají jiné speciální vlastnosti vhodné pro danou aplikaci, například změnu akustických vlastností plynů s jejich teplotou, teplotně závislého rezonančního kmitočtu krystalových oscilátorů, magnetických polí látek, optických vlastností vláken atd.

### 2.1.2 Bezkontaktní měření teploty

Podstatou je měření elektromagnetického záření emitovaného měřeným objektem. Oblast měřeného spektra tohoto záření se pohybuje od 0,4  $\mu\text{m}$  do 25  $\mu\text{m}$ . Dle způsobu detekce vyzařovaných fotonů s materiálem členíme senzory na tepelné a kvantové.

Pro bezkontaktní měření teploty objektu je důležité znát jeho emisivitu. „*Emisivita je definována jako poměr intenzity vyzařování reálného tělesa  $H_E$  k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa  $H_{EO}$  se stejnou teplotou*“ [9]

$$\varepsilon_T = \frac{H_E}{H_{OE}}$$

Jelikož je emisivita každého reálného tělesa menší než emisivita absolutně černého tělesa ( $\varepsilon = 1$ ), vykazovalo by bezkontaktní měření bez korekce emisivity vždy menší teplotu než ve skutečnosti. Proto je třeba před měřením znát tuto hodnotu a provést potřebnou kalibraci přístroje. Emisivita silně závisí na kvalitě povrchu a materiálu. Například nezoxidované kovy o lesklém povrchu mají hodnotu emisivity velmi nízkou, zatímco nekovové látky, zoxidované povrchy nebo lidská kůže neobyčejně vysokou.

Emisivitu můžeme měřit více způsoby. Teplota měřeného objektu může být nejdříve zjištěna kontaktními prostředky a součinitel emisivity upravován do doby, než se kontaktně a bezkontaktně změřená teplota neliší. Jiným způsobem je použití krycí látky o známé

emisivitě (lepící páska, speciální barva,...), následné měření poté určí teplotu objektu, podle které je možno emisivitu kalibrovat.

### *PYROMETRY*

Pyrometry pomocí optické soustavy soustředí infračervené záření měřeného objektu na detektor (např. termoelektrický článek) Výsledná naměřená hodnota je tedy přibližná teplota měřeného objektu, pokud by tento objekt byl absolutně černým tělesem. Pro reálné objekty je nutno měření kalibrovat o hodnotu emisivity.



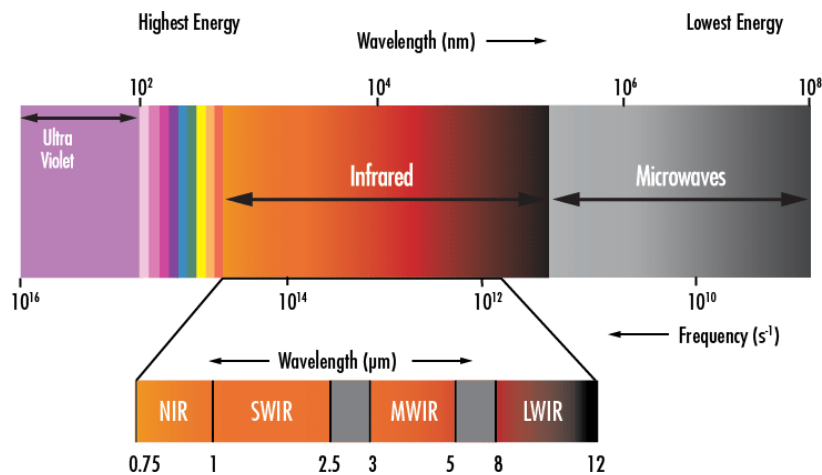
**Obr. 6 Pyrometr TROTEC BP21 [10]**

### 2.1.3 Termografie

Nebo také vžitým názvem termovize, je metoda snímání rozložení teplotních polí detekcí IR (tepelného) záření emitovaného objektem, a interpretací tohoto záření jako viditelného světla pomocí různých metod. Výstupem této metody je tzv. termogram – barevně nebo jinak zvýrazněné teplotní pole povrchu tělesa.

Vzhledem k šířce elektromagnetického spektra klasifikovaného jako infračervené záření je toto spektrum rozděleno na 5 základních oddílů:

- Blízká oblast (0,75  $\mu\text{m}$  až 2  $\mu\text{m}$ , NIR)
- Krátkovlnná oblast (2  $\mu\text{m}$  až 3  $\mu\text{m}$ , SWIR)
- Střední oblast (3  $\mu\text{m}$  až 5  $\mu\text{m}$ , MWIR)
- Vzdálená oblast (5  $\mu\text{m}$  až 15  $\mu\text{m}$  LWIR)
- Velmi vzdálená oblast (15  $\mu\text{m}$  až 1 mm)



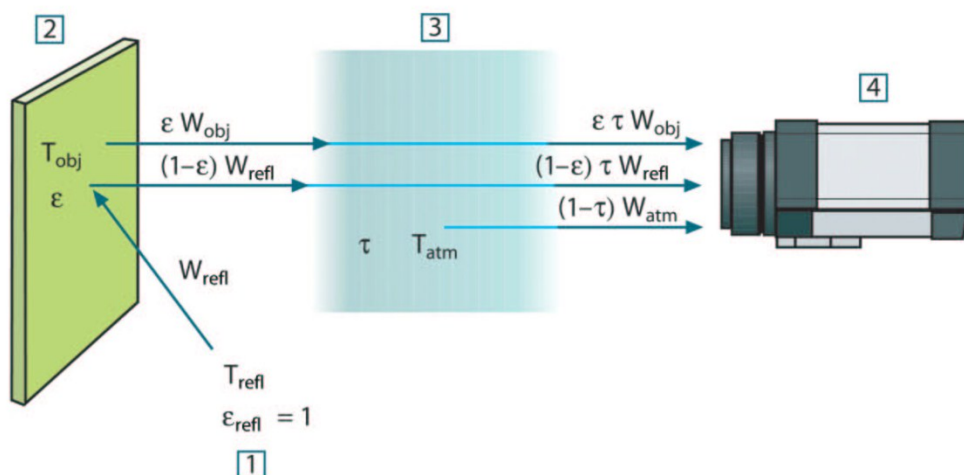
Obr. 7 IR spektrum elektromagnetického záření [13]

#### *MĚŘÍCÍ ŘETĚZEC TERMOGRAFIKÉHO MĚŘENÍ*

Termovizní měření se účastní čtyři základní části, které ho svými parametry ovlivňují:

- 1 – Okolí měřeného objektu
- 2 – Měřený objekt
- 3 – Prostředí mezi měřeným objektem a měřícím zařízením
- 4 – Měřící systém





Obr. 8 Měřicí řetězec [17]

Do měřicího zařízení tedy kromě zářivého toku  $W_{obj}$  emitovaného měřeným objektem vstupuje také tok  $W_{refl}$  způsobený odrazem záření okolního prostředí od objektu a tok  $W_{atm}$  způsobený zářením prostředí mezi objektem a měřičem. Všechny tyto zářivé toky jsou navíc ovlivněny útlumem při průchodu prostředím.

## 2.2 Vibrodiagnostika

Pro tvorbu této kapitoly byly využity zdroje [1], [2].

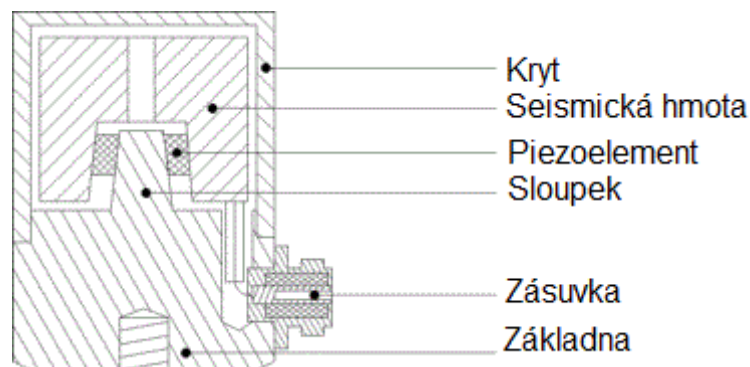
Vibrodiagnostika využívá k určení technického stavu objektu jeho mechanické kmitání – vibrace. Diagnostickou veličinu tedy tvoří jejich výchylka, rychlost nebo zrychlení. Všechny stroje obsahující rotující části v praxi generují vibrace o určitém kmitočtu a průběhu, ať už z důvodu nevyváhy rotujících částí, nesouosostí, stavem ložisek, převodovek, spojek apod. Detekcí těchto vibrací vhodně umístěnými snímači a následnou analýzou můžeme určit technický stav těchto částí, a podle něj plánovat budoucí údržbu zařízení.

### 2.2.1 Používané snímače mechanických vibrací

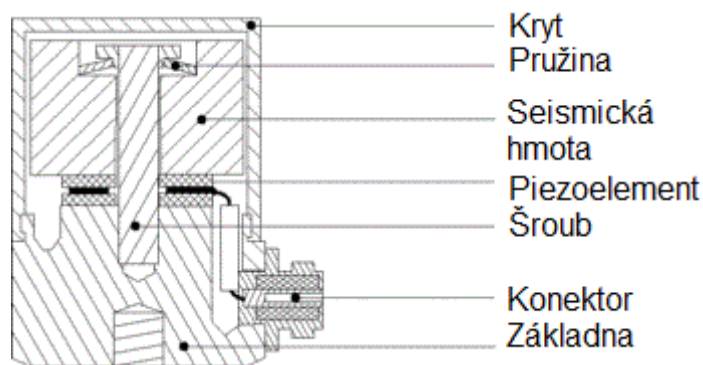
Snímače obecně převádějí mechanické kmity na elektrický signál. K co nejjednoduššímu přenosu signálu je velice důležité zvolit správný typ snímače. Ten volíme podle toho, jakou měřenou veličinu potřebujeme při dané aplikaci snímat, a také v jakém frekvenčním rozsahu se tato veličina pohybuje.

#### *AKCELEROMETRY*

Seismická zařízení, pracující na principu převodu mechanické energie na elektrický náboj pomocí piezoelementu, na nějž působí reakce setrvačné hmoty. Patří mezi nejrozšířenější snímače vibrací z důvodu jejich univerzálnosti – ačkoliv naměřený signál přímo odpovídá zrychlení měřených vibrací, je jej možno následnou integrací převést na rychlost a dále pak na výchylku. Mezi dva základní typy akcelerometrů patří tlakové a smykové. Specializované typy mohou měřit zároveň ve více osách. Nevýhodou akcelerometrů je nemožnost měřit velmi nízké frekvence pod desetiny Hz.



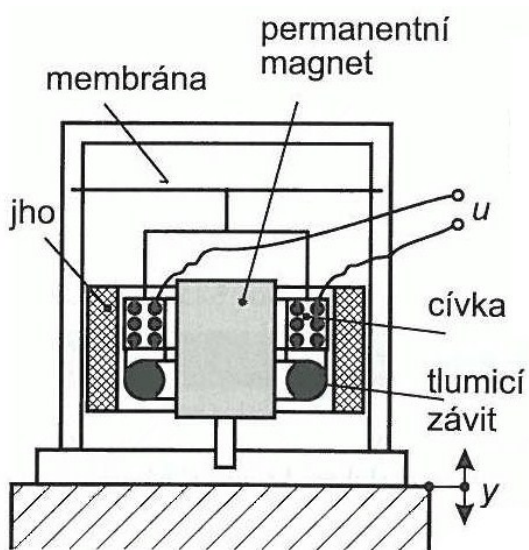
Obr. 9 Smykový akcelerometr[18]



Obr. 10 Tlakový akcelerometr[18]

### SNÍMAČE RYCHLOSTI

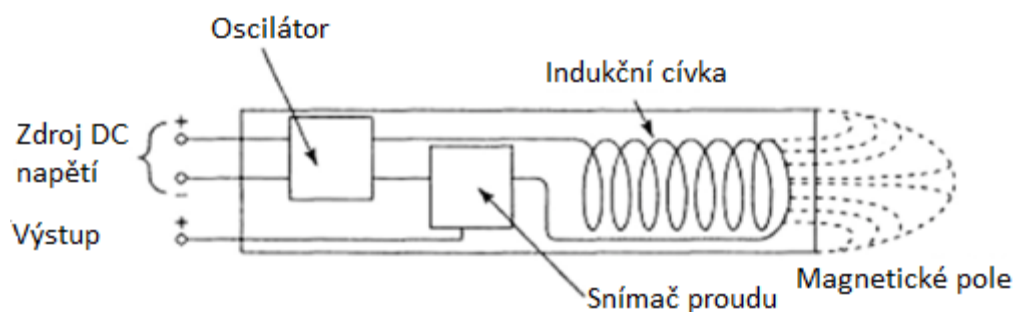
Výstupní signál těchto snímačů je závislý na rychlosti vibrací. Jejich principem obvykle bývá magnetická indukce, kdy se v poli pevně umístěného permanentního magnetu pohybuje cívka generující napětí přímo úměrné rychlosti vibrací.



Obr. 11 Indukční snímač rychlosti vibrací [18]

## BEZDOTYKOVÉ SONDY

Slouží především k měření výchylky, principem je měření vířivých proudů indukovaných v kovových částech měřeného objektu vysílací cívkou. Jejich velkou výhodou je možnost měření výchylky mezi stacionární a rotující částí stroje, například ložiskovým domkem a hřídelí. Dovolují tedy určit absolutní polohu hřídele a na ni vázanou orbitální analýzu, která je vhodná například pro určení poruch kluzných ložisek.



Obr. 12 Sonda přiblížení [14]

### 2.2.2 Vibrodiagnostický signál a jeho zpracování

Z hlediska průběhu v čase můžeme signál detekovaný snímačem rozdělit do tří základních skupin:

- Deterministický signál – jeho průběh se dá popsat např. matematickou funkcí, můžeme tedy predikovat jeho další průběh
- Stochastický signál – signál s blíže nespecifikovatelným a nepředvídatelným průběhem
- Přechodový signál – signál zabírající jen určitou část záznamu, například hluk okolí, impulzy z navazujících provozů...

Z hlediska vlivu náhody v průběhu signálu můžeme blíže určit další kategorie:

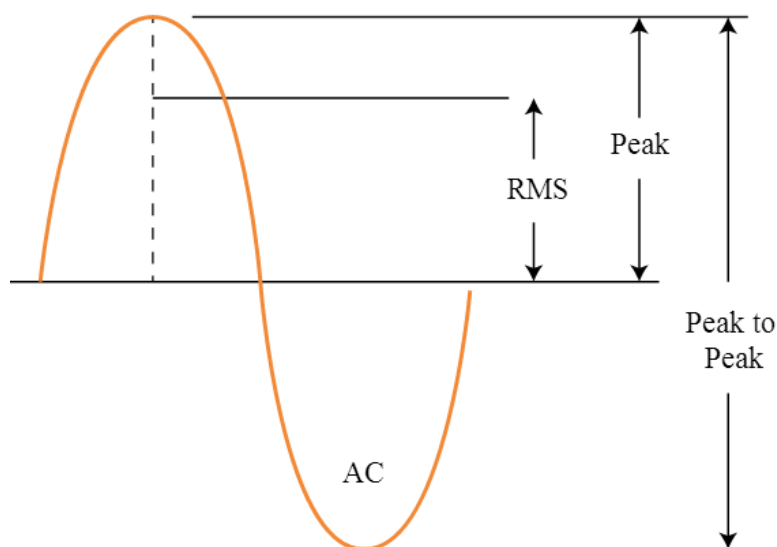
- Periodický signál – skládá se ze základní frekvence a jejích harmonických násobků nebo zlomků, lze jej klasifikovat jako reálnou časovou funkci
- Kvasiperiodický signál – vzniká sloučením dvou nebo více periodických signálů, jejichž základní frekvence o iracionálním poměru velikostí
- Stacionární a nestacionární signál – jedná se o stochastický signál, jehož charakter je buďto v čase neměnný, nebo se případně mění, avšak toto závisí na délce časového úseku měření

Základní metodou analýzy snímaného signálu je jeho transformace na frekvenční spektrum. Tento převod lze provést dvěma metodami: pásmovou analýzou použitím množství pásmových propustí, nebo rychlou Fourierovou transformací. Právě rychlou Fourierovu transformaci používají vibrodiagnostické přístroje.

### *ANALÝZA FFT*

FFT (Fast Fourier Transformation – rychlá Fourierova transformace) je základní vibrodiagnostická metoda analýzy signálu pracující na principu vyhledávání periodických dějů v signálu. Nalezené děje jsou poté zobrazeny pomocí grafu amplituda – frekvence (frekvenční spektrum). Toto spektrum je tvořeno množstvím signálů o určitých amplitudách. Následnou bližší analýzou je možno přiřadit konkrétním signálům jejich zdroj na diagnostikovaném objektu a tím určit technický stav. U základních sinusových signálů nás zajímá několik hodnot:

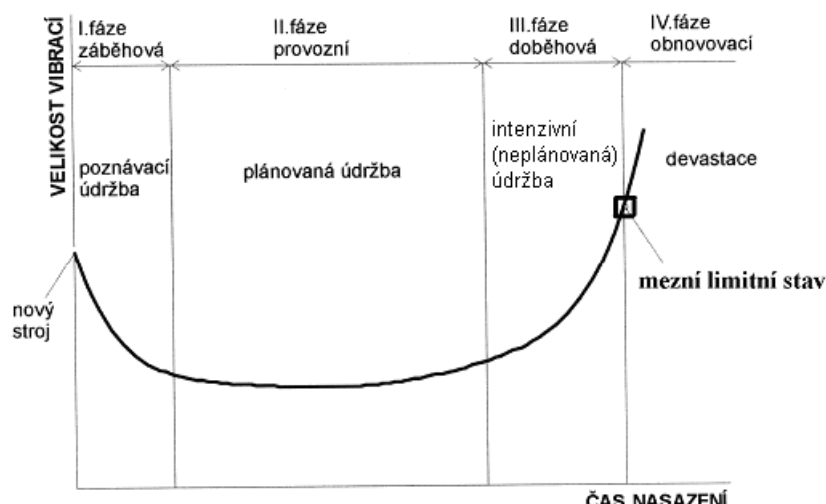
- Špička (peak) – vzdálenosti mezi nulovou úrovní a vrcholem vlny
- Špička – špička (peak – to – peak) – rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším bodem vlny
- Průměrná hodnota (average) – 0,637 x špička, většinou nenulová
- Efektivní hodnota (RMS – root mean square) – nejběžnější vyjádření, odvozena pomocí výpočtu, druhá odmocnina čtverců okamžité hodnoty. Při ideální sinusoidě je její hodnota rovna 0,707 x špička)



Obr. 13 Hodnoty sinusového signálu[15]

## CELKOVÁ MOHUTNOST VIBRACÍ

Hodnota vibrací konkrétního místa objektu, například hodnota naměřená v oblasti kritického bodu stroje. Tato hodnota nám při porovnání s předchozím měření na stejném místě a mezní hodnotou pro daný objekt určuje technický stav objektu. Při postupném vynášení naměřených hodnot do grafu, jehož osu x tvoří čas vytváří hodnoty během životnosti stroje tzv. vanovou křivku. Podle této křivky je pak možno určit, ve které fázi technického života se objekt nachází, a přizpůsobit tomu další údržbu.



Obr. 14 Vanová křivka [1]

## KEPSTRÁLNÍ ANALÝZA

Tato metoda využívá jako vstup výstup ze FFT analýzy, tedy frekvenční spektrum daného signálu. Algoritmy poté hledají ve spektru periodické děje, tedy v podstatě harmonické násobky a podíly mezi frekvenčními čarami v původním spektru. Tyto výsledky jsou poté zaneseny do grafu (kepstra), jehož osy tvoří na vodorovné ose queference (v původním spektru frekvence) a na svislé ose mamplituda (původně amplituda dané frekvence). Tato analýza nám dovoluje odhalit boční pásma opakujících se frekvencí, což je výhodné zejména při detekci poruch zubových převodovek, kde například při kapilárních trhlinách v materiálu zubu standartní metody mají malou šanci na objevení poruchy.

## OBÁLKOVÁ METODA

Metoda vhodná zejména k detekci opakujících se signálů s malou amplitudou a vysokou frekvencí, které ve spektru vibrací téměř zanikají díky šumu a výrazným hlavním relativně nízkým frekvencím. Principem je tedy odfiltrování těchto zejména otáčkových frekvencí a zkoumání obálky. Metoda je vhodná například ke zjištění vad na dráhách valivých ložisek nebo samotných valivých elementech. Pro správnou detekci je nutné znát poruchové frekvence daného ložiska, které lze vypočítat pomocí otáček rotoru a údajů známých z katalogu výrobce.

- BPFO – defekt vnějšího kroužku (Ball Pass Frequency Outer Ring)

$$BPFO = \frac{n}{2} \left( 1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi \right) \cdot f_o$$

- FTF – defekt na kleci (Fundamental Train Frequency)

$$FTF = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi \right) \cdot f_o$$

- BSF – defekt valivého elementu (Ball Spin Frequency)

$$BSF = \frac{P_d}{2B_d} \left( 1 - \left( \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi \right)^2 \right) \cdot f_o$$

- BPFI – defekt vnitřního kroužku (Ball Pass Frequency Inner Ring)

$$BPFI = \frac{n}{2} \left( 1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi \right) \cdot f_o$$

## 2.3 Vady rotačních strojů a jejich projevy

Pro tvorbu této kapitoly byly využity zdroje [1], [2], [3].

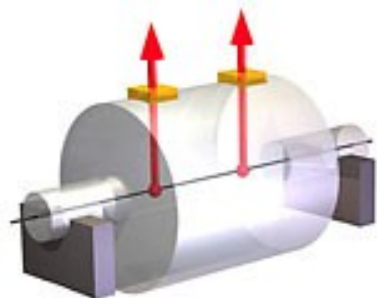
### 2.3.1 Nevývaha

Nevyváženost rotujících částí strojů je jeden z nejobvyklejších důvodů vzniku vibrací. Faktem je, že je v praxi téměř nemožné zaručit absolutní shodu osy rotace části stroje s osou jeho setrvačnosti. Důvodem může být jak nepřesnost výroby daná tolerancemi, nedokonalá montáž rotorů skládajících se z více částí, nehomogenní rozložení hustoty materiálu nebo technologické požadavky na tvar rotoru.

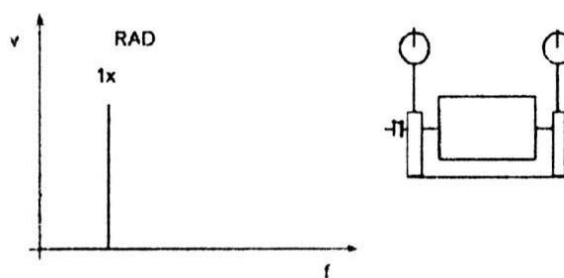
Větší či menší nevyváha generuje vibrace, které se přes ložiska nebo jiné části přenáší na zbytek stroje. Podle polohy osy setrvačnosti vzhledem k ose rotace je možno rozlišit několik typů nevyváhy.

### *STATICKÁ NEVYVÁŽENOST*

Jedná se o případ, kdy se osa setrvačnosti posune vzhledem k ose rotace, ale zůstane paralelní. Tento typ nevyváhy budí radiální vibrace na otáčkové frekvenci, jejichž amplituda se zvyšuje s druhou mocninou otáček. Nevyváha se dá detekovat i na stojícím rotoru při uložení s dostatečně malým odporem. Rotor se poté otočí těžším místem dolů. Statická nevyváženost se dá odstranit přidáním nebo odebráním materiálu podle polohy nevyvážku v jedné vyvažovací rovině. V praxi se takto vyvažují především krátké rotory s velkým průměrem – kotoučové rotory.



Obr. 15 Statická nevyváha [8]

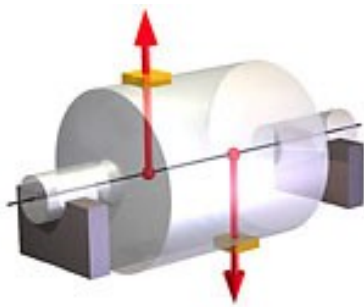


Obr. 16 Projev statické nevyváhy ve frekvenčním spektru [1]

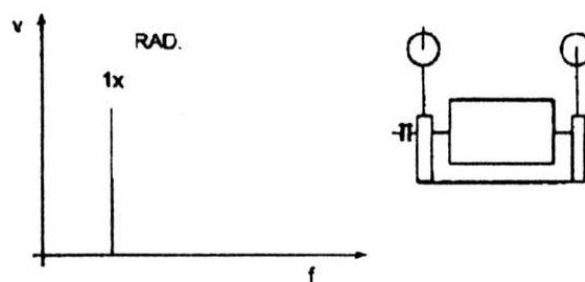


## MOMENTOVÁ NEVYVÁŽENOST

Osa setrvačnosti momentově nevyváženého rotoru protíná osu rotace v těžišti a je s ní různoběžná. Tento typ nevyváhy mohou tvořit dvě hmotnosti umístěné na rotoru naproti sobě, ale v jiných rovinách otáčení. Generované vibrace jsou v radiálním i axiálním směru, a to na otáčkové frekvenci. Zjistit tuto nevyváženost na stojícím rotoru nelze, neboť se jeví jako vyvážený, a moment způsobující vibrace je přítomen až při rotaci. Vibrace měřené na opačných koncích rotoru mají fázi posunutou o  $180^\circ$ .



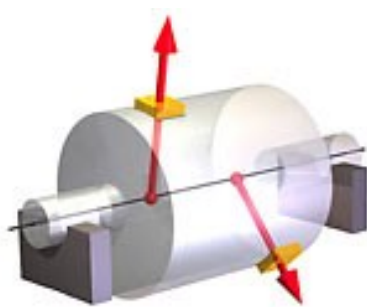
Obr. 18 Projev momentové nevyváhy ve frekvenčním spektru [1]



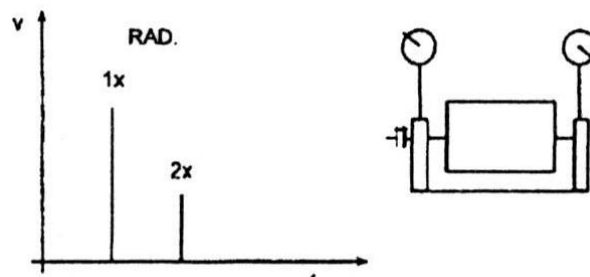
Obr. 17 Projev momentové nevyváhy ve frekvenčním spektru [1]

## DYNAMICKÁ (OBEČNÁ) NEVYVÁŽENOST

Tento typ je v praxi nejčastější. Vzniká kombinací statické a momentové nevyváhy, kdy je osa setrvačnosti různoběžná s osou rotace. Těžiště tedy leží posunuto mimo osu. Dynamická nevyváženost se dá vysvětlit jako dvě různě velké hmoty ležící obecně umístěny mimo osu rotoru. Generované vibrace mají na opačných stranách rotoru obecný rozdíl fází a ve spektru se projevují na otáčkové, případně i druhé harmonické frekvenci. Takto nevyvážený rotor se vyvažuje alespoň ve dvou rovinách.



Obr. 19 Obecná nevyváženost [8]



Obr. 20 Projev obecné nevyváhy ve frekvenčním spektru [1]

### 2.3.2 Nesouosost

U sestav tvořených hnacím motorem a hnaným zařízením spojenými spojkou je žádoucí, aby jejich osy byly pokud možno souosé. Některé typy spojek dokáží drobnou nesouosost kompenzovat, vždy ale klesá účinnost přenosu krouticího momentu a stoupají ztráty, zejména nadměrným zahříváním spojky a ložisek. Při větší nesouososti může dojít k poškození elementů spojky, přílišnému namáhání ložisek nebo k prohnutí hřídele a následnému nepřiměřenému dynamickému namáhání v důsledku rotace kolem stabilní průhybové křivky. Vždy je tedy vhodné stroje při montáži správně ustavit. Nesouosost můžeme blíže rozdělit na axiální a radiální přesazení a jejich kombinace.

Ustavení se většinou provádí směrem hnaný stroj – převodovka - motor, tedy od nehybné části po lehčí a pohyblivější. Pro přesné ustavení se většinou používají laserové ustavovací přípravky. Na konce hřídelí se umístí vysílač a přijímač laserového paprsku a otáčením hřídele se provede měření ve třech bodech posunutých o 90°. Ustavovací přípravek poté vypočte požadované korekce výšky patek pohyblivé části soustrojí. Patky se následně podloží plechovými podložkami.

#### *AXIÁLNÍ (ÚHLOVÉ) PŘESAZENÍ*

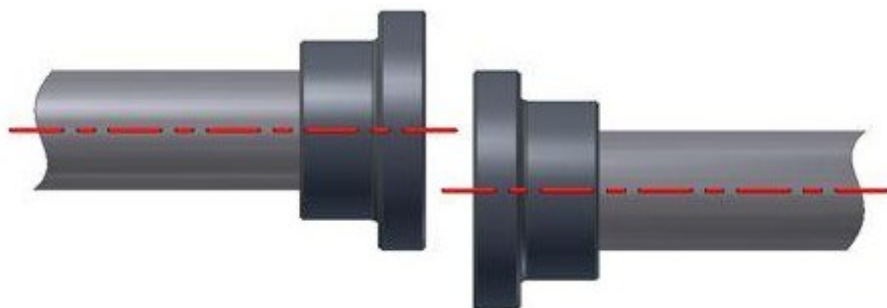
Svírají-li osy rotace dvou spojovaných hřídelí určitý úhel, jedná se o úhlovou nesouosost. Obvykle se hodnota nesouososti uvádí jako odchylka od osy v určitém směru na určité vzdálenosti (mm/m), případně ve stupních a jejich zlomcích. Takovéto přesazení při provozu způsobuje silné axiální vibrace, jež se ve spektru projevují většinou na 1. a 2., někdy až 3. harmonické frekvenci otáček. Fáze vibrací jsou posunuty o 180°.



Obr. 21 Úhlové přesazení hřídelí [16]

## *PARALELNÍ (RADIÁLNÍ) PŘESAZENÍ*

Osy spojovaných hřídelí jsou rovnoběžné, ale existuje mezi nimi jisté radiální posunutí. Generované vibrace jsou především v radiálním směru a projevují se podobně jako u axiálního přesazení na prvních několika harmonických násobcích otáčkové frekvence. Vzájemná velikost harmonických složek závisí na konkrétním typu spojky a běžně bývá 2. větší než otáčková frekvence. Fáze vibrací jsou taktéž naproti sobě.



**Obr. 22 Paralelní přesazení hřídelí [16]**

## 3 Diagnostika zařízení v areálu OKK a.s.

### 3.1 Základní údaje o podniku

Pro tvorbu této kapitoly byly využity zdroje [21], [22], [23].

#### *KOKSOVNA SVOBODA*

Provoz Koksovna Svoboda se nachází v Ostravské městské části přívoz, a je to v současné době jediná koksovna společnosti OKK Koksovny a.s. na území Ostravy. Historie produkce koksu se zde datuje od roku 1908, kdy byla koksovna založena pod jménem František. Během své existence několikrát změnila jméno (Generál Svoboda, Vítězný únor) a majitele. V dnešní době má Koksovna Svoboda čtyři koksárenské baterie o celkovém počtu 210 komor a je schopna produkce přibližně 800 tis. tun převážně slévárenského koksu ročně. Koksárenský plyn vznikající při koksování je dále chemicky zpracován při produkci dalších výrobků (benzol, dehet, síra, síran amonný).

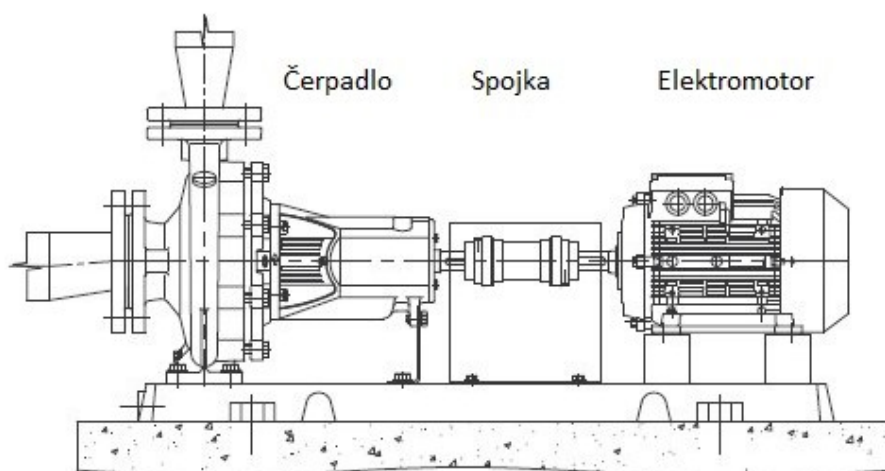
Výroba koksu začíná přípravou uhlíkových bloků. Bloky jsou tvořeny různými druhy koksovateľného uhlí, které se rozele v kulovém mlýně a následně upěchuje do tvaru hranolu. Uhlíkový blok je následně umístěn do koksárenské baterie, kde probíhá koksovací cyklus. Během něj se stěny baterie vyhřívají spalováním koksárenského plynu na teplotu cca 1 150°C. V uhlíkovém bloku probíhá termická pyrolýza, kdy se uhlí během cca 33 hodin mění bez přístupu vzduchu na koks. Na konci koksovacího cyklu je baterie otevřena a žhavý koks je transportován do hasicí věže, kde se gravitačním proudem vody schladí. Koks je dále tříděn a upravován pro potřeby expedice.

Při termické pyrolýze se z uhlí uvolňuje koksárenský plyn, což je směs vodíku, methanu, oxidu uhelnatého a množství uhlovodíků a chemických produktů. Tento plyn je nasáván do předlohy, kde se vstřikováním čpavkové vody schladí z teploty cca 800°C na teplotu přibližně 80°C, kdy kondenzuje většina výše vroucích uhlovodíků, včetně dehtu. Ten je spolu s chladicí vodou odčerpáván. Plyn je následně stlačen jedním ze tří radiálních turbokompresorů a znovu schlazen. Dalšími úpravami je z plynu separováno množství vedlejších produktů, mezi nimi například benzol, síra a síran amonný.

Většina diagnostikovaných čerpadel je součástí právě technologických procesů získávání benzolu. Ten je z koksárenského plynu separován pomocí absorpční kapaliny (oleje). Plyn je tímto olejem propírán, během čehož se benzol v oleji rozpustí. Další destilací obohaceného pracího oleje je benzol separován. Jelikož tyto výrobní procesy navazují jeden na druhý, je nutno zajistit spolehlivý transport procesních kapalin. Z toho důvodu je každé čerpadlo zálohováno jedním nebo dvěma dalšími pro případ výpadku nebo odstávky z důvodu opravy.

### 3.2 Diagnostikovaná zařízení a použité metody

Diagnostikovanými objekty jsou horizontální odstředivá čerpadla. Podle umístění v technologických procesech čerpají různé kapaliny o různých teplotách a tlaku. O pohon čerpadel se starají třífázové asynchronní elektromotory napájené elektrickou sítí 500V 50Hz IT. Stroje jsou umístěny na betonových základových deskách. Sestavu tvoří čerpadlo spojené s elektromotorem hřídelovou spojkou. Čerpadlo i elektromotor jsou upevněny na svařované frémě ocelovými šrouby. Celek je do základu upevněn kotevními šrouby.

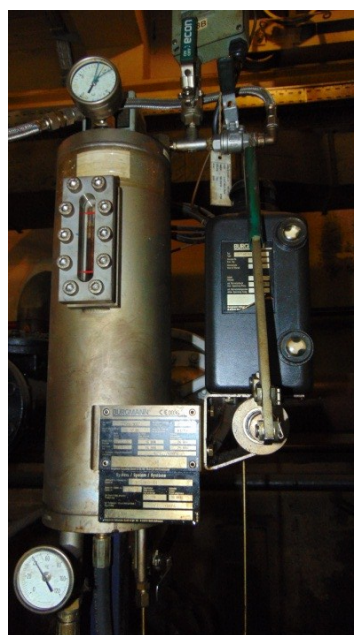


Obr. 23 Sestav horizontálního čerpadla [19]

Na čerpadlech jsou použity dva typy ucpávek: standartní ucpávky využívající grafitové šňůry a bezúkapový systém EagleBurgmann montovaný na většině strojů. Ucpávky EagleBurgmann využívají grafitové těsnící elementy chlazené olejem. Těsnící olej protéká zásobníkem, a je udržován pod tlakem pomocí stlačeného dusíku. U strojů čerpajících velmi horké médium je navíc chladicí olej chlazen vodou protékající výměníkem tepla zabudovaném v zásobníku tlaku.



Obr. 24 Příklad ucpávky EagleBurgmann [21]



Obr. 25 Obslužný systém Burgmann

### 3.2.1 Termodiagnostika

Pro tvorbu této kapitoly byly využity zdroje [20].

Cílem termodiagnostiky čerpadel je především včasná detekce nadměrné teploty ložisek a spojek, což ve spojení s vibrodiagnostikou umožňuje přesněji zjistit příčiny případné poruchy. Vzhledem k tomu, že některá čerpadla přepravují kapaliny o teplotě až 190°C, přináší termografické snímky důležité informace o směru prostupu tepla strojem.

Pro poskytování IR snímků čerpadel byla použita průmyslová termovizní kamera Fluke Ti32. Tato kamera umožňuje pořizovat infračervené snímky o rozlišení 320 x 240 pixelů při přesnosti měření  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  (při  $25^{\circ}\text{C}$ ). Typem detektoru je zde nechlazený mikrobolometr snímající infračervené spektrum 7,5  $\mu\text{m}$  až 14  $\mu\text{m}$ . Kamera disponuje technologií IR-Fusion® umožňující nastavitelné prolínání IR snímku a snímku ve viditelném spektru s rozlišením 2 MPx. Snímky jsou ukládány na SD kartu ve formátu .is2 obsahujícím radiometrická data. Tyto snímky byly dále zpracovány softwarem SmartView® poskytujícím nástroje pro analýzu termografických dat snímků a export do běžných grafických formátů.



Obr. 26 Termovizní kamera Fluke Ti32 [20]

Snímky sestav čerpadel a motoru byly pořizovány s ohledem na možnost co nejlepšího zobrazení důležitých částí, pokud to způsob montáže ochranných krytů a provozní podmínky dovolovaly. Jedná se tedy především o celkový snímek elektromotoru, snímek krytu ložiska a výstupní hřídele se spojkou, snímek kozlíku čerpadla zaměřený na ložiska a snímek ucpávky.

### 3.2.2 Vibrodiagnostika

Pro tvorbu této kapitoly byly využity zdroje [24].

Pro vibrační diagnostiku zařízení byl použit 4 – kanálový analyzátor Adash A4400 VA4 Pro. Tento přístroj umožňuje synchronní záznam signálu ze čtyř kanálů AC/DC a kombinuje v sobě množství funkcí (analyzátor, sběrač dat, vyvažování, rozběh/doběh, rekordér, stetoskop, FASIT, oktávová analýza, rázový test, ADS a ultrazvuk). Funkce analyzátor umožňuje zpracování dat pomocí real – time FFT (max 3 276 800 čar), obálkovou analýzu, analýzu pomaloběžných ložisek, řádovou analýzu a měření orbit. Maximální vstupní frekvenční rozsah činí 1 – 90 kHz při použití jednoho kanálu (194 kHz sampling) nebo 1 – 25 kHz při simultánním použití čtyř kanálů (64 kHz sampling).

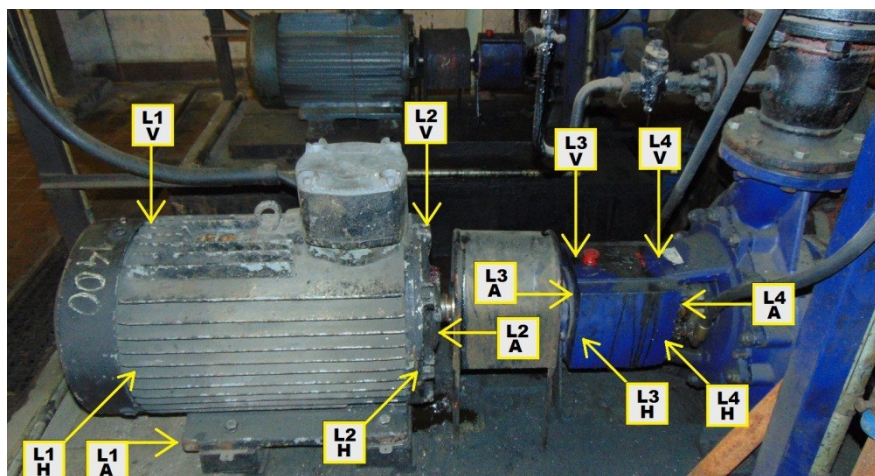


Obr. 27 Přístroj Adash A4400 VA4 Pro [24]

Nasbíraná data byla později analyzována ve virtuální verzi softwaru analyzátoru A4410 Virtual Unit běžící na standardním Windows PC.



Měření bylo uskutečněno pomocí tří akcelerometrů s magnetickou základnou. Snímače byly umístěny na předem očištěná místa na strojích, a to v co možná nejbližší vzdálenosti od měřených ložisek. Každá sestava elektromotoru a čerpadla obsahuje 4 valivá ložiska – dvě v motoru a dvě v kozlíku čerpadla. Ložiska jsou označena směrem od ventilátoru elektromotoru po konečné ložisko u ucpávky čerpadla **L1**, **L2**, **L3**, **L4**. Snímače byly umístovány s ohledem na měření tří hlavních směrů vibrací – vertikál (**V**), horizontál (**H**) a axiál (**A**).



Obr. 28 Rozmístění měřicích bodů na sestavách [Autor]

### HODNOCENÍ MOHUTNOSTI VIBRACÍ

Naměřené hodnoty vibrací byly zhodnoceny v souladu s normou ČSN ISO 10 816 – 3. Hodnocenou veličinou je zde efektivní hodnota rychlosti vibrací  $v_{RMS}$  [mm/s] a zrychlení  $a_{RMS}$  [g].

Tabulka 1: Doporučené hodnoty efektivní rychlosti vibrací v pásmu 10 Hz - 1000 Hz dle ČSN ISO 10816 – 3 pro stroje o výkonu 15 kW – 75 kW

Rozhraní pásem	Efektivní hodnota rychlosti vibrací [mm/s]
A/B	2,3 mm/s
B/C	4,5 mm/s
C/D	7,1 mm/s

Tabulka 2 Doporučené hodnoty efektivní rychlosti vibrací v pásmu 10 Hz - 1000 Hz dle ČSN ISO 10816 – 3 pro stroje do 15 kW

Rozhraní pásem	Efektivní hodnota rychlosti vibrací [mm/s]
A/B	1,4 mm/s
B/C	2,8 mm/s
C/D	4,5 mm/s

Tabulka 3 Doporučené hodnoty efektivní hodnoty zrychlení vibrací v pásmu 500 Hz - 25 000 Hz

Rozhraní pásem	Efektivní hodnota zrychlení vibrací [g]
A/B	0,5 g
B/C	2 g
C/D	4 g

Podle normy ČSN ISO 10 816 – 3 rozdělujeme diagnostikované stroje do čtyř kategorií podle naměřených hodnot:

- **Pásmo A:** Vibrace dosahují úrovně očekávané u nových strojů.
- **Pásmo B:** Stroje v této kategorii mohou být provozovány neomezeně dlouhou dobu.
- **Pásmo C:** Vibrace naznačují nebezpečí poruchy, stroj této kategorie by měl být provozován jen do doby nejbližší možné opravy.
- **Pásmo D:** Mohutnost vibrací dosahuje úrovně nebezpečné pro další provoz stroje, hrozí další poškození.

### 3.3 Rozmístění strojů a provozní podmínky

Měřená zařízení se nacházejí ve čtveřici hal. Konkrétně se jedná o strojovnu benzolové absorpce, fenolky, benzolky, a čerpání čpavkové vody.

#### *BENZOLOVÁ ABSORPCE*

Z koksárenského plynu je v benzolové pračce separován benzol. Tento proces se zakládá na propírání plynu pracím olejem, jenž na sebe naváže benzol. Horký olej je přepravován potrubím čtyřmi hlavními čerpacími větvemi a jedním menším čerpadlem malé strojovny. Hlavní čerpadla mají nainstalovány olejové ucpávky Burgmann. Pro každou čerpací větev jsou určeny dvě čerpadla (jedno je záložní). Ložiska elektromotorů čerpadel jsou mazána pomocí maznic při pravidelných pochůzkách. Ložiska čerpadel pracují v olejové lázni. Stejně tomu tak je i v dalších strojovnách.



Obr. 29 Hala strojovny benzolové absorpce [Autor]

### *HALA PŘEDČIŠTĚNÍ ČPAVKOVÉ VODY (FENOLKA)*

Zdejší čerpadla přepravují čpavkovou vodu separovanou z koksárenského plynu dále do provozu fenolky. Jednalo se původně o dvě větve tvořené dvojicí a trojicí čerpadel. Původní čerpadla byly ve velmi špatném technickém stavu. Před měřením v listopadu 2016 byla stará strojovna vyřazena z provozu a vybudována nová.



Obr. 30 Původní čerpadla fenolové technologie [25]



Obr. 31 Nově vybudovaná strojovna [Autor]

### *SEPARACE BENZOLU*

V provozu benzolky je z obohaceného pracího oleje destilován benzol. Čerpaný olej je proto velmi horký. Čerpadla jsou umístěna v prostorné hale ve skupinách až čtyř jednotek pro zabezpečení zálohy. Všechny stroje jsou vybaveny olejovými ucpávkami s vodními chladiči.



Obr. 32 Strojovna separace benzolu [Autor]

## ČERPADLA ČPAVKOVÉ VODY

V této relativně čisté strojovně jsou v provozu dvě větve čerpadel. Menší z nich je poháněno hliníkovým elektromotorem, což znemožnilo umístění magnetických snímačů vibrací a sběr dat. Větší stroj čerpá horkou čpavkovou vodu. Taktéž je vybaven olejovou ucpávkou.



Obr. 33 Čerpadlo čpavkové vody 09b [Autor]



## 4 Výsledky podle jednotlivých hal

### 4.1 Benzolová absorpce

#### 4.1.1 Sestava 24B

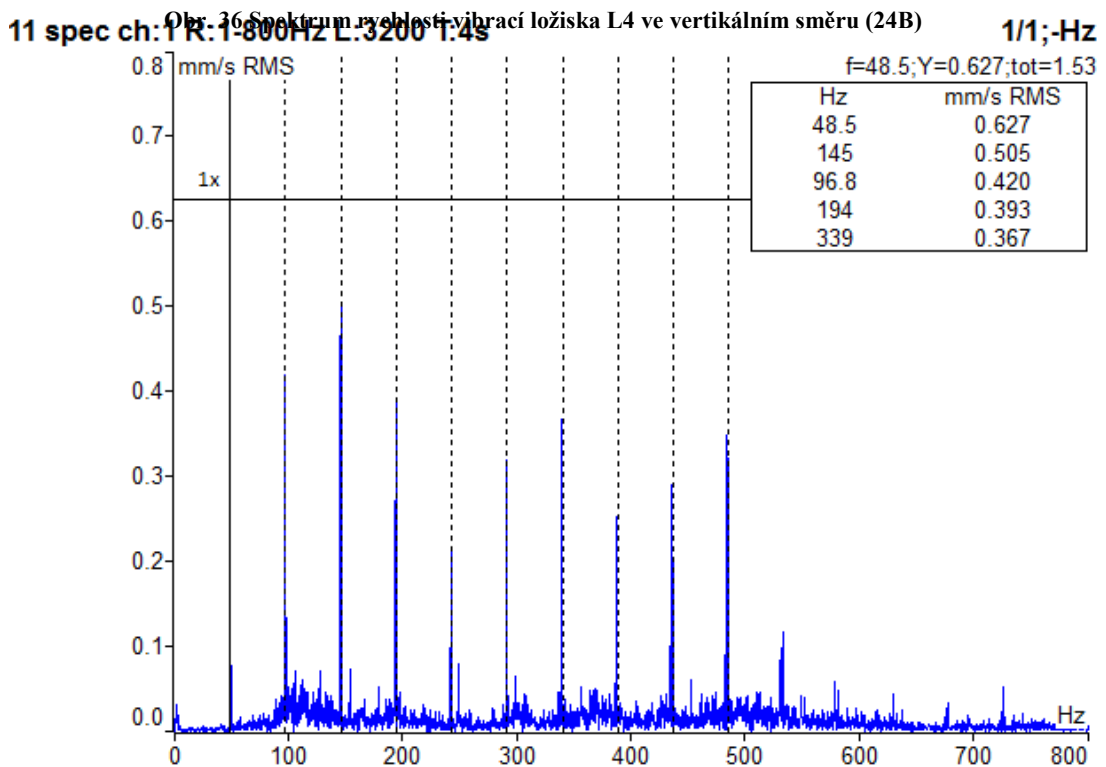
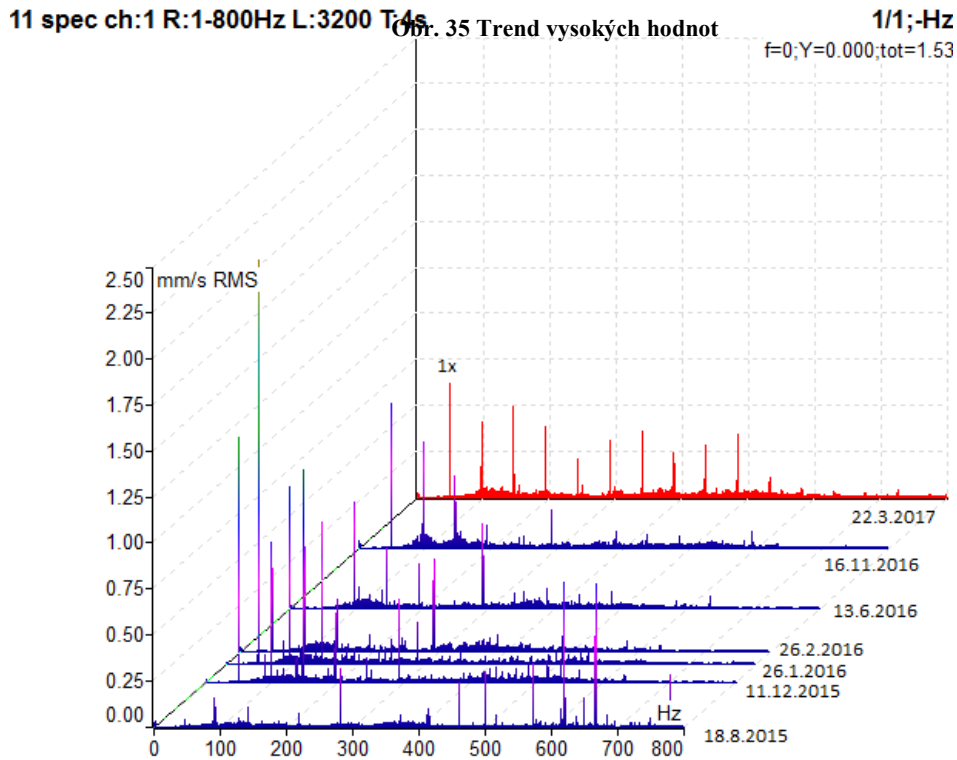
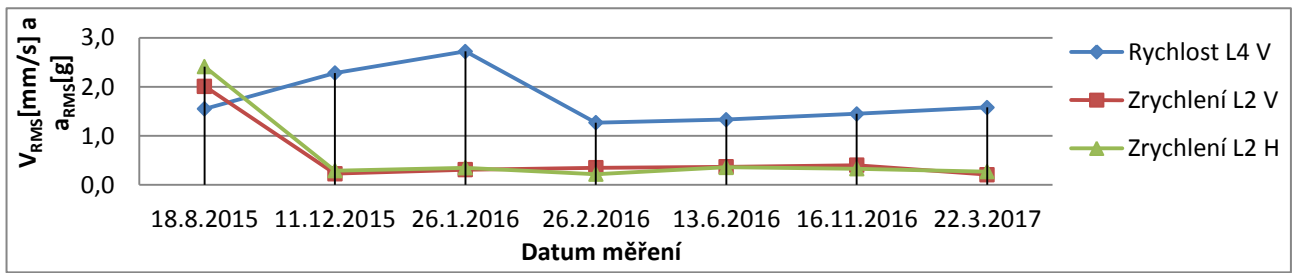
- Výkon 4 kW
- Otáčky 2870 min<sup>-1</sup>.



Tabulka 4 Změřené hodnoty vibrací sestavy 24B

Obr. 34 Čerpadlo 24B [Autor]

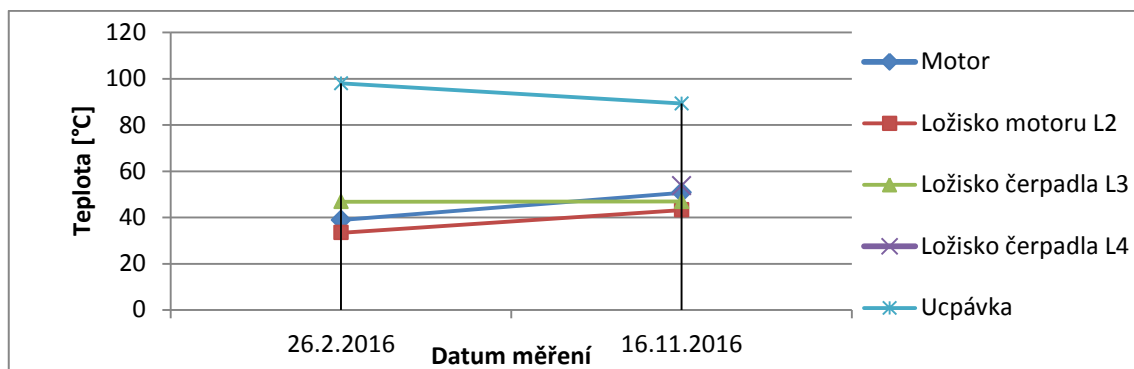
Datum měření		18.8.2015				11.12.2015				26.1.2016						
Popis		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo				
Měřící místo		L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4			
Veličina	Směr															
Max. ot/min		2870		2870		2870		2870		2870		2870				
v <sub>RMS</sub> [mm/s]	V	1,43	1,35	0,94	1,55	0,46	0,38	1,36	2,28	0,53	0,47	1,28	2,72			
	H	0,78	1,34	1,20	0,67	0,87	0,37	1,35	0,61	0,61	0,94	1,33	0,72			
	A	2,02	1,65	0,56	0,59	0,46	0,53	0,76	1,63	0,81	0,71	0,90				
a <sub>RMS</sub> [g] 500 – 25600 Hz	V	1,09	2,01	0,86	0,62	0,31	0,23	0,46	0,39	0,17	0,31	0,35	0,31			
	H	1,61	2,41	0,79	0,49	0,17	0,29	0,33	0,34	0,11	0,35	0,38	0,39			
	A	1,31	1,86	0,53	0,47	0,25	0,25	0,38	0,35	0,16	0,19	0,35				
Pozn.		se zátěží, zvýšené vibrace				se zátěží				se zátěží						
Datum	26.2.2016				13.6.2016				16.11.2016				22.3.2017			
	motor		čerpadlo		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo	
Místo	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
Směr	2870		2870		2870		2870		2870		2870		2870		2870	
V	0,73	0,47	0,87	1,27	0,49	0,35	0,99	1,33	0,45	0,37	0,94	1,45	0,58	0,43	1,21	1,58
H	0,68	0,39	0,90	0,89	0,46	0,36	0,89	0,47	0,81	0,42	1,01	0,57	0,52	0,45	1,42	0,61
A	0,15	0,58	0,59	0,61	0,08	0,46	0,56	0,62	0,16	0,39	0,52	0,56	0,12	0,58	0,66	0,64
V	0,19	0,35	0,49	0,34	0,23	0,37	0,46	0,33	0,19	0,40	0,61	0,39	0,29	0,21	0,59	0,47
H	0,11	0,22	0,54	0,33	0,21	0,36	0,43	0,34	0,14	0,33	0,54	0,45	0,21	0,27	0,51	0,42
A	0,18	0,21	0,41	0,37	0,14	0,21	0,42	0,51	0,17	0,29	0,53	0,57	0,19	0,28	0,45	0,40
Pozn	se zátěží				se zátěží				se zátěží				se zátěží			



Obr. 38 Spektrum rychlosti vibrací ložiska L4 ve vertikálním směru 22.3.2017 (24B)

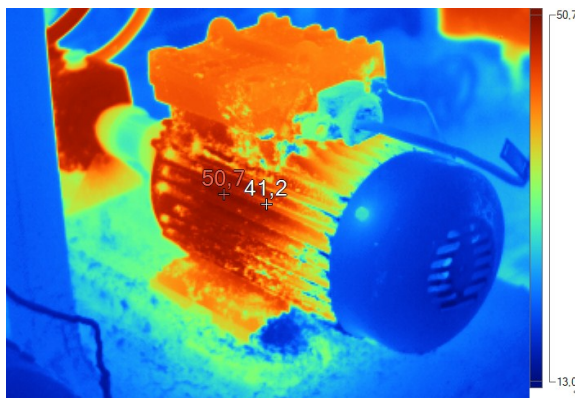
Tabulka 5 Teploty měřících bodů sestavy 24B

Měřící bod		Datum měření	
		26.2.2016	16.11.2016
Maximální teplota [°C]	Motor	38,9	50,7
	Měřící bod motoru L2	33,4	43,2
	Měřící bod čerpadla L3	46,8	46,9
	Měřící bod čerpadla L4		53,7
	Ucpávka	98	89,3

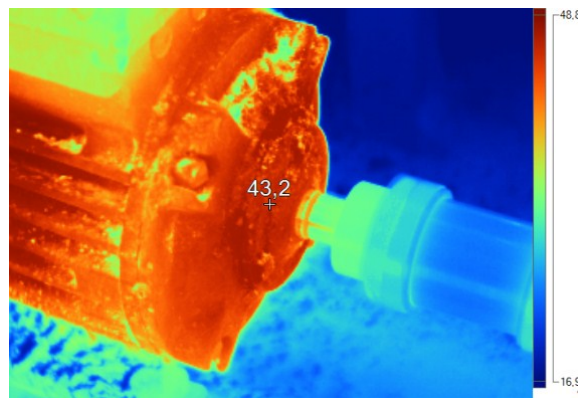


Obr. 39 Trend teplot měřících bodů

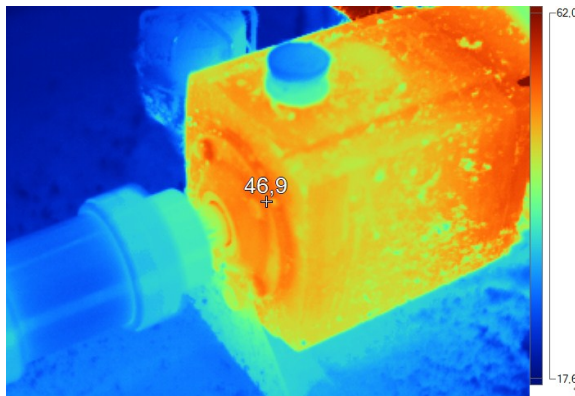
Poslední termografické snímky: 16.11.2016



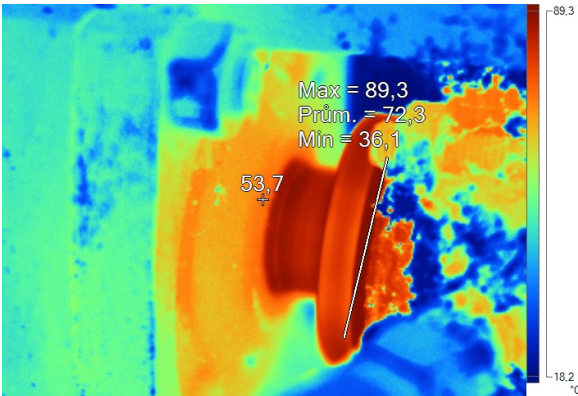
Obr. 41 Motor (24B)



Obr. 40 Měřící bod motoru L2 (24B)



Obr. 43 Měřící bod čerpadla L3 (24B)



Obr. 42 Ucpávka (24B)

## 4.1.2 Sestava 19B

- Výkon 37kW
- Otáčky 2950 min<sup>-1</sup>.

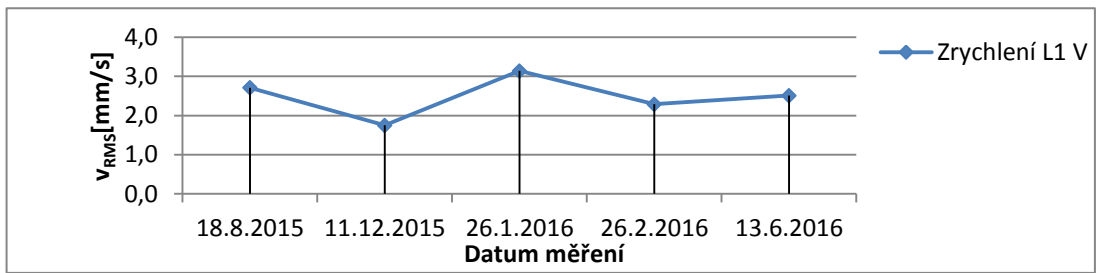


Obr. 44 Čerpadlo 19B [25]

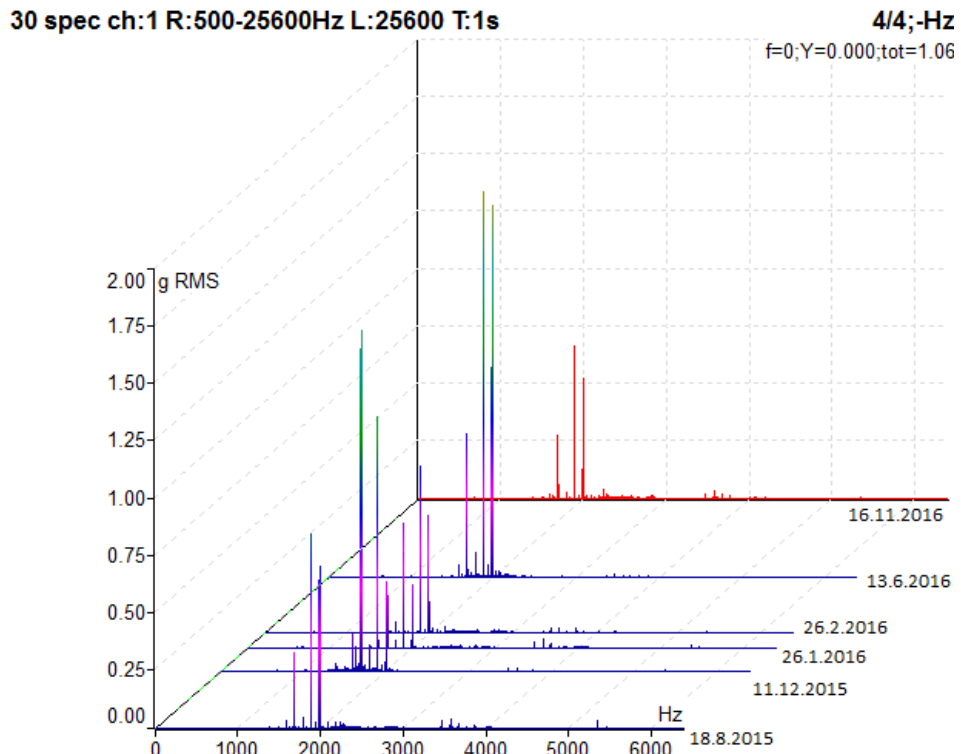
Tabulka 6 Změřené hodnoty vibrační sestavy 19B

Datum měření		18.8.2015				11.12.2015				26.1.2016			
Popis		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo	
Měřicí místo		L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr												
Max. ot/min		2950		2950									
V <sub>RMS</sub> [mm/s]	V	1,39	1,61	1,33	0,98	1,29	1,58	1,43	1,15	1,42	1,52	1,63	1,25
	H	0,71	0,72	0,96	0,83	0,68	0,75	1,31	0,91	1,01	0,77	1,25	1,04
	A	0,43	1,03	0,53	0,62	0,35	0,83	0,61	0,83	0,52	1,21	0,64	0,85
a <sub>RMS</sub> [g] 500 – 25600 Hz	V	1,30	0,24	0,37	0,23	2,11	0,35	0,55	0,39	0,73	0,30	0,45	0,38
	H	0,15	0,31	0,45	0,34	0,14	0,42	0,46	0,47	1,32	0,31	0,47	0,44
	A	0,33	0,27	0,61	0,44	0,24	0,31	0,45	0,59	0,28	0,46	0,62	0,58
Pozn.		se zátěží				se zátěží				se zátěží			
Datum měření		26.2.2016				13.6.2016				16.11.2016			
Popis		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo	
Měřicí místo		L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr												
Max. ot/min		2950		2950		2950		2950		2950		2950	
V <sub>RMS</sub> [mm/s]	V	1,36	1,48	1,41	1,15	1,55	1,59	1,62	1,32	1,71	1,58	1,83	1,30
	H	0,66	2,76	1,39	1,23	0,71	0,85	1,39	1,15	0,79	0,81	1,32	1,12
	A	0,55	0,53	1,02	0,93	0,54	0,98	0,65	0,98	0,42	1,29	0,66	1,02
a <sub>RMS</sub> [g] 500 – 25600 Hz	V	1,11	0,23	0,56	0,43	2,41	0,23	0,49	0,57	1,01	0,24	0,48	0,47
	H	0,87	0,39	0,61	0,54	1,07	0,29	0,51	0,48	1,78	0,41	0,46	0,49
	A	0,49	0,48	0,58	0,59	0,36	0,31	0,51	0,57	0,34	0,27	0,55	0,68
Pozn		se zátěží				se zátěží, měněn olej				se zátěží			

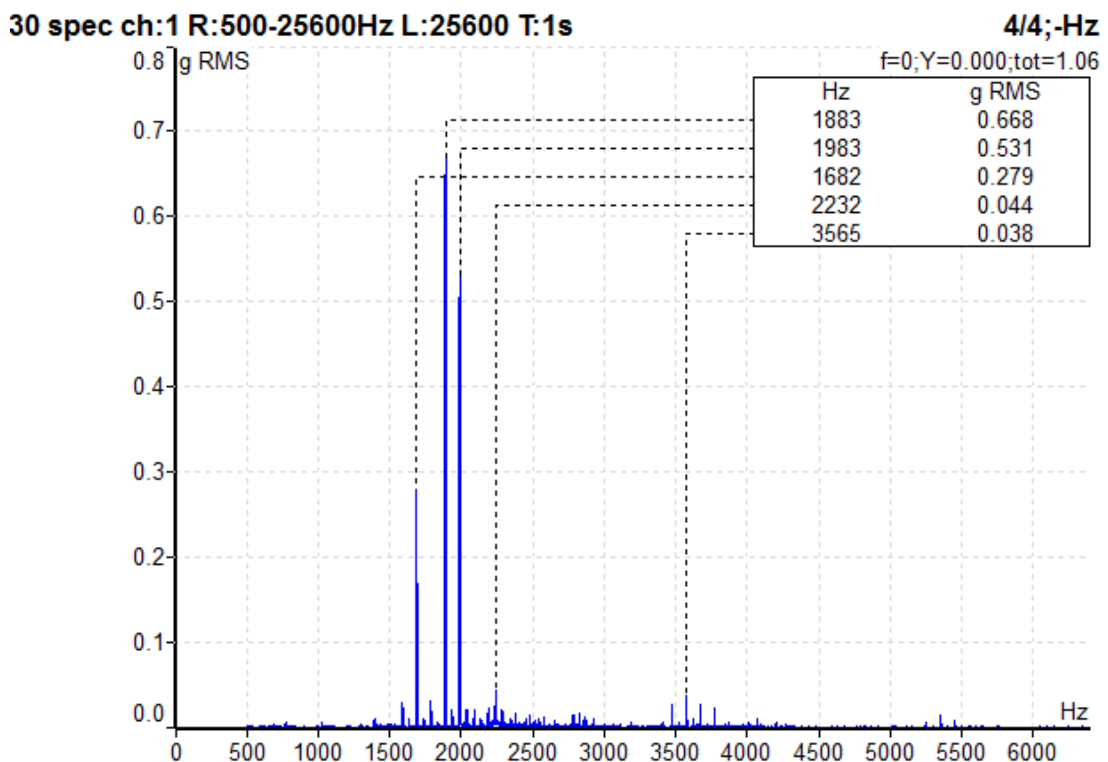




Obr. 45 Trend vysokých hodnot



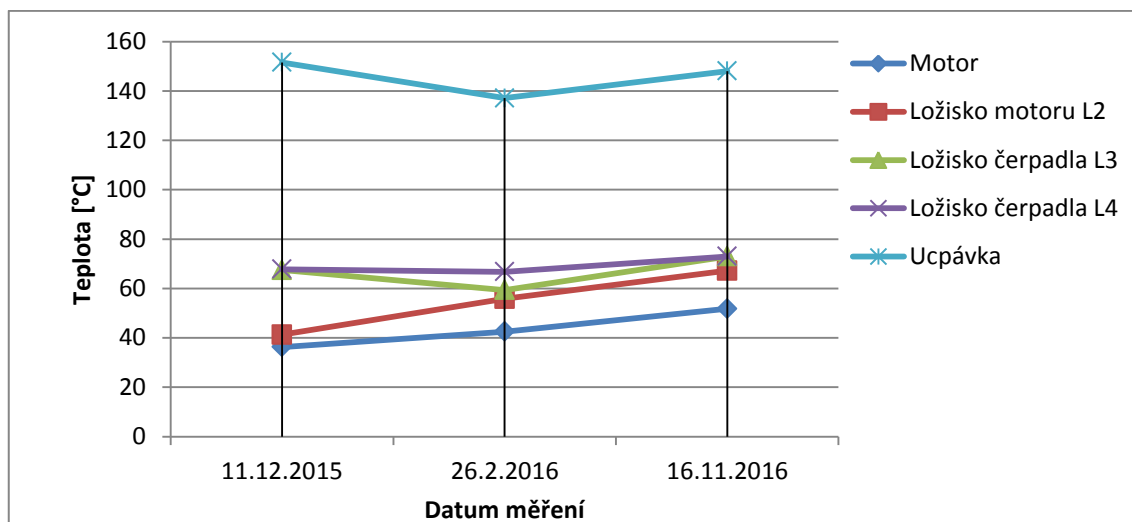
Obr. 46 Trend zrychlení vibrací měřicího bodu L1 ve vertikálním směru (19B)



Obr. 47 Spektrum zrychlení vibrací měřicího bodu L1 ve vertikálním směru 16.11.2016 (19B)

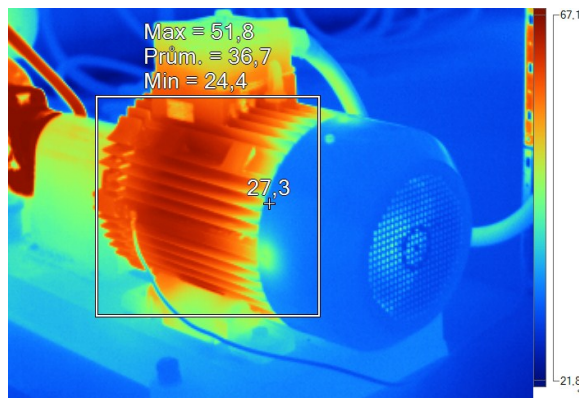
Tabulka 7 Teploty měřících bodů sestavy 19B

Měřící bod		Datum měření		
		11.12.2015	26.2.2016	16.11.2016
Maximální teplota [°C]	Motor	36,3	42,5	51,8
	Měřící bod motoru L2	41,3	55,8	67,2
	Měřící bod čerpadla L3	67,5	59,4	73
	Měřící bod čerpadla L4	67,8	66,8	73
	Ucpávka	151,6	137,1	148,1

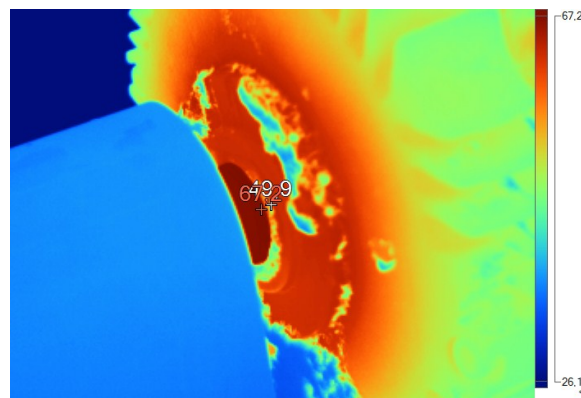


Obr. 48 Trend teplot měřících bodů

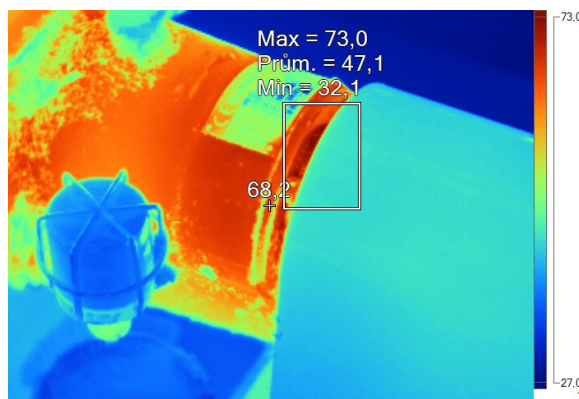
Poslední termografické snímky: 16.11.2016



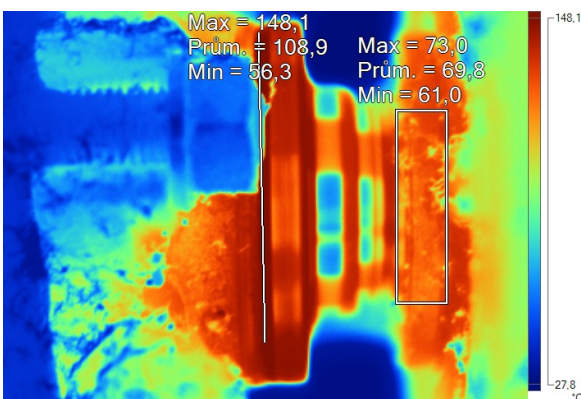
Obr. 50 Motor (19B)



Obr. 49 Měřící bod motoru L2 (19B)



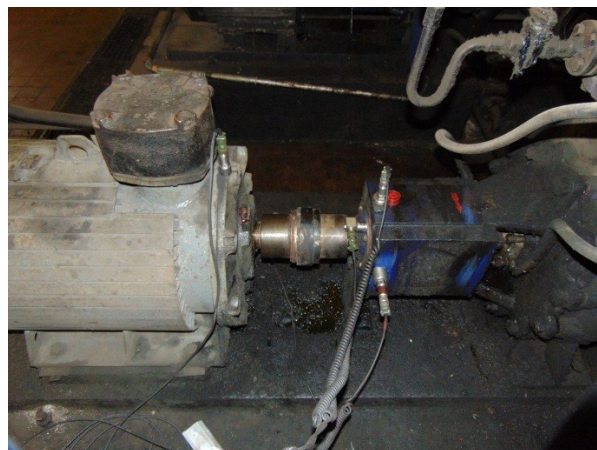
Obr. 52 Měřící bod čerpadla L3 (19B)



Obr. 51 Ucpávka a L4 (19B)

### 4.1.3 Sestava 6B

- Výkon 30 kW
- Otáčky 1465 min<sup>-1</sup>

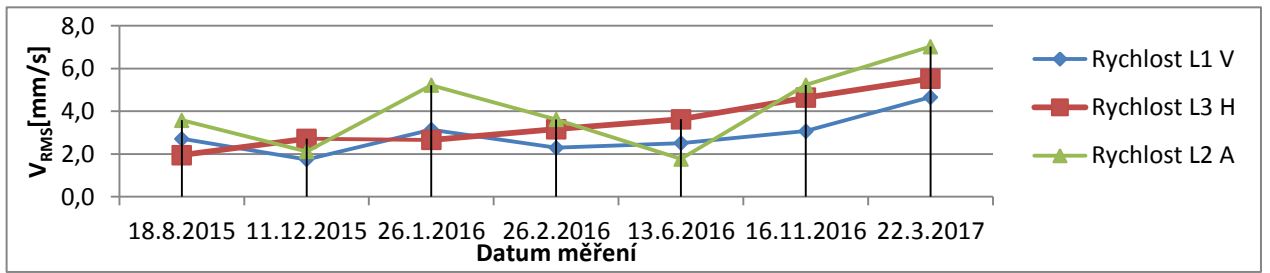


Obr. 53 Čerpadlo 6B [Autor]

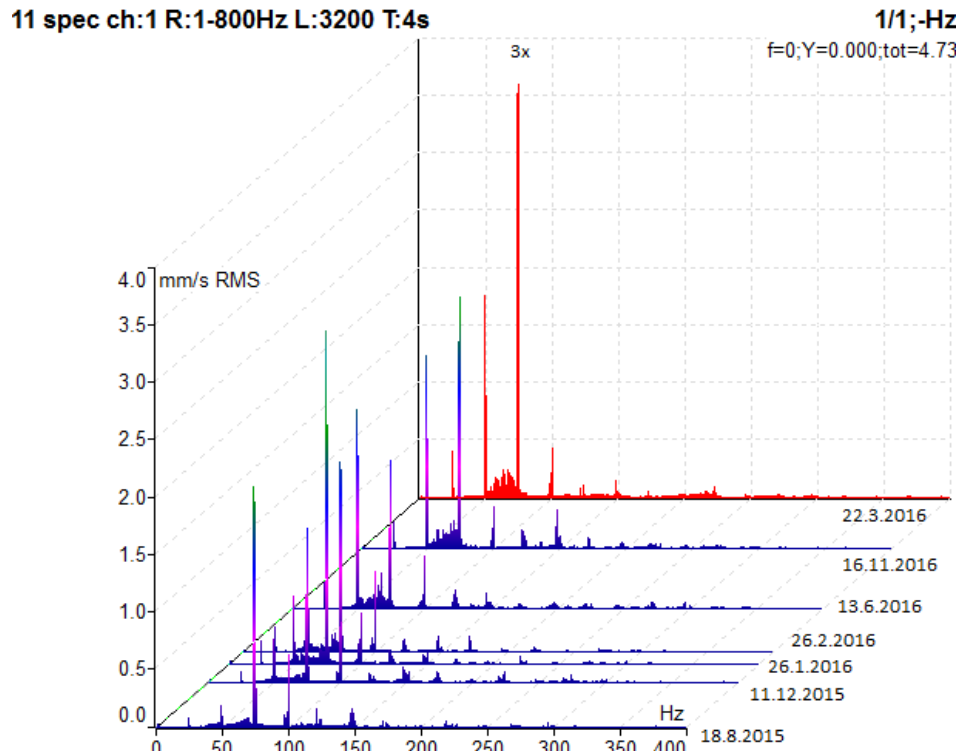
Tabulka 8 Změřené hodnoty vibrací sestavy 6B

Datum měření		18.8.2015				11.12.2015				26.1.2016						
Popis		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo				
Měřící místo		L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4			
Veličina	Směr															
Max. ot/min		1465		1465		1465		1465		1465		1465				
v <sub>RMS</sub> [mm/s]	V	2,71	2,26	1,03	2,71	1,75	2,52	1,86	1,75	3,14	3,75	2,15	1,66			
	H	2,13	1,55	1,95	2,13	1,85	1,43	2,71	1,85	1,54	1,33	2,66	1,46			
	A	1,52	3,58	1,35	1,52	1,48	2,12	0,98	1,48	2,22	5,22	2,25	1,01			
a <sub>RMS</sub> [g] 500 – 25600 Hz	V	0,29	0,19	0,41	0,33	0,46	0,31	0,83	0,36	0,14	0,15	0,49	0,28			
	H	0,18	0,18	0,39	0,34	0,34	0,28	0,77	0,38	0,25	0,17	0,37	0,43			
	A	0,16	0,25	0,54	0,37	0,39	0,52	0,59	0,35	0,22	0,15	0,38	0,35			
Pozn.		Se zátěží				Se zátěží				Se zátěží						
Datum	26.2.2016				13.6.2016				16.11.2016				22.3.2017			
	motor		čerpadlo		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo	
Místo	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
Směr	1465		1465		1465		1465		1465		1465		1465		1465	
V	2,29	2,34	2,10	2,02	2,51	3,72	2,45	2,13	3,07	3,87	2,99	2,40	4,66	4,28	4,22	3,04
H	0,59	1,45	3,16	1,80	1,87	1,56	3,63	2,10	2,47	2,03	4,64	2,73	2,14	2,91	5,53	3,01
A	1,64	3,62	1,49	1,57	1,93	1,77	1,63	1,76	2,31	5,23	2,43	1,35	0,32	7,03	1,99	1,62
V	0,20	0,16	0,51	0,35	0,21	0,15	0,41	0,23	0,31	0,21	0,38	0,28	0,26	0,24	0,46	0,27
H	0,19	0,17	0,45	0,29	0,21	0,19	0,56	0,30	0,19	0,14	0,30	0,26	0,29	0,24	0,31	0,24
A	0,14	0,22	0,53	0,32	0,22	0,21	0,22	0,21	0,26	0,21	0,43	0,27	0,22	0,39	0,39	0,25
Pozn.	Se zátěží				Se zátěží				Se zátěží, nesouosost				Se zátěží, poškozená spojka			

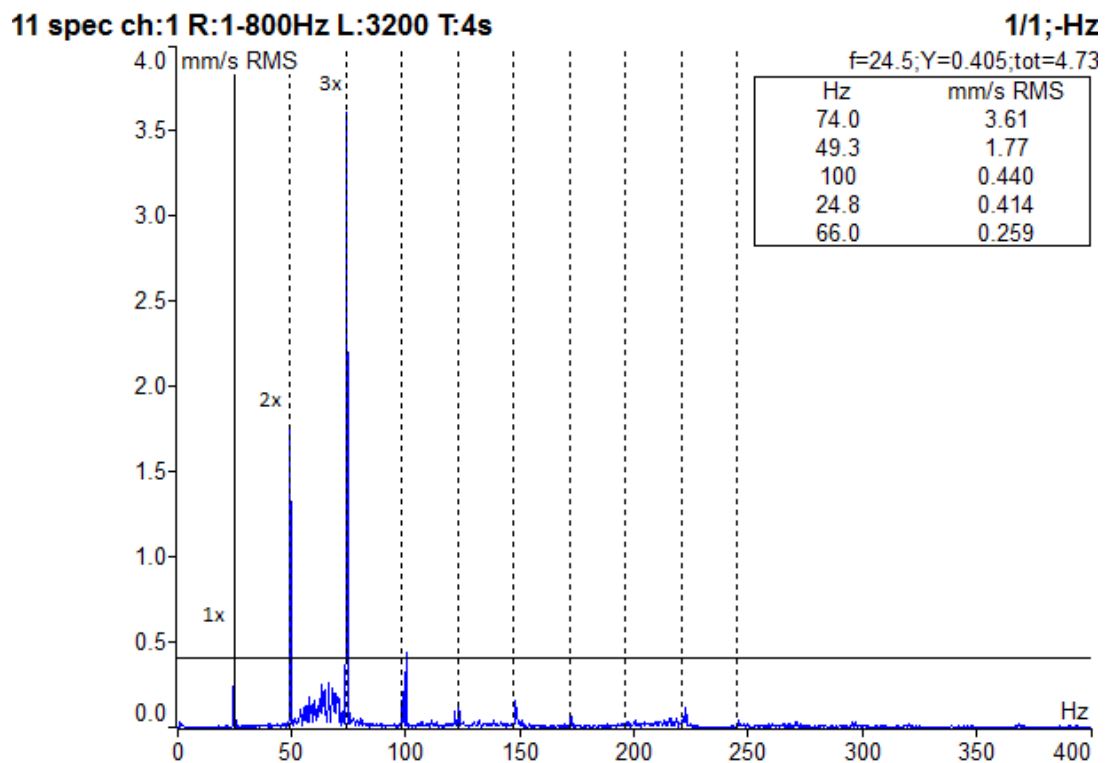
Stroj má pravděpodobně poškozenou spojku.



Obr. 54 Trend vysokých hodnot



Obr. 55 Trend rychlosti vibrací měřicího bodu L1 ve vertikálním směru (6B)

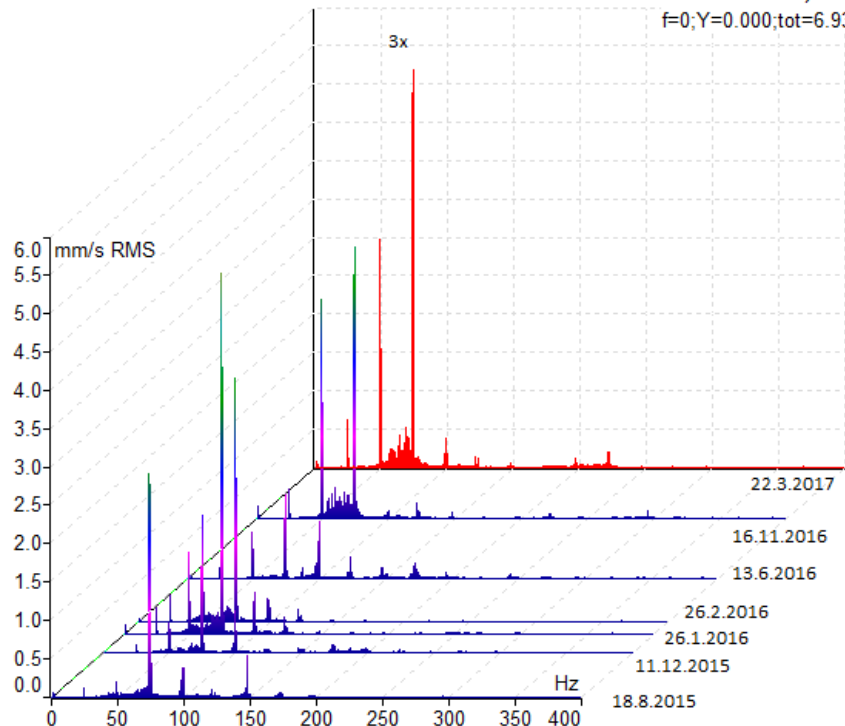


Obr. 56 Spektrum rychlosti vibrací měřicího bodu L1 ve vertikálním směru 22.3.2017 (6B)

13 spec ch:3 R:1-800Hz L:3200 T:4s

1/1;-Hz

f=0;Y=0.000;tot=6.93

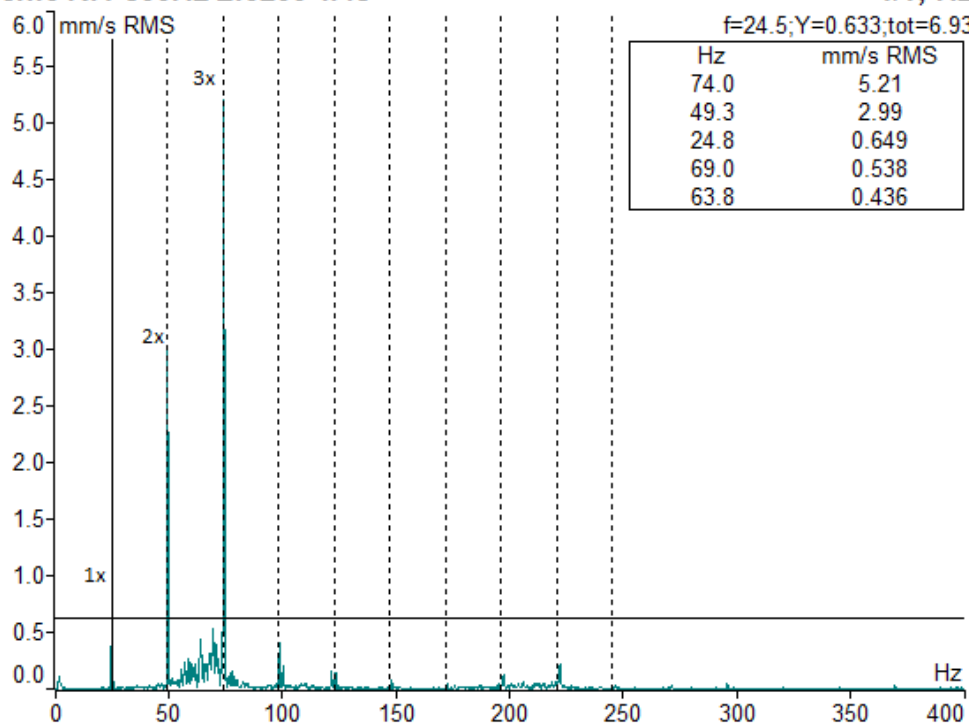


Obr. 57 Trend rychlosti vibrací měřícího bodu L2 v axiálním směru (6B)

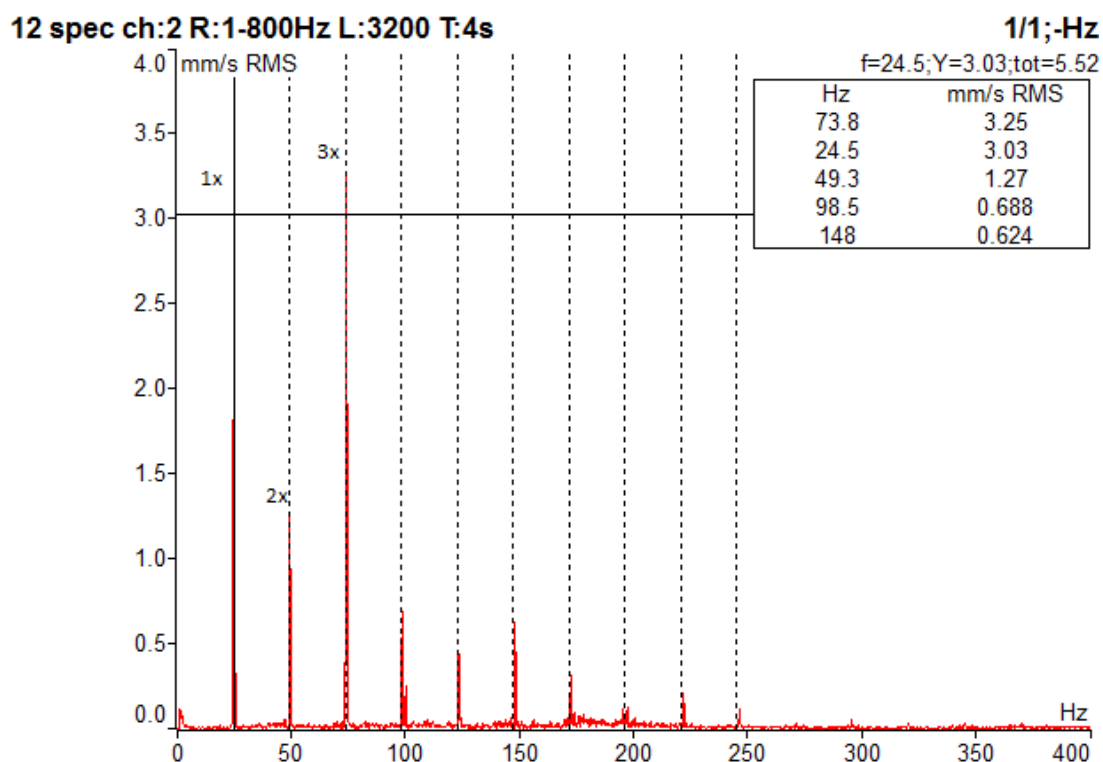
13 spec ch:3 R:1-800Hz L:3200 T:4s

1/1;-Hz

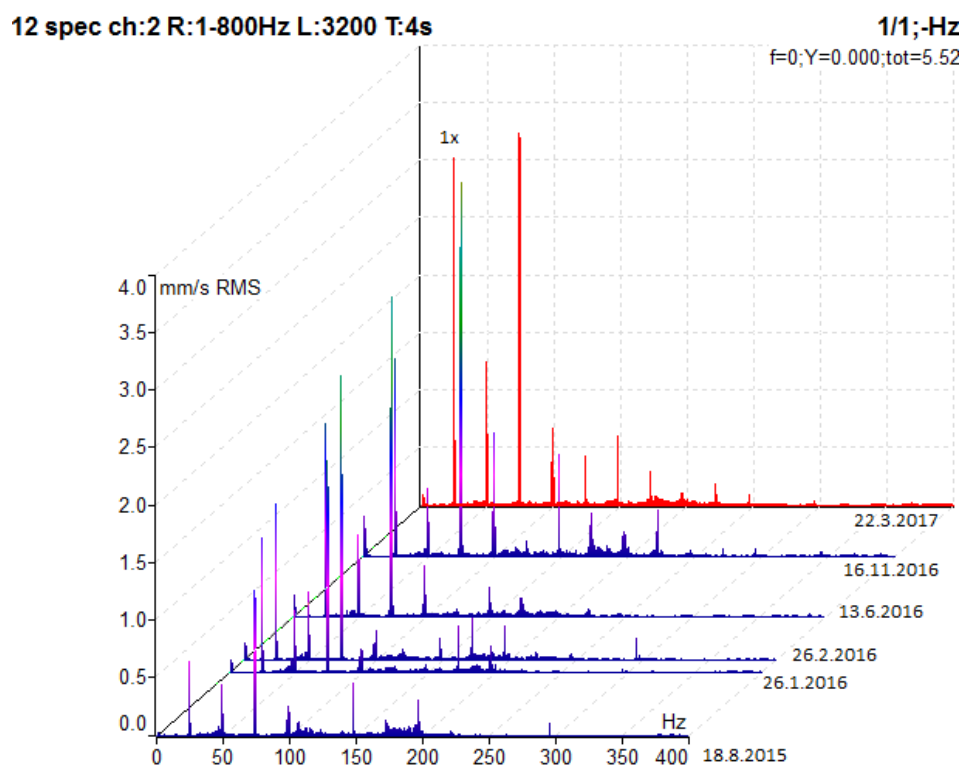
f=24.5;Y=0.633;tot=6.93



Obr. 58 Spektrum rychlosti vibrací měřícího bodu L2 v axiálním směru 22.3.2017 (6B)



Obr. 60 Spektrum rychlosti vibrací měřícího bodu L3 v horizontálním směru 22.3.2017 (6B)

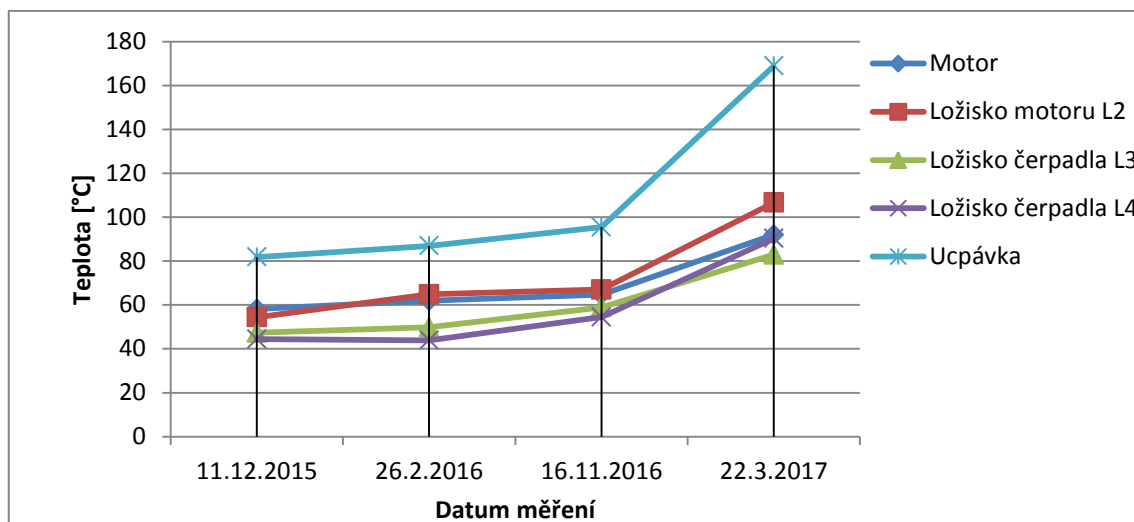


Obr. 61 Trend rychlosti vibrací měřícího bodu L3 v horizontálním směru (6B)



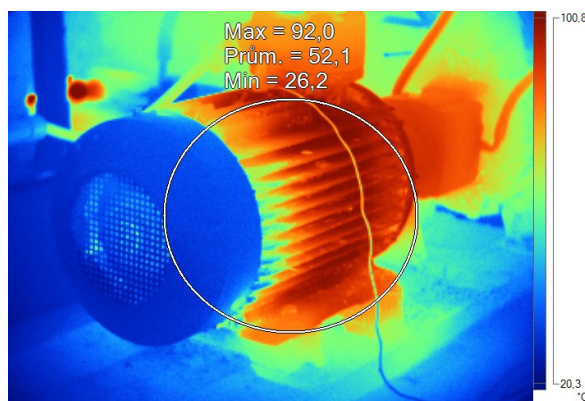
Tabulka 9 Teploty měřících bodů sestavy 6B

Měřící bod		Datum měření			
		11.12.2015	26.2.2016	16.11.2016	22.3.2017
Maximální teplota [°C]	Motor	58,1	61,9	64,7	92
	Měřící bod motoru L2	54,4	64,8	67	106,6
	Měřící bod čerpadla L3	47,3	49,8	58,9	82,9
	Měřící bod čerpadla L4	44,4	43,9	54,5	90,3
	Ucpávka	81,8	86,9	95,5	168,9

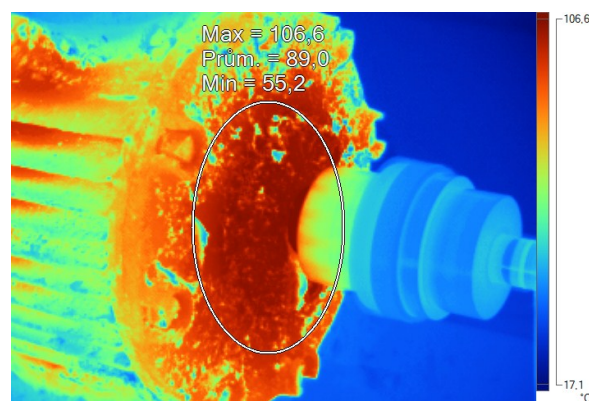


Obr. 62 Trend teplot měřících bodů

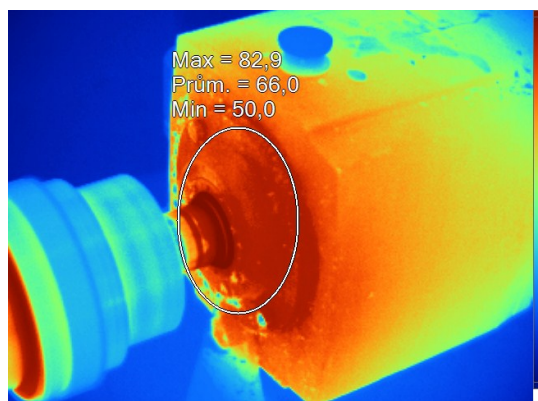
Poslední termografické snímky: 22.3.2017



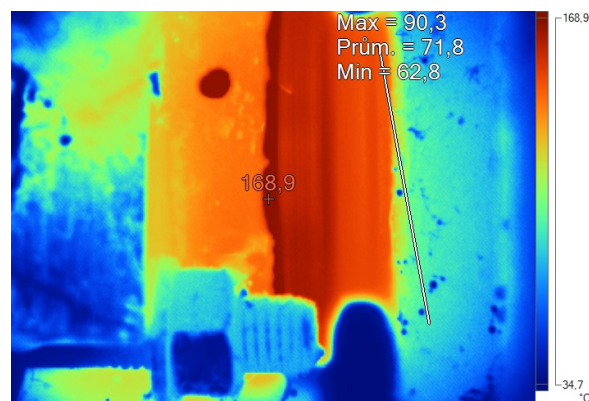
Obr. 63 Motor (6B)



Obr. 64 Měřící bod motoru L2 (6B)



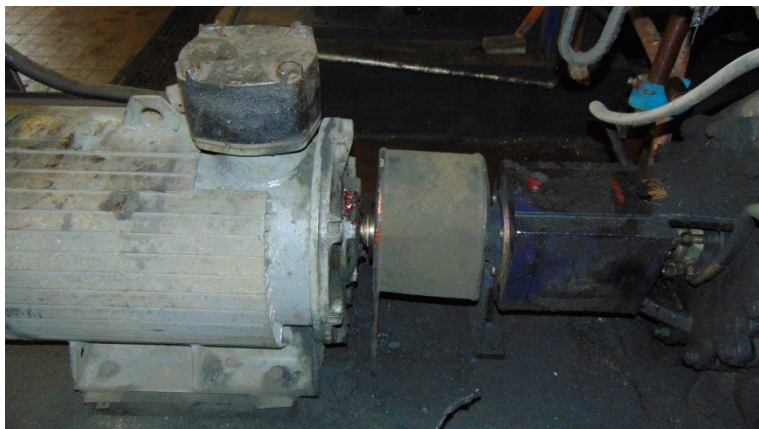
Obr. 66 Měřící bod čerpadla L3 (6B)



Obr. 65 Ucpávka a L4 (6B)

#### 4.1.4 Sestava 7A

- Výkon 55 kW
- Otáčky 1475 min<sup>-1</sup>



Obr. 67 Čerpadlo 7A [Autor]

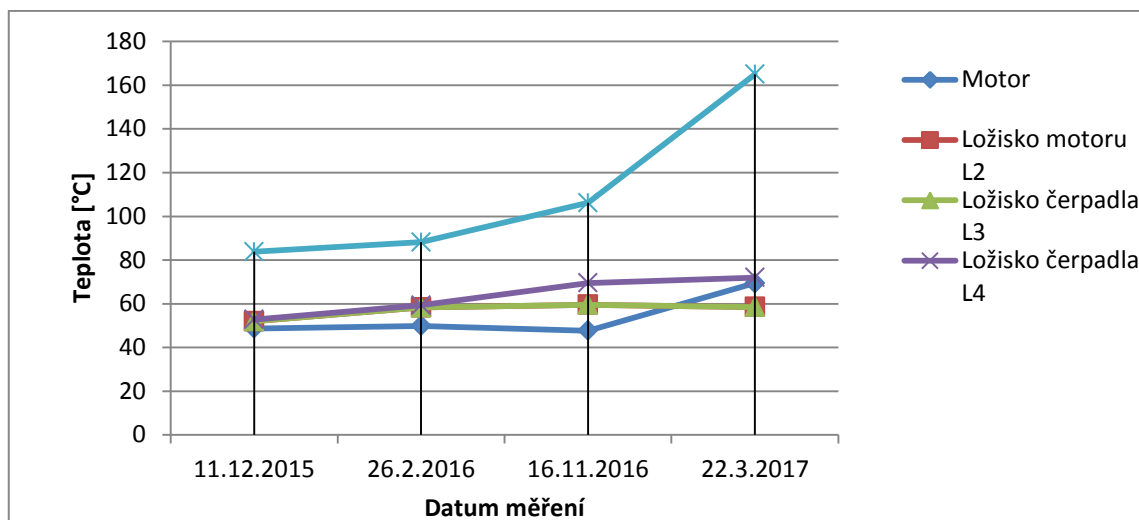
Tabulka 10 Změřené hodnoty vibrací sestavy 7A

Datum měření		18.8.2015				11.12.2015				26.1.2016			
Popis		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo	
Měřící místo		L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr												
Max. ot/min		1475		1475		1475		1475		1475		1475	
v <sub>RMS</sub> [mm/s]	V	0,65	0,76	1,22	1,81	0,67	0,71	0,91	1,52	0,61	0,76	0,84	1,41
	H	0,75	0,85	1,72	0,93	0,62	0,81	1,18	0,62	0,36	0,43	1,25	0,55
	A	0,28	0,71	0,78	0,69	0,31	0,53	0,76	0,53	0,25	0,98	0,53	0,48
a <sub>RMS</sub> [g] 500 – 25600 Hz	V	0,21	0,23	0,34	0,22	0,15	0,18	0,48	0,27	0,19	0,35	0,24	0,13
	H	0,22	0,31	0,19	0,20	0,19	0,35	0,21	0,17	0,23	0,23	0,26	0,23
	A	0,11	0,3	0,27	0,26	0,11	0,21	0,23	0,26	0,11	0,18	0,32	0,22
Pozn.		se zátěží				se zátěží				se zátěží			
Datum měření		26.2.2016				13.6.2016				22.3.2017			
Popis		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo	
Měřící místo		L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr												
Max. ot/min		1475		1475		1475		1475		1475		1475	
v <sub>RMS</sub> [mm/s]	V	0,51	0,75	0,73	1,41	0,58	0,58	0,84	1,63	0,62	0,85	0,63	2,01
	H	0,57	0,71	1,04	0,55	0,52	0,72	1,09	0,46	0,53	0,54	1,31	0,59
	A	0,28	0,55	0,76	0,48	0,26	0,58	0,76	0,55	0,78	0,65	0,96	0,56
a <sub>RMS</sub> [g] 500 – 25600 Hz	V	0,18	0,31	0,24	0,16	0,19	0,29	0,33	0,24	0,21	0,32	0,25	0,26
	H	0,24	0,64	0,26	0,23	0,17	0,38	0,25	0,21	0,14	0,24	0,27	0,24
	A	0,14	0,24	0,32	0,22	0,15	0,41	0,32	0,25	0,11	0,33	0,32	0,23



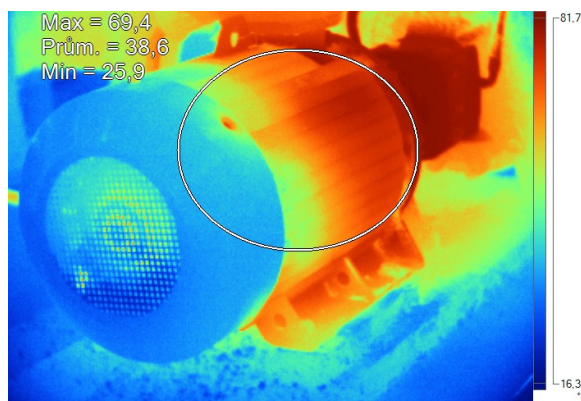
Tabulka 11 Teploty měřících bodů sestavy 7A

Měřící bod		Datum měření			
		11.12.2015	26.2.2016	16.11.2016	22.3.2017
Maximální teplota [°C]	Motor	48,7	49,9	47,7	69,4
	Měřící bod motoru L2	52	58,3	59,5	58,5
	Měřící bod čerpadla L3	56,5	55,4	66,6	90,1
	Měřící bod čerpadla L4	52,8	59,3	69,5	72
	Ucpávka	83,8	88,2	106,2	165

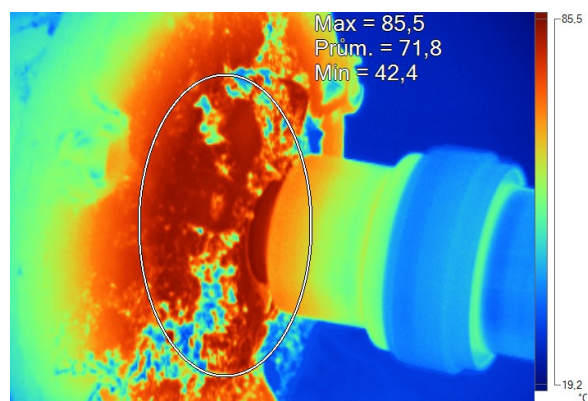


Obr. 68 Trend teplot měřících bodů

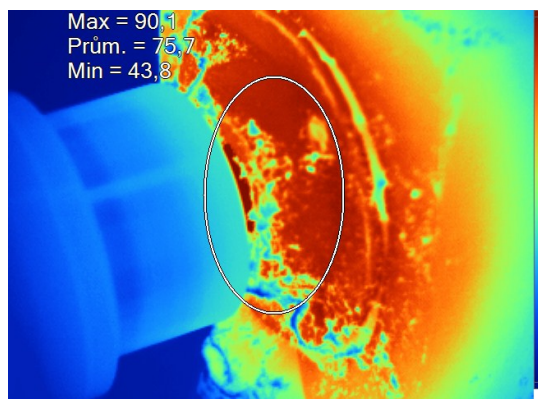
Poslední termografické snímky: 22.3.2017



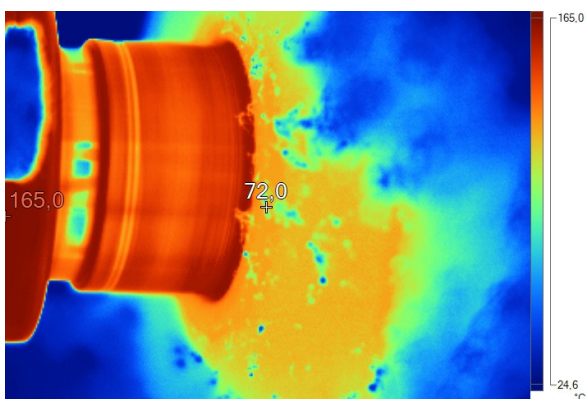
Obr. 70 Motor (7A)



Obr. 69 Měřící bod motoru L2 (7A)



Obr. 72 Měřící bod čerpadla L3 (7A)



Obr. 71 Ucpávka a L4(7A)

#### 4.1.5 Sestava 8B

- Výkon 55 kW
- Otáčky 1475 min<sup>-1</sup>

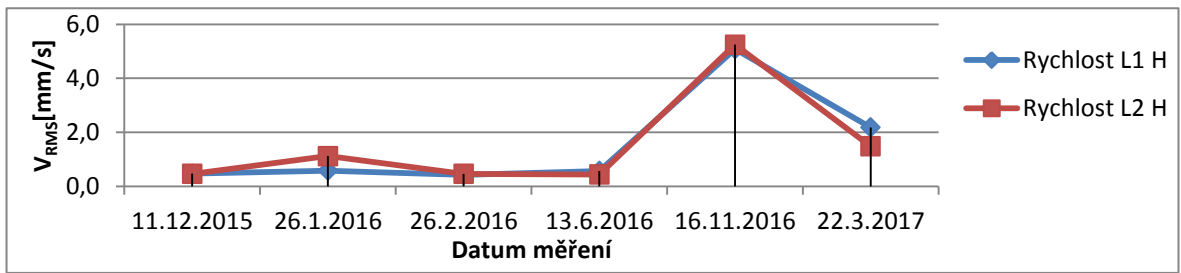


Obr. 73 Čerpadlo 8B [Autor]

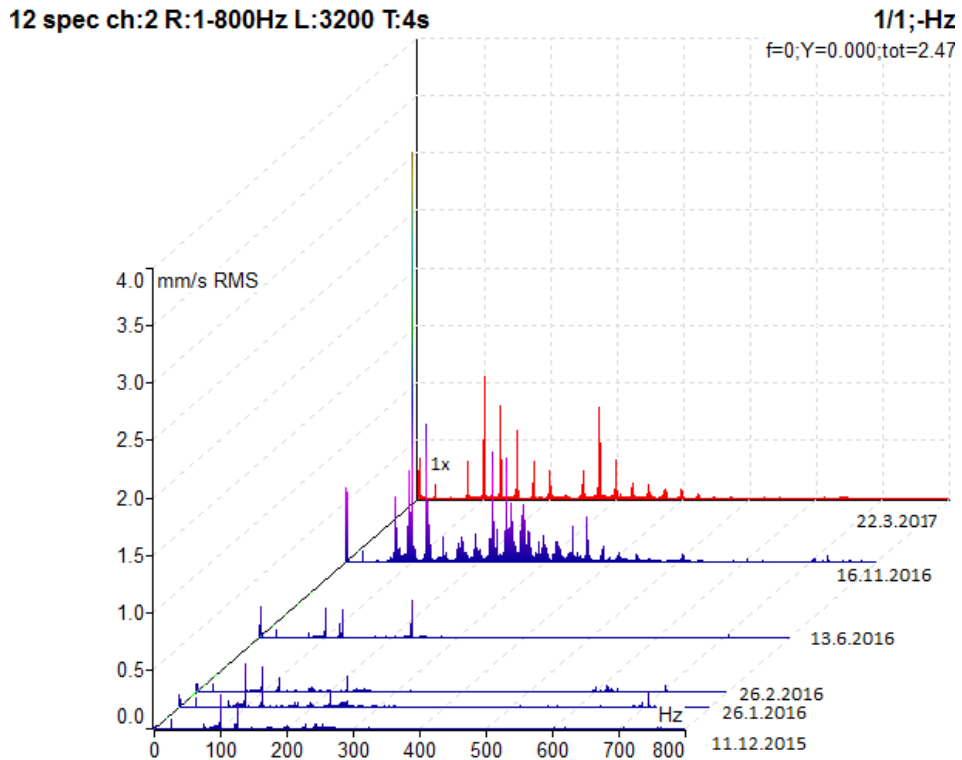
Tabulka 12 Změřené hodnoty vibrační sestavy 8B

Datum měření		11.12.2015				26.1.2016				26.2.2016			
Popis		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo	
Měřicí místo		L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr												
Max. ot/min		1475		1475		1475		1475		1475		1475	
v <sub>RMS</sub> [mm/s]	V	1,02	0,99	0,69	1,72	1,29	1,45	0,91	1,75	1,44	1,56	0,74	1,73
	H	0,47	0,46	1,23	0,53	0,58	1,12	1,06	0,61	0,43	0,46	1,24	0,58
	A	0,19	0,53	0,93	0,78	0,32	0,45	0,98	0,86	0,21	0,33	0,96	0,98
a <sub>RMS</sub> [g] 500 – 25600 Hz	V	0,45	0,74	0,39	0,48	0,22	0,65	0,38	0,42	0,56	1,13	0,37	0,44
	H	0,27	1,12	0,30	0,37	0,25	0,47	0,31	0,39	0,25	0,56	0,27	0,35
	A	0,24	0,76	0,38	0,49	0,32	0,44	0,48	0,41	0,22	0,86	0,47	0,49
Pozn.		se zátěží				se zátěží				se zátěží			
Datum měření		13.6.2016				16.11.2016				22.3.2017			
Popis		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo	
Měřicí místo		L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr												
Max. ot/min		1475		1475		1475		1475		1475		1475	
v <sub>RMS</sub> [mm/s]	V	1,04	1,44	0,66	1,48	3,67	2,34	1,87	1,91	1,66	1,46	1,02	2,13
	H	0,57	0,44	1,10	0,49	5,09	5,25	3,39	2,05	2,18	1,48	2,75	1,45
	A	0,17	0,41	0,88	0,78	3,04	1,67	1,22	1,51	0,69	0,95	0,81	1,06
a <sub>RMS</sub> [g] 500 – 25600 Hz	V	0,27	0,42	0,37	0,38	0,88	1,56	0,33	0,37	0,41	0,31	0,33	0,44
	H	0,26	0,44	0,31	0,33	0,86	1,32	0,31	0,31	0,16	0,23	0,28	0,29
	A	0,23	0,37	0,61	0,55	0,51	1,84	0,37	0,41	0,16	0,48	0,42	0,24
Pozn.		se zátěží				se zátěží				se zátěží			

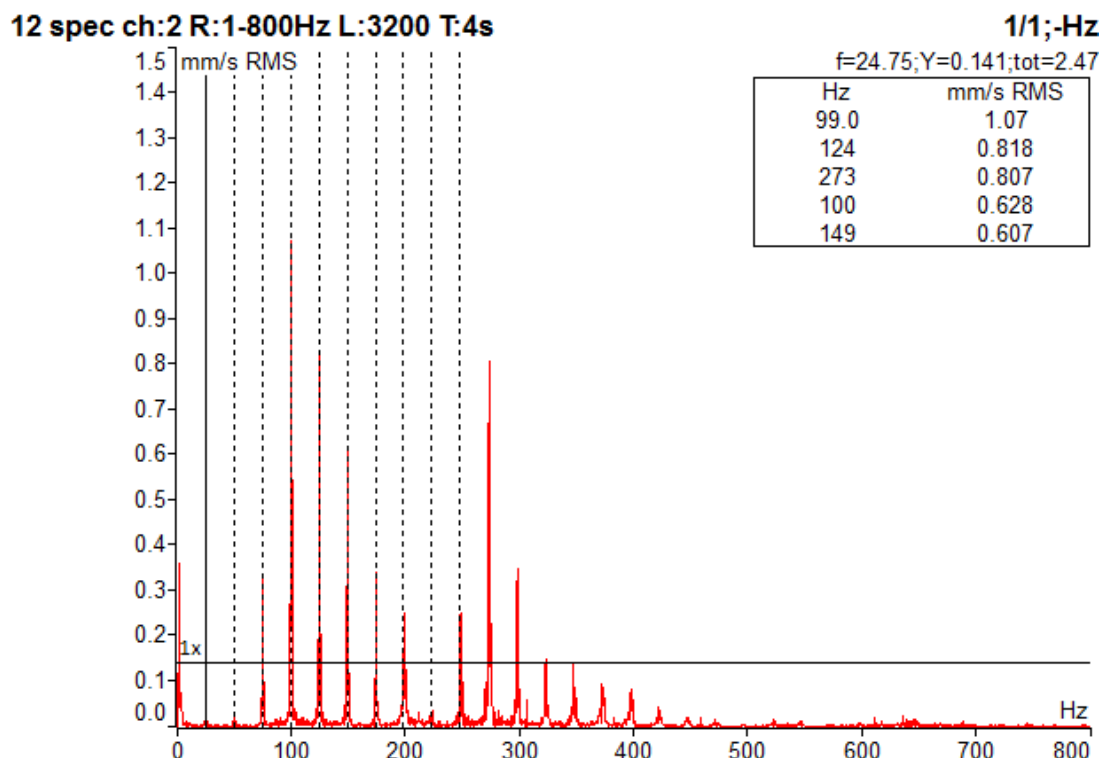
Příčinou vibrací je patrně nesouosost a uvolnění stroje.



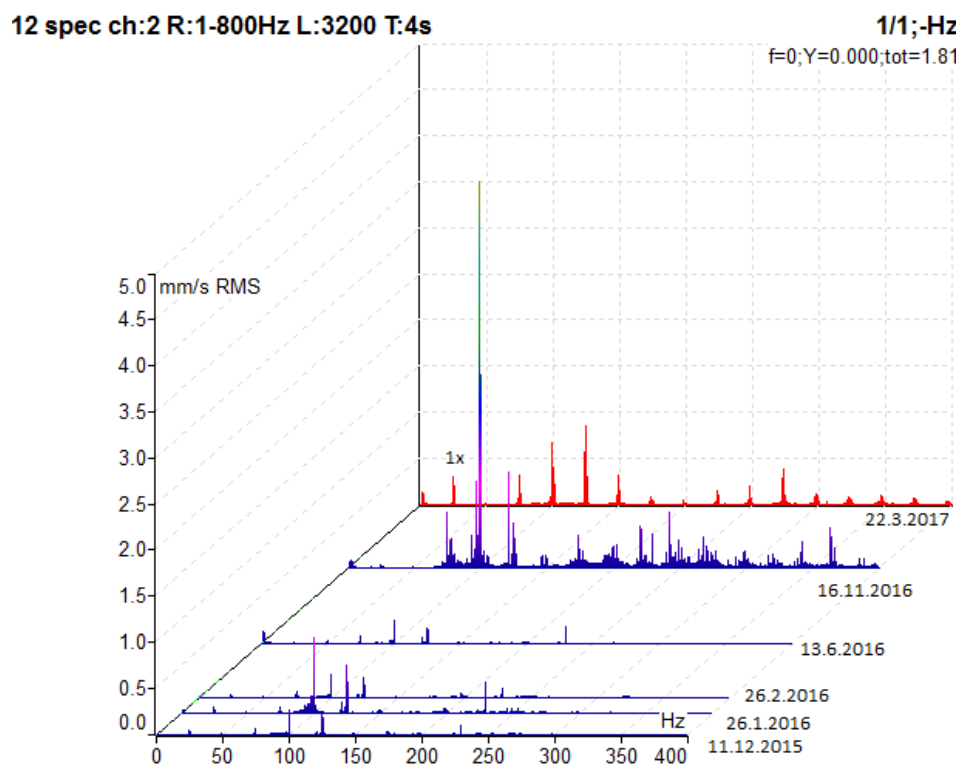
Obr. 74 Trend vysokých hodnot



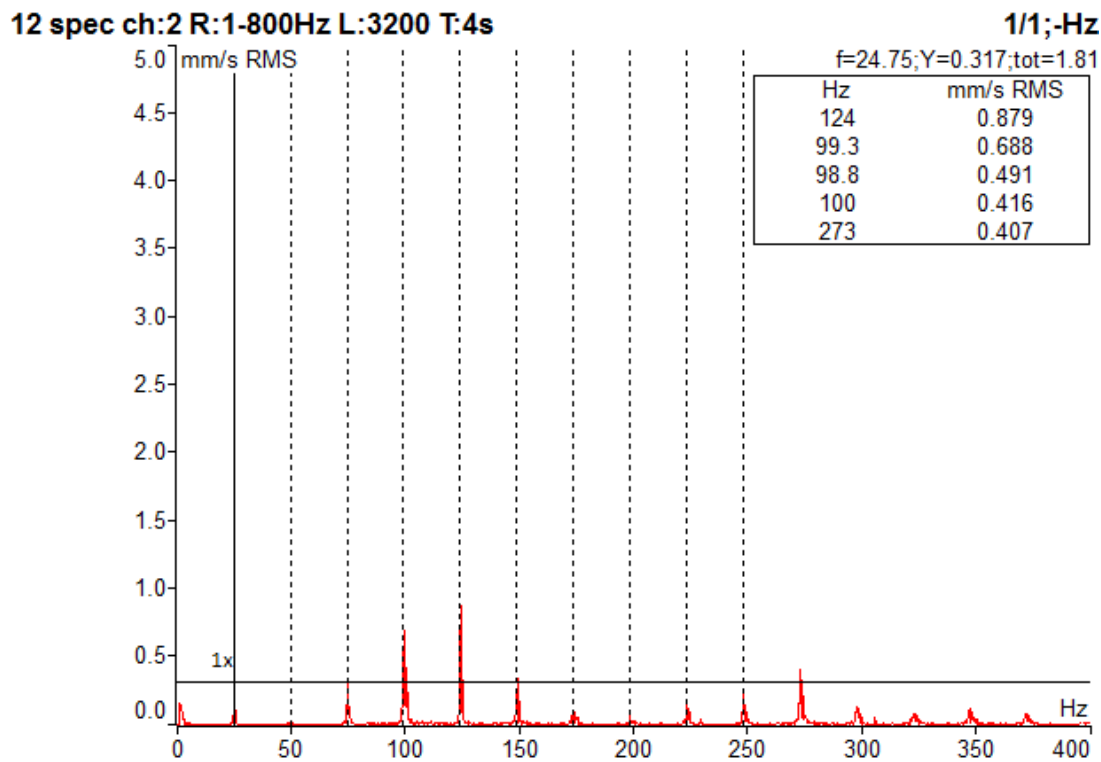
Obr. 75 Trend rychlosti vibrací měřícího bodu L1 v horizontálním směru (8B)



Obr. 76 Spektrum rychlosti vibrací měřícího bodu L1 v horizontálním směru 22.3.2017 (8B)



Obr. 78 Trend rychlosti vibrací měřícího bodu L2 v horizontálním směru (8B)

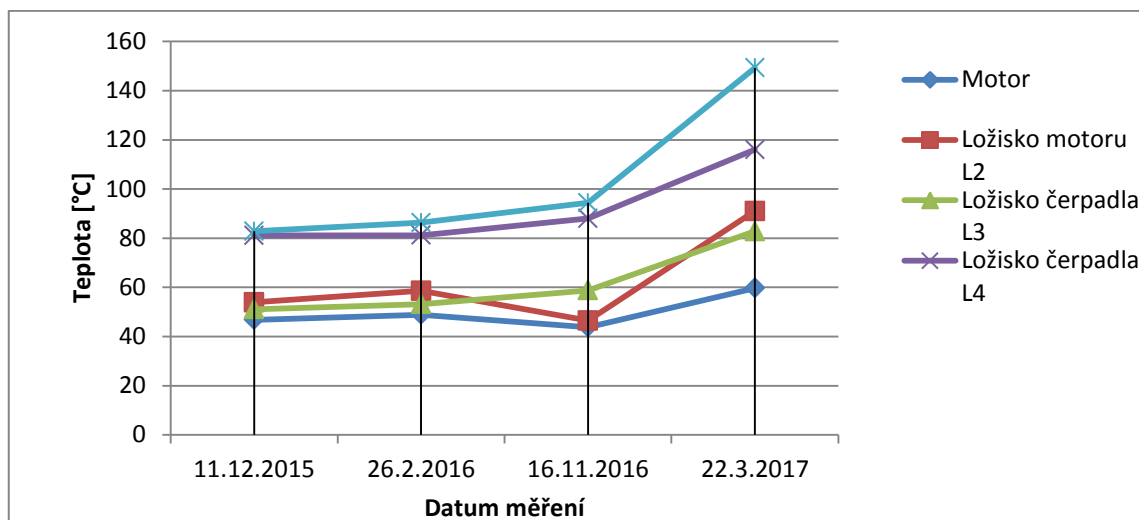


Obr. 79 Spektrum rychlosti vibrací měřícího bodu L2 v horizontálním směru 22.3.2017 (8B)



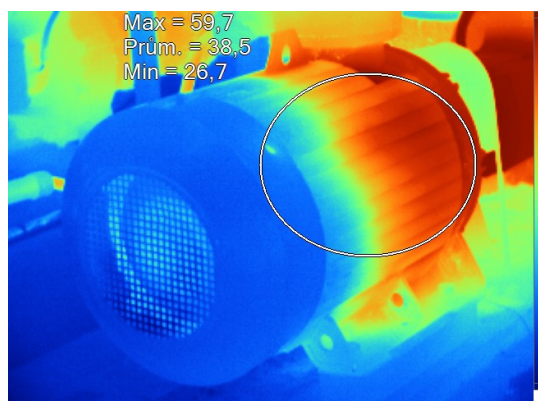
Tabulka 13 Teploty měřících bodů sestavy 8B

Měřící bod		Datum měření			
		11.12.2015	26.2.2016	16.11.2016	22.3.2017
Maximální teplota [°C]	Motor	46,8	48,9	43,8	59,7
	Měřící bod motoru L2	53,9	58,6	46,5	91
	Měřící bod čerpadla L3	51,1	53,2	58,8	82,8
	Měřící bod čerpadla L4	81,1	81,2	88	116
	Ucpávka	82,8	86,3	94,4	149,3

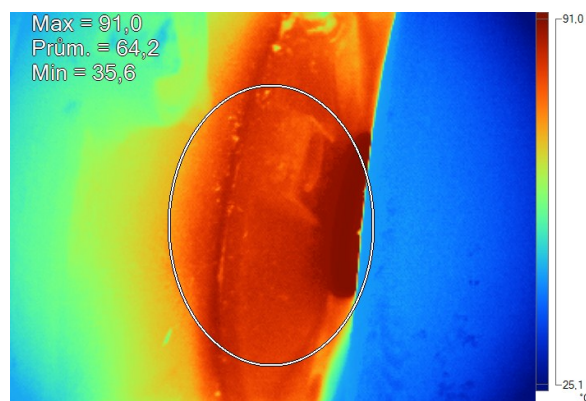


Obr. 80 Trend teplot měřících bodů

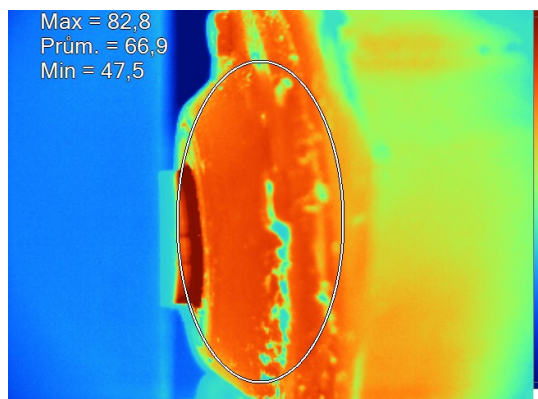
Poslední termografické snímky: 22.3.2017



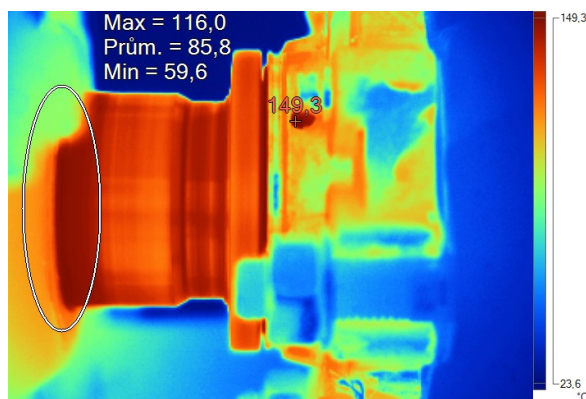
Obr. 81 Motor (8B)



Obr. 82 Měřící bod motoru L2 (8B)



Obr. 84 Měřící bod čerpadla L3 (8B)



Obr. 83 Ucpávka a L4 (8B)

#### 4.1.6 Sestava 9B

- Výkon 5,5 kW
- Otáčky 2870 min<sup>-1</sup>

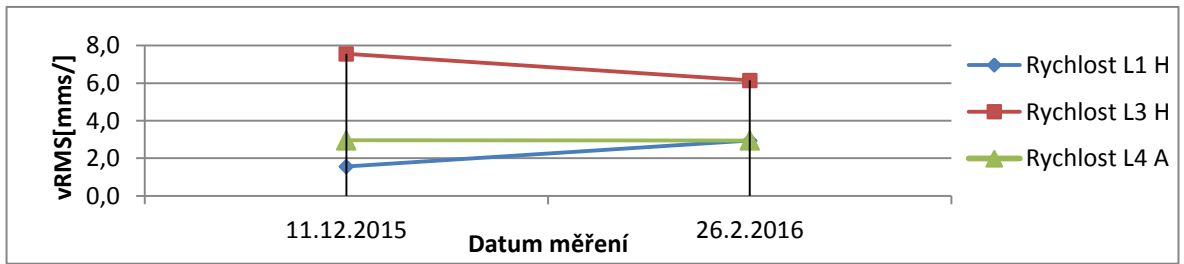


Obr. 85 Čerpadlo 9B [Autor]

Tabulka 14 Změřené hodnoty vibrací sestavy 9B

Datum měření		11.12.2015				26.2.2016			
Popis		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo	
Měřící místo		L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr								
Max. ot/min		2870		2870		2870		2870	
v <sub>RMS</sub> [mm/s]	V	1,91	2,11	2,09	1,68	1,46	1,57	2,12	1,79
	H	9,32	5,59	1,66	1,03	3,79	3,66	2,51	1,55
	A	0,19	0,91	1,02	0,93	0,21	0,71	1,19	1,29
a <sub>RMS</sub> [g] 500 – 25600 Hz	V	0,30	0,26	0,72	0,72	0,29	0,29	0,49	0,44
	H	0,34	0,34	0,89	0,74	0,32	0,42	0,39	0,41
	A	0,19	0,51	0,86	0,68	0,32	0,37	0,41	0,84
Pozn.		se zátěží, uvolněné čepy spojky				se zátěží, opraveno			

Pravděpodobné uvolnění stroje.

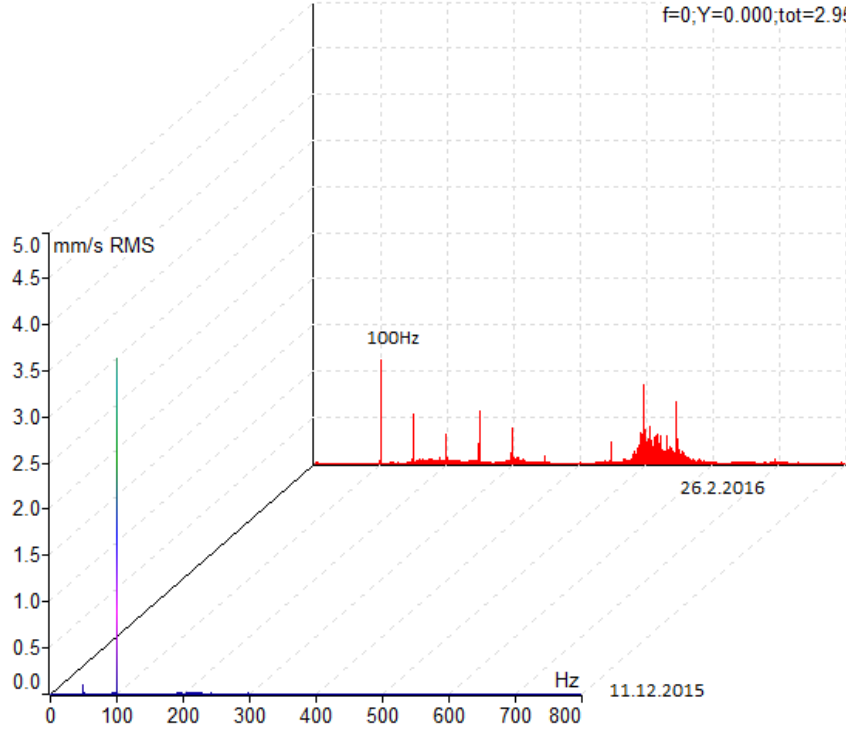


Obr. 86 Trend vysokých hodnot

12 spec ch:3 R:2-800Hz L:3200 T:4s

1/1;-Hz

f=0;Y=0.000;tot=2.95

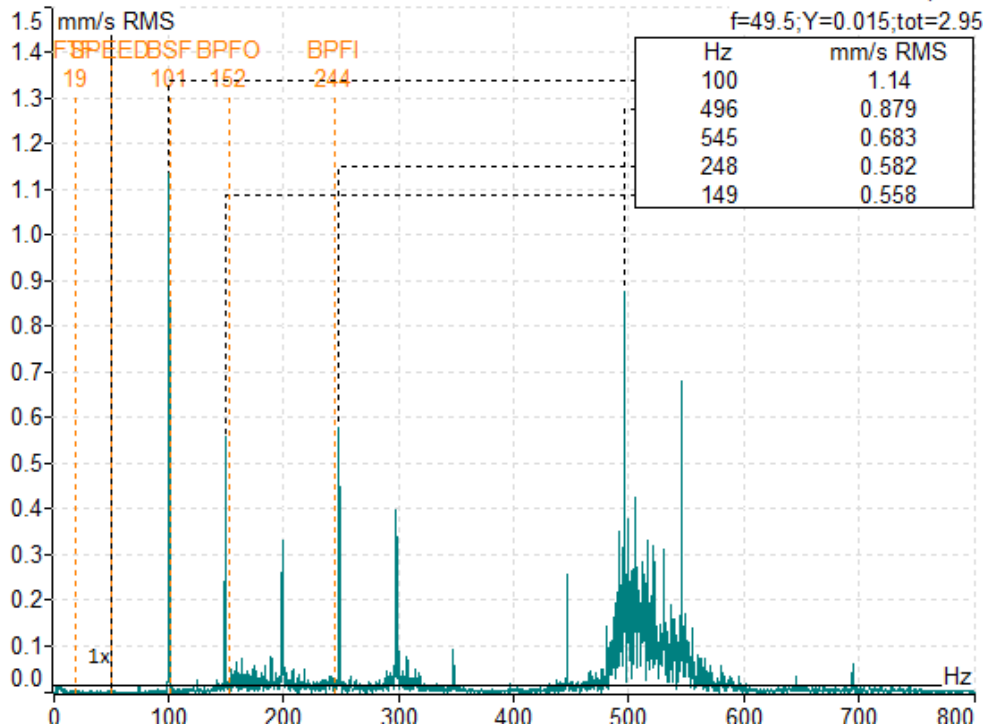


Obr. 87 Trend rychlosti měřícího bodu L1 v horizontálním směru (9B)

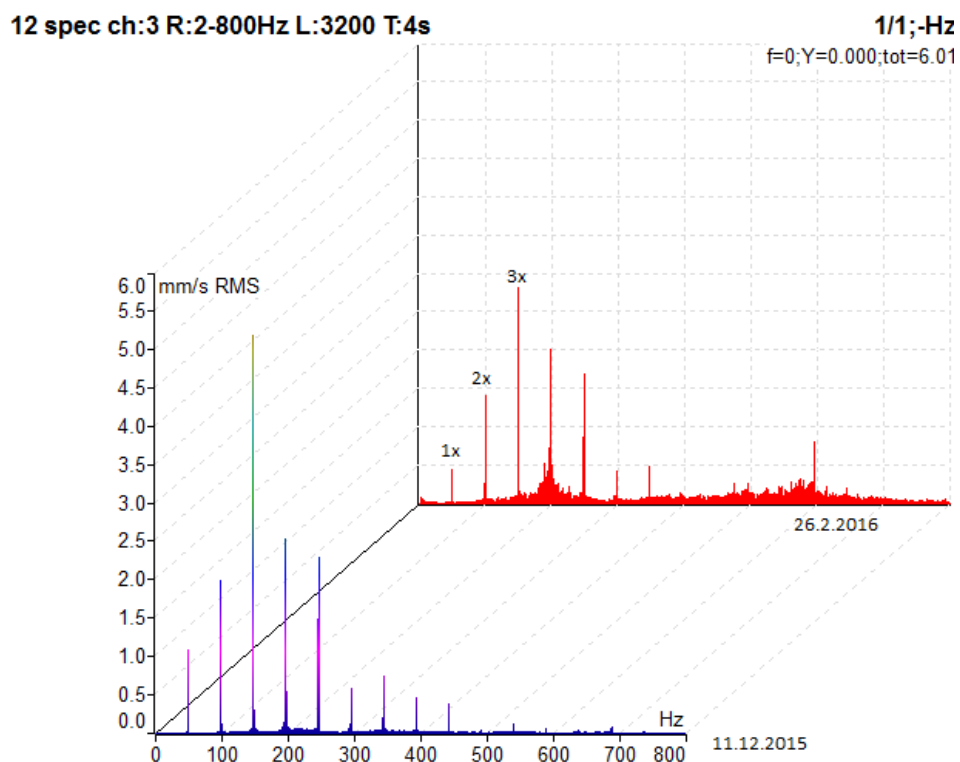
12 spec ch:3 R:2-800Hz L:3200 T:4s

1/1;-Hz

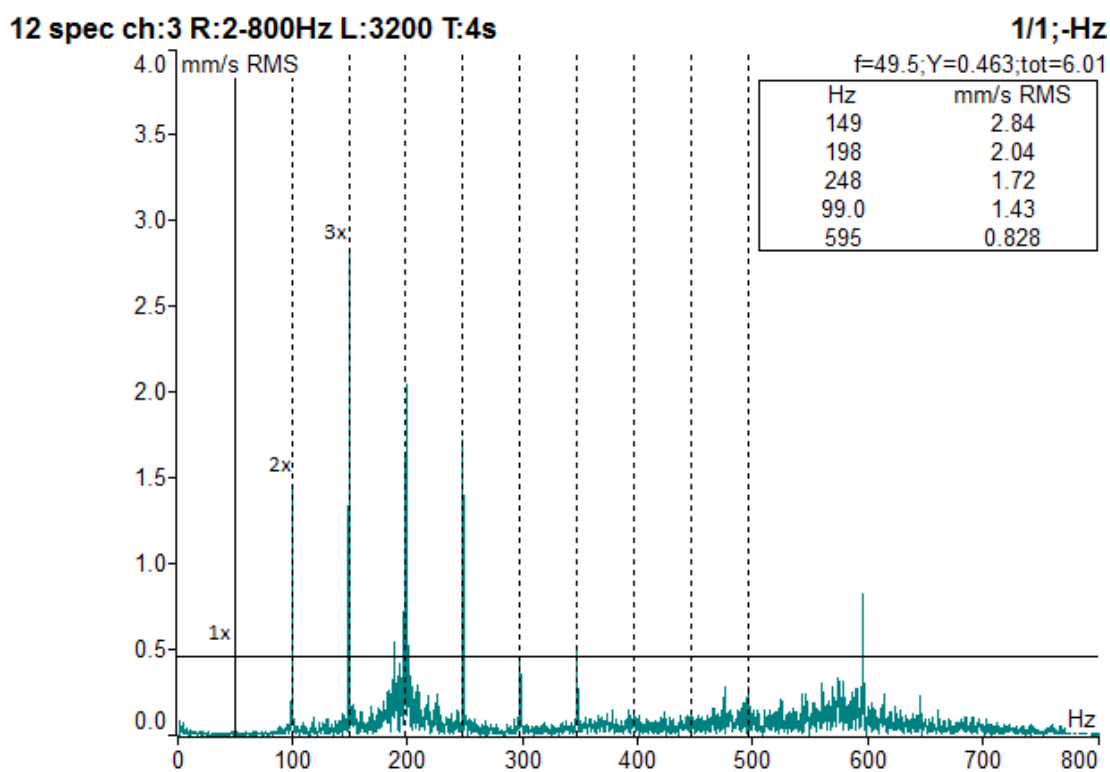
f=49.5;Y=0.015;tot=2.95



Obr. 88 Spektrum rychlosti vibrační měřícího bodu L1 v horizontálním směru s poruchovými frekvencemi 26.2.0016 (9B)



Obr. 89 Trend rychlosti měřícího bodu L3 v horizontálním směru (9B)



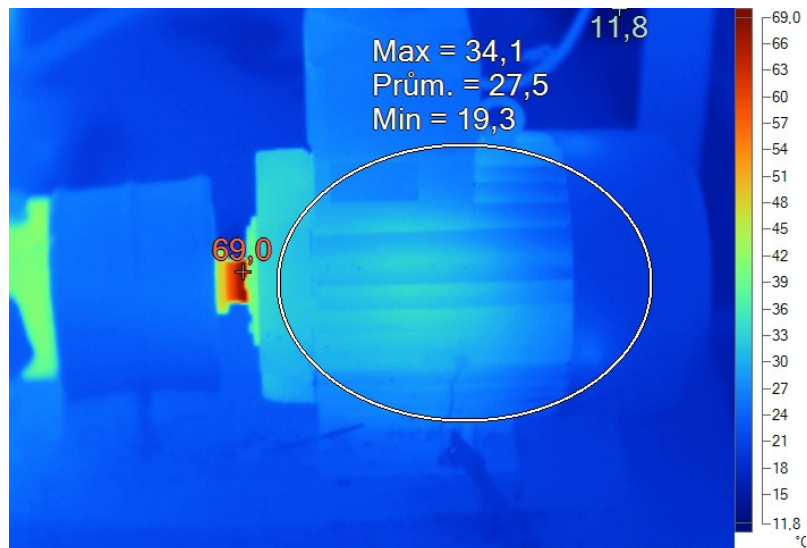
Obr. 90 Spektrum rychlosti vibrací měřícího bodu L1 v horizontálním směru 26.2.2016 (9B)



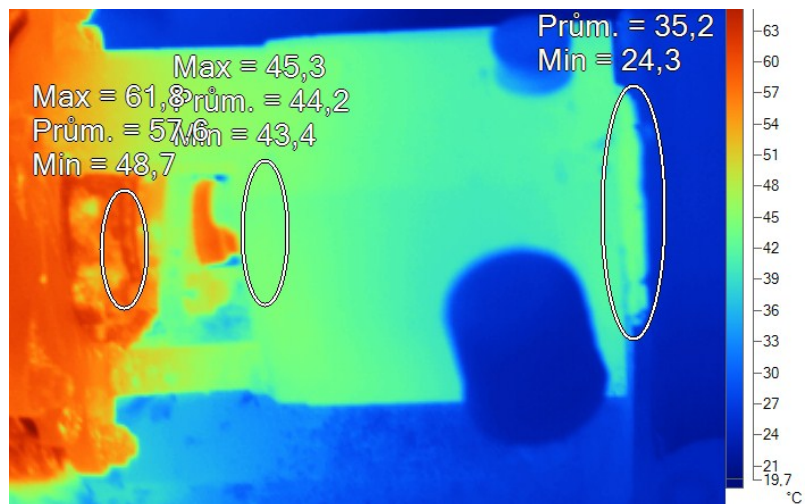
Tabulka 15 Teploty měřících bodů sestavy 9B

Měřící bod		Datum měření
		11.12.2015
Maximální teplota [°C]	Motor	34,1
	Měřící bod motoru L2	69
	Měřící bod čerpadla L3	43,9
	Měřící bod čerpadla L4	45,3
	Ucpávka	61,8

Poslední termografické snímky: 11.12.2015



Obr. 91 Motor a měřící bod L2 (9B)

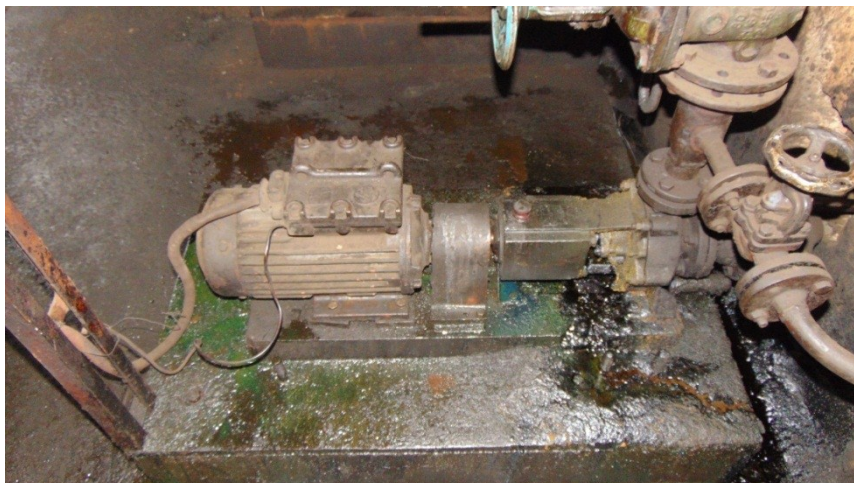


Obr. 92 Měřící bod čerpadla L3, L4, ucpávka (9B)

## 4.2 Předčištění čpavkové vody (fenolka)

### 4.2.1 Sestava 48A

- Výkon 4kW
- Otáčky 2870 min<sup>-1</sup>

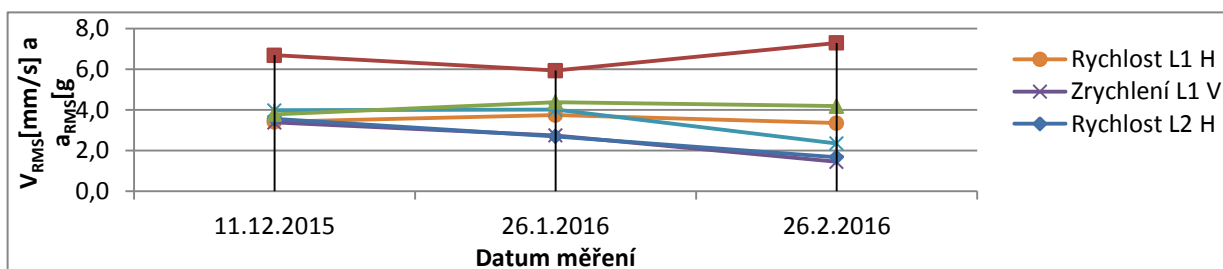


Obr. 93 Čerpadlo 48A [25]

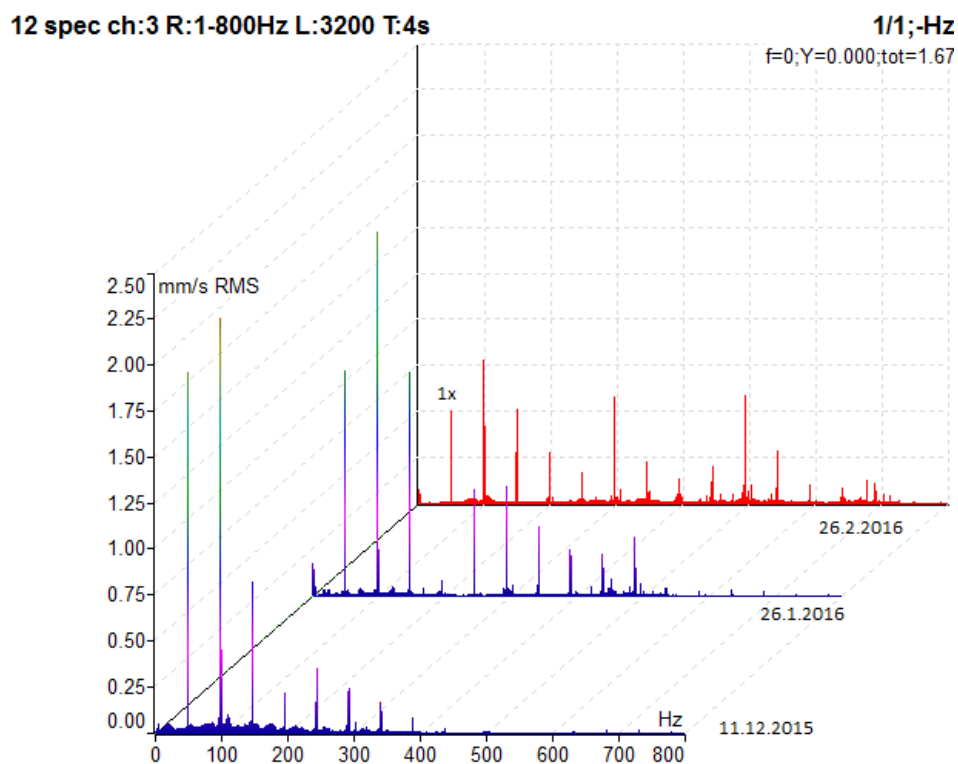
Tabulka 16 Změřené hodnoty vibrací sestavy 48A

Datum měření		11.12.2015				26.1.2016				26.2.2016			
Popis		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo	
Měřící místo		L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr												
Max. ot/min		2870		2870		2870		2870		2870		2870	
V <sub>RMS</sub> [mm/s]	V	2,61	3,21	4,73	3,32	2,82	2,29	4,81	3,03	2,69	3,20	4,93	3,25
	H	3,41	3,56	6,69	3,78	3,74	2,69	5,93	4,38	3,35	1,67	7,29	4,18
	A	0,92	1,63	3,98	3,05	0,45	2,15	4,01	2,09	0,87	3,34	2,35	3,31
a <sub>RMS</sub> [g] 500 – 25600 Hz	V	1,46	3,38	1,75	1,94	2,10	2,74	1,67	1,48	1,38	1,44	1,61	1,21
	H	1,18	2,79	1,79	1,97	1,51	2,25	1,76	2,06	1,44	1,17	1,71	1,97
	A	1,08	1,76	2,01	1,7	0,65	1,92	1,35	1,58	0,65	1,68	1,42	1,56
Pozn.		se zátěží				se zátěží, dotažená patka				se zátěží			

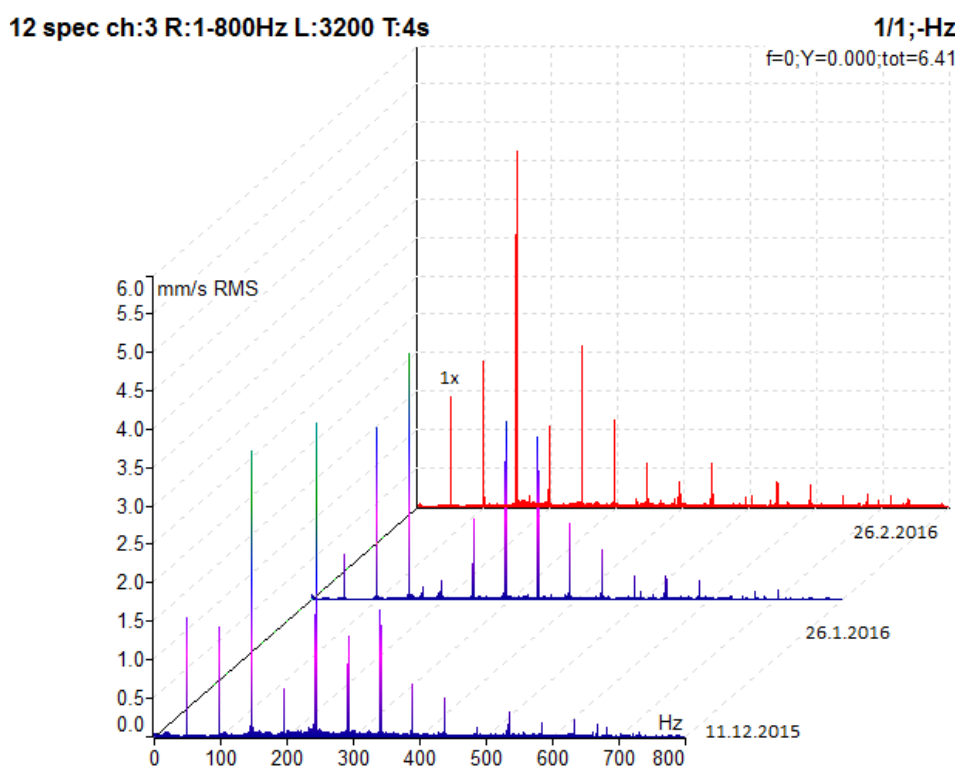
Nesymetrie elektromagnetického pole motoru, uvolněný stroj.



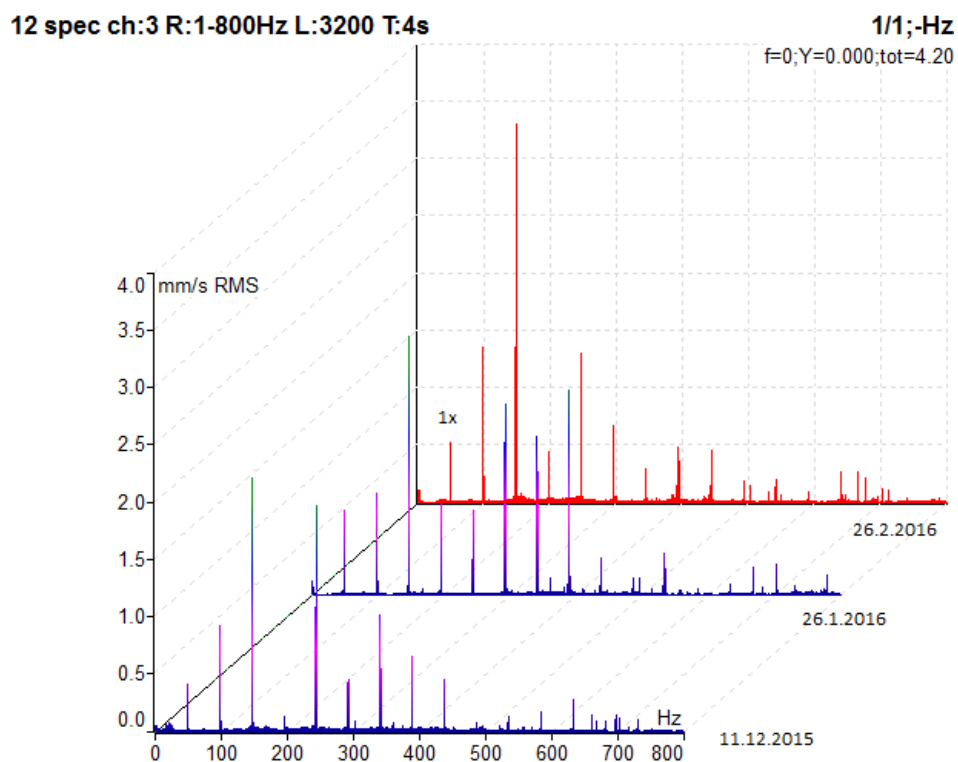
Obr. 94 Trend vysokých hodnot



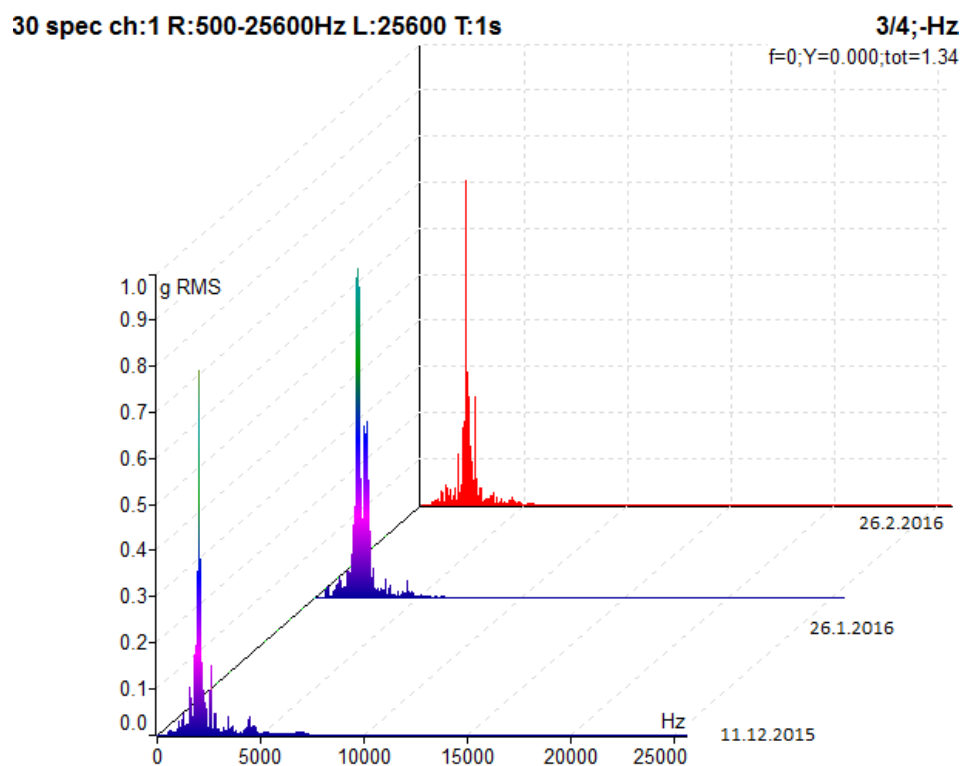
Obr. 95 Trend rychlosti vibrací měřícího bodu L1 v horizontálním směru (48A)



Obr. 96 Trend rychlosti vibrací měřícího bodu L3 v horizontálním směru (48A)



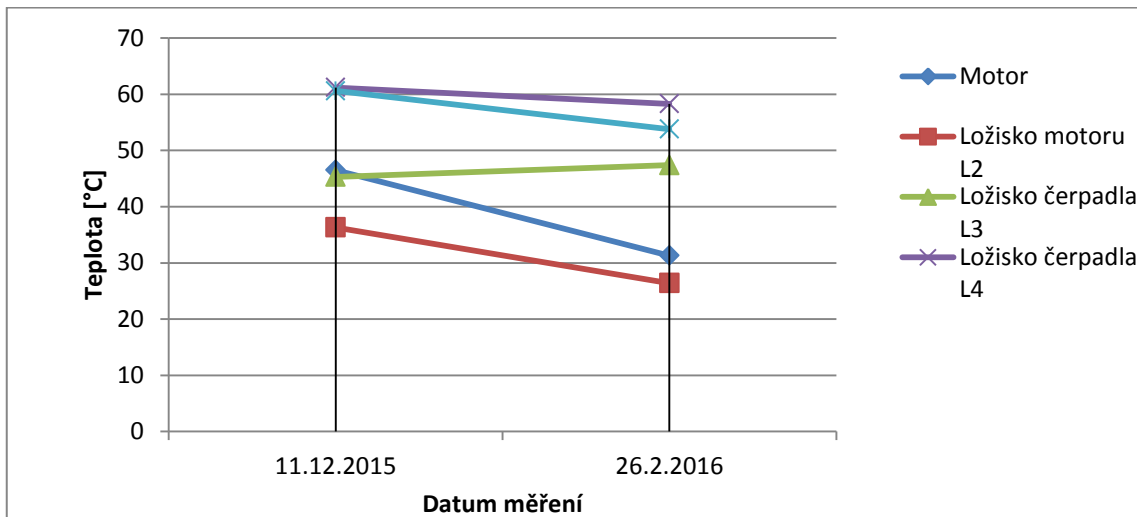
Obr. 97 Trend rychlosti vibrací měřícího bodu L4 v horizontálním směru (48A)



Obr. 98 Trend spektra zrychlení vibrací měřícího bodu L1 ve vertikálním směru (48A)

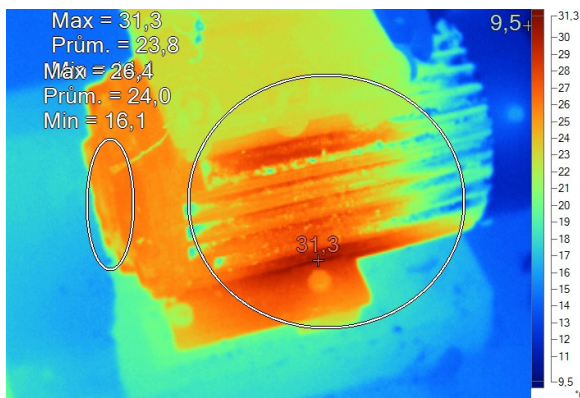
Tabulka 17 Teploty měřících bodů sestavy 48A

Měřící bod		Datum měření	
		11.12.2015	26.2.2016
Maximální teplota [°C]	Motor	46,5	31,3
	Měřící bod motoru L2	36,3	26,4
	Měřící bod čerpadla L3	45,3	47,4
	Měřící bod čerpadla L4	61,2	58,3
	Ucpávka	60,6	53,8

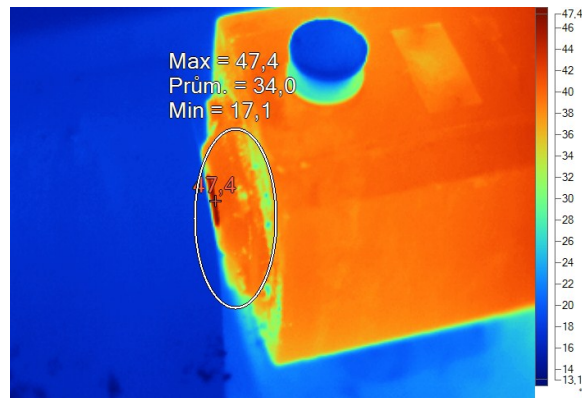


Obr. 99 Trend teplot měřících bodů

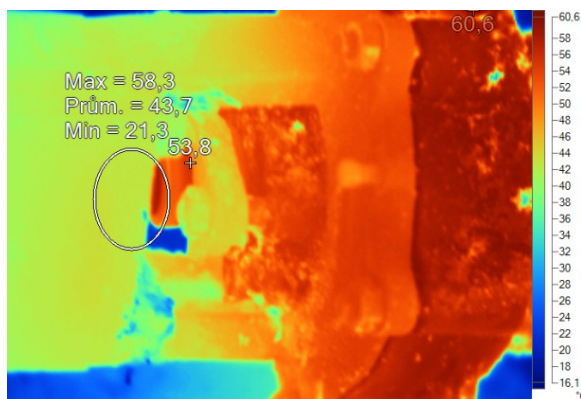
Poslední termografické snímky: 26.2.2016



Obr. 101 Motor a měřící bod L2 (48A)



Obr. 100 Měřící bod čerpadla L3 (48A)

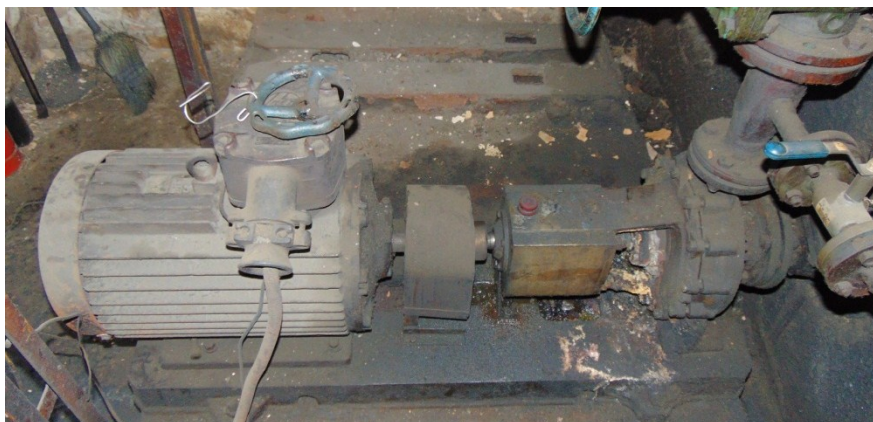


Obr. 102 Ucpávka a L4 (24B)



## 4.2.2 Sestava 49B

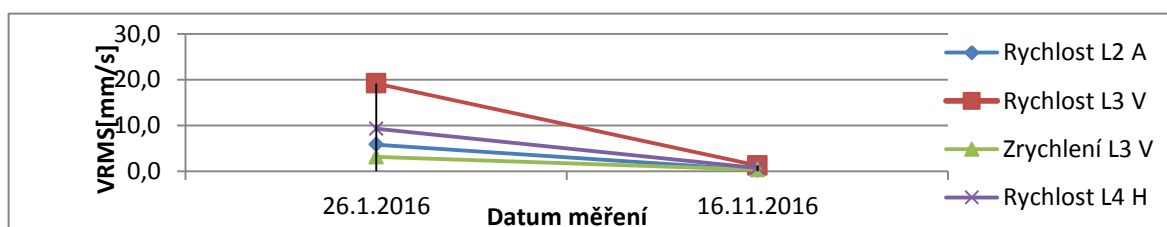
- Výkon 18,5 kW
- Otáčky 1470 min<sup>-1</sup>



Obr. 103 Čerpadlo 49B [Autor]

Tabulka 18 Změřené hodnoty vibrací sestavy 49B

Datum měření		26.1.2016				16.11.2016			
Popis		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo	
Měřicí místo		L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr								
Max. ot/min		1470		1470		1470		1470	
v <sub>RMS</sub> [mm/s]	V	3,75	4,13	19,2	13,8	0,26	0,55	1,25	1,18
	H	3,61	2,57	17,2	9,28	0,71	0,67	0,92	0,72
	A	0,96	5,83	9,37	7,25	0,26	0,68	0,59	0,65
a <sub>RMS</sub> [g] 500 – 25600 Hz	V	0,37	0,44	3,15	1,82	0,14	0,17	0,33	0,28
	H	0,44	0,42	2,32	2,19	0,14	0,09	0,31	0,30
	A	0,51	0,48	1,82	1,91	0,32	0,17	0,36	0,33
Pozn.		se zátěží, nesouosost				se zátěží, opraveno			

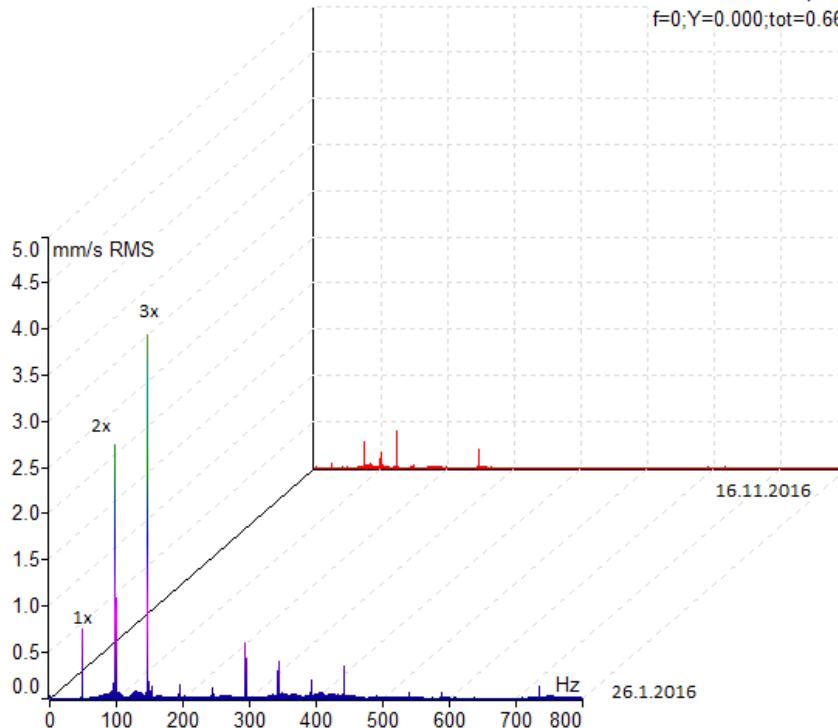


Obr. 104 Trend vysokých hodnot

13 spec ch:3 R:1-800Hz L:3200 T:4s

1/1;-Hz

f=0;Y=0.000;tot=0.666

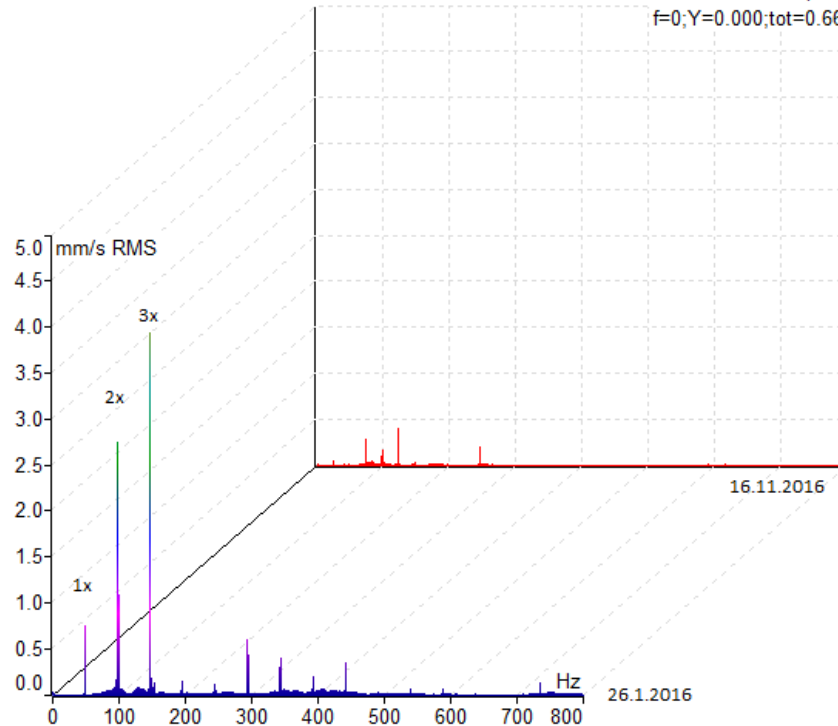


Obr. 105 Trend rychlosti vibrací měřícího bodu L2 v axiálním směru (49B)

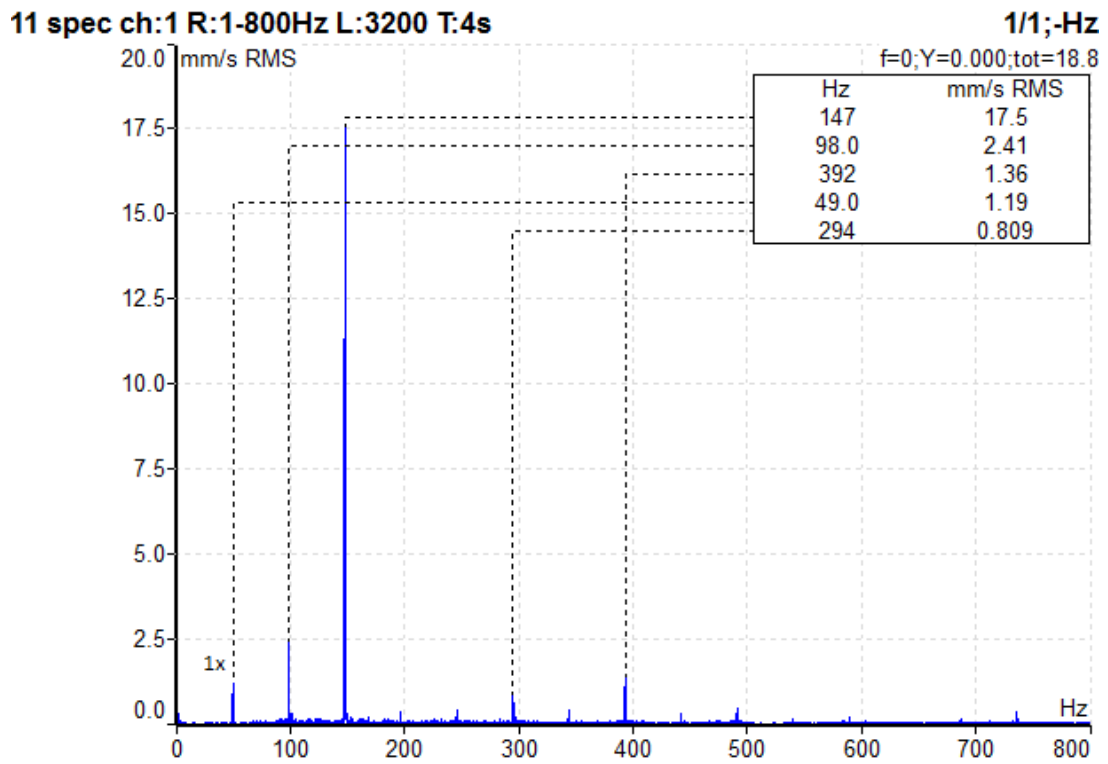
13 spec ch:3 R:1-800Hz L:3200 T:4s

1/1;-Hz

f=0;Y=0.000;tot=0.666



Obr. 106 Trend rychlosti vibrací měřícího bodu L3 v axiálním směru (49B)



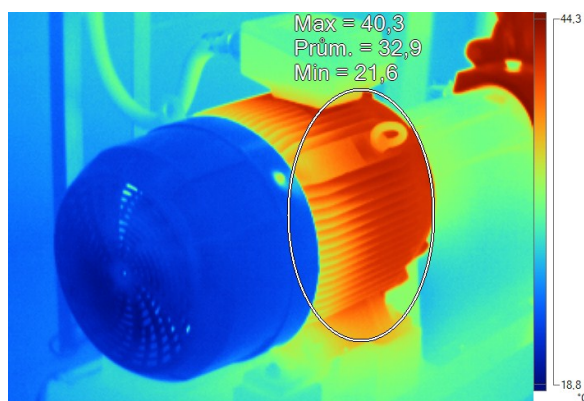
Obr. 107 Spektrum rychlosti vibrací měřícího bodu L3 ve vertikálním směru 26.1.2016) (49B)



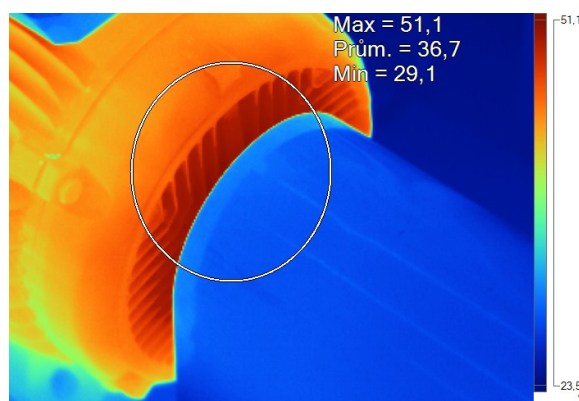
**Tabulka 19 Teploty měřících bodů sestavy 49B**

Měřící bod		Datum měření
		16.11.2016
Maximální teplota [°C]	Motor	40,3
	Měřící bod motoru L2	51,1
	Měřící bod čerpadla L3	47,8
	Měřící bod čerpadla L4	70,7
Ucpávka		101,8

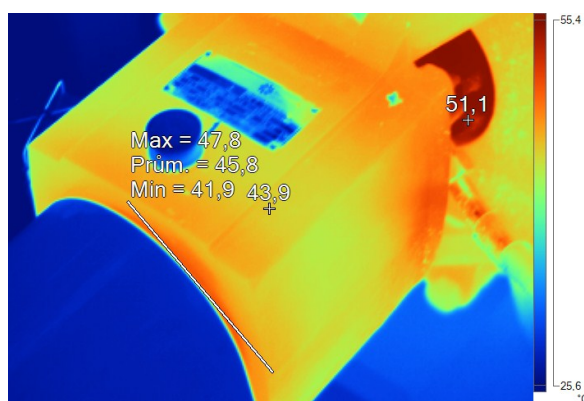
Poslední termografické snímky: 16.11.2016



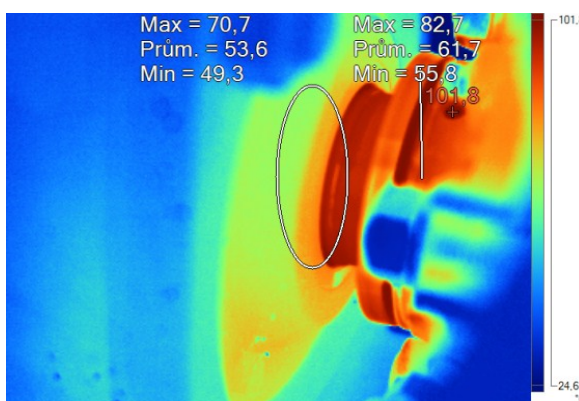
**Obr. 109 Motor (49B)**



**Obr. 108 Měřící bod motoru L2 (49B)**



**Obr. 110 Měřící bod čerpadla L3 (49B)**



**Obr. 111 Ucpávka a L4 (49B)**

### 4.2.3 Sestava 49D

- Výkon 22 kW
- Otáčky 2935 min<sup>-1</sup>

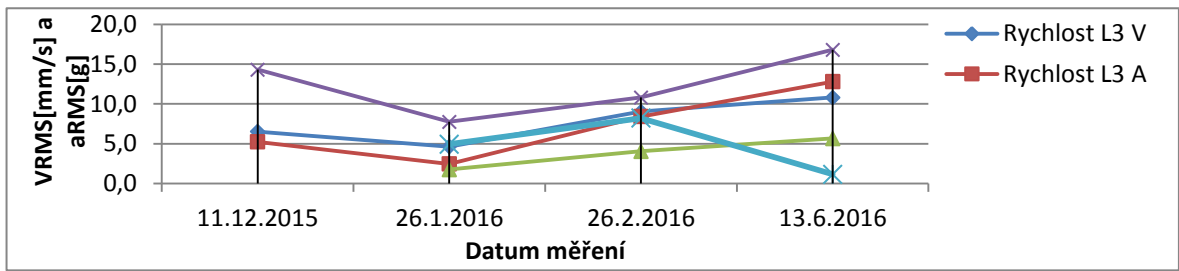


Obr. 112 Čerpadlo 49D [25]

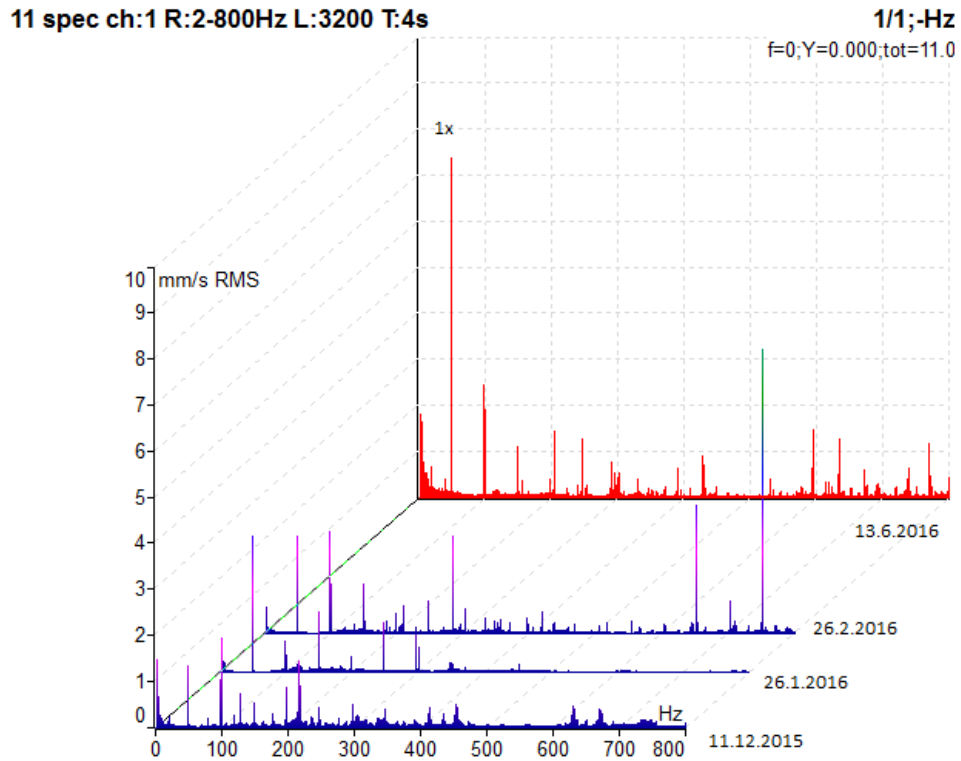
Tabulka 20 Změřené hodnoty vibrací sestavy 49D

Datum měření		11.12.2015				26.1.2016				26.2.2016			
Popis		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo	
Měřicí místo		L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr												
Max. ot/min		2935		2935		2935		2935		2935		2935	
V <sub>RMS</sub> [mm/s]	V	1,61	2,56	6,53		1,41	1,35	4,63	3,11	1,85	2,57	9,03	5,99
	H	1,85	2,95	10,9		1,32	1,58	4,25	2,85	2,71	5,06	11,4	6,52
	A	0,63	2,11	5,23		0,38		2,45	1,76	0,82	2,81	8,41	4,05
a <sub>RMS</sub> [g] 500 – 25600 Hz	V	2,95	1,92	11,9		0,78	1,46	7,41	4,89	1,04	2,58	9,35	8,70
	H	1,01	1,45	14,3		0,88	1,02	7,75	7,25	1,2	1,44	10,8	10,7
	A	1,38	4,29	10,5		0,63		5,08	4,93	0,98	3,15	7,33	8,22
Pozn.		se zátěží				se zátěží				se zátěží, poškozená ložiska			
Datum měření		13.6.2016											
Popis		motor		čerpadlo									
Měřicí místo		L1	L2	L3	L4								
Veličina	Směr												
Max. ot/min		2935		2935									
V <sub>RMS</sub> [mm/s]	V	1,48	1,97	10,8	5,23								
	H	2,22	2,42	9,38	5,16								
	A	0,59	2,32	12,8	5,66								
a <sub>RMS</sub> [g] 500 – 25600 Hz	V	1,25	1,16	15,4	6,58								
	H	1,22	1,41	16,8	7,76								
	A	1,16	1,63	1,70	1,14								
Pozn.		se zátěží, nesouosost											

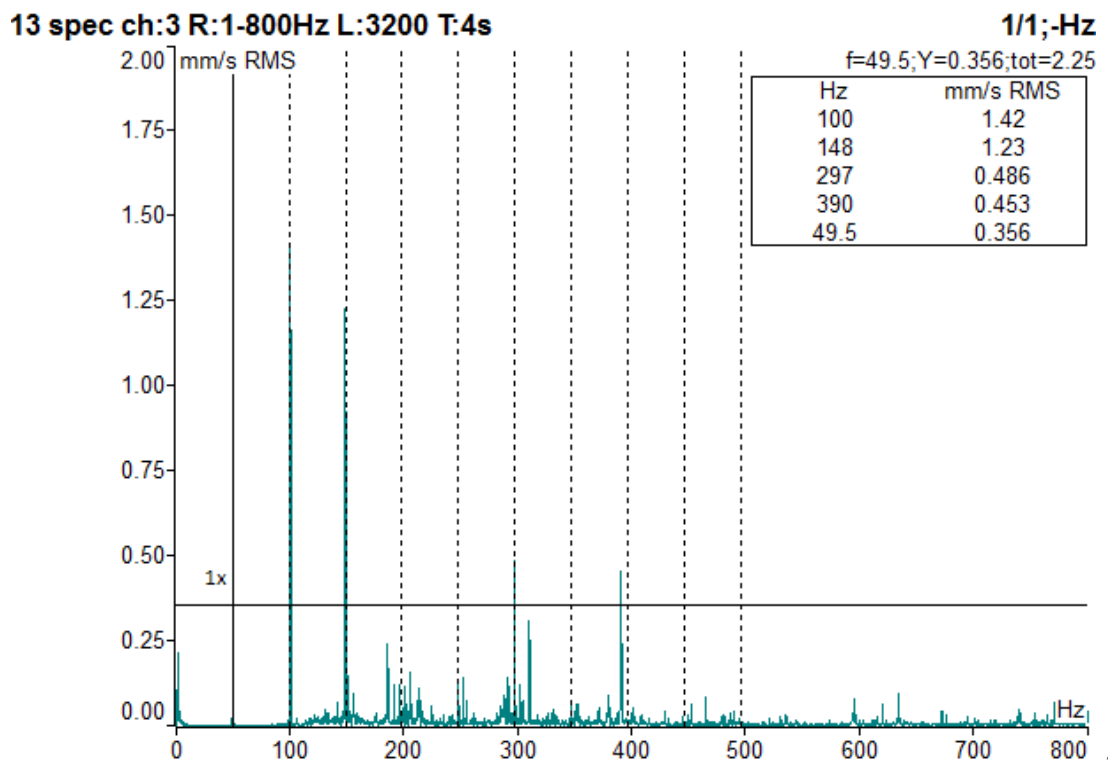
Stroj byl nevhodě mazán, poškození ložisek.



Obr. 113 Trend vysokých hodnot



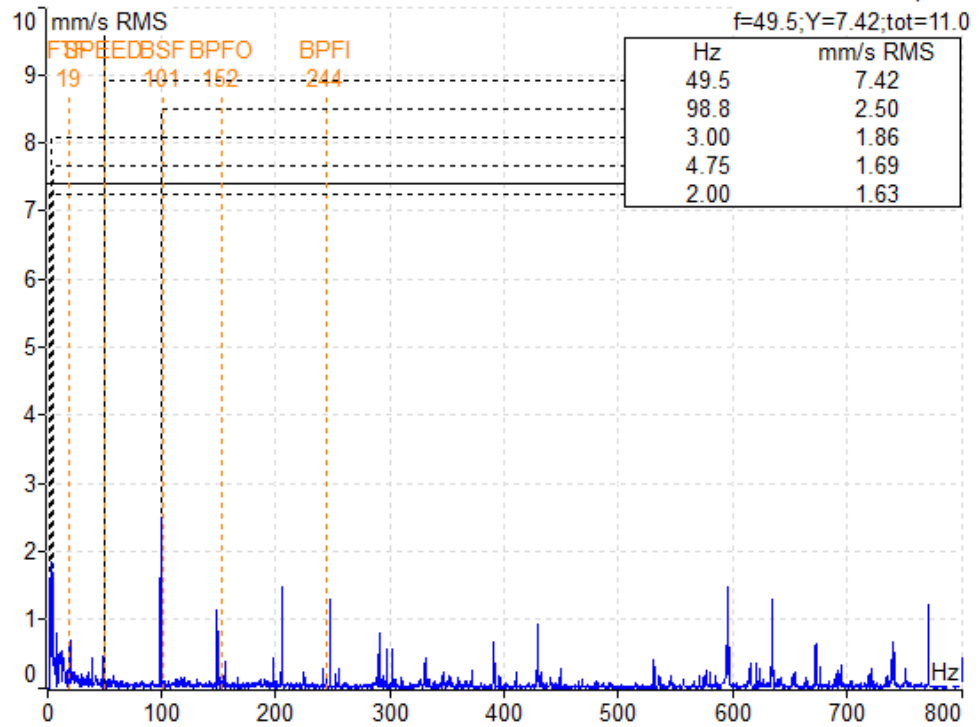
Obr. 114 Trend rychlosti vibrací měřícího bodu L3 ve vertikálním směru (49D)



Obr. 115 Spektrum rychlosti vibrací měřícího bodu L3 v axiálním směru (49D)

11 spec ch:1 R:2-800Hz L:3200 T:4s

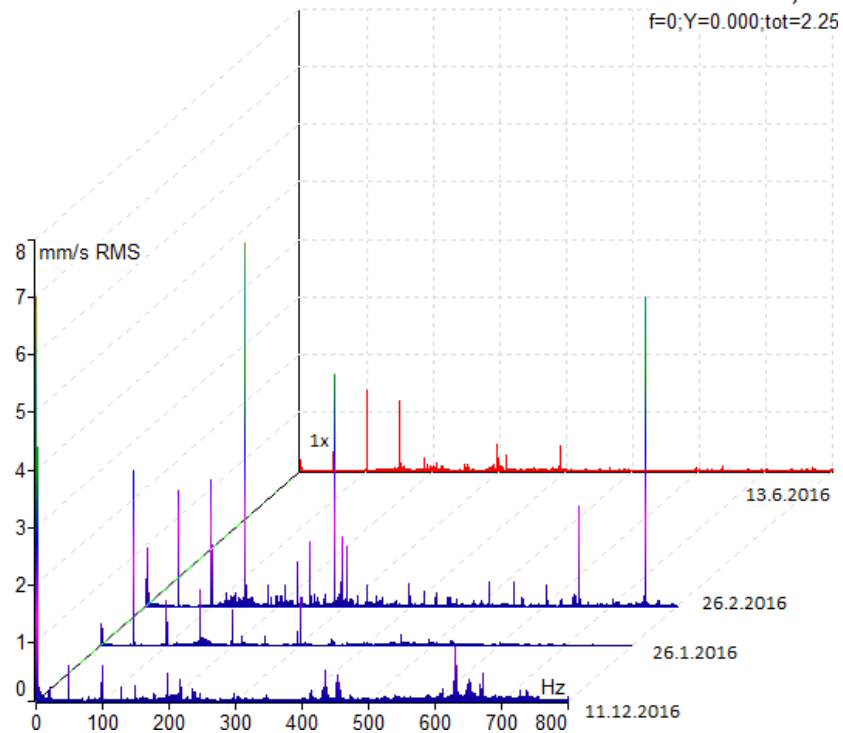
1/1;-Hz



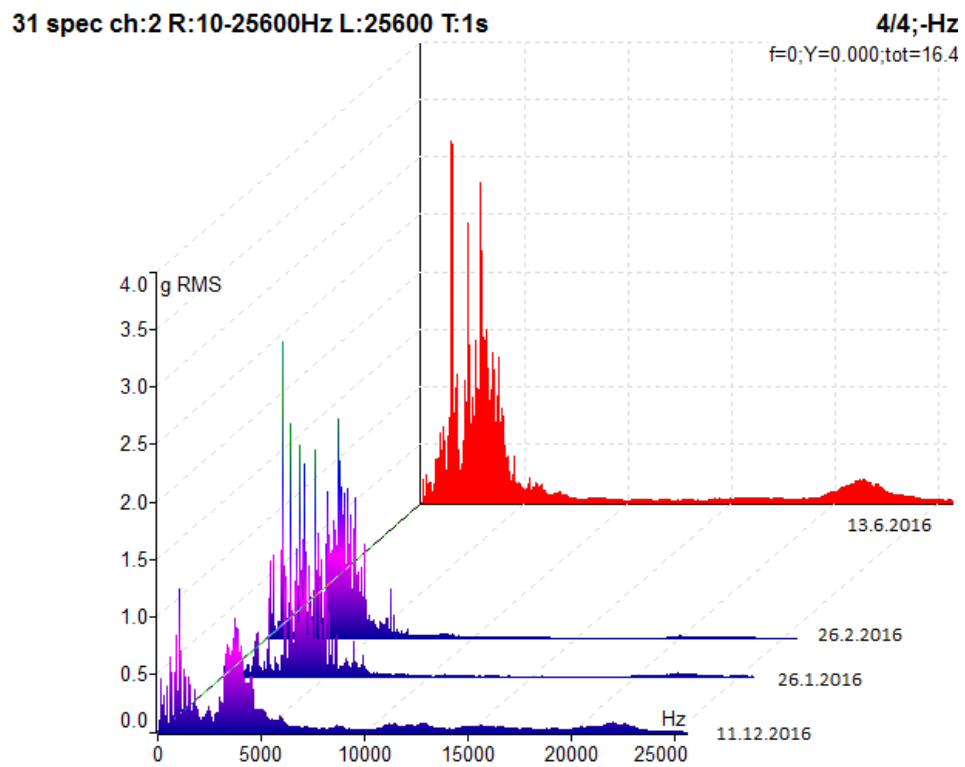
Obr. 116 Spektrum rychlosti vibrací měřícího bodu L3 ve vertikálním směru s vyznačenými poruchovými frekvencemi (49D)

13 spec ch:3 R:1-800Hz L:3200 T:4s

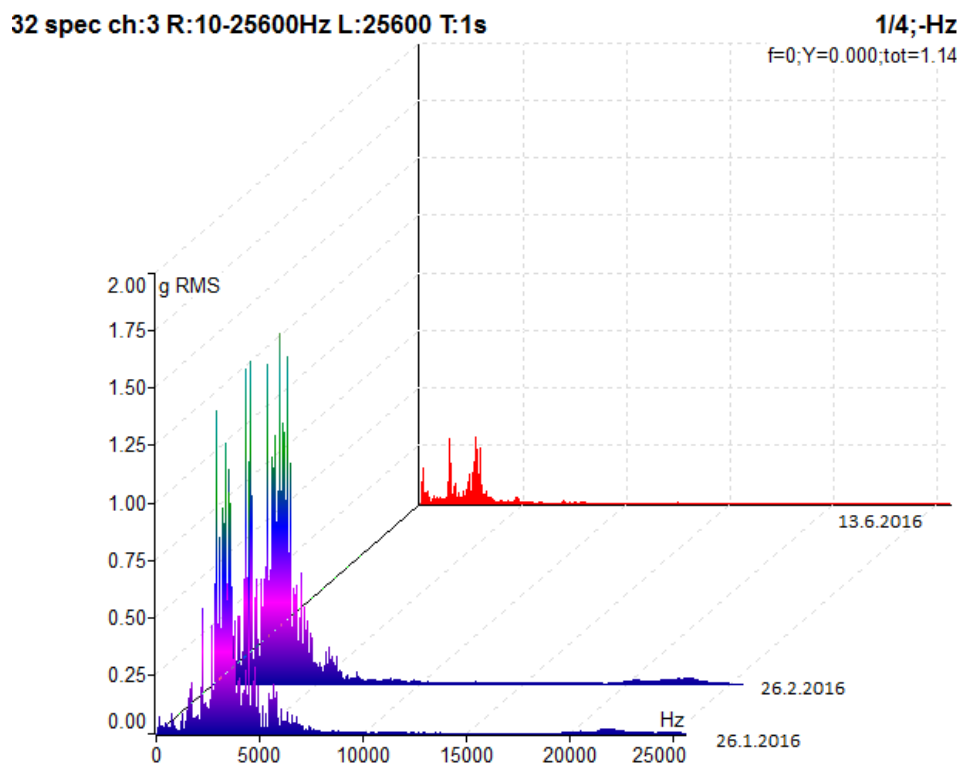
1/1;-Hz



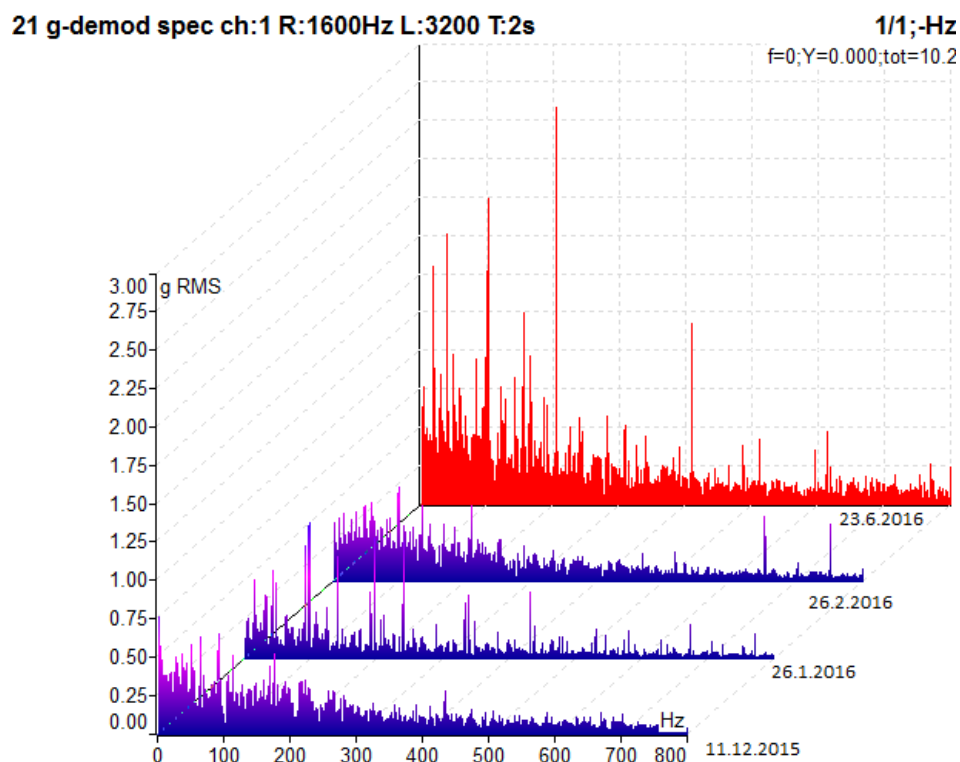
Obr. 118 Trend rychlosti vibrací měřícího bodu L3 v axiálním směru (49D)



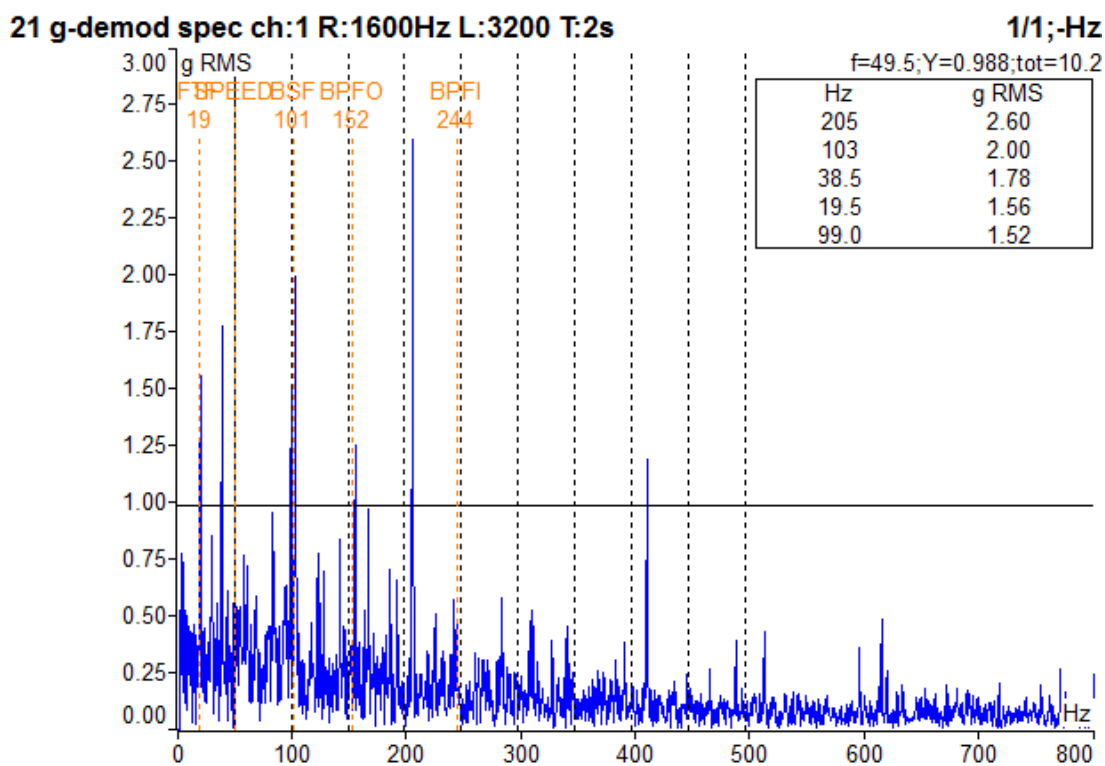
**Obr. 120 Trend zrychlení vibrací měřícího bodu L3 v horizontálním směru (49D)**



**Obr. 121 Trend rychlosti vibrací měřícího bodu L4 v axiálním směru (49D)**



Obr. 122 Trend obálky zrychlení vibrací měřícího bodu L3 ve vertikálním směru (49D)

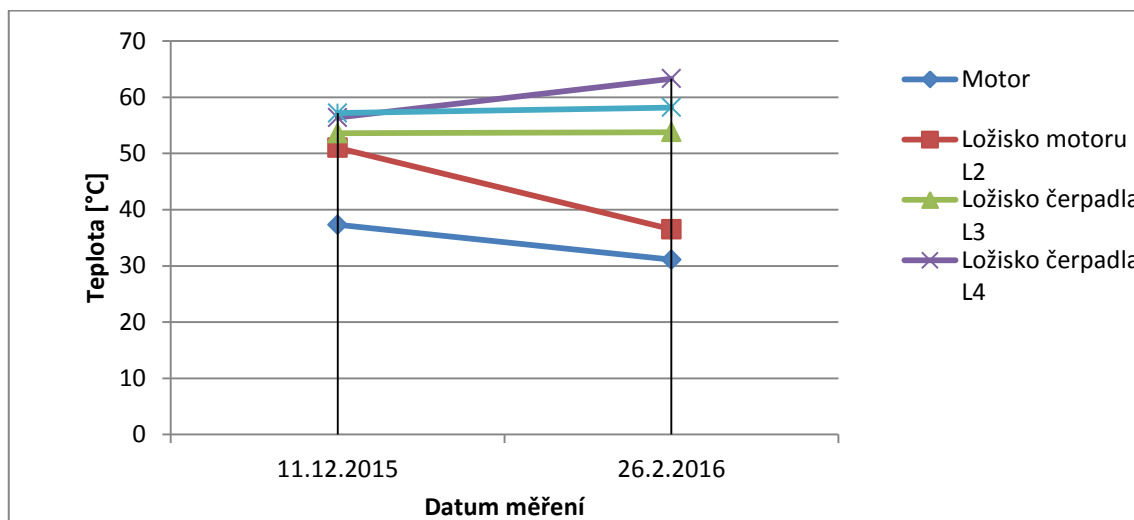


Obr. 123 Spektrum obálky zrychlení měřícího bodu L3 13.6.2016 (49D)



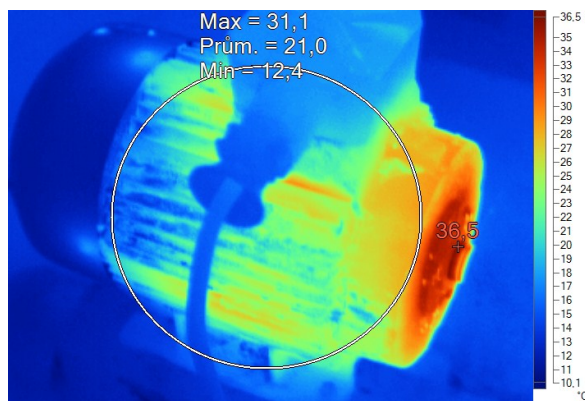
Tabulka 21 Teploty měřících bodů sestavy 49D

Měřící bod		Datum měření	
		11.12.2015	26.2.2016
Maximální teplota [°C]	Motor	37,3	31,1
	Měřící bod motoru L2	51	36,5
	Měřící bod čerpadla L3	53,6	53,8
	Měřící bod čerpadla L4	56,4	63,3
	Ucpávka	57,2	58,2

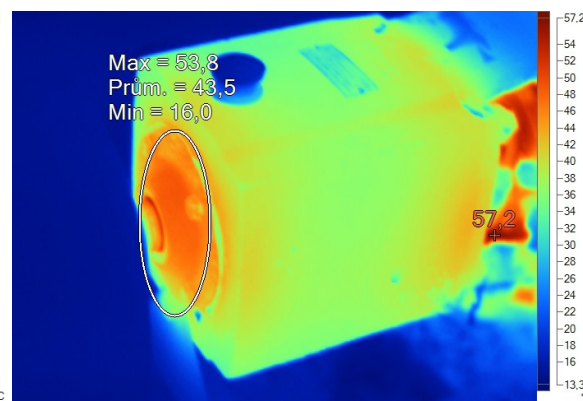


Obr. 124 Trend teplot měřících bodů

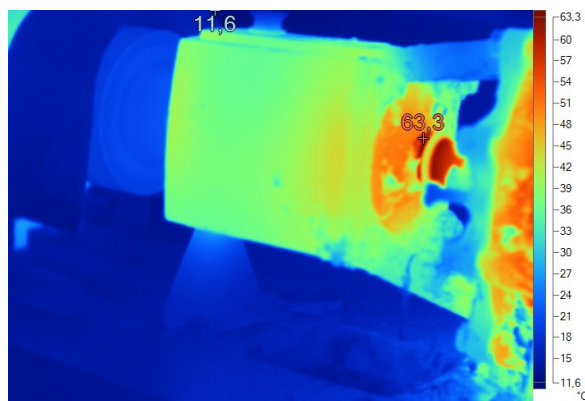
Poslední termografické snímky: 26.2.2016



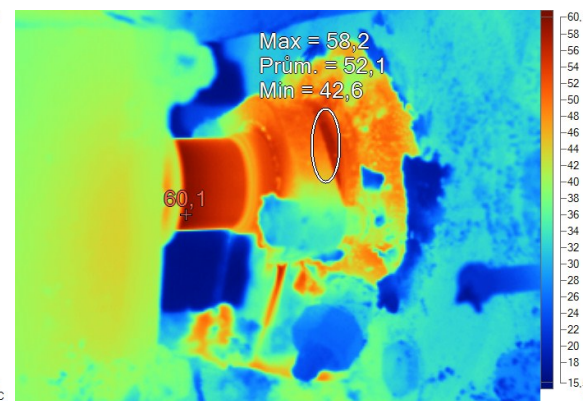
Obr. 126 Motor a měřící bod L2 (49D)



Obr. 125 Měřící bod čerpadla L3 (49D)



Obr. 128 Měřící bod čerpadla L4 (49D)



Obr. 127 Ucpávka a L4 (49D)

## 4.3 Benzolka

### 4.3.1 Sestava 6a

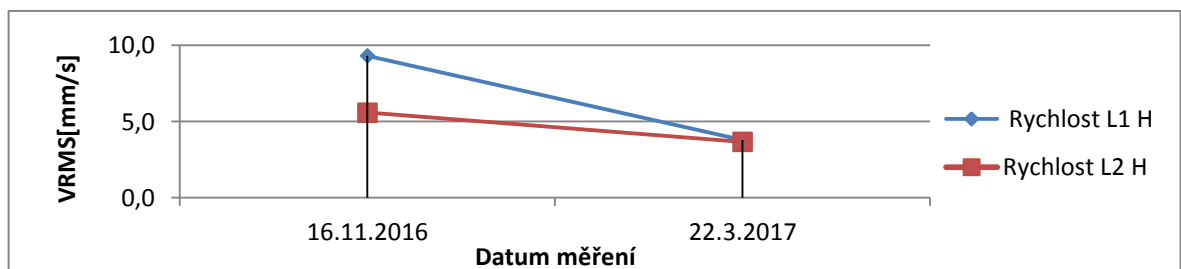
- Výkon 30 kW
- Otáčky 2950 min<sup>-1</sup>



Obr. 129 Čerpadlo 6a [Autor]

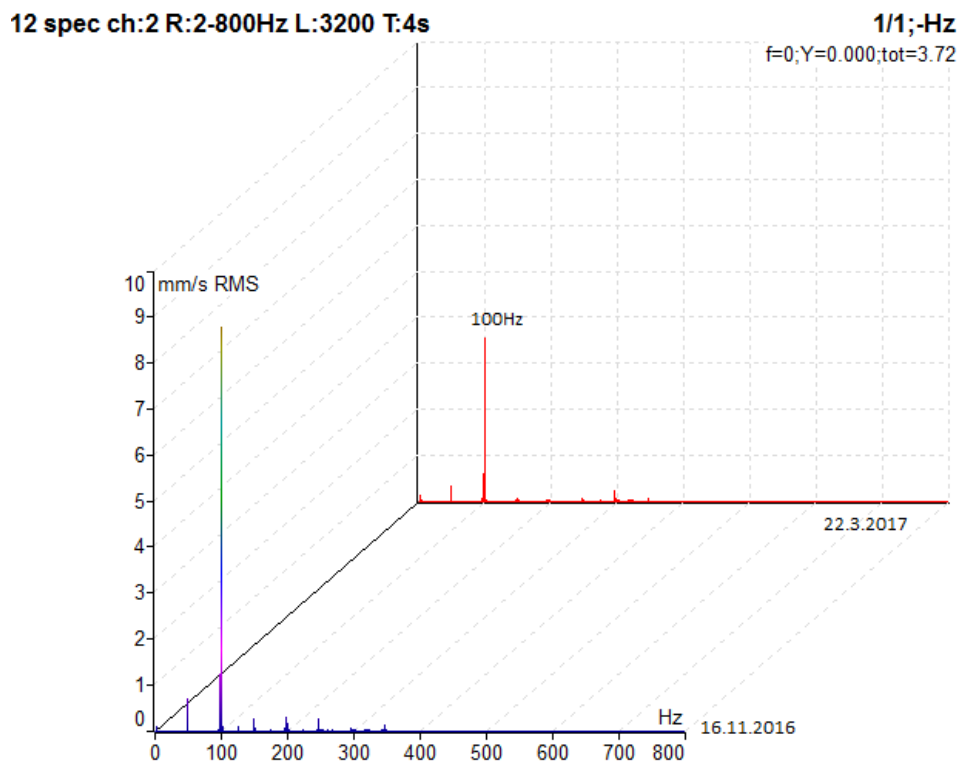
Tabulka 22 Změřené hodnoty vibrací sestavy 6a

Datum měření		16.11.2016				22.3.2017			
Popis		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo	
Měřící místo		L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr								
Max. ot/min		2950		2950		2950		2950	
v <sub>RMS</sub> [mm/s]	V	1,91	2,11	2,09	1,68	1,46	1,57	2,12	1,79
	H	9,32	5,59	1,66	1,03	3,79	3,66	2,51	1,55
	A	0,19	0,91	1,02	0,93	0,21	0,71	1,19	1,29
a <sub>RMS</sub> [g] 500 – 25600 Hz	V	0,30	0,26	0,72	0,72	0,29	0,29	0,49	0,44
	H	0,34	0,34	0,89	0,74	0,32	0,42	0,39	0,41
	A	0,19	0,51	0,86	0,68	0,32	0,37	0,41	0,84
Pozn.		se zátěží, elektromagnetický problém motoru				se zátěží, opraveno			

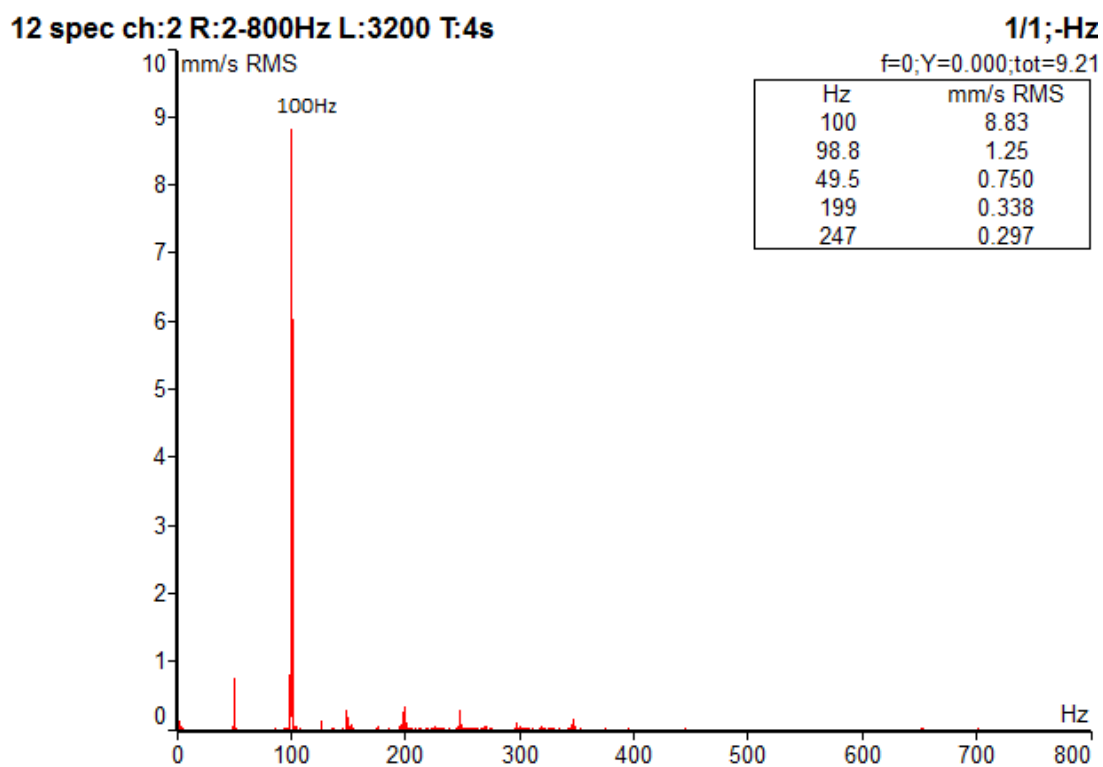


Obr. 130 Trend vysokých hodnot





Obr. 131 Trend rychlosti vibrací měřícího bodu L1 v horizontálním směru (6a)

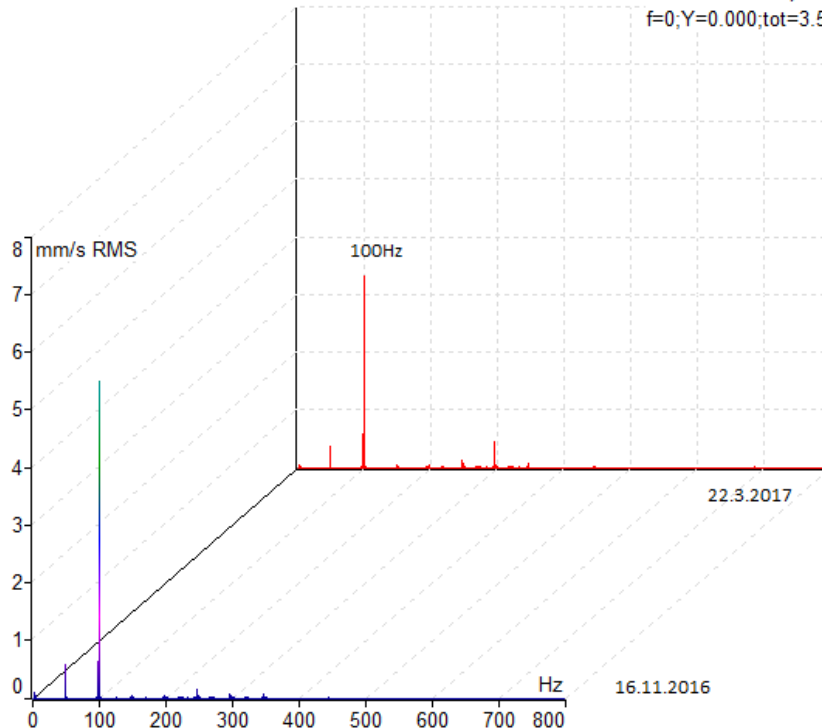


Obr. 132 Spektrum rychlosti vibrací měřícího bodu L1 v horizontálním směru 22.3.2017 (6a)

12 spec ch:2 R:2-800Hz L:3200 T:4s

1/1;-Hz

f=0;Y=0.000;tot=3.57

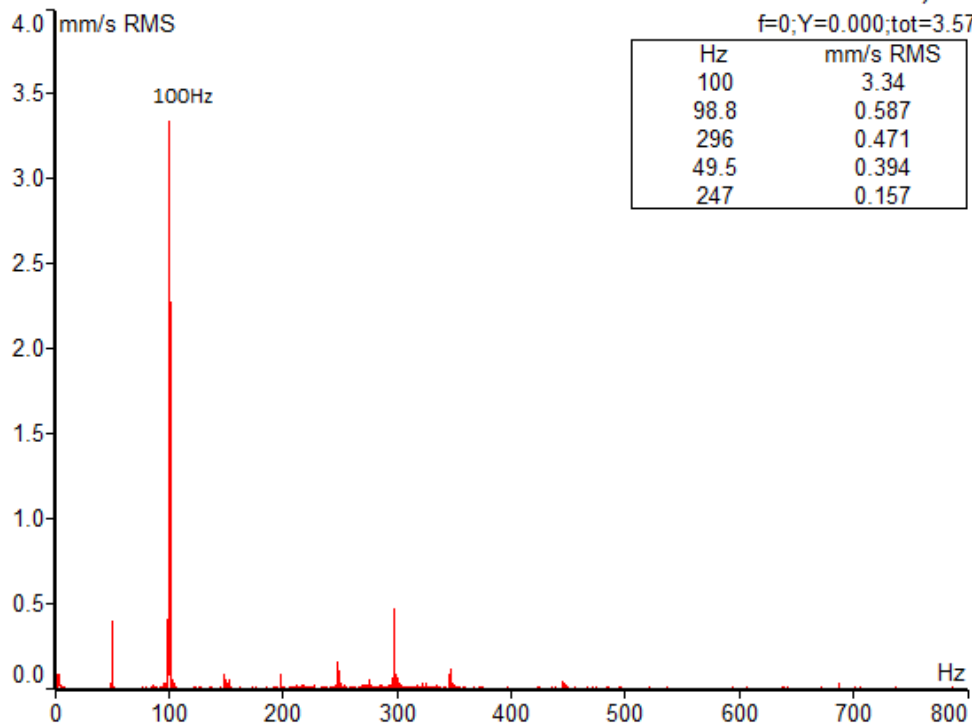


Obr. 133 Trend rychlosti vibrací měřícího bodu L2 v horizontálním směru (6a)

12 spec ch:2 R:2-800Hz L:3200 T:4s

1/1;-Hz

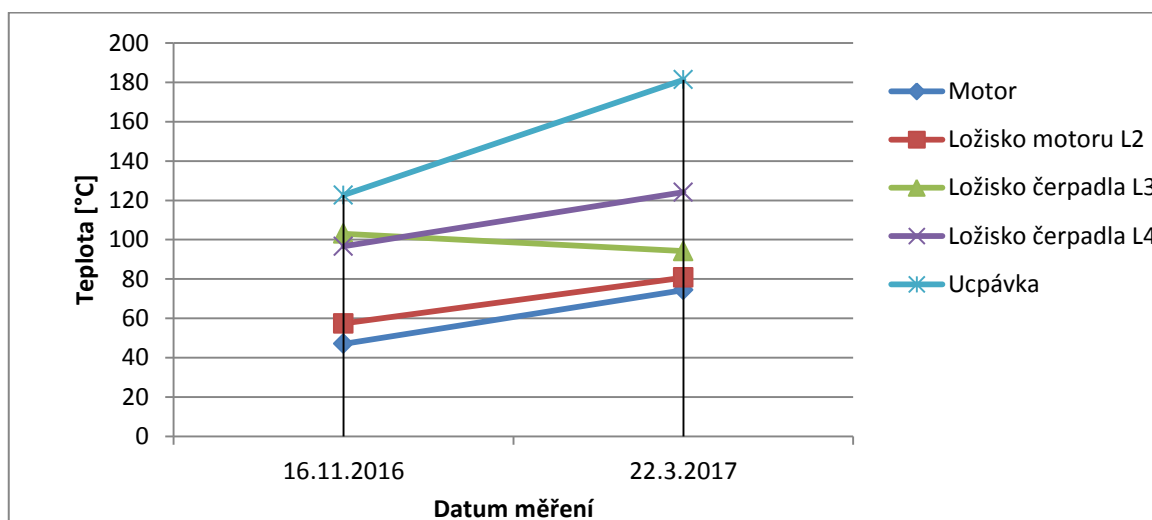
f=0;Y=0.000;tot=3.57



Obr. 134 Spektrum rychlosti vibrací měřícího bodu L2 v horizontálním směru 22.3.2017 (6a)

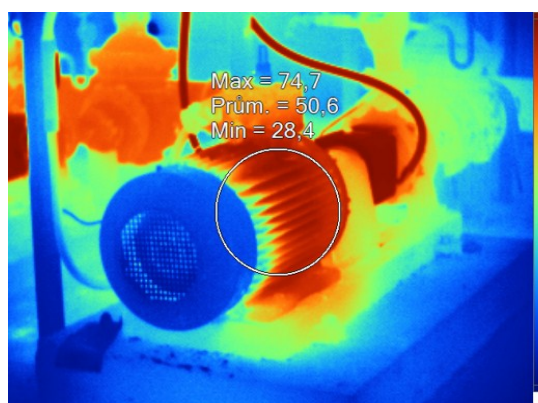
Tabulka 23 Teploty měřících bodů sestavy 6a

Měřící bod		Datum měření	
		16.11.2016	22.3.2017
Maximální teplota [°C]	Motor	47	74,4
	Měřící bod motoru L2	57,4	80,7
	Měřící bod čerpadla L3	103	94,2
	Měřící bod čerpadla L4	96,6	124,1
	Ucpávka	122,7	181,4

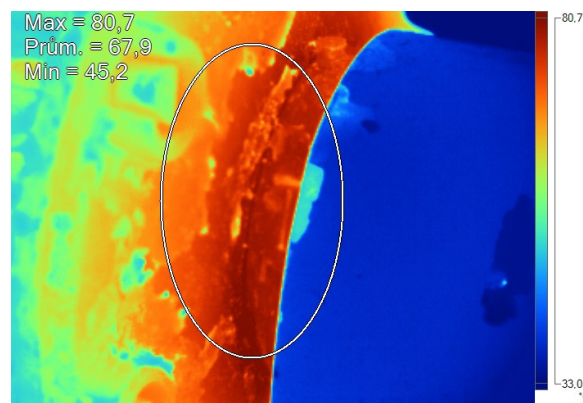


Obr. 135 Trend teplot měřících bodů

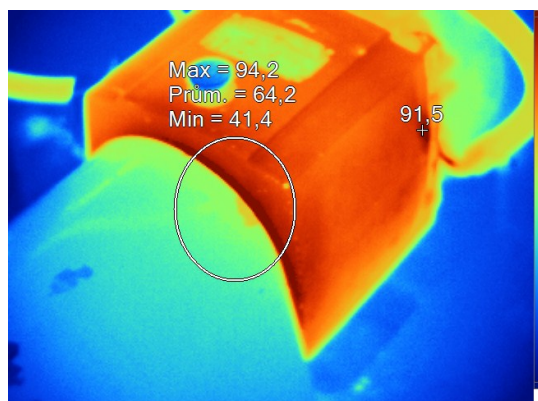
Poslední termografické snímky: 22.3.2017



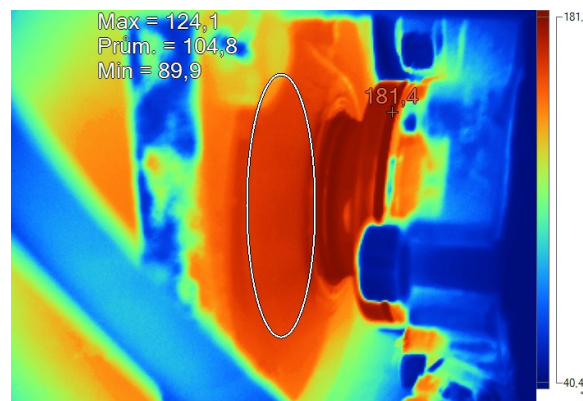
Obr. 137 Motor (6a)



Obr. 136 Měřící bod motoru L2 (6a)



Obr. 139 Měřící bod čerpadla L3 (6a)



Obr. 138 Ucpávka a L4 (6a)

### 4.3.2 Sestava 6b

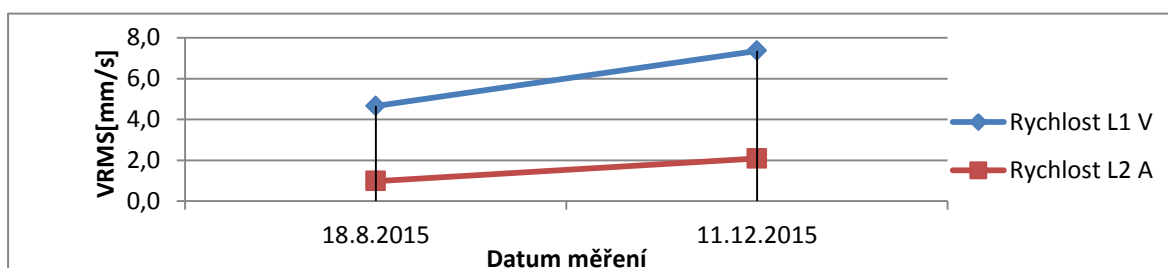
- Výkon 30 kW
- Otáčky 2940 min<sup>-1</sup>



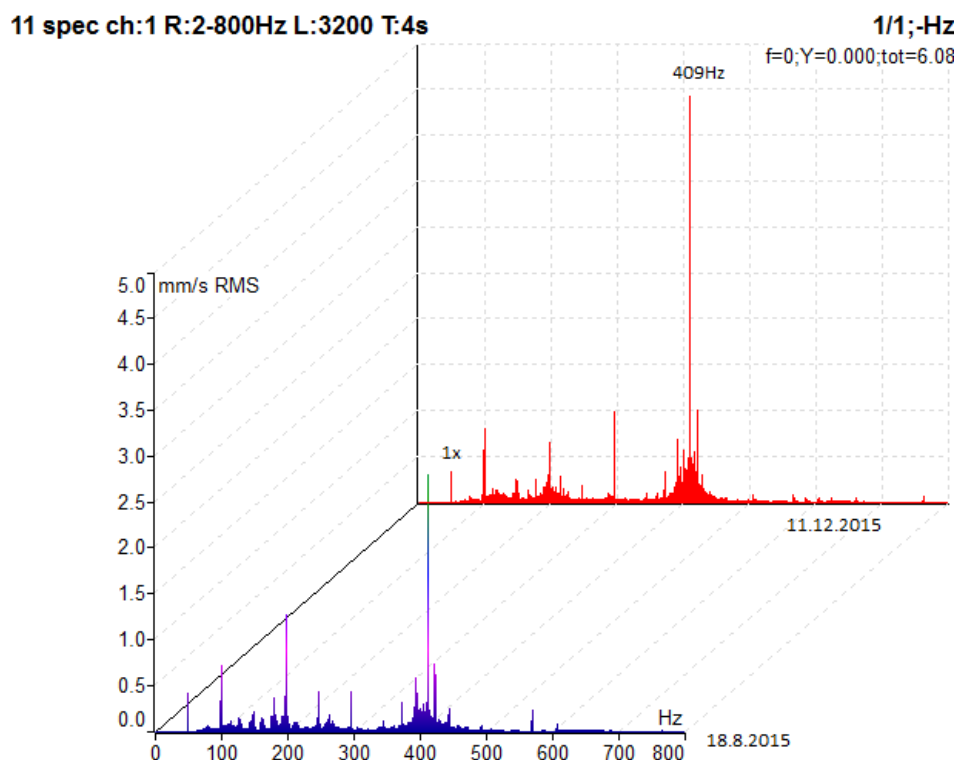
Obr. 140 Čerpadlo 6b [25]

Tabulka 24 Změřené hodnoty vibrací sestavy 6b

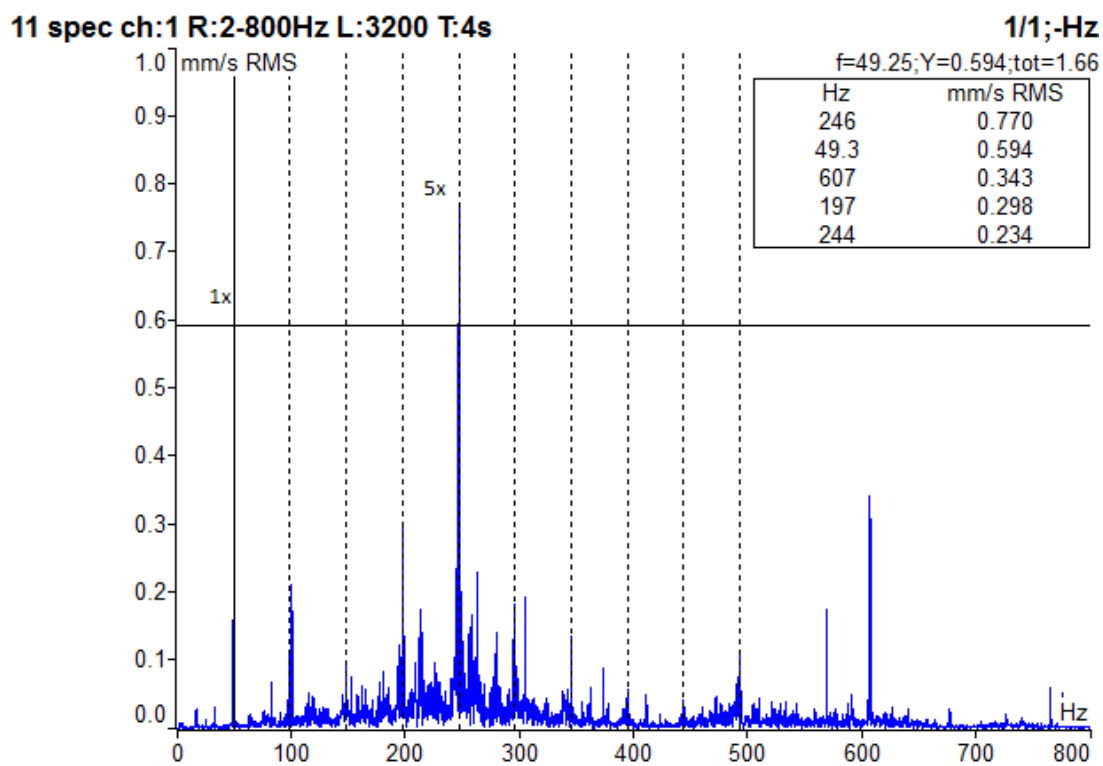
Datum měření		18.8.2015				11.12.2015			
Popis		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo	
Měřicí místo		L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr								
Max. ot/min		2940		2940		2940		2940	
v <sub>RMS</sub> [mm/s]	V	4,66	1,57	1,78	1,53	7,36	1,85	1,71	1,38
	H	3,23	1,23	1,95	1,38	3,15	1,31	2,08	1,35
	A	0,93	0,98	0,98	1,06	1,12	2,09	1,73	1,49
a <sub>RMS</sub> [g] 500 – 25600 Hz	V	0,31	0,62	1,24	0,88	0,48	0,72	1,31	0,95
	H	0,44	0,52	0,60	0,59	0,56	0,62	0,81	0,79
	A	0,36	0,76	0,63	0,71	0,59	1,64	0,72	1,04
Pozn.		se zátěží				se zátěží			



Obr. 141 Trend vysokých hodnot



Obr. 142 Trend rychlosti vibrací ložiska L1 ve vertikálním směru

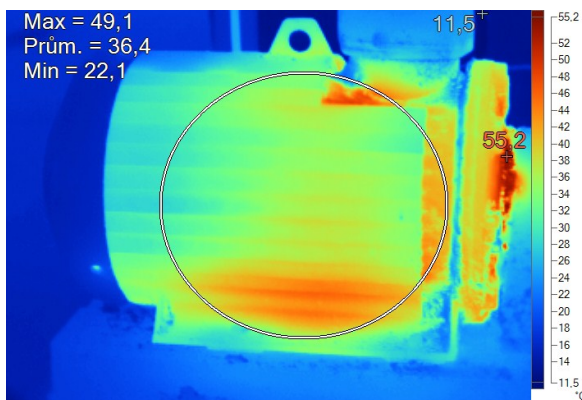


Obr. 143 Spektrum rychlosti vibrací měřicího bodu L3 ve vertikálním směru 11.12.2015 (6b)

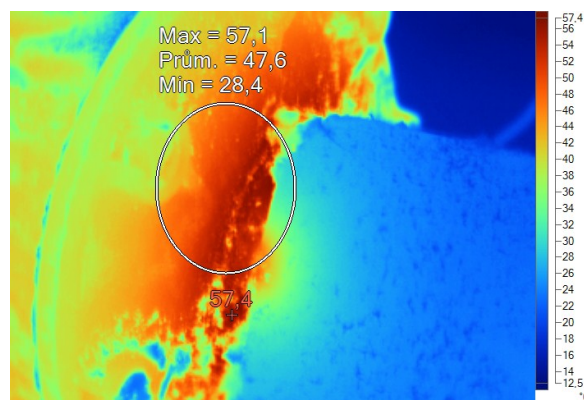
Tabulka 25 Teploty měřících bodů sestavy 6b

Měřící bod		Datum měření
		11.12.2015
Maximální teplota [°C]	Motor	49,1
	Měřící bod motoru L2	57,1
	Měřící bod čerpadla L3	60
	Měřící bod čerpadla L4	59,1
Ucpávka		97,5

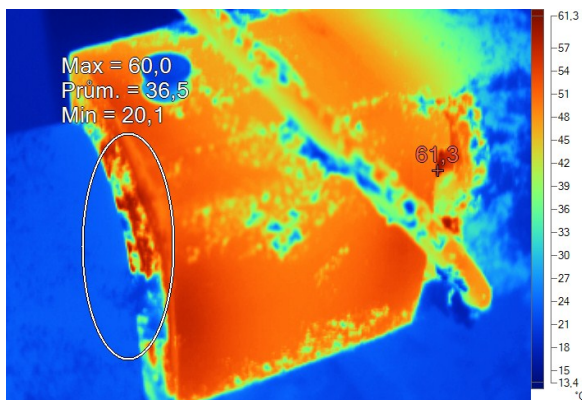
Poslední termografické snímky: 11.12.2015



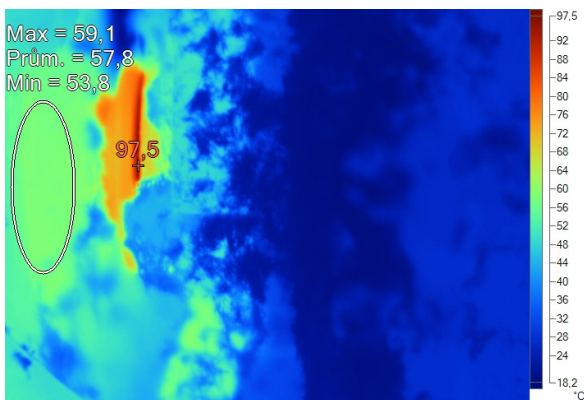
Obr. 144 Motor (6b)



Obr. 145 Měřící bod motoru L2 (6b)



Obr. 147 Měřící bod čerpadla L3 (6b)



Obr. 146 Ucpávka a L4 (6b)



### 4.3.3 Sestava 7b

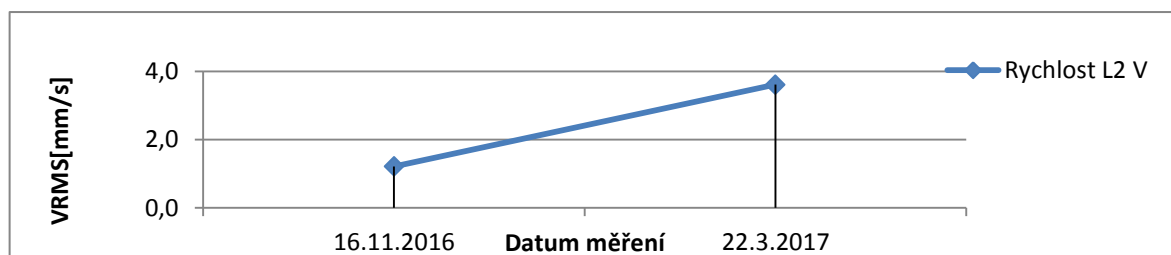
- Výkon 45kW
- Otáčky 2955 min<sup>-1</sup>



Obr. 148 Čerpadlo 7b [Autor]

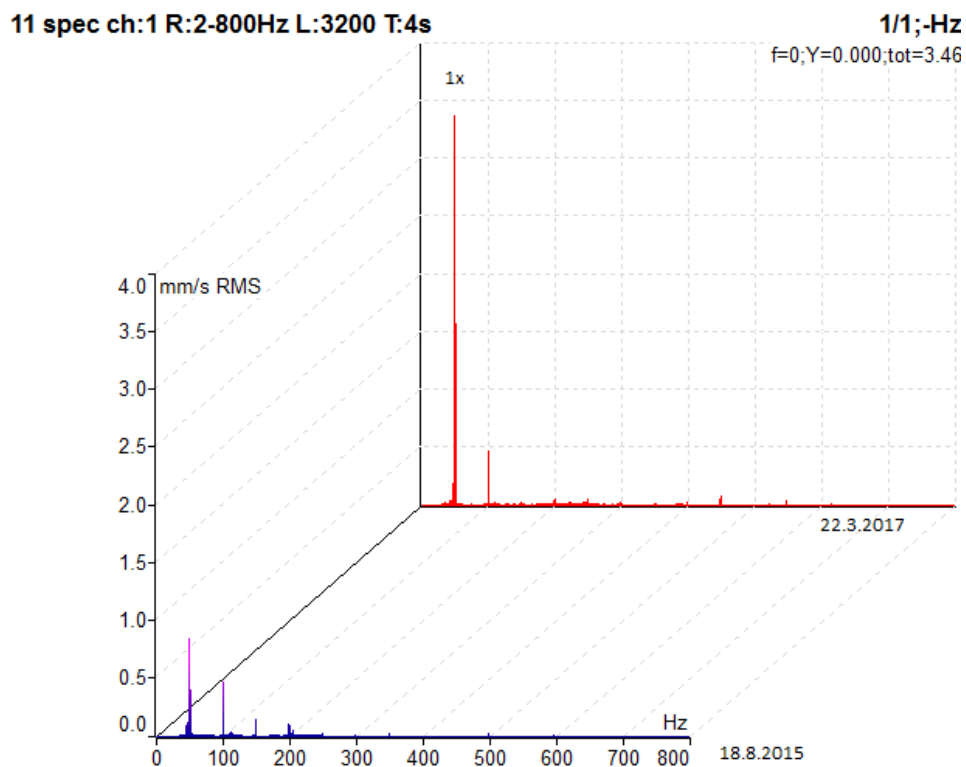
Tabulka 26 Změřené hodnoty vibrací sestavy 7b

Datum měření		18.8.2015				22.3.2017			
Popis		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo	
Měřící místo		L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr								
Max. ot/min		2955		2955		2955		2955	
v <sub>RMS</sub> [mm/s]	V	0,98	1,21	1,72	1,21	1,17	3,61	2,06	1,74
	H	0,73	0,72	1,58	1,26	1,23	1,04	1,78	0,65
	A	0,38	1,02	0,68	0,93	0,71	3,51	1,02	0,28
a <sub>RMS</sub> [g] 500 – 25600 Hz	V	0,39	0,19	0,19	0,21	0,29	0,25	0,38	0,45
	H	0,33	0,20	0,20	0,19	0,27	0,26	0,32	0,34
	A	0,18	0,28	0,28	0,18	0,31	0,39	0,58	0,33
Pozn.		se zátěží				se zátěží			

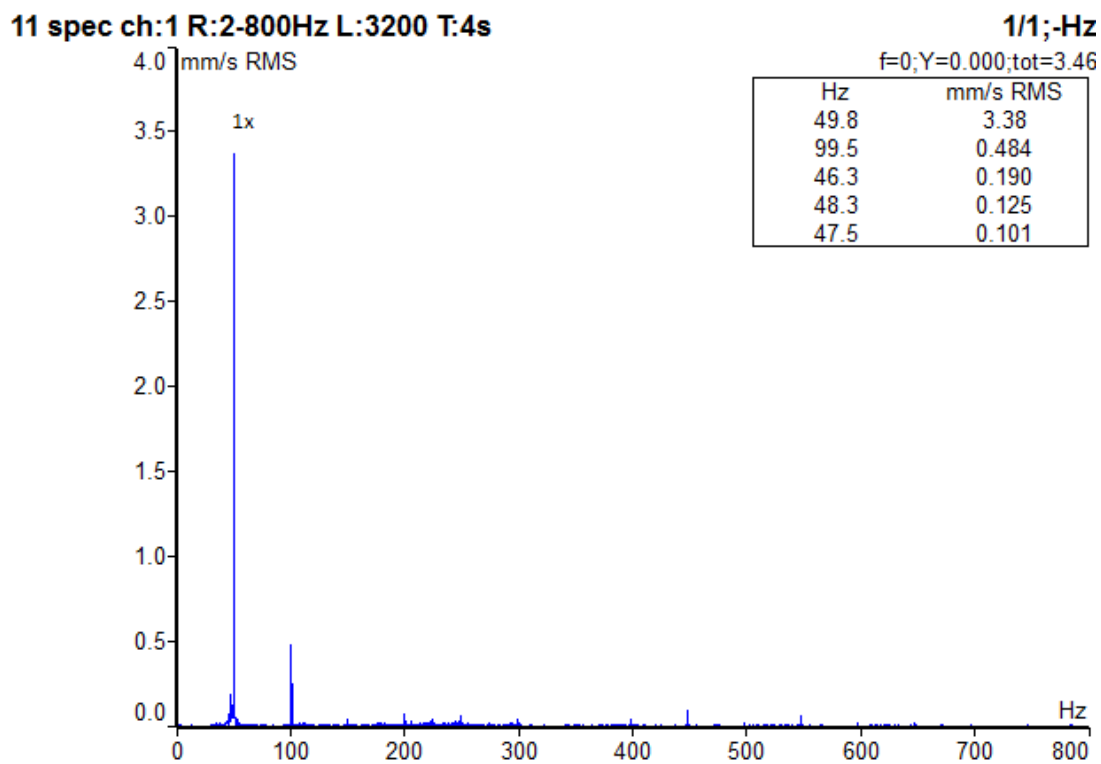


Obr. 149 Trend vysokých hodnot





Obr. 150 Trend rychlosti vibrací měřícího bodu L2 ve vertikálním směru (7b)

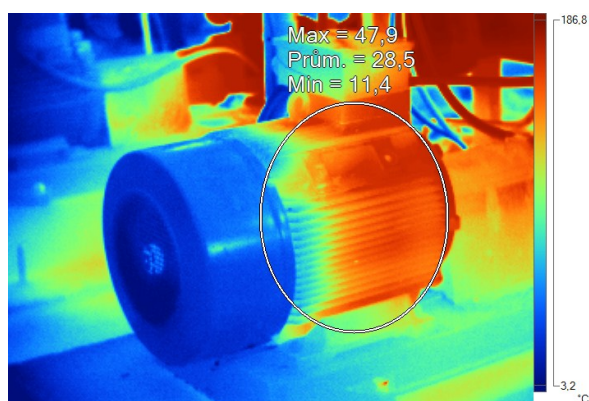


Obr. 151 Spektrum rychlosti vibrací měřícího bodu L2 ve vertikálním směru (7b)

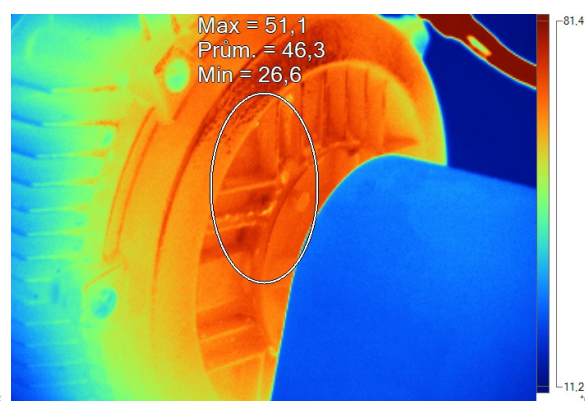
Tabulka 27 Teploty měřících bodů sestavy 7b

Měřící bod		Datum měření
		22.3.2017
Maximální teplota [°C]	Motor	47,9
	Měřící bod motoru L2	51,1
	Měřící bod čerpadla L3	105,8
	Měřící bod čerpadla L4	135,8
Ucpávka		188,3

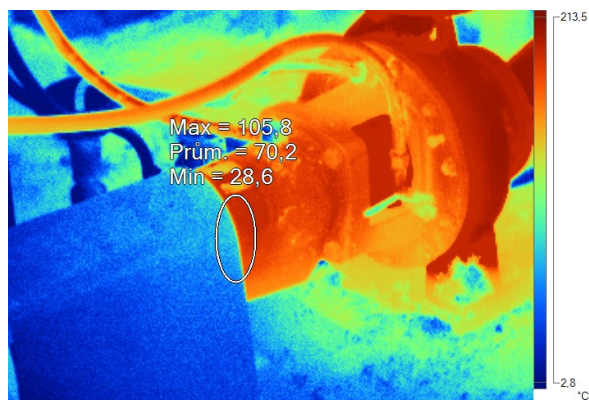
Poslední termografické snímky: 22.3.2017



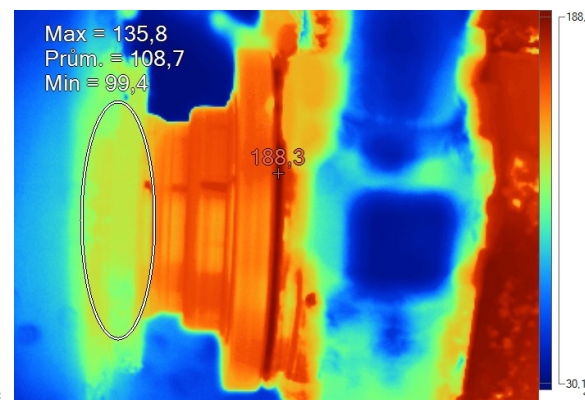
Obr. 153 Motor (7b)



Obr. 152 Měřící bod motoru L2 (7b)



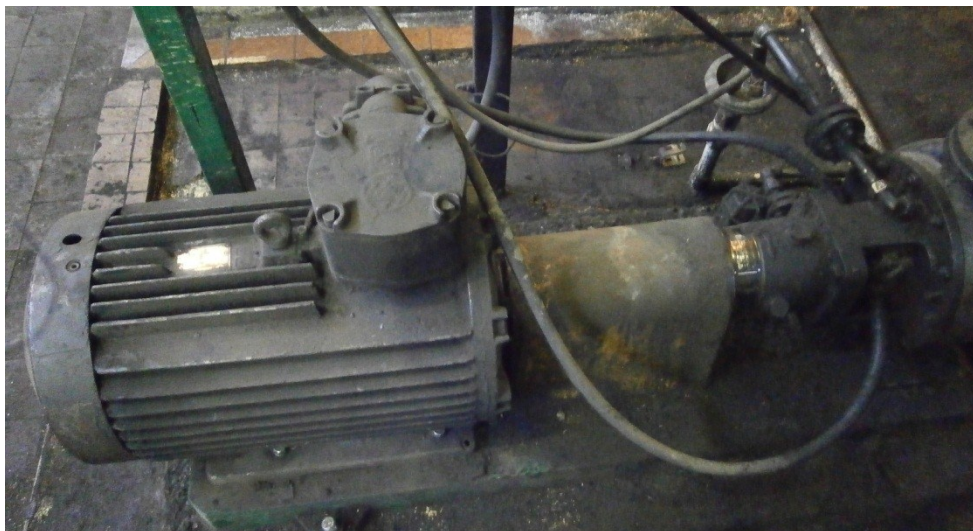
Obr. 155 Měřící bod čerpadla L3 (7b)



Obr. 154 Ucpávka a L4 (7b)

### 4.3.4 Sestava 7c

- Výkon 30 kW
- Otáčky 2850 min<sup>-1</sup>

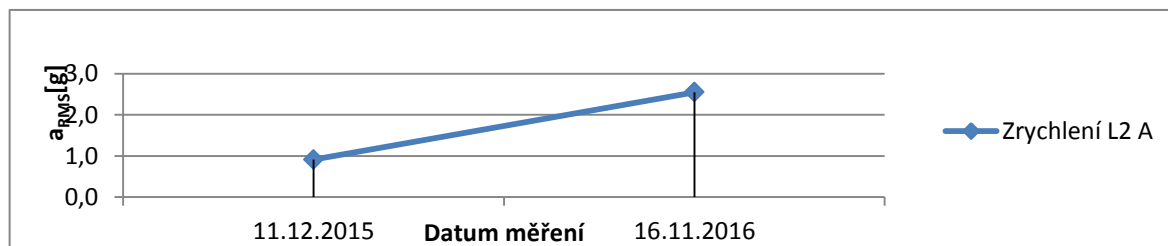


Obr. 156 Čerpadlo 7c [Autor]

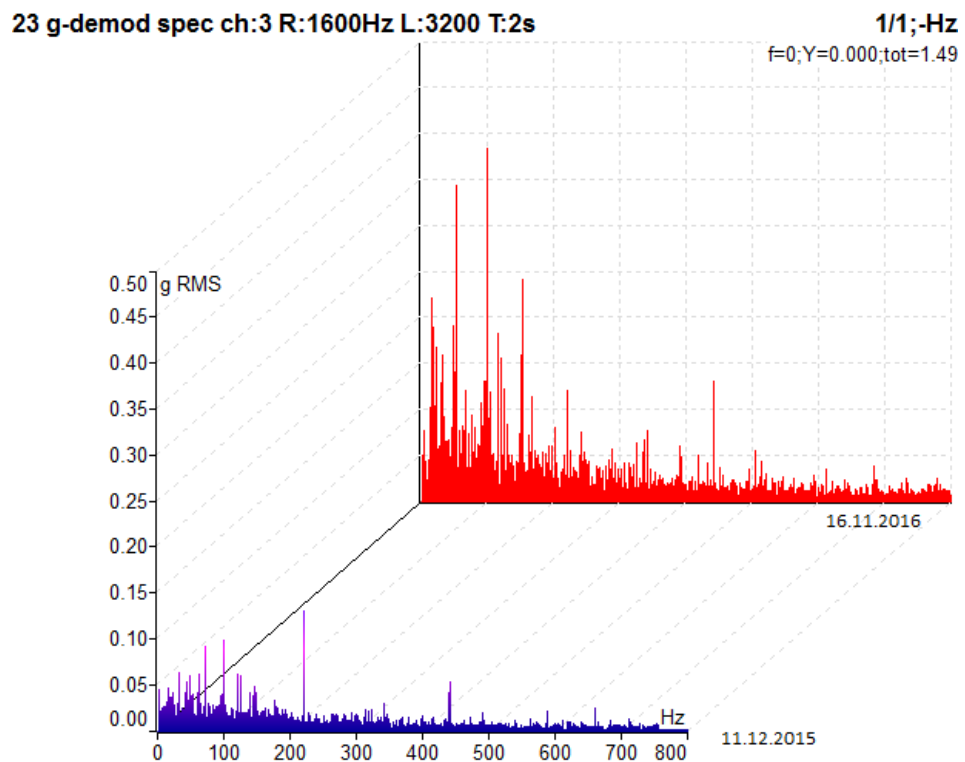
Tabulka 28 Změřené hodnoty vibrací sestavy 7c

Datum měření		11.12.2015				16.11.2016			
Popis		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo	
Měřící místo		L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr								
Max. ot/min		2850		2850		2850		2850	
v <sub>RMS</sub> [mm/s]	V	1,63	0,87	2,78	1,31	1,51	1,37	3,85	2,89
	H	2,23	1,49	2,36	2,41	2,36	1,41	2,32	1,75
	A	0,51	0,97	0,91	1,93	0,49	1,34	0,88	2,04
a <sub>RMS</sub> [g] 500 – 25600 Hz	V	1,36	1,36	0,53	0,56	0,99	1,22	0,51	0,62
	H	1,12	1,28	0,81	0,65	0,81	1,23	0,53	0,44
	A	0,51	0,91	0,63	0,83	0,66	2,55	0,66	0,76
Pozn.		se zátěží				se zátěží, poškození ložiska			

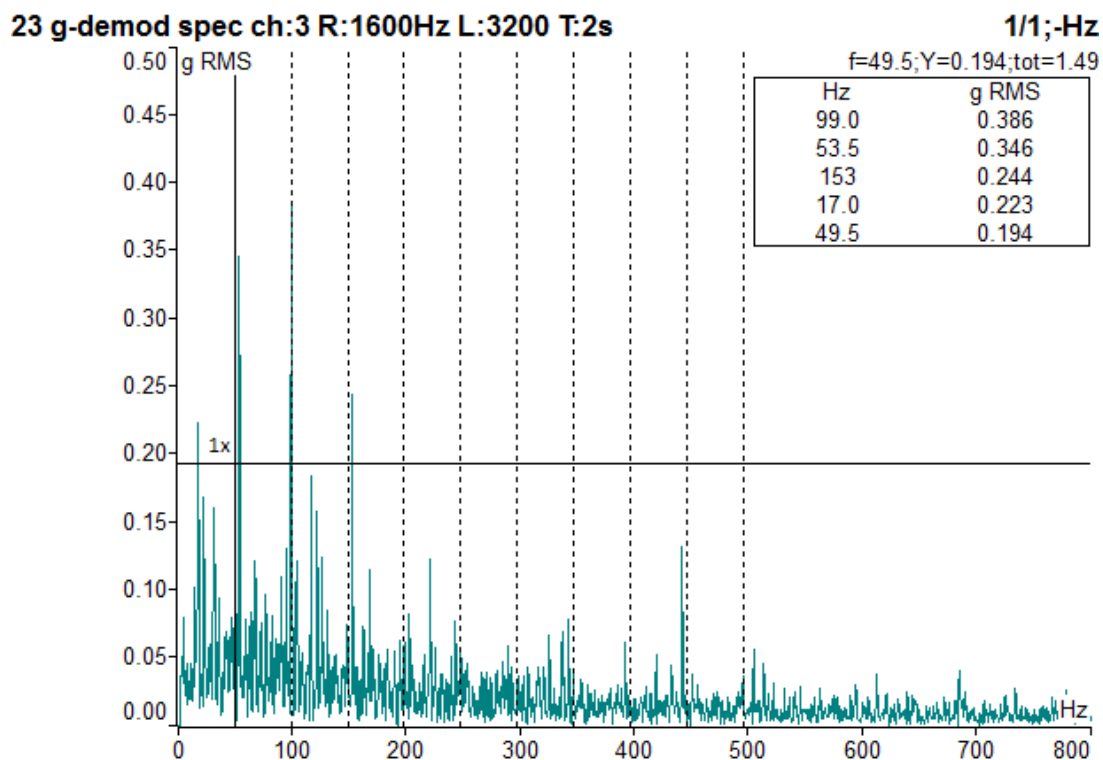
Vada ložiska motoru, možná chyba mazání.



Obr. 157 Trend vysokých hodnot



Obr. 158 Trend obálky zrychlení vibrací měřicího bodu L2 v axiálním směru (7c)



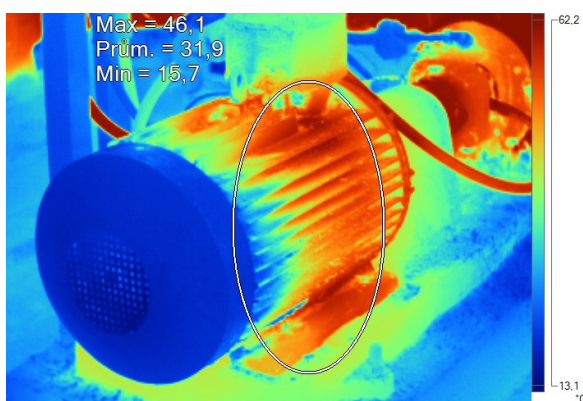
Obr. 159 Obálka zrychlení vibrací měřicího bodu L2 v axiálním směru 16.11.2016(7c)



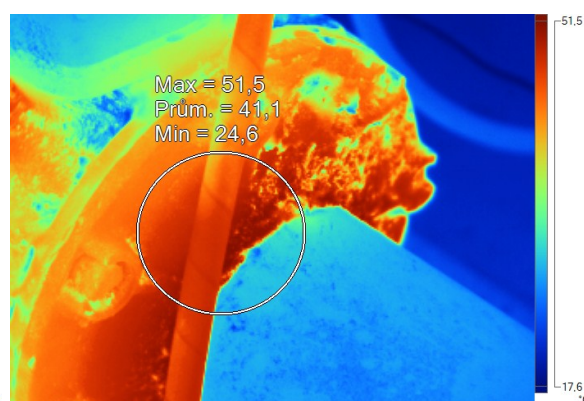
Tabulka 29 Teploty měřících bodů sestavy 7c

Měřící bod		Datum měření
		16.11.2016
Maximální teplota [°C]	Motor	46,1
	Měřící bod motoru L2	51,5
	Měřící bod čerpadla L3	52,7
	Měřící bod čerpadla L4	55,4
Ucpávka		129,7

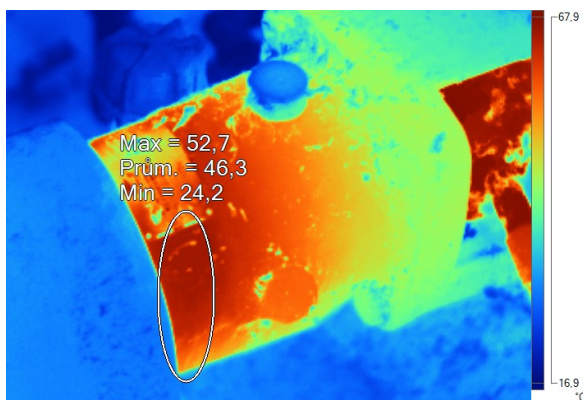
Poslední termografické snímky: 16.11.2016



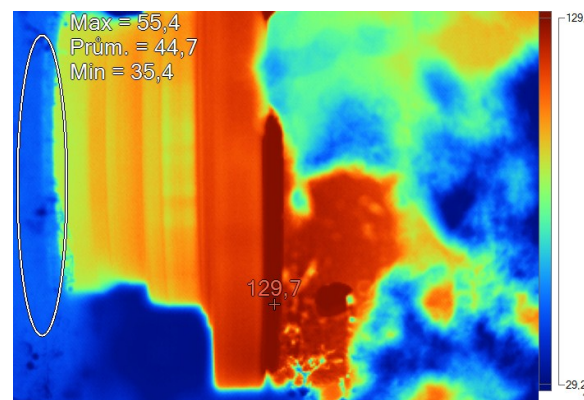
Obr. 161 Motor (7c)



Obr. 160 Měřící bod motoru L2 (7c)



Obr. 163 Měřící bod čerpadla L3 (7c)



Obr. 162 Ucpávka a L4 (7c)

### 4.3.5 Sestava 9b

- Výkon 45 kW
- Otáčky 2955 min<sup>-1</sup>

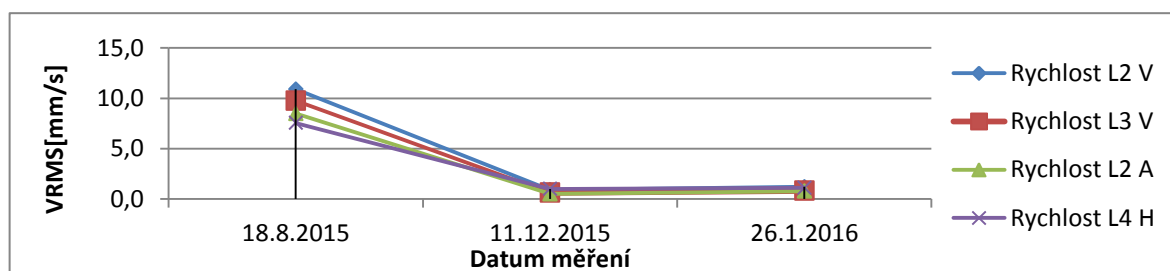


Obr. 164 Čerpadlo 9b [Autor]

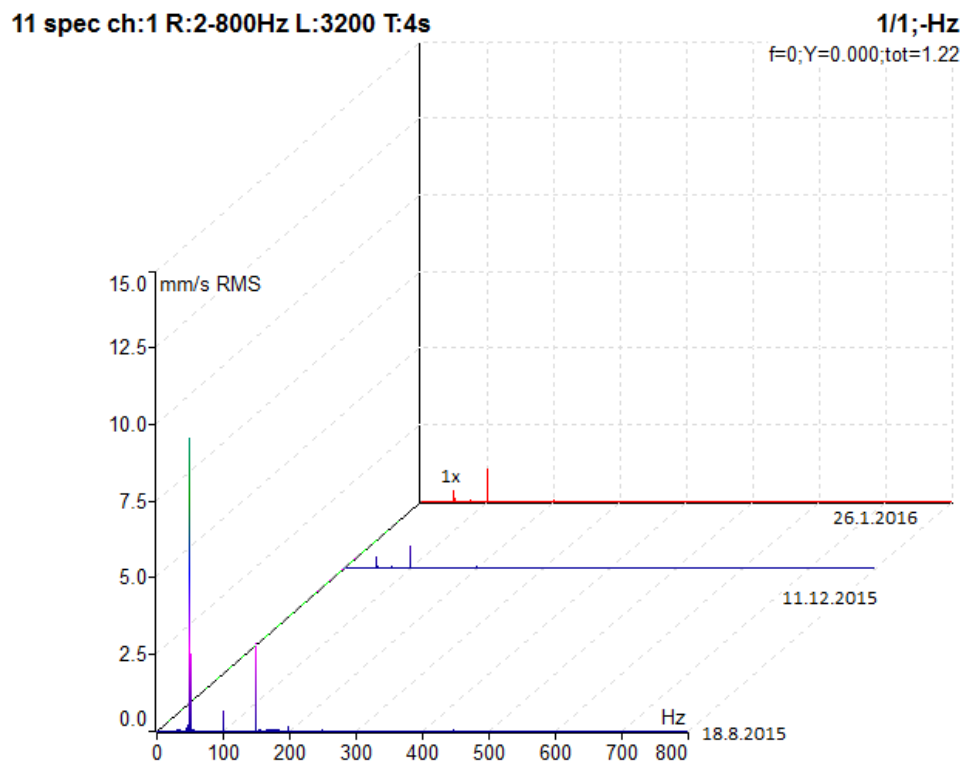
Tabulka 30 Změřené hodnoty vibrací sestavy 9b

Datum měření		18.8.2015				11.12.2015				26.1.2016			
Popis		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo	
Měřící místo		L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr												
Max. ot/min		2955		2955									
v <sub>RMS</sub> [mm/s]	V	3,15	10,9	9,76	6,31	0,92	0,91	0,63	0,56	0,84	1,21	0,81	0,64
	H	2,45	4,56	8,56	7,55	3,66	3,43	1,38	1,01	4,24	3,82	1,62	1,12
	A	3,96	8,49	5,56	4,76	0,31	0,51	0,92	0,83	0,21	0,78	0,79	0,71
a <sub>RMS</sub> [g] 500 – 25600 Hz	V	0,29	0,12	0,65	0,71	0,29	0,22	0,76	0,82	0,32	0,13	0,71	0,53
	H	0,37	0,19	0,66	0,49	0,28	0,79	0,81	0,51	0,28	0,77	0,83	0,71
	A	0,21	0,27	0,52	0,52	0,33	0,32	0,51	0,67	0,33	0,19	0,62	0,61
Pozn.		se zátěží, problém základu				se zátěží, nový základ, elektromagnetický. problém motoru				se zátěží,			

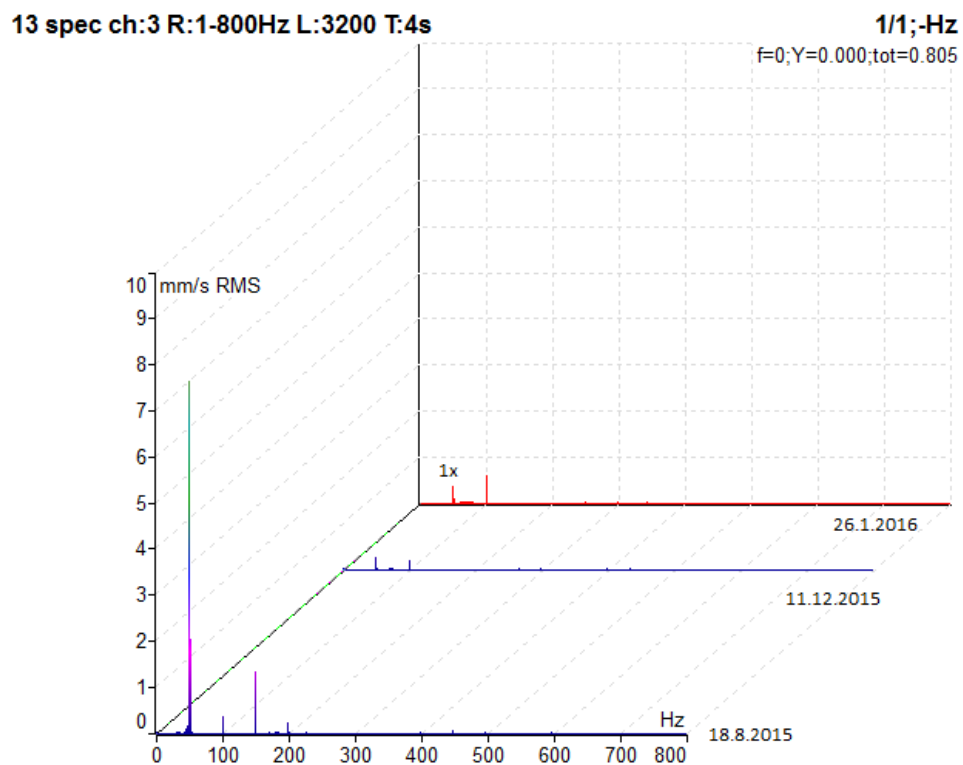
Problém nesymetrie elektromagnetického pole motoru.



Obr. 165 Trend vysokých hodnot



Obr. 166 Trend rychlosti vibrací měřícího bodu L2 ve vertikálním směru (9b)



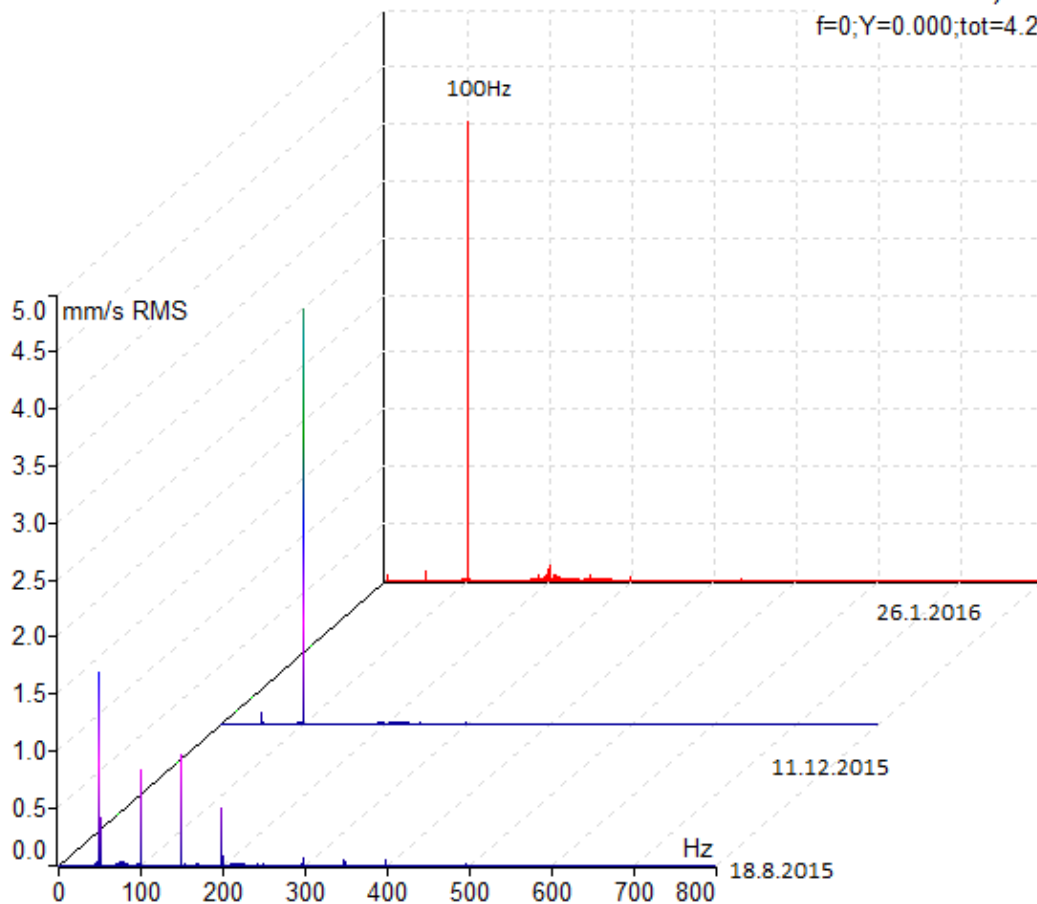
Obr. 167 Trend rychlosti vibrací měřícího bodu L2 v axiálním směru (9b)



12 spec ch:3 R:2-800Hz L:3200 T:4s

1/1;-Hz

f=0;Y=0.000;tot=4.25

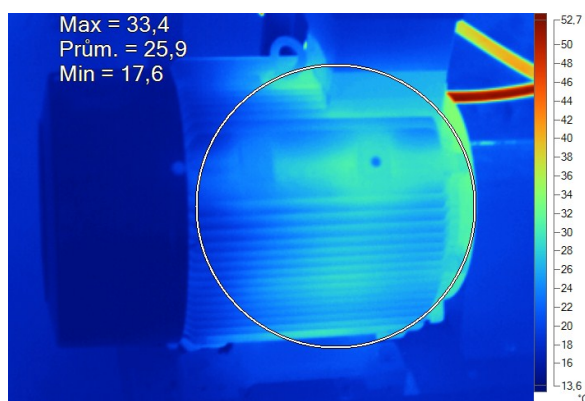


Obr. 168 Trend rychlosti vibrací měřícího bodu L1 ve vertikálním směru (9b)

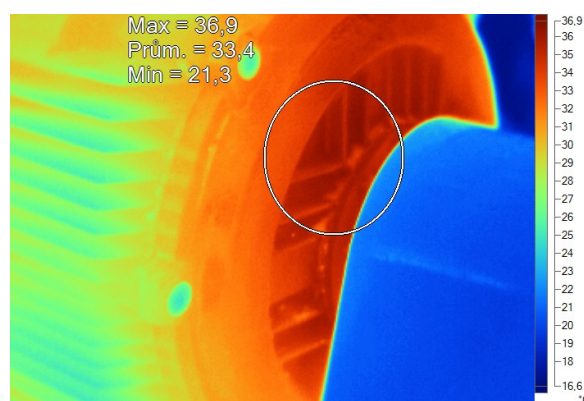
Tabulka 31 Teploty měřících bodů sestavy 9b

Měřící bod		Datum měření
		11.12.2015
Maximální teplota [°C]	Motor	33,4
	Měřící bod motoru L2	36,9
	Měřící bod čerpadla L3	61,9
	Měřící bod čerpadla L4	89,1
Ucpávka		110

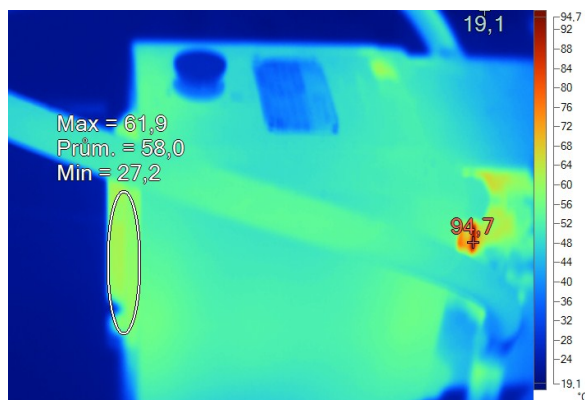
Poslední termografické snímky: 11.12.2015



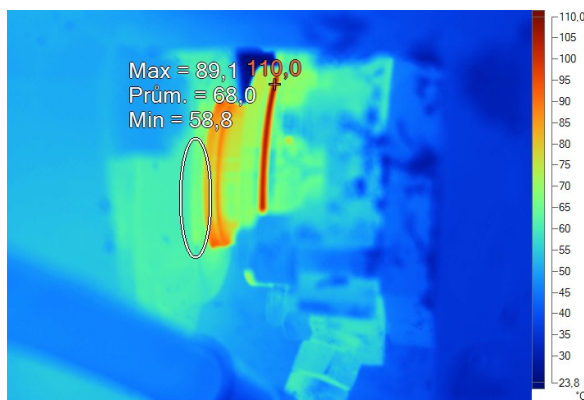
Obr. 170 Motor (9b)



Obr. 169 Měřící bod motoru L2 (9b)



Obr. 171 Měřící bod čerpadla L3 (9b)



Obr. 172 Ucpávka a L4 (9b)

## 4.4 Čerpadla čpavkové vody

### 4.4.1 Sestava 09b

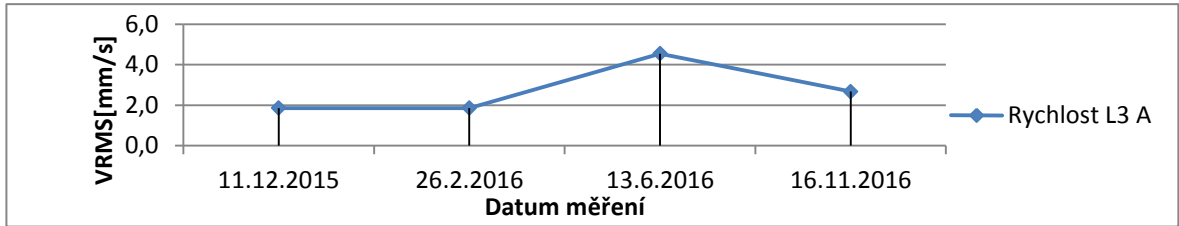
- Výkon 45 kW
- Otáčky 1475 min<sup>-1</sup>



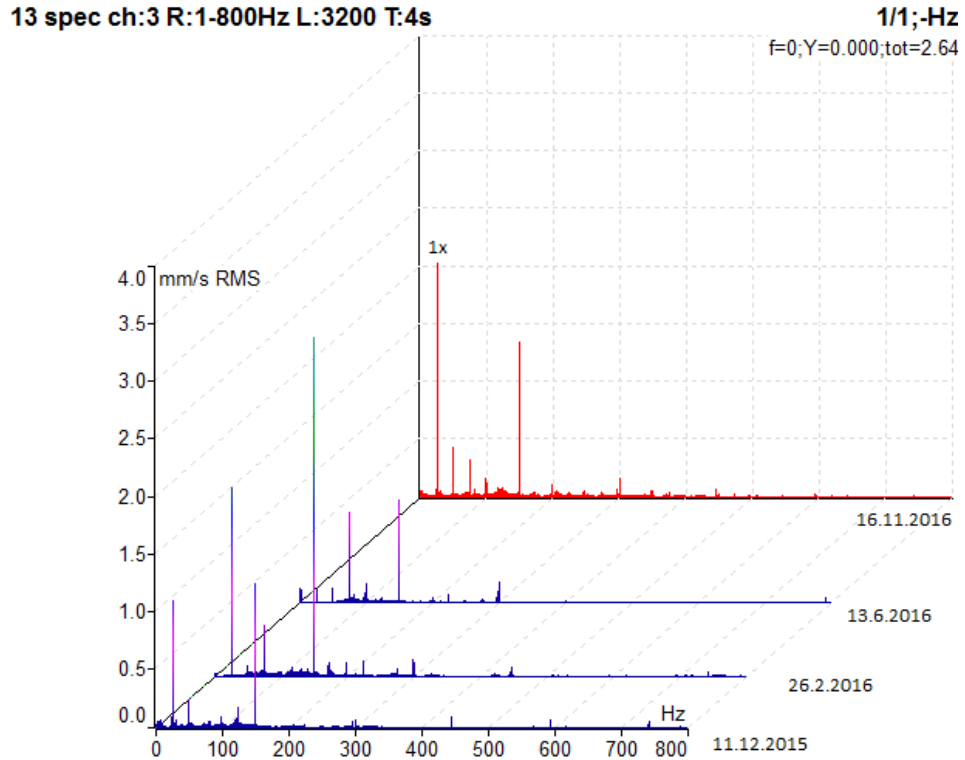
Obr. 173 Čerpadlo 09b [25]

Tabulka 32 Změřené hodnoty vibrací sestavy 09b

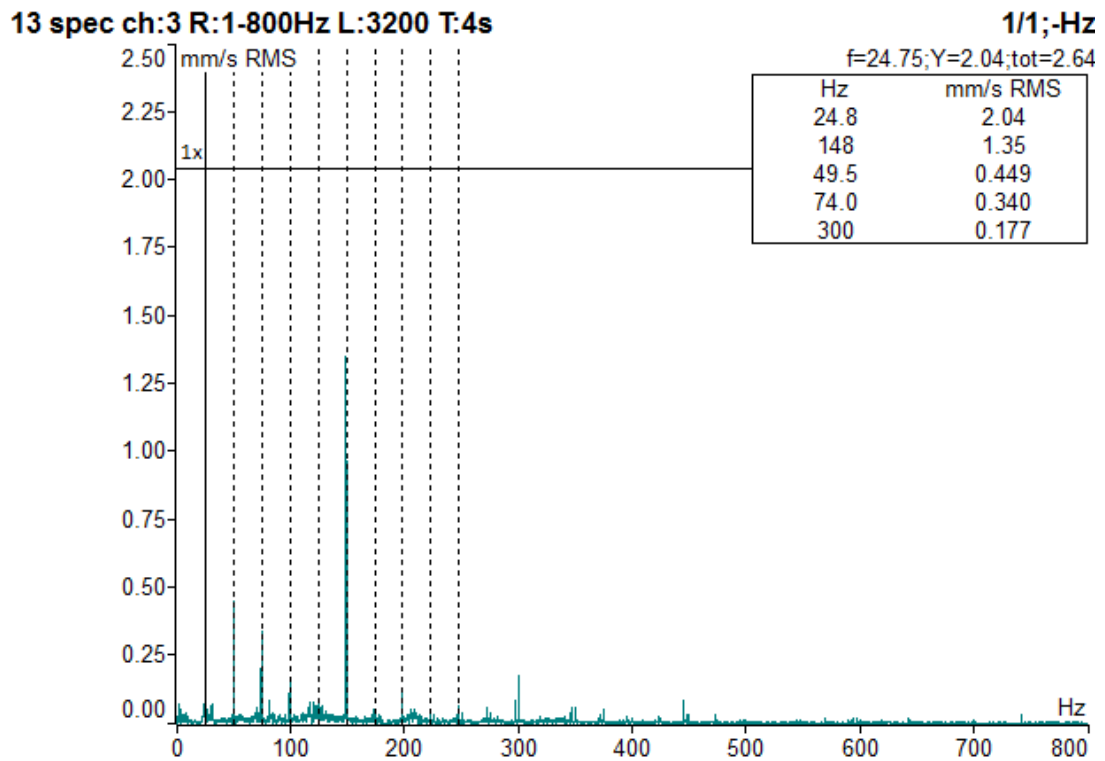
Datum měření		11.12.2015				26.2.2016				13.6.2016			
Popis		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo		motor		čerpadlo	
Měřící místo		L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr												
Max. ot/min		1475		1475		1475		1475		1475		1475	
v <sub>RMS</sub> [mm/s]	V	1,28	1,27	1,35	1,33	1,77	1,73	1,35	1,33	0,30	1,29	3,34	2,64
	H	1,26	1,32	2,93	0,72	2,03	1,56	2,93	0,72	1,51	1,55	3,11	0,89
	A	0,73	1,36	1,86	1,95	1,02	2,25	1,86	1,95	0,61	1,17	4,55	3,10
a <sub>RMS</sub> [g] 500 – 25600 Hz	V	0,22	0,18	0,71	0,55	0,20	0,18	0,78	0,72	0,14	1,18	0,58	0,64
	H	0,19	0,18	0,47	0,74	0,37	0,23	0,56	0,74	0,15	1,18	0,63	0,75
	A	0,30	0,19	0,52	0,85	0,18	0,19	0,58	1,27	0,40	0,19	0,43	0,71
Pozn.		se zátěží				se zátěží				se zátěží			
Datum měření		16.11.2016											
Popis		motor		čerpadlo									
Měřící místo		L1	L2	L3	L4								
Veličina	Směr												
Max. ot/min		1475		1475									
v <sub>RMS</sub> [mm/s]	V	1,49	0,98	2,12	1,95								
	H	1,39	1,32	2,34	0,81								
	A	0,55	1,08	2,67	2,56								
a <sub>RMS</sub> [g] 500 – 25600 Hz	V	0,15	0,18	0,63	0,67								
	H	0,13	0,14	0,57	0,64								
	A	0,32	0,19	0,44	1,01								
Pozn.		se zátěží											



Obr. 174 Trend vysokých hodnot



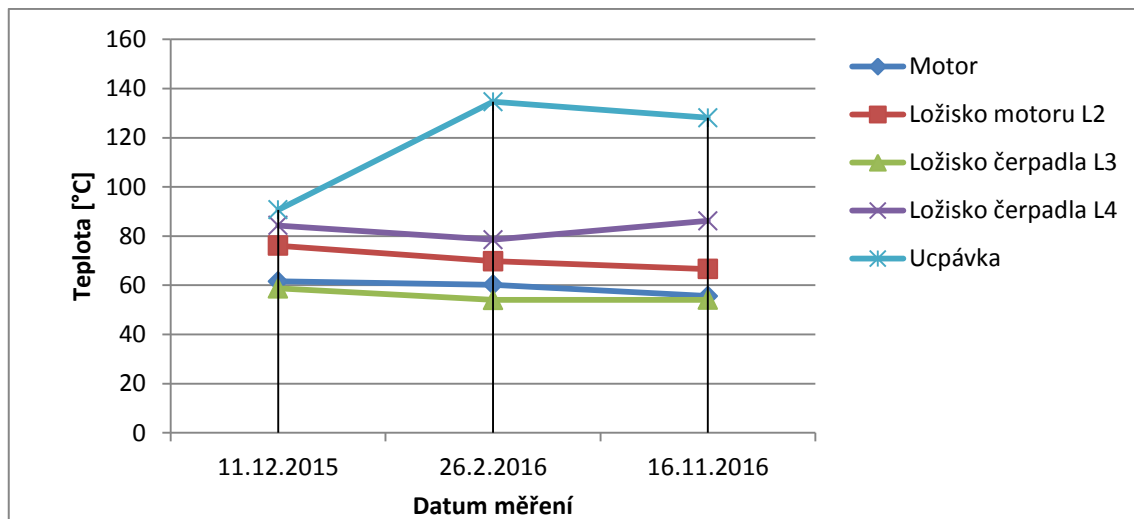
Obr. 175 Trend rychlosti vibrací měřícího bodu L3 v axiálním směru (09b)



Obr. 176 Spektrum rychlosti vibrací měřícího bodu L3 v axiálním směru 16.11.2016 (09b)

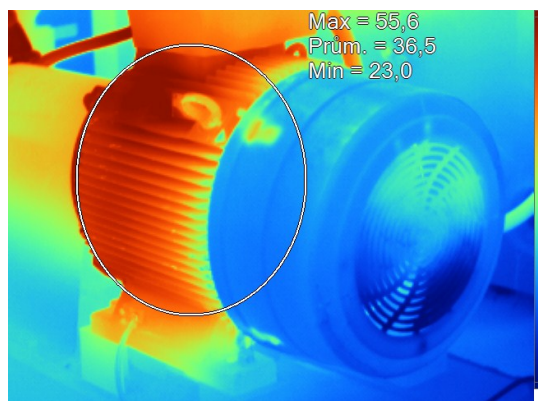
Tabulka 33 Teploty měřících bodů sestavy 09b

Měřící bod		Datum měření		
		11.12.2015	26.2.2016	16.11.2016
Maximální teplota [°C]	Motor	61,6	60,2	55,6
	Měřící bod motoru L2	76,1	69,8	66,6
	Měřící bod čerpadla L3	58,7	54	54,1
	Měřící bod čerpadla L4	84,3	78,5	86,2
	Ucpávka	90,7	134,6	128,1

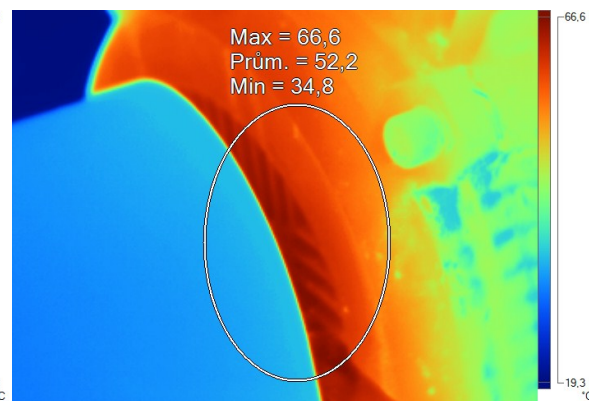


Obr. 177 Trend teplot měřících bodů

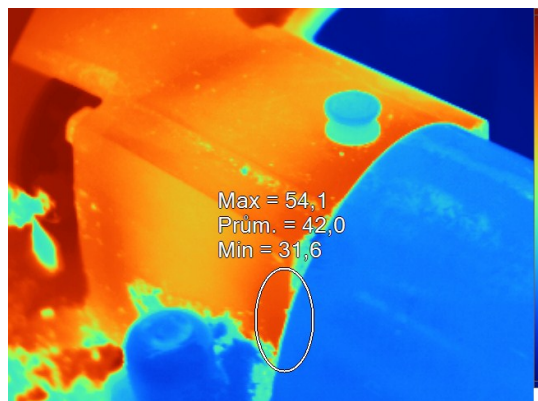
Poslední termografické snímky: 16.11.2016



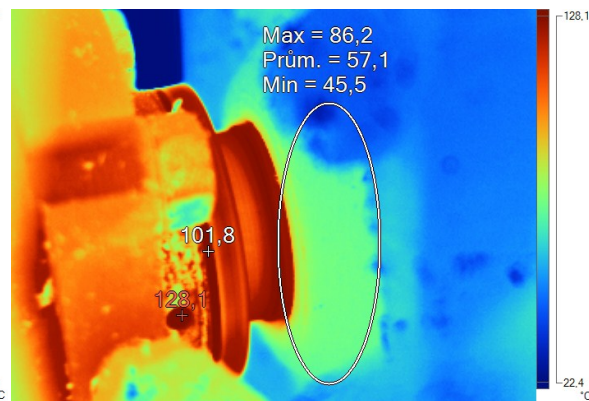
Obr. 178 Motor (09b)



Obr. 179 Měřící bod motoru L2 (09b)



Obr. 180 Měřící bod čerpadla L3 (09b)



Obr. 181 Ucpávka a L4 (09b)

## Závěr

V diplomové práci jsem se zabýval vibrodiagnostikou a termodiagnostikou strojních zařízení – horizontálních pump. Cílem měření bylo poskytnout informace o technickém stavu strojů z dlouhodobého časového hlediska. Během období dvou let jsem učinil celkem sedm návštěv měřených objektů a nasbíral velké množství dat.

Jelikož měřené stroje pracují ve skupinách několika kusů, dochází často k odstávkám a provozu jiného stroje než při předešlém měření. Ne u všech strojů se tak povedlo zaznamenat dostatek dat pro dlouhodobé trendy. U výše uvedených strojů bylo možné provést aspoň dvě měření vibrací, z toho u pěti proběhlo šest měření a výše. Celkem bylo diagnostikováno patnáct čerpadel. Deset z toho bylo při jejich posledním měření ve vyhovujícím stavu podle normy. Hodnoty vibrací dalších dvou ukazovaly na zhoršený stav, a zbylé tři stroje dosahovaly nepřijatelné úrovně vibrací.

Čerpadla s nejhorsšími výsledky se nacházely hlavně v čerpací stanici fenolky. Jednalo se hlavně o sestavy 48A, a 49D. Stroje zde trpěly častými prouchami ložisek, byly velmi hlučné a mysely být několikrát opravovány. Na čerpadlech byly použity nepřiliš těsné ucpávky a prosakující čpavková voda odtékající do sběrných kanálů neustále smáčela stroje i podlahu haly. Čerpadla větve 49 o výkonu cca 22kW byla pro dosažení požadovaného průtoku škrcena na výtlaku klapkou, což je z hlediska ekonomiky provozu nepřiliš vyhovující řešení.

Regulace průtoku čerpané kapaliny škrtícím ventilem na výtlaku čerpadla je používána i u ostatních strojů v hale benzolky. Ačkoliv je tento způsob regulace z technického hlediska pro odstředivá čerpadla vyhovující, z hlediska efektivity a ekonomiky provozu zařízení nikoliv. Škrčením dochází k nárustu tlaku v komoře čerpadla, což se negativně projevuje jak na životnosti ucpávky a těsnícího oleje, tak na životnosti ložisek čerpadla. Energie zbytečně předimenzovaným čerpadlem dodaná kapalině se na škrtícím ventilu spotřebovává ve formě tepelných ztrát. Z ekonomického hlediska je výhodnější použití strojů o menším výkonu pokud je to možné, popřípadě regulací otáček čerpadla. V případě požadavku na proměnný průtok kapaliny je jednou z neekonomičtějších metod použití regulace otáček čerpadla pomocí frekvenčního měniče,

což umožňuje přizpůsobit dodávku kapaliny co nejpřesněji požadovaným parametrům při minimálních energetických ztrátách.

Původní stanice čerpadel čpavkové vody fenolky byla v období po měření 13.6.2016 vyřazena z provozu. Na místo ní byla zřízena nová hala a stará čerpadla nahrazena novými stroji menšího výkonu 18,5kW při polovičních otáčkách čerpadla. Součástí vybavení haly je ovládací systém zobrazující aktuální informace o běžících čerpadlech a informace o veličinách čerpané čpavkové vody. Nově instalované stroje jsou navíc vybaveny bezúkapovými olejovými ucpávkami. Toto řešení je výhodné jak z hlediska zamezení ztrát cenných čerpaných kapalin na standartních ucpávkách, tak ze ekologického hlediska. Vzhledem ke stavu kontaminace půdy v regionu s dlouhodobou historií těžkého a chemického průmyslu a také faktu, že areál koksovny sousedí s tokem Ostravice, jsou zbytečné ztráty nebezpečných látek rozhodně nežádoucí. Dá se předpokládat, že průmysl tohoto typu se bez jisté ekologické zátěže neobejde. Vhodnou renovací a především udržováním strojů v bezvadném stavu je však možno předejít případným závažným haváriím zařízení a omezení rizika s nimi spojeným.



Tabulka 34 Shrnutí technického stavu zařízení

Hala	Stroj	Datum měření	Stav při měření
Benzolová absorpce	24B	18.8.2015	Zvýšené vibrace
		11.12.2015	Vibrace v normě
		26.1.2016	Vibrace v normě
		26.2.2016	Vibrace v normě
		13.6.2016	Vibrace v normě
		16.11.2016	Vibrace v normě
		22.3.2017	Vibrace v normě
	19B	18.8.2015	Vibrace v normě
		11.12.2015	Zvýšené vibrace
		26.1.2016	Vibrace v normě
		26.2.2016	Vibrace v normě
		13.6.2016	Zvýšené vibrace, měněn olej ložisek čerpadla
	16.11.2016	Vibrace v normě	
	6B	18.8.2015	Vibrace v normě
		11.12.2015	Vibrace v normě
		26.1.2016	Zvýšené vibrace, přemazáno
		26.2.2016	Vibrace v normě
		13.6.2016	Vibrace v normě
		16.11.2016	Zvýšené vibrace, nesouosost
	22.3.2017	Zvýšené vibrace, poškození spojky	
	7A	18.8.2015	Vibrace v normě
		11.12.2015	Vibrace v normě
		26.1.2016	Vibrace v normě
		26.2.2016	Vibrace v normě
		13.6.2016	Vibrace v normě
		22.3.2017	Vibrace v normě
8B	11.12.2015	Vibrace v normě	
	26.1.2016	Vibrace v normě	
	26.2.2016	Vibrace v normě	
	13.6.2016	Vibrace v normě	
	16.11.2016	Zvýšené vibrace, uvolnění a nesouosost	
22.3.2016	Vibrace v normě		
9B	11.12.2015	Vysoké vibrace, uvolněné čepy spojky	
	26.2.2016	Vibrace v normě, opraveno	
Předčištění čpavkové vody (fenolky)	48A	11.12.2015	Vysoké vibrace
		26.1.2016	Vysoké vibrace, dotažená patka
		26.2.2016	Vysoké vibrace, uvolněný stroj, elektromag. vada motoru
	49B	26.1.2016	Vysoké vibrace, nesouosost
		16.11.2016	Vibrace v normě ,opraveno
	49D	11.12.2015	Vysoké vibrace
		26.1.2016	Vysoké vibrace
26.2.2016		Vysoké vbrace, vadná ložiska	
13.6.2016		Vysoké vbrace, nesouosost	
Separace benzolu	6a	16.11.2016	Vysoké vibrace, elektromag. vada motoru
		22.3.2017	Vibrace v normě, elektromg. vada motoru stále přítomna
	6b	18.8.2015	Zvýšené vibrace
		11.12.2015	Vysoké vibrace
	7b	18.8.2015	Vibrace v normě
		22.3.2017	Vibrace v normě
	7c	11.12.2015	Vibrace v normě
		16.11.2016	Zvýšené vibrace, poškozené ložisko, možný problém mazání
	9b	18.8.2015	Vysoké vibrace, prasklý základ
		11.12.2015	Vibrace v normě, nový základ, elektromag. vada motoru
		26.1.2016	Vibrace v normě, elektromg. vada motoru stále přítomna
Čerpání čpavkové vody	09b	11.12.2015	Vibrace v normě
		26.2.2016	Vibrace v normě
		13.6.2016	Zvýšené vibrace
		16.11.2016	Vibrace v normě

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedení Koksovny Svoboda za umožnění diagnostického měření jejich zařízení, a jejich personálu za vstřícný přístup. Dále děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Blatovi a Ing. Šeděnkovi za jejich čas a rady při měření a zpracování dat.

## Použitá literatura

- [1] HELEBRANT, František; ZIEGLER, Jiří. *Technická diagnostika a spolehlivost II. Vibrodiagnostika*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2004. 173 s.
- [2] BILOŠ, Jan; BILOŠOVÁ, Alena. *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů. Část Vibrační diagnostika*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2012. 142 s.
- [3] HRABEC, Ladislav; HELEBRANT, František; MAZALOVÁ, Jana. *Technická diagnostika a spolehlivost III. Ustavování strojů*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2006. 96 s.
- [4] DOLEČEK, Josef., HOLOUBEK, Zdeněk. *Strojnictví II pro SOU*. 3. vydání. Praha: SNTL – NAKLADATELSTVÍ TECHNICKÉ LITERATURY, 1989. 165 s. ISBN 80-03-00036-X.
- [5] *Čerpadla – druhy čerpadel* [online]. 2017 [cit 2017-04-27]. Dostupné z WWW: <<http://druhy-cerpadel.cz/>>
- [6] ČEJKA, Pavel; KLAS, Roman. *Konstrukční provedení čerpadel*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2009. 40s.
- [7] *Vodní turbíny a hydrodynamická čerpadla* [online]. ŠKORPÍK, Jiří. 2016. [cit 2017-04-27]. Dostupné z WWW:<<http://www.transformacni-technologie.cz/21.html>>
- [8] *Schenck RoTec – Why is balancing so important?* [online]. Schenck RoTec. 2017. [cit 2017-04-28]. Dostupné z WWW:< <http://www.schenck-rotec.cz/why-balancing/index.php>>
- [9] *Emisivita - Wikipedie* [online]. Wikipedia. 2015. [cit 2017-04-28]. Dostupné z WWW:<<https://cs.wikipedia.org/wiki/Emisivita>>
- [10] *Pyrometr B21*[online]. Trotec GmbH. 2017. [cit 2017-04-28]. Dostupné z WWW:<<https://www.trotec24.cz/merici-zarizeni/teplota/infracervene-teplomery/pyrometr-bp21.html?rc=7f8db70470>>
- [11] *Pístové stroje* [online]. SPŠSOL. 2017. [cit 2017-04-28]. Dostupné z WWW:<<http://www.spssol.cz/rsimages/DIGI1/html/cad/P%C3%ADstov%C3%A9%20stroje/Modul.html>>
- [12] *Čerpadla a dávkovače* [online]. KOUŘIL Dávkovací čerpadla. 2007. [cit 2017-04-28]. Dostupné z WWW:<<http://www.cerpadlakouril.cz/informace-o-produktech.html>>

- [13] *What is SWIR?* [online]. Edmind optics. 2017. [cit 2017-04-28]. Dostupné z WWW:<<https://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/imaging/what-is-swir/>>
- [14] *Block diagram of an proximity probe* [online]. 2017. [cit 2017-04-29]. Dostupné z WWW:<[https://www.researchgate.net/figure/259133889\\_fig3\\_Fig-3-Block-diagram-of-an-inductive-proximity-probe](https://www.researchgate.net/figure/259133889_fig3_Fig-3-Block-diagram-of-an-inductive-proximity-probe)>
- [15] *Voltage measurement* [online]. DEWESoft. [cit 2017-04-29]. Dostupné z WWW:<<https://www.dewesoft.com/pro/course/voltage-measurement-6>>
- [16] *Laser shaft alignment* [online]. Nicol & Andrew. 2016. [cit 2017-04-29]. Dostupné z WWW:<<https://www.dewesoft.com/pro/course/voltage-measurement-6>>
- [17] HELEBRANT, František; MONI, Vlastimil, BLATA, Jan. *Studijní podklady Termografie* Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2010. 54 s.
- [18] *Automatizace.hw.cz: Měření vibrací pro diagnostiku opotřebených strojů.* [online]. 2014 [cit 2015-05-10]. Dostupné z WWW: <<http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/mereni-vibraci-pro-diagnostiku-opotrebeni-stroju.html>>
- [19] *ZLND - Čerpadla Supernova - spirální jednostupňová kozlíková.* [online]. K+H Čerpační technika s.r.o. 2017. [cit 2017-05-2]. Dostupné z WWW: <<http://www.k-h.cz/kategorie/cerpadla-supernova-spiralni-jednostupnova-kozlikova>>
- [20] *Průmyslová termokamera Fluke Ti32.* [online]. FLUKE. 2017. [cit 2017-05-2]. Dostupné z WWW: <[http://www.fluke.com/fluke/czcs/termokamery/fluke-ti32-\(europe\).htm?pid=56185](http://www.fluke.com/fluke/czcs/termokamery/fluke-ti32-(europe).htm?pid=56185)>
- [21] *Mechanical seals.* [online]. EagleBurgmann. 2017. [cit 2017-05-2]. Dostupné z WWW: <[https://www.eagleburgmann.com/en/products?set\\_language=en](https://www.eagleburgmann.com/en/products?set_language=en)>
- [22] *Hornictví.info, Hornická skripta* [online]. [cit 2017-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.hornictvi.info/prirucka/zprac/koksovny/koks.htm>>
- [23] *Schéma produkce koksů.* [online]. OKK Koksovny a.s. 2017 [cit 2017-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.koksovny.cz/cz/schema-produkce-koksu>>
- [24] *Adash A4400 VA4 Pro* [on-line]. Adash. 2017. [cit. 2017-05-03]. Dostupné z WWW: <<http://adash.com/cs/prenosne-merici-systemy/a4400-va4-vibracni-analyzator>>.
- [25] NOVÁK, David . *Praktická aplikace vibrodiagnostických metod: Bakalářská práce.* Ostrava: katedra výrobních strojů a konstruování, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2015, 66s. vedoucí práce: Ing. Blata, J.