



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

# REENGINEERING SYSTÉMU ÚDRŽBY POHONŮ S PROMĚNLIVÝMI OTÁČKAMI S VYUŽITÍM MULTIPARAMETRICKÉ DIAGNOSTIKY

REENGINEERING OF THE MAINTENANCE SYSTEM OF VARIABLE SPEED DRIVES USING MULTI-PARAMETER DIAGNOSTICS

## DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Petr Nahodil

## ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.

BRNO 2022



## **ABSTRAKT**

Práce je zaměřena na multiparametrickou diagnostiku, která je dnes důležitou součástí údržby strojů a zařízení. Zabývá se využitím oborů jako je vibrodiagnostika, elektrodiagnostika, termodiagnostika, tribodiagnostika, montážní a optická měření i dalších diagnostických metod za účelem získání uceleného obrazu o sledovaných zařízeních. V práci je i rozebrán moderní postup využití multiparametrické diagnostiky pro zjištění příčin problémů a definování vhodných opatření v rámci údržby.

Disertační práce vychází konkrétně z implementace multiparametrické diagnostiky do provozuschopnosti pohonů s proměnlivými otáčkami a zdůvodňuje nutný reengineering systému údržby u těchto zařízení. Daný systém údržby si jednoznačně vyžádá změnu inspekční činnosti především po stránce kvalitativní, ale určitě také kvantitativní verifikaci a validaci naměřených dat in situ, adekvátní změnu zpracovávané dokumentace výrobcem, resp. dodavatelem, tak vedené u uživatele apod. Vlastní práce je postavena na základní myšlence, dokážu-li něco změřit a diagnostikovat, tak mohu prohlásit, že o tom něco znám.

## **ABSTRACT**

The work is focused on multiparametric diagnostics, which is an important part of machine and equipment maintenance today. It deals with the use of fields such as vibrodiagnostics, electrodiagnostics, thermodiagnosics, tribodiagnosics, assembly and optical measurements as well as other diagnostic methods in order to obtain a complete picture of the monitored devices. The work also discusses the modern procedure of using multiparametric diagnostics to identify the causes of problems and define appropriate measures in the framework of maintenance.

The dissertation is based specifically on the implementation of multiparametric diagnostics in the operability of drives with variable speeds and justifies the necessary reengineering of the maintenance system for these devices. The given maintenance system will clearly require a change in the inspection activity primarily in terms of quality, but certainly also quantitative verification and validation of the measured data in situ, an adequate change in the documentation processed by the manufacturer, or by the supplier, conducted by the user, etc. The work itself is based on the basic idea that if I can measure and diagnose something, then I can declare that I know something about it.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Multiparametrická diagnostika, diagnostika, vibrodiagnostika, elektrodiagnostika, termodiagnostika, tribodiagnostika, montážní a optická měření, analýza strojů a zařízení, údržba strojů a zařízení.

## **KEYWORDS**

Multiparametric diagnostics, diagnostics, vibrodiagnostics, electrodiagnostics, thermodiagnosics, tribodiagnosics, assembly and optical measurements, machine and device analysis, machine and device maintenance.



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

NAHODIL P. Reengineering systému údržby pohonů s proměnlivými otáčkami postavený na využití multiparametrické diagnostiky, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2022, 126 stran, Školitel: doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.



## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval svému školiteli doc. Ing. Milošovi Hammerovi, CSc. za poskytnuté rady a velkou trpělivost. Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří mi pomohli pronikat do tajů diagnostiky a rozvíjet tento nádherný obor technické diagnostiky v praxi.





# ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Miloše Hammera, CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 01.12.2022

.....

Ing. Petr Nahodil



## Obsah

<b>ABSTRAKT .....</b>	<b>3</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>3</b>
<b>KLÍČOVÁ SLOVA .....</b>	<b>3</b>
<b>KEYWORDS .....</b>	<b>3</b>
<b>BIBLIOGRAFICKÁ CITACE.....</b>	<b>5</b>
<b>PODĚKOVÁNÍ.....</b>	<b>7</b>
<b>ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ.....</b>	<b>9</b>
<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>13</b>
<b>2 MOTIVACE.....</b>	<b>14</b>
<b>3 NÁSTIN SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ DANÉ PROBLEMATIKY .....</b>	<b>15</b>
<b>4 STÁVAJÍCÍ POJETÍ TECHNICKÉ DIAGNOSTIKY.....</b>	<b>16</b>
4.1 Obecně k pojetí technické diagnostiky .....	19
4.1.1 Objekt technické diagnostiky .....	19
4.1.2 Diagnostické metody .....	21
4.1.3 Diagnostické prostředky .....	22
4.2 Základní rozbor vybraných metod technické diagnostiky .....	25
4.2.1 Vibrodiagnostika .....	25
4.2.2 Elektrodiagnostika .....	37
4.2.3 Termodiagnostika .....	41
4.2.4 Tribodiagnostika .....	43
4.2.5 Montážní a optická měření .....	44
4.2.6 Další metody diagnostiky .....	44
4.3 Způsoby provádění diagnostiky .....	45
4.3.1 ON-LINE multiparametrická diagnostika .....	45
4.3.2 OFF-LINE multiparametrická diagnostika.....	46
4.3.3 Multiparametrická diagnostika .....	47
<b>5 IDEOVÝ NÁVRH METODIKY MULTIPARAMETRICKÉ DIAGNOSTIKY.....</b>	<b>49</b>
5.1 Obecné pojednání o multiparametrickém přístupu .....	50
5.2 Postup při řešení s využitím multiparametrické diagnostiky .....	53
5.3 Technická a organizační příprava .....	54
5.4 Multiparametrická diagnostika .....	54
5.5 Multiparametrická analýza .....	55
5.6 Návrh vhodných opatření, realizace a verifikace.....	56
5.7 Dílčí závěry kapitoly .....	57
<b>6 MULTIPARAMETRICKÁ TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA A SYSTÉM ÚDRŽBY .....</b>	<b>58</b>
6.1 Základní systémy údržby .....	58
6.2 Komplexní produktivní údržba (TPM) .....	60
6.3 Multiparametrická diagnostika jako součást TPM .....	61
6.4 ON-LINE diagnostika v praxi.....	62

6.5	Dílčí závěr kapitoly .....	68
<b>7</b>	<b>CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE .....</b>	<b>72</b>
<b>8</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ A PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>73</b>
8.1	Multiparametrická diagnostika pohonů s frekvenčním měničem .....	73
8.1.1	Návrh metod MPD .....	80
8.1.2	Navržená opatření .....	86
8.1.3	Shrnutí průběhu řešení diagnostického případu .....	87
8.1.4	Závěr daného problému.....	91
8.2	Dieselektrické soustrojí .....	92
8.2.1	Výchozí premisy dieselektrických pohonů .....	93
8.2.2	Návrh MPD pro řešení problému .....	93
8.2.3	Analýza poškozeného ložiska .....	97
8.2.4	Analýza problému .....	99
8.2.5	Návrh na opatření .....	102
8.2.6	Shrnutí průběhu řešení diagnostického případu .....	103
8.2.7	Závěr daného případu.....	106
8.3	Soustrojí čerpadla s proměnlivými otáčkami .....	107
8.3.1	Návrh postupu měření .....	107
8.3.2	Zjištění příčiny vibrací .....	114
8.3.3	Průběh řešení diagnostického případu.....	115
8.3.4	Závěr daného problému.....	117
<b>9</b>	<b>ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ A DISKUZE.....</b>	<b>118</b>
9.1	Způsoby provádění diagnostiky a využití multiparametrické diagnostiky.....	119
<b>10</b>	<b>CELKOVÝ ZÁVĚR A PŘÍNOSY PRO VĚDU, PRAXI A PEDAGOGIKU</b>	<b>120</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>123</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM ZKRATEK A POJMŮ .....</b>	<b>125</b>
12.1	Seznam zkratk a pojmů.....	125

# 1 ÚVOD

V posledních letech se čím dál častěji setkáváme s termíny digitalizace, Průmysl 4.0, chytrá města nebo internet věcí. Toto všechno souvisí s rozvojem technologií a zařízení, která jsou schopna zaznamenávat a přenášet mezi sebou velké množství dat, tato data analyzovat a pomocí nich optimalizovat procesy ve výrobě, v dopravě či jiných oborech. V těchto nových přístupech hraje velkou roli i multiparametrická diagnostika, ke které je nutné přistupovat komplexně, zvláště pak, jedná-li se o různá zařízení s elektrickými pohony s frekvenčními měniči či zařízení, kde se plynule mění otáčky a stroj pracuje v různých režimech. Realizace těchto nových moderních postupů a mechanismů dnes pomalu dostává reálné kontury, i když stále jde o složitý a dlouhodobý proces. Inženýry, vývojáře, programátory i politiky čeká ještě mnoho technologických výzev, které povedou k zavádění Průmyslu 4.0 do praxe. Pokud se zaměříme na průmysl, který má historicky v České republice důležitou roli, aplikace nových myšlenek a inovací by mohla tuto pozici ještě posílit, zlepšit produktivitu a také konkurenceschopnost firem, které chtějí být na technologické špičce.

Základním stavebním prvkem ve všech průmyslových odvětvích, jako je energetika, výrobní průmysl, zemědělství, odpadové hospodářství, doprava apod., jsou elektrické a regulované pohony strojů a zařízení. Tyto pohony se skládají zejména z elektromotorů a frekvenčních měničů, generátorů, převodovek apod.

První elektrické pohony se objevily již v průběhu 19. století a od té doby prošly výrazným vývojem. Díky počítačovým simulacím, novým materiálům a zpřesnění výrobních procesů došlo v poslední době k významné optimalizaci mechanické konstrukce elektrických strojů. Současně je kladen důraz i na zvýšení účinnosti a snížení ztrát v pohonech. K tomu v posledních desetiletích výrazně přispěl nástup frekvenčních měničů, což přineslo lepší možnosti v regulaci výkonu zařízení a nové možnosti v oblasti řízení těchto pohonů. Účinnosti rotujících strojů dnes běžně dosahují přes 90 % a s frekvenčním měničem ještě více. Přes veškerý výzkum a vývoj však stále přetrvávají poruchy a problémy u těchto strojů. Jsou to přitom pohony, které často představují nepostradatelný článek složitého výrobního, zpracovatelského nebo těžebního řetězce. Další skupinou s regulovatelnými pohony jsou například trakční vozidla, kde vzhledem k omezeným rozměrům a hmotnosti vozidla je třeba dostat do určitých zástavbových rozměrů požadovaný výkon. To lze provést za předpokladu, že stroje budou pracovat s vyšší výstupní elektrickou frekvencí. Dalším úskalím u těchto strojů je dynamika sil působící na tyto stroje. Tyto stroje většinou nejsou stacionární, kde působí jen síly od vlastní rotace rotoru, případně elektromagnetické síly, ale k těmto silám je nutné připočítat i síly od pohybu a dynamického chování vozidla.

I přes prudký rozvoj oboru a v rámci iniciativy Průmyslu 4.0 není doposud vytvořen erudovaný přístup k hodnocení vibrací pohonů s proměnlivými otáčkami. Systémový přístup multiparametrické diagnostiky s využitím oborů jako je vibrodiagnostika, elektrodiagnostika, tribodiagnostika, termodiagnostika, parametrická diagnostika tlaků, průtoků, hluku, diagnostika deformací apod. vede k lepšímu pochopení funkce stroje, k popsání příčin problému a k návrhu vhodných opatření pro eliminaci zjištěných příčin. Neexistuje ucelená metodika, která by posuzovala a zahrnovala všechny diagnostické obory a zároveň brala v úvahu konstrukci a funkci strojů a zařízení. Rovněž není provedeno systematické začlenění získaných výsledků obecně do systému údržby firmy se sériovou a nesériovou výrobou.

Všechny uvedené obrázky a grafy až na výjimky, které jsou označeny, jsou dílem autora.

## 2 MOTIVACE

Technická diagnostika by obecně, bez ohledu na konkrétní parametr, měla být nedílnou součástí každé údržby strojů. Cílem údržby je minimalizace odstávek strojů, zajištění maximální životnosti, provozuschopnosti, provozní spolehlivosti, výrobní produktivity strojů a také jejich bezpečnosti provozu, tzn. jak bezpečnosti technických systémů (BTS), tak bezpečnosti práce (BOZP).

Pro správné zhodnocení celkového stavu však v některých případech nelze spoléhat pouze na výsledky měření vibrací. V praxi je často nutné sledovat i jiné parametry a provádět různé druhy diagnostik jako je například elektrodiagnostika pro analýzu napájecí sítě a dalších elektrických parametrů, dále pak tribodiagnostika pro analýzu maziv, termodiagnostika, jejímž úkolem je odhalovat zejména místa s nestandardní teplotou či teplotní anomálie. Ultrazvuková diagnostika využívající ultrazvuk generovaný suchým třením a v neposlední řadě montážní diagnostika, která má za úkol měření geometrických odchylek zařízení.

Mimo tyto diagnostické obory existuje spousta dalších podpůrných diagnostických metod, které mohou přispět k objasnění příčin poruch diagnostikovaného zařízení, tzn. proaktivnost jejich údržby jako procesně technické činnosti. Jedná se zejména o měření hodnot teplot určitých vnitřních částí strojů, měření tlaku a průtoku apod. Nedílnou součástí obecné diagnostiky je i po demontážní analýza poškozených dílů, kdy například u ložisek lze z charakteru poškození ložiska určit příčinu poškození.

Každá z uvedených metod může svým dílem přispět k odhalení potenciální poruchy stroje. Vzájemně se doplňují a poskytují tak diagnostikovi komplexnější a jistější obraz při rozhodování o příčině poruchy a stanovit vhodná opatření pro zabránění opakování stejné závady na stroji. Toto je ideální stav, který však v praxi nebývá často splněn. Překážkou mohou být omezené prostředky, chybějící vědomosti technika nebo nedostatek času, tzn. snaha o rychlou identifikaci problému.

Měnič frekvence nemusí být jen frekvenční měnič, který mění síťovou frekvenci 50 Hz na novou požadovanou frekvenci, abychom mohli měnit otáčky asynchronních motorů. Ale měnič frekvence může být i dieselgenerátor, který pracuje v určitém rozsahu otáček. Tyto stroje jsou používány například pro pohon lokomotiv, různých velkých nákladních vozidel, kde přenos výkonu je pomocí elektromechanického přenosu na trakční motory.

Dále se může jednat o zařízení kde, otáčky zařízení nejsou stabilní, ale jsou plynule měněny mechanickými členy, jako jsou například variátory, hydrospojky, nebo jsou poháněny turbínami, kde otáčky například čerpadla jsou regulovány tlakem páry do turbíny.

Všechna tato zařízení mají z hlediska diagnostiky své specifické vlastnosti a je třeba k diagnostice strojů s proměnlivými otáčkami a frekvencemi přistupovat individuálně.

Je velký rozdíl provádět diagnostiku u strojů, které lze považovat za sériovou výrobu, tzn., že výsledky diagnostiky lze porovnávat mezi sebou. I v těchto případech se může jednat o

dva rozdílné přístupy multiparametrické diagnostiky. V jednom případě provádíme diagnostiku u stejných strojů v rámci firmy (obráběcí stroje, linky apod.), kde diagnostický objekt je stejný nebo velice podobný a naměřené výsledky můžeme mezi sebou porovnávat. V druhém případě se jedná o vyráběný produkt, kde v rámci výstupních zkoušek provádíme multiparametrickou diagnostiku a pro jednotlivé diagnostické parametry máme nastavené určité hodnotící limity.

Jiným odvětvím diagnostiky je nesériová diagnostika strojů a zařízení, u které nemáme možnost naměřené výsledky porovnávat se stejným či podobným strojem. Zde musíme na základě znalostí o konstrukci stroje a zjištěných výsledků všech analýz hledat řešení, které má za úkol odstranit příčiny problémů a zajistit funkci stroje, pro kterou byl stroj určen.

Ze stručně nastíněného je jednoznačně zřejmé, jaká osobní motivace mě vedla ke zpracování předmětné disertační práce, a to především o multiparametrickém přístupu k diagnostice a hledání nápravných opatření. Uvedené podporuje i neuvedený základní fakt, celý svůj aktivní pracovní život pracuji v dané problematice.

### 3 NÁSTIN SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ DANÉ PROBLEMATIKY

Řešenou problematikou se zabývá ve světě mnoho studií a publikací. Z důvodu stručnosti nejsou tyto v předkládané disertační práci rozebírány. Jsou zmíněny jen některé literární prameny v práci použité.

V České republice se zabýval problematikou vzniku hřídelových napětí doc. Chmelík z VŠB – TU Ostrava ve své publikaci „Ložiskové proudy v elektrických strojích“ [4] nebo doc. Bartoš z AV ČR, v článku „Ložiskové proudy u asynchronních motorů napájených z napěťových polovodičových střídačů“. Článek se zabývá vznikem jak cirkulačních proudů, tak proudů kapacitních a působení těchto proudů na systém zařízení FM-AM (zkratky jsou uvedeny v seznamu zkratk, symbolů a pojmů).

Obdobnou problematikou se zabývají i zahraniční články, kde např. Toni Heino v publikaci [23] „Ložiskové proudy a jejich zmírnění v indukčních motorech řízených frekvenčním měničem“ se zabývá vlivy nežádoucích proudů na ložiska asynchronního motoru, jejich poškozením, diagnostikou a eliminací vlivu kapacitních proudů.

V současné době je OFF-LINE diagnostika pohonů řešena odděleně. Vibrodiagnostici měří a vyhodnocují vibrace strojů a jejich příčiny z hlediska mechanického buzení, elektrodiagnostici měří a analyzují napájecí síť, tribodiagnostici analyzují stav maziv a opotřebení dílů na základě kontaminace olejů a jen málo diagnostiků řeší problematiku komplexně. Při diagnostice pohonů napájených frekvenčním měničem je nutné ne jenom provádět měření a toto měření analyzovat, ale je nutné zařízení posuzovat jak z hlediska instalace motoru, použití vhodných vodičů a jejich správné zapojení, tak analyzovat proudy v zemních a propojovacích vodičích a konstrukcích. Následně je třeba si udělat ze všech získaných informací co nejvěrnější diagnostický obraz o technickém stavu zařízení.

Dnešní ON-LINE diagnostika je především zaměřena na monitorování technického stavu zařízení (condition monitoring), a to především na sledování trendů hodnot rychlosti a zrychlení vibrací. Některé systémy sledují i další parametry, jako jsou například teploty, tlaky,

otáčky, výkony apod. Vyhodnocení měřených dat je pak na základě nastavení limitních hodnot pro varovné a alarmové stavy, případně pro stavy pro vypnutí a odstavení zařízení. Modernější systémy umí pracovat i s analýzou dat, kdy je možné například pomocí metody demodulace a FFT analýzy určit a sledovat stav poškození ložisek na určitých frekvencích a poškození konkrétních ložisek pak vyhodnocovat. Tyto systémy se nejčastěji používají v elektrárnách a v provozech, kde je více podobných zařízení a měřená data jsou sbírána a vyhodnocována v centrálním diagnostickém systému, resp. použitím rozvíjejících se metod ON-LINE diagnostiky.

U pohonů s frekvenčním měničem se velmi často opakovaně vyskytují závady na rotujících částech strojů a zařízení, které vznikají v důsledku průchodu elektrického proudu přes ložiska, spojky, ozubená kola převodovek apod. Náklady na jednu opravu zařízení, například výměny ložisek elektromotoru o výkonu 1 MW, velmi často dosahují sta tisícových hodnot. Mimo tyto náklady je nutné počítat i s náklady na demontáž a montáž motoru na pozici stroje, kdy je nutné pro tyto práce použít autojeřáb, náklady na dopravu a také finanční ztráty, kdy opravované zařízení nelze provozovat i několik týdnů. Celkové náklady na opravu a finanční ztrátu často dosahují i několik milionů korun. V současné době tedy i reengineering systému údržby pohonů s proměnlivými otáčkami postavený na využití multiparametrické diagnostiky by byl přínosný a je potřebný.

## 4 STÁVAJÍCÍ POJETÍ TECHNICKÉ DIAGNOSTIKY

Přístup k diagnostice je v dnešní době strukturován podle jednotlivých zaměření a diagnostických oborů. Je to dáno především tím, že existuje celá řada diagnostických metod, jako je vibrodiagnostika, elektrodiagnostika, termodiagnostika, tribodiagnostika, nedestruktivní metody diagnostiky apod., řeší daný problém v rámci své specializace. Pak je velmi složité tyto poznatky vzájemně z jednotlivých diagnostických pohledů vyhodnotit a stanovit relevantní závěr. Nejsou zde postihnuté vzájemné vazby a vzájemně ovlivňující faktory, které mohou lépe popsat příčiny a vlastnosti daného zařízení.

Ve své praxi se setkávám s mnoha diagnostickými zprávami různých firem a specialistů, kteří řeší daný problém určitého stroje. Tyto zprávy obvykle postihují problém jen v rámci dané specializace, a to ještě nejčastěji jen v jeden daný časový okamžik z právě provedeného měření. Jednotlivé nálezy obvykle nehodnotí dynamické chování strojů, nezohledňují vzájemné ovlivňování sledovaných i nesledovaných parametrů a jsou strohým konstatováním okamžitého stavu stroje z pohledu jedné specializace. Obvyklým výsledkem diagnostiky je provedení nápravného opatření, jako je například výměna ložiska, oprava stroje apod.

Dalším stávajícím způsobem je pojetí ON-LINE a OFF-LINE diagnostiky. V mnoha firmách je užití této diagnostiky z důvodu sledování trendů provozních parametrů, kdy pro jednotlivé parametry jsou nastaveny limitní hodnoty pro varování a vypnutí stroje. V případě, když dojde k překročení daného limitního bodu, ne vždy je využito trendování měřených hodnot, řeší se pouze příčina zvýšení provozních parametrů a provozní oprava, v menší míře pak už jen prvotní příčiny poškození jednotlivých dílů případně nevhodnost údržby stroje. Ve většině případů je tedy z pohledu nasazení technické diagnostiky řešena detekce, lokalizace a specifikace sledovaného objektu a pouze jednou diagnostickou metodou, s danou vypovídací jistotou, ne predikce dalšího vývoje včetně návrhu na nutná opatření k zajištění



provozní spolehlivostí a bezpečností. K zajištění těchto skutečností slouží mimo jiné i prediktivní údržba.

U tak složitých zařízení jako jsou pohony, je nutné k diagnostice přistupovat zahrnutím všech dostupných metod a specializací, které pomohou osvětlit chování strojů z hlediska vzájemného ovlivnění různých parametrů a dále pak jejich změn v určitém časovém úseku. Abychom mohli tyto stroje takto posuzovat a diagnostikovat, je nutné využít metody multiparametrické diagnostiky.

Výsledkem multiparametrické diagnostiky nemusí být jenom návrh nápravných opatření pro odstranění příčin problémů, ale také návrh doporučených opatření k provádění a zlepšení údržby, návrhy pro zlepšení funkce stroje například zavedením ON-LINE diagnostiky a její správného hodnocení apod.

Z popsaného je vidět, že multiparametrická diagnostika je velice široká specializace, zahrnující několik diagnostických oborů, která je nedílnou součástí moderního pojetí údržby strojů s možností využití moderních metod digitalizace a hodnocení strojů.



## 4.1 Obecně k pojetí technické diagnostiky

Pro technickou praxi je důležitá technická diagnostika (dále v této práci používán termín diagnostika). V současné době ji lze považovat za rozsáhlou vědní disciplínu, která prodělala značný vývoj. Nyní se na diagnostiku nazírá úplně jinak, než tomu bylo např. před 40 lety. Slovo diagnostika pochází z řeckého diagnosis [7], které znamená určení nebo rozpoznání. V ČSN ISO 13372 je diagnostika definována jako ověřování symptomů a syndromů pro určení podstaty závad (je stav stroje, který nastane, když se jedna z jeho komponent nebo sestav zhoršuje nebo vykazuje abnormální chování, které může vést k poruše) nebo poruch (ukončení schopnosti stroje konat svoji funkci, pro kterou byl určen). V literatuře [1], [2] je diagnostika vždy chápána jako věda, která je zaměřena na zjištění technického stavu objektu. Realizace diagnostiky vždy vychází z vytvoření diagnostického systému, který se skládá z objektu diagnostiky, diagnostických prostředků souborů metod a metodik a osoby diagnostika. Základním současným úkolem diagnostiky není měřit, ale ohodnotit stav sledovaného zařízení. Postupem času se diagnostika začala rozdělovat dle různých hledisek, avšak důležité je dělení podle příslušné diagnostické veličiny.

V následující části budou popsány jednotlivé části diagnostického systému.

### 4.1.1 Objekt technické diagnostiky

Většinou se jedná pro potřeby této disertační práce o pohony vyšších výkonů, jako jsou například ventilátory, dieselgenerátory, čerpadla apod. - obr. 1. U malých strojů, kde cena výměny celého zařízení není velká, se diagnostika provádí v případech, kdy výpadek byt' malého levného zařízení může v praxi znamenat velké výrobní ztráty či riziko dalších souvisejících nákladů.



Obr. 1) Příklady pohonů s proměnlivými otáčkami (zkratový generátor, ventilátor, čerpadlo s hydrospojku a turbínou a dielelektrické soustrojí)

- **Pohony s frekvenčním měničem**

Pohony s frekvenčním měničem mají v průmyslu obecně široké použití. Nejčastěji se využívají k regulaci otáček nebo v případě těžkých rozběhů pro rozběh zařízení s velkým záběrným momentem. V minulosti se v průmyslových aplikacích používaly pro těžké rozběhy pouze motory s přepínáním hvězda/trojúhelník, kroužkové motory pro rozběhy se starty pomocí rotorového spouštěče, motory s přepínatelným vinutím a další způsoby rozběhů asynchronních pohonů. Pokud jsme potřebovali regulovat výkon a otáčky, tak pro tyto aplikace se nejčastěji používaly stejnosměrné motory s komutátorem, kde regulací velikostí napětí bylo možné plynule regulovat otáčky zařízení a tím i výkon stroje. Příkladem využití plynulé regulace pohonu může být například papírenský stroj, kdy pro najíždění papírenské linky potřebujeme regulovat otáčky na minimum pro zavedení pásu vyráběného papíru, případně regulovat otáčky při navíjení papíru na navíjecí buben, kdy s přibývajícím průměrem cívky navíjecí otáčky bubnu postupně klesají.

S nasazením polovodičové techniky v elektrických pohonech však vznikají nové problémy, které jsme u klasických pohonů neznali. Jedná se zde hlavně o vlivy tzv. kapacitních a hřídelových proudů, které mají nepříznivý vliv na funkci ložisek zařízení a ozubení převodovek u těchto pohonů.

- **Pohony s proměnlivými otáčkami**

Jedná se o pohony ryze s mechanickým měničem otáček. Jako měnič frekvence otáčení zde může být použit variátor případně hydrodynamická převodovka. Dále lze otáčky plynule měnit pohony, jako jsou například hydro-motor, různý typ turbín apod. U těchto pohonů se vyskytují zpravidla závady, které jsou způsobeny rezonancí určitých strojních prvků, případně závadami, které mohou být spojeny s provozem stroje a při určitých provozních režimech. Příkladem takového zařízení může být napájecí čerpadlo, kde výkon tohoto čerpadla se řídí proměnlivými otáčkami, změnou otáček turbíny, případně použitím hydrodynamické převodovky mezi motorem a čerpadlem.

- **Dieseλεκτρické pohony**

Tyto dieselektrické pohony se používají nejčastěji pro pohon vozidel, jako jsou hybridní automobily, dieselektrické lokomotivy nebo velké nákladní automobily, kde přenos výkonu na kola je pomocí elektromotorů. Zde se výrobci snaží z důvodu omezených zástavbových rozměrů vměstnat co největší výkon do malého prostoru. Proto jsou pro výrobu elektrické energie využívány vícepólové generátory, které mají výstupní napěťovou frekvenci v závislosti na otáčkách motoru i několik stovek Hz. Tato energie se pak usměrní a je pomocí měničů a asynchronních pohonných motorů, případně stejnosměrných (DC) motorů, převáděna na kola vozidla nebo do akumulátorů pro její uchování. S vysokou sítíovou frekvencí jsou pak spojeny problémy, podobně jako je tomu u pohonů s frekvenčními měniči.

Jiným principem přenosu výkonu na nápravu vozidla může být přenos pomocí hydraulického čerpadla a hydraulického motoru.

Všechna tato zařízení mají podle své funkce a principu přenosu a regulace výkonu odlišné přístupy k řešení diagnostických problémů, které je nutno zohlednit při volbě diagnostického přístupu.

#### 4.1.2 Diagnostické metody

V dnešních provozech, kde se používají stále složitější a cenově dražší stroje a zařízení, je využití technické diagnostiky úzce svázané se spolehlivostí těchto strojů ve výrobě. Technická diagnostika neslouží jen k analýze zjištění příčin poruch, k monitorování stavu strojů, ale je z hlediska zajištění bezpečné a spolehlivé výroby je vhodným nástrojem v řadě podniků při zavádění adekvátních systémů údržby. V případě, že se vyskytne na sledovaném zařízení závada, slouží k jejímu odhalení.

Pro zjištění poruchy je nutné k diagnostice přistupovat komplexně s využitím multiparametrických metod. Nestačí jen měřit a vyhodnocovat měření dle příslušných norem pro tato zařízení, ale je nutné na základě znalostí z různých oborů diagnostiky, znalostí principů, funkce a konstrukce strojních zařízení stanovit proces vzniku poruchy a navrhnout opatření k odstranění poruchovosti daného stroje, případně predikovat zbytkovou životnost.

Diagnostiku můžeme rozdělit z hlediska přístupu na subjektivní diagnostiku a objektivní diagnostiku [2]: kde subjektivní diagnostika posuzuje stav stroje pouze lidskými smysly jako je čich, hmat, sluch, zrak apod., což nejčastěji známe pod termínem vizuální inspekce. Stroj hodnotíme například sledováním teploty pohmatem, případně přitlačením prstu na chvějící se zařízení. Dále lze pozorovat různé zvukové projevy, ze kterých můžeme usuzovat na zdroj problémů. Vždy se jedná ale o subjektivní názor na stav zařízení bez hmatatelných výsledků měření. Oproti tomu objektivní diagnostika provádí určitá specifická měření, a z výsledků těchto měření posuzujeme technický, resp. provozní stav sledovaného zařízení. Může se jednat o ON-LINE nebo OFF-LINE parametrickou diagnostiku, která slouží k hlídání provozních parametrů stroje během jeho provozu, nebo diagnostiku, která má za úkol najít zdroj problémů vedoucí k návrhu vhodných opatření.

Jak je popsáno v [1], diagnostika je sledování a vyhodnocování stavu stroje za provozu. Diagnostiku lze také popsat jako monitorování, kde na stroji v definovaných místech, ze kterých jsou pomocí snímačů v pravidelných intervalech snímány a zaznamenávány měřené veličiny.

**Detekce** – měřené veličiny jsou jednoduchým způsobem vyhodnocovány a pro jednotlivé druhy veličiny jsou zde nastaveny poplachové meze tzv. ALARM.

**Analýzy** (vlastní diagnostika) – měřené hodnoty jsou pomocí diagnostických metod analyzovány a vyhodnocovány, což umožňuje jasnější pohled na funkci stroje a příčinu problému.

V mnoha případech je dnes prováděna diagnostika způsobem, který řeší vyhodnocení naměřených parametrů ve srovnání s určitými nastavenými a doporučenými hodnotami, respektive normou jako je například soubor harmonizovaných norem ČSN ISO 10816 resp. ČSN ISO 20816 s příslušnou částí dle druhu stroje, nebo různé podnikové normy, jako jsou podnikové normy elektrárenských podniků, případně limity, resp. mezní stavy dané výrobcem zařízení. V závislosti na těchto hodnotách je měřený stroj vyhovující nebo nevyhovující.

V současné době se diagnostické obory spíše úzce specializují na vibrodiagnostiku, elektrodiagnostiku apod. Tyto diagnostické obory většinou řeší problém v rámci svého oboru s tím, že ne vždy jsou schopny postihnout vlivy z jiných diagnostických oborů. Multiparametrický přístup k diagnostice se stále vyvíjí, postihuje všechny obory diagnostiky a především vazby mezi jednotlivými obory.

**Provozní parametry** – využívají se všechny dostupné parametry stroje za jeho provozu, které umožní hodnotit a sledovat parametry stroje při jeho činnosti.

Jak je popsáno v [1], diagnostikou rozumíme sledování a vyhodnocení stavu stroje za provozu, tzv. bezdemontážní technickou diagnostiku.

Na základě měřené fyzikální (diagnostické) veličiny rozeznáváme technické diagnostiky:

**Vibrodiagnostika** – se zabývá měřením a analýzou kmitání (vibrací) u rotujících i nerotujících zařízení, kde pomocí různých metod lze zjistit poměrně velké množství rozvíjejících se závad a určit jejich příčiny.

**Elektrodiagnostika** – zabývá se posouzením stavu elektrických částí strojů, napájecí sítě. Elektrodiagnostiku lze provádět jak za provozu stroje (analýza proudu a napětí), tak za klidu a na zajištěném stroji (izolační odpory, posouzení stavu vinutí apod.).

**Tribodiagnostika** – se zabývá především sledováním stavu maziv a analýzou maziv, obsahu nečistot a otěrových částic. Získává informace z maziva o stavu maziva a stavu stroje.

**Termodiagnostika** – pomocí dotykového a bezdotykového měření teplot lze zjistit místa s odlišnou teplotou a následně usuzovat na zdroje zvýšené teploty a jejich příčiny. Mluví-li se o termografii, tak myslíme teplotní obraz.

**Ultrazvuková diagnostika** – používá se jak v mechanické diagnostice (generování ultrazvuku), například ze suchého a smíšeného tření, netěsnosti tlakových obvodů, tak v elektrodiagnostice (elektrické výboje), takže mluvíme o tzv. aktivní ultrazvukové diagnostice. Pasivní ultrazvuková diagnostika se používá v nedestruktivní diagnostice (defektoskopii) k zjištění vnitřních a povrchových závad materiálu.

**Další metody a analýzy** – diagnostika průtoku, tlaku, deformací atd. a dále např. analýzy: citlivostní analýza, statistické metody, potom také využití umělé inteligence, fuzzy systémů apod.

#### 4.1.3 Diagnostické prostředky

Pro vibrodiagnostiku mohou být využívány frekvenční analyzátory vibrací např. od firmy Adash pro analýzu vibrací a proudu, od SKF a dalších nespecifikovaných firem, případně od firmy Dewetron pro analýzu sítě. K uvedeným prostředkům je k dispozici i softwarová podpora pro analýzu a vyhodnocení naměřených dat. Pro měření například teploty můžeme využít termokameru nebo bezdotykový (pyrometr) či kontaktní teploměr - obr. 3.

Mimo tato zařízení existuje na trhu celá řada diagnostických přístrojů jedno či vícekanálových, se kterými lze snímat a nahrávat měřená data a následně vyhodnocovat. Některé přístroje umí zpracovávat signál i z více kanálů pomocí zadaných matematických

vztahů, které jsou implementovány přímo v přístroji nebo lze je definovat v rámci zpracování dat. Příkladem takového vyhodnocení měření je měření příkonu elektromotoru, kde měříme na jednom kanálu proud a ve druhém napětí. Výpočtem z těchto měřených veličin a z fázového posunu jsme schopni určit činný, jalový a zdánlivý příkon elektromotoru a také účinník  $\cos \phi$ , případně další parametry jako například frekvenci a jejich harmonické složky, harmonické zkreslení (THD faktor) nebo zobrazit časový průběh napětí a proudu.

- **Vibrodiagnostika, elektrodiagnostika**



Obr. 2) Analyzátor vibrací VA4 a SW DDS od f. Adash a analyzátor sítě Sirius a SW X2 od f. Dewetron

Pro potřeby této disertační práce byly použity přístroje od firmy Adash, čtyř kanálový analyzátor VA4 s vyhodnocovacím programem DDS. Tento přístroj byl použit pro analýzu vibrací a proudu. Vibrace byly snímány snímači zrychlení s citlivostí  $100 \text{ mV} \cdot \text{g}^{-1}$  Proudů byly měřeny klešťovými převodníky proudu a rogowského cívkami s příslušným převodovým poměrem. Pro analýzu napětí, proudu a výkonu byl použit přístroj Sirius od f. Dewetron se softwarem X2 – obr. 2.

- **Termodiagnostika**



Obr. 3) Termokamera, bezdotykový teploměr, dotykový teploměr

Pro snímání teplot strojů a ložisek byla použita po potřeby této disertační práce termokamera FLIR E5x, bezdotykový teploměr a teplotní čidla PT 100 – obr. 3.

- **Nutné podmínky realizace technické diagnostiky**

Aby bylo možné provést diagnostické měření a vyhodnocení zodpovědně, je nutné, aby provádějící osoba byla dostatečně kvalifikovaná v daném oboru, měla příslušné oprávnění, zvláště pak pokud provádí měření na vyhrazených elektrických zařízeních, tzn. že musí mít vzdělání v elektrotechnice a mít osvědčení dle vyhlášky č. 50/1978 Sb. o elektrotechnické způsobilosti dle §6 pro samostatnou činnost dle velikosti napětí. Od 1.7.2022 byla však vyhláška č.50/1978Sb. zrušena a je nahrazena zákonem č. 250/2021Sb. a konkrétně Nařízením vlády (NV) č. 194/2022Sb., dle kterého diagnostik musí mít odbornou způsobilost minimálně podle §6 – Elektrotechnik (původní kvalifikace je však platná 3 roky od data vydání). Dále je nutné, aby diagnostik, pokud provádí diagnostickou činnost mimo areál svého zaměstnavatele a případně i v rámci svého zaměstnavatele byl kvalifikovaný dle souboru norem ČSN ISO 18436 „Monitorování a diagnostika strojů – Požadavky na kvalifikaci a posuzování pracovníků“. Aby mohl pracovník tuto kvalifikaci získat, musí absolvovat předepsaná školení a mít dostatečnou praxi. Pro získání profesního certifikátu, který se uděluje na určitou dobu platnosti, je třeba složit zkoušky u akreditovaného certifikačního orgánu (například v ČR – DTO CZ, který zajišťuje certifikační zkoušky pro Asociaci technických diagnostiků České republiky). Nezbytným předpokladem diagnostika je znalost funkce a konstrukce diagnostikovaného zařízení a jeho částí.



## 4.2 Základní rozbor vybraných metod technické diagnostiky

### 4.2.1 Vibrodiagnostika

#### 4.2.1.1 Měřený signál

- Popis časového signálu

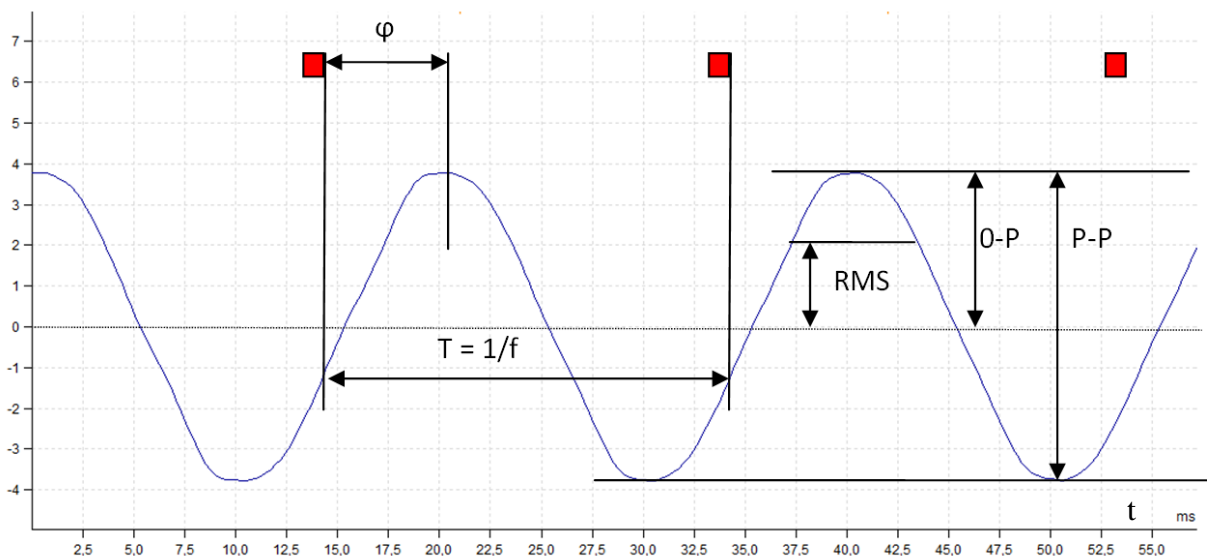
Jak je uvedeno v [1], časový signál je charakterizován jako popis kmitání hmotného bodu v závislosti na čase. Tento časový signál lze charakterizovat jako deterministický (popsatelný), stochastický (nepopsatelný, nepředvídatelný) nebo přechodový [6].

- Střídavé časové signály

Jakýkoliv časový signál můžeme definovat určitými hodnotami, které lze z těchto „střídavých“ signálů vyčíst [1] - obr. 4.

Harmonický signál je určen vztahem (význam symbolů vyplývá z obrázku)

$$(1) x(t) = x_a \cdot \sin(\Omega t - \varphi)$$



Obr. 4) Základní hodnoty časového signálu

**Efektivní hodnota signálu**  $x_{RMS}$  – hodnota, která se v technické praxi užívá nejčastěji. U střídavých signálů má lepší vypovídající hodnotu než hodnota střední (AVG).

U harmonického signálu ji lze vyjádřit také vztahem  $x_{ef} = 0,707 \cdot x_a = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot x_a$

$$(2) x_{ef} = x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt}$$

$T$  – [s] časový úsek časového signálu nemusí být jedna perioda

**Střední hodnota signálu  $x_{AVG}$** – hodnota, která se v technické praxi užívá méně často. U harmonického signálu ji lze vyjádřit také vztahem:  $x_{stř} = 0,637 \cdot x_a$

$$(3) \quad x_{stř} = x_{AVG} = \frac{1}{T} \int_0^T x \, dt$$

**Špičková hodnota  $x_a$ ,  $x_{0-P}$  - Peak** nebo-li špičková hodnota amplitudy mezi neutrální nulovou hodnotou (0) a maximální hodnotou amplitudy.

**Hodnota  $x_{P-P}$  - Peak to Peak** nebo-li špička - špička hodnota mezi minimální a maximální hodnotou amplitudy.

$$(4) \quad X_{P-P} = 2 \cdot x_{0-P}$$

**Perioda  $T$**  – doba trvání jednoho cyklu. [s]

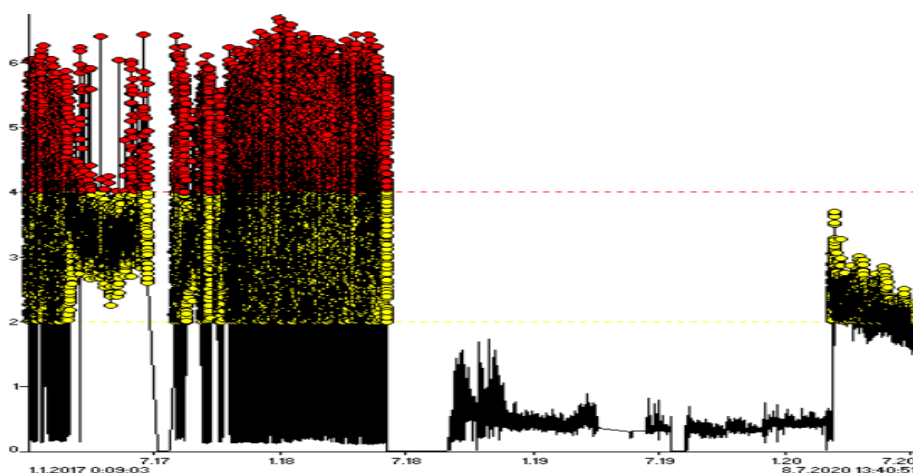
**Frekvence  $f$** – počet cyklů za jednu sekundu.

$$(5) \quad f = \frac{1}{T} \quad [\text{Hz}]$$

**Fázový posun  $\varphi$**  – posun mezi dvěma harmonickými signály (měřeno mezi špičkovými hodnotami) nebo časový rozdíl mezi trigovací značkou na hřídeli a maximální hodnotou amplitudy na odfiltrované otáčkové frekvenci.

#### ○ Stejnoseměrné časové signály

Tyto signály můžeme popsat hodnotou, která se mění v závislosti na čase. Jedná se o skalární hodnoty například teploty, tlaku, průtoku, výšky hladiny, hodnot vibrací, proudu, napětí apod. Tyto hodnoty zaznamenáváme v určitých časových intervalech a sledujeme jejich vývoj - obr. 5.



Obr. 5) Příklad trendu hodnot sledované hodnoty (data z vlastního měření)

Tyto hodnoty vyhodnocujeme většinou tak, že pro jednotlivé veličiny nastavujeme varovné a havarijní hodnoty těchto parametrů. V některých případech při překročení havarijních hodnot lze nouzově automaticky odstavit sledované zařízení.

#### 4.2.1.2 Diagnostické metody

Vibrační diagnostika nebo také vibrodiagnostika patří mezi bezdemontážní metody technické diagnostiky. Jak vyplývá z názvu, základním parametrem pro měření a následné vyhodnocení jsou vibrace (kmitání) strojů. Získané informace slouží ke zjištění technického a provozního stavu vyšetřovaných soustav. Lze tak předejít možnému poškození ložisek, rotoru, spojkou připojenému zařízení a dalším. Vibrační diagnostika patří mezi nejrozšířenější typy diagnostik u rotujících zařízení, kdy na jejím základě se dá odhalit mnoho závad i jiného charakteru, než jsou závady mechanického původu. Podrobné metody vibrační diagnostiky jsou popsány v [1], [6], [10] a [11].

Pomocí vibrodiagnostiky vyhodnocujeme kmitání strojů a zařízení. Vibrodiagnostika patří mezi jeden z nejrozšířenějších a nejpoužívanějších diagnostických oborů (metod). Pomocí vhodných snímačů (zrychlení, rychlosti nebo výchylky vibrací) jsme schopni měřit jak absolutní vibrace (rychlost a zrychlení vibrací), tak relativní vibrace, většinou se jedná o hřídelové vibrace (výchylka vibrací).

Využití hodnot výchylky, rychlosti a zrychlení v určitých frekvenčních intervalech dává ucelenější obraz o chování stroje.

**Výchylka  $x(t)$**  - užívaná jednotka [ $\mu\text{m}$ ] – zpravidla tuto hodnotu měříme snímači na měření výchylky (proximity). Výchylkou zpravidla měříme tzv. relativní vibrace, tzn. že vibrace například hřídele, jsou vztaženy k jiné části stroje, v tomto případě ložiskovému tělesu stroje a jsou využívány například pro orbitální analýzu používanou u kluzných ložisek.

$$(6) x(t) = x_a \cdot \sin(\omega t - \varphi)$$

$$(7)$$

$$(8) \omega = 2\pi f$$

kde	$x_a$ - amplituda harmonického kmitání	[mm]
	$\omega$ - vlastní kruhová frekvence	[rad.s <sup>-1</sup> ]
	$\varphi$ - fázový posun	[rad]
	$f$ -frekvence	[Hz]

**Rychlost vibrací  $v(t)$**  – užívaná jednotka [ $\text{mm.s}^{-1}$ ] – tuto hodnotu měříme velometry, ale zpravidla ji dostaneme integrací naměřených hodnot zrychlení.

$$(9) \quad v(t) = \int a(t) dt = \frac{dx}{dt} = X \omega \cos(\omega t)$$

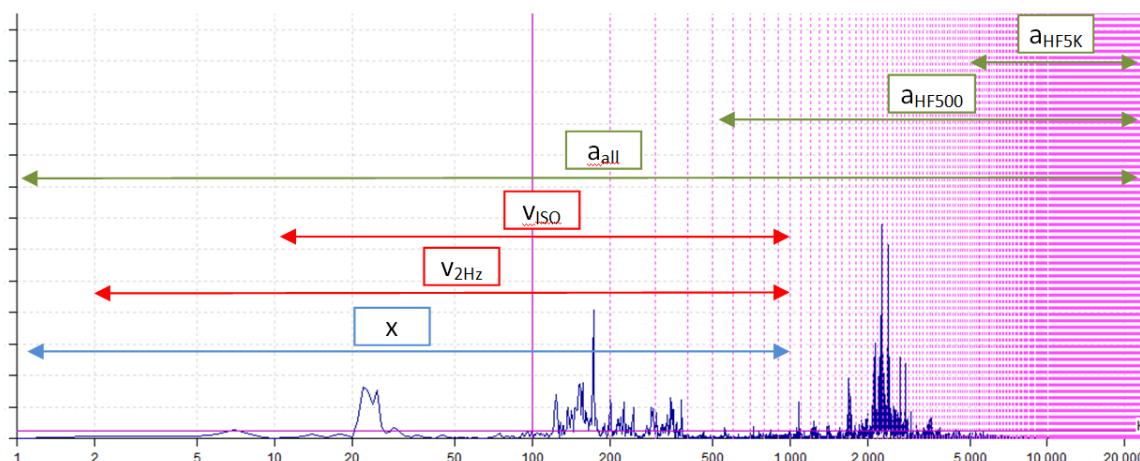
(10)

kde  $v(t)$ - rychlost vibrací [mm.s<sup>-1</sup>]  
 $a(t)$ - zrychlení vibrací [mm.s<sup>-2</sup>]  
 $X$  - amplituda harmonického kmitání [mm]  
 $\omega$  - vlastní kruhová frekvence [rad.s<sup>-1</sup>]

**Zrychlení vibrací  $a(t)$**  – užívaná jednotka [mm.s<sup>-2</sup>, g] – tuto hodnotu měříme akcelerometry, které nejčastěji bývají založeny na piezoelektrickém principu. Povrchový elektrický náboj, který vzniká při deformaci piezoelektrického krystalu je v zesilovači zesílen a převeden na elektrické napětí, které je přímo úměrné měřenému zrychlení.

$$(11) \quad a(t) = \frac{dv}{dt} = -X \cdot \omega^2 \sin(\omega t)$$

Pro analýzu vibrací výše jmenované veličiny měříme a vyhodnocujeme v následujících frekvenčních pásmech - obr. 6. Výhytku vibrací měříme obvykle v nízkých frekvenčních pásmech, řádově do 10x harmonického násobku otáčení hřídele, obvykle do frekvence 1 kHz. Se vzrůstající hodnotou frekvence klesá význam hodnoty výhytky vibrací. Rychlost vibrací je zpravidla odvozena od doporučení a stanovení limitů podle norem. Rozsah pro měření rychlosti vibrací je obvykle stanoven pro měření rychlosti od 10 do 1000 Hz, avšak u strojů jejíž otáčky jsou nižší než 600 ot.min<sup>-1</sup> je nutné spodní hranici snížit na 2 Hz, což normy pro hodnocení vibrací připouští. Sledovat hodnoty vibrací nad 1000 Hz lze při zobrazení spekter rychlosti, obvykle do maximální hodnoty 2 kHz.



Obr. 6) Standardní frekvenční pásma výchylky, rychlosti a zrychlení vibrací

kde

- $x$  – výchylka ve frekvenčním rozsahu 0 až 1000 Hz
- $v_{2Hz}$  – rychlost vibrací ve frekvenčním rozsahu 2 až 1000 Hz
- $v_{ISO}$  – rychlost vibrací ve frekvenčním rozsahu 10 až 1000 Hz (dle norem ISO)

- a all** – zrychlení vibrací ve frekvenčním rozsahu 0 až 25 000 Hz
- a HF500** – zrychlení vibrací ve frekvenčním rozsahu 500 až 25 000 Hz
- a HF5K** – zrychlení vibrací ve frekvenčním rozsahu 5000 až 25 000 Hz

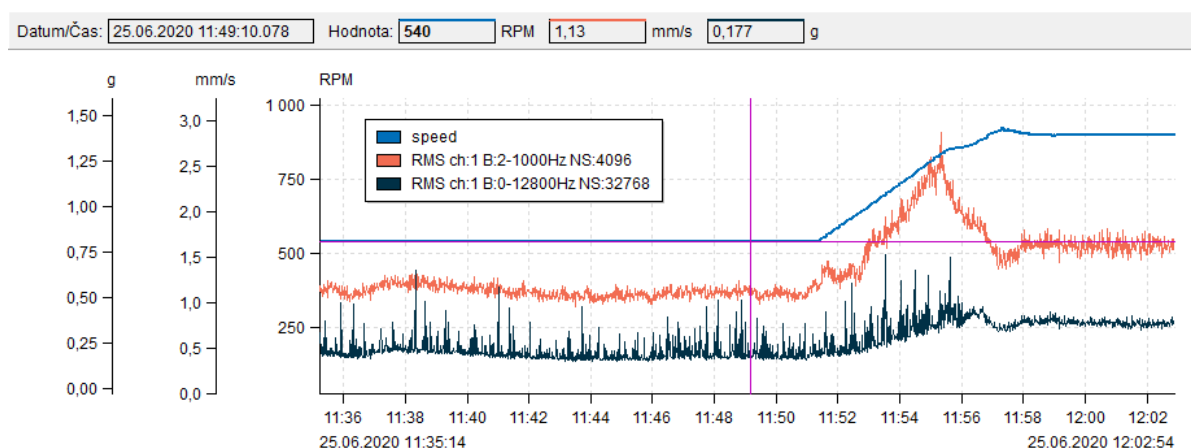
Zrychlení vibrací většinou pokrývá celou frekvenční oblast, je pouze závislá od charakteristiky snímače, která je obvykle do 25 kHz. Význam zrychlení s narůstající frekvencí nabývá na významu.

Pro vyhodnocení zrychlení jsou zavedené určité frekvenční rozsahy s horní propustí 500 a 5000 Hz, které se využívají především při metodě analýzy pomocí obálkové metody hodnocení stavu valivých ložisek.

Pro detailnější analýzu, kde hledáme děje v určitém frekvenčním pásmu, lze s výhodou použít užší frekvenční pásma pro vyfiltrované časové signály, případně pro širokopásmové hodnoty. S výhodou lze frekvenční filtry použít například při sledování konkrétní poruchy stroje, jako je například sledování vad ložiska, kde jsme schopni pomocí různých filtrů sledovat vývoj poškození například vnějšího kroužku ložiska.

#### 4.2.1.3 Hodnocení naměřených vibrací vybraných metod vibrodiagnostiky

- **Širokopásmové hodnoty** - obr. 7, měření širokopásmových hodnot výchylky, rychlosti a zrychlení v různých frekvenčních rozsazích dává představu o druhu velikosti vibrací. Podle nastaveného frekvenčního pásma a sledované hodnoty lze odvodit, zda se jedná například o problémy s ložisky či o problémy jiného mechanického charakteru. Na tyto širokopásmové hodnoty se přímo odvolávají různé normy, které hodnotí stav konkrétních zařízení dle těchto hodnot v určitém frekvenčním pásmu.

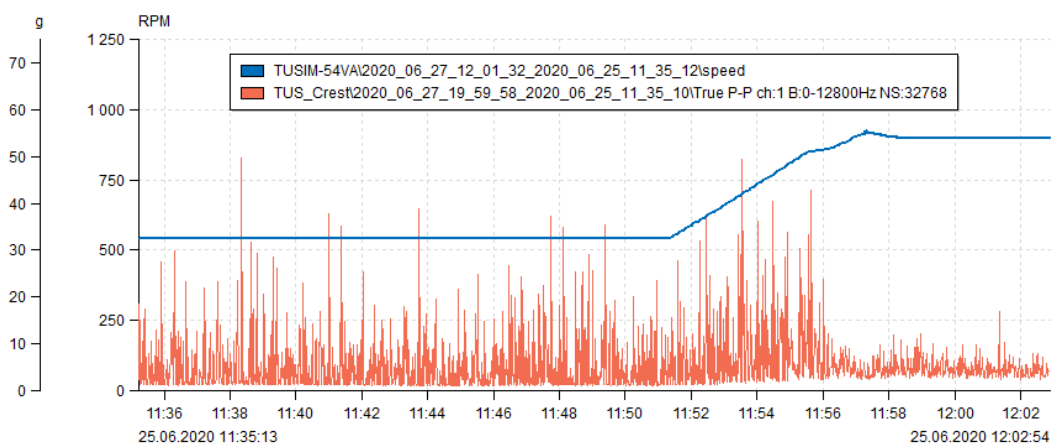


Obr. 7) Trend širokopásmových hodnot a otáček

Dle těchto širokopásmových hodnot můžeme sledovat vývoj a trendy jednotlivých parametrů vibrací, mít pro ně nastavené varovné hladiny pro alarmové a havarijní stavy, případně na základě překročení stanovených hodnot provést automatické odstavení zařízení.

- **Crest faktor** - obr. 8, poměr mezi špičkovou (Peak) hodnotou a efektivní (RMS) hodnotou. Hodnota crest faktoru u harmonického sinusového signálu je cca 1,4. Při malých hodnotách CF do (crest faktor do hodnoty 3 až 4) se jedná převážně o převládající sinusový charakter vibrací, při vyšších hodnotách se jedná o impulzní, respektive o rázy ve vibracích.

$$(12) \quad CF = \frac{x_{0-P}}{x_{ef}} \quad [ \cdot ]$$

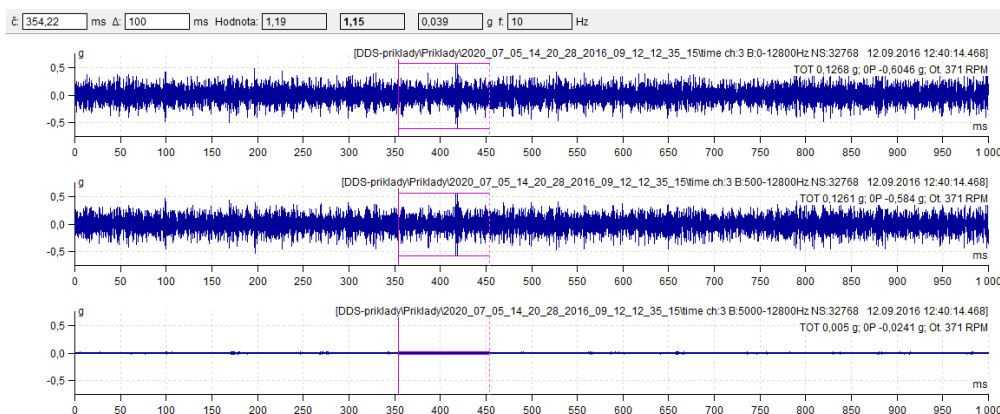


Obr. 8) Trend crest faktoru

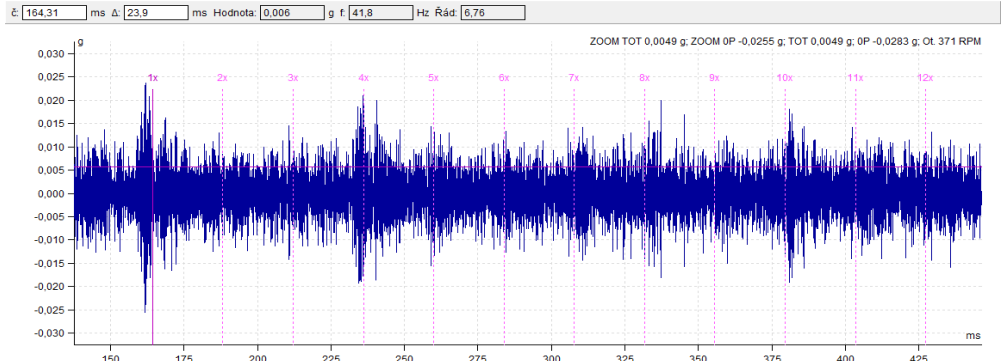
Z grafu je zřejmé, že v nízkých otáčkách dochází k velkým rázům na zařízení.

- **Analýza časového signálu** – analýza časového signálu se používá při řešení pomaloběžných strojů nebo tam, kde očekáváme krátkodobé děje, rázy apod.

Pro analýzy časového signálu používáme různé frekvenční filtry - obr. 9 a obr. 10, kdy můžeme pak lépe vystihnout děje, které na zařízení hledáme. Tato metoda je nepostradatelná u pomaloběžných strojů, ale i jako doplňková metoda při analýze běžných strojů a zařízení.

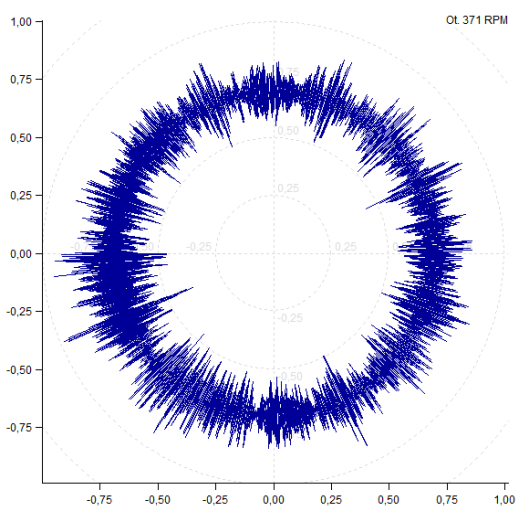


Obr. 9) Časový signál bez filtru, s filtrem 500 Hz a s filtrem 5kHz



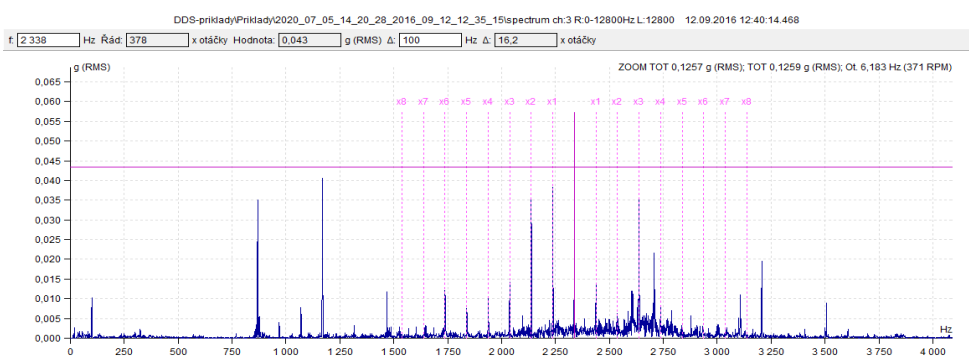
Obr. 10) Zvětšený časový signál s filtrem 5kHz

Časový diagram lze zobrazit i v kruhovém pohledu - obr. 11, kdy časový signál je zobrazen v rozsahu jedné otáčky hřídele.



Obr. 11) Kruhové zobrazení časového signálu

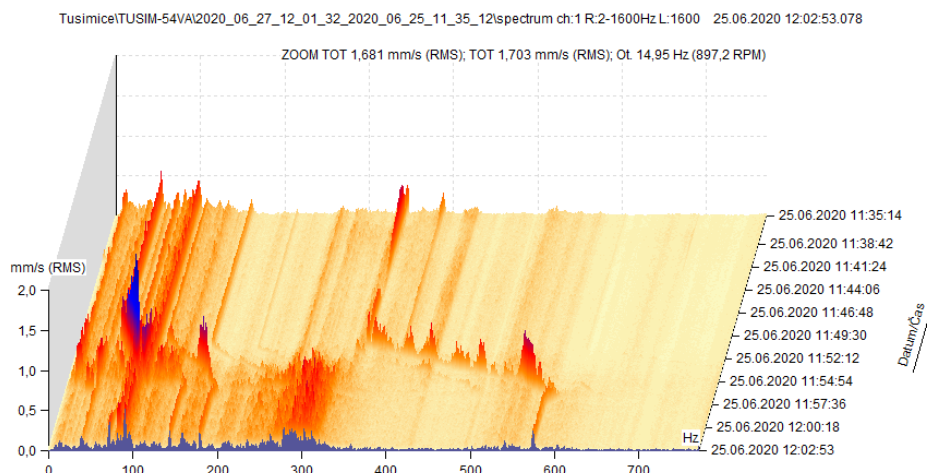
**FFT – rychlá Fourierova transformace** – tato metoda se používá tam, kde potřebujeme rozložit časový signál na jednotlivé harmonické signály (frekvence), výsledkem této transformace je frekvenční spektrum - obr. 12. Pomocí této metody vyhledáváme budící frekvence jednotlivých frekvencí, hledáme jejich harmonické násobky případně jejich postranní pásma. Na základě jednoduchých výpočtů jsme schopni potom určit zdroj problémových vibrací.



Obr. 12) Spektrum s vyšetřovacím kurzorem postranního pásma

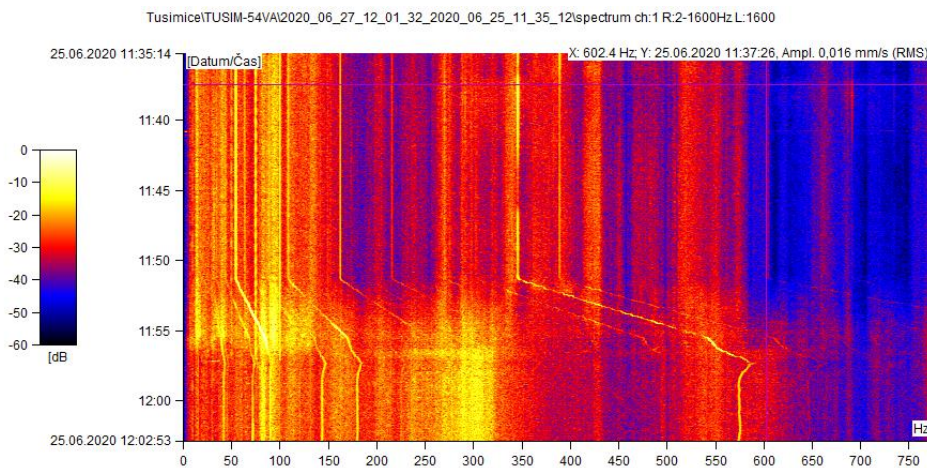
- Vykreslení spekter lze provést několika způsoby

**Kaskáda spektra** – 3osé zobrazení spektra, kde osa x je frekvence, osa y amplituda a osa z čas - obr. 13.



Obr. 13) Kaskáda spektra (dynamické zobrazení spektra v čase)

**Spektrogram** – plošné zobrazení spektra, kde osu x tvoří frekvence spektra, osu y čas a amplituda je znázorněna barevnou škálou v závislosti na dB zobrazení - obr.14.

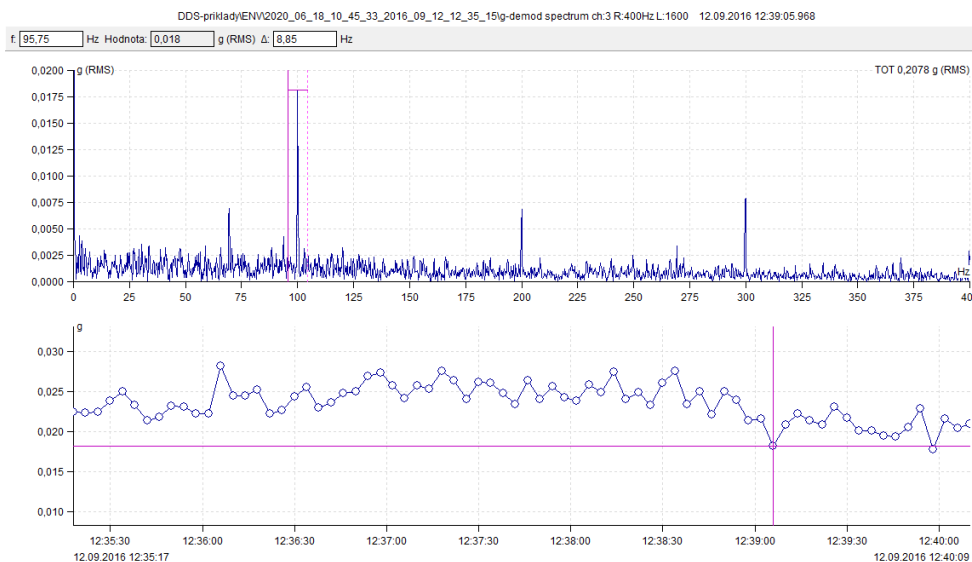


Obr. 14) Decibelové zobrazení spektra ve spektrogramu

Pro hledání budících frekvencí ve spektru je nutné znát konstrukci stroje, a to zejména typ a výrobce použitých ložisek, počet zubů převodových kol převodovky, počet lopatek čerpadel a ventilátorů, počet drážek statoru a rotoru elektromotoru atd. Pomocí jednoduchých výpočtů jsme schopni v závislosti na otáčkách konkrétní osy rotace určit budící frekvence a v návaznosti na určité provozní stavy definovat zdroj problému.



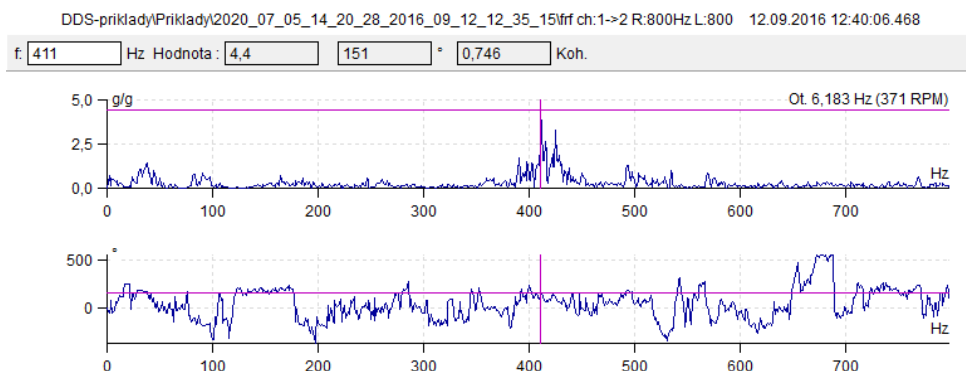
Dnešní metody vyšetřování spektra vibrací umožňují vyšetřovat vibrace v úzkém frekvenčním pásmu. Následující obrázek zobrazuje trend úzkopásmové hodnoty rychlosti vibrací - obr.15. Výhodou tohoto zobrazení a úzkopásmových trendů je, že při ON-LINE diagnostice jsme schopni nastavit hodnotu varovných a havarijních alarmů přímo na určité frekvence nebo na násobky otáček u regulovaných pohonů.



Obr. 15) Úzkopásmový trend hodnot vibrací 100 +/- 5 Hz

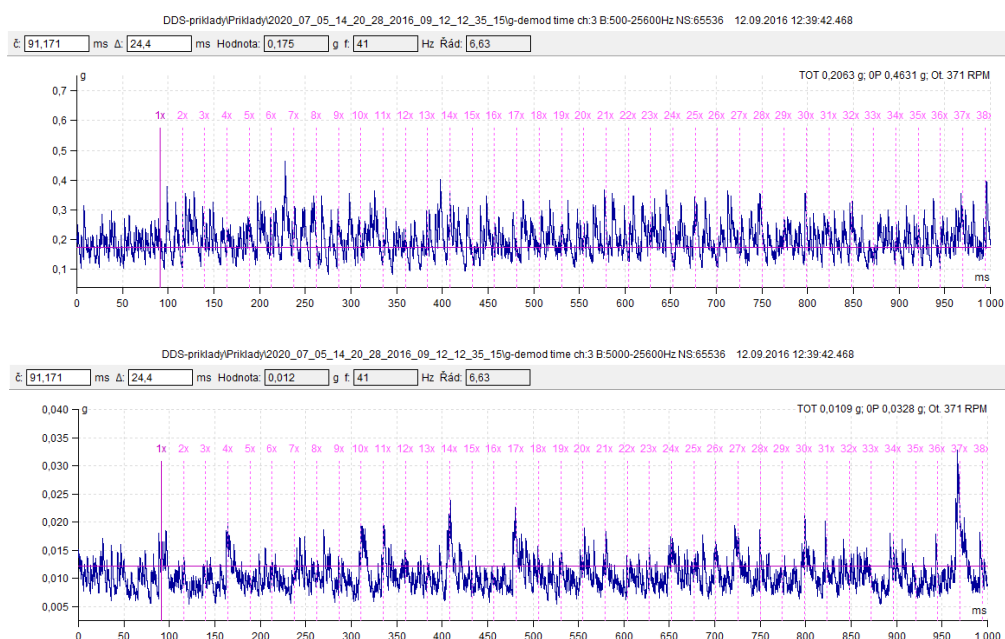
Toto hodnocení spekter vibrací lze s výhodou použít u sledování amplitud poruchových frekvencí ložisek ve spektru obálky zrychlení, amplitud otáčkové, zubové, lopatkové, frekvence v rychlosti vibrací apod.

- **Frekvenční odezva** – používáme pro zjištění amplitudového a fázového rozdílu mezi dvěma měřícími body na určitých frekvencích – obr. 16. Tato metoda se využívá například při vizualizaci provozních tvarů kmitů.



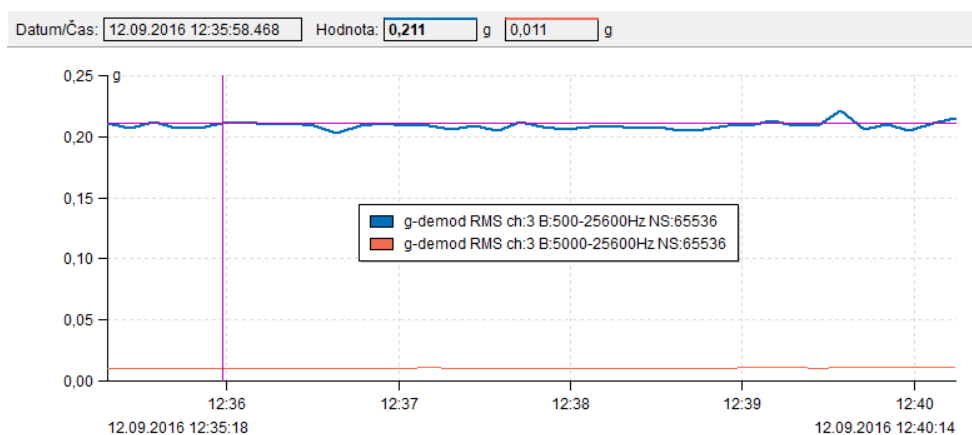
Obr. 16) Frekvenční odezva g/g se zobrazením fáze

- **Obálka zrychlení v časové oblasti** – touto metodou jsme schopni analyzovat drobné rázové děje, ze kterých můžeme zjistit opakovací frekvence těchto drobných rázů – obr. 17. Tato metoda se využívá například při analýze poškození valivých ložisek.



Obr. 17) Časový signál obálky zrychlení s filtrem 0,5 a 5 kHz

- **Širokopásmová hodnota obálky zrychlení** – je pro hodnocení stavu ložisek velice důležitá. Lze si ji představit jako stejnosměrnou (DC) složku – polohu demodulovaného časového signálu obálky zrychlení – obr. 18.



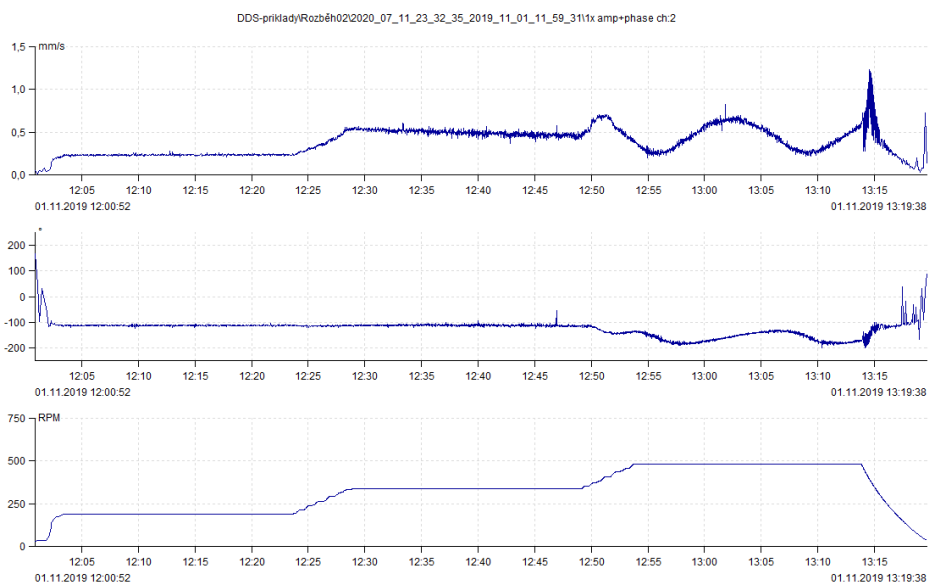
Obr. 18) Multigraf hodnot obálky zrychlení s filtrem 0,5 a 5 kHz

- Spektrum obálky zrychlení** – pro spektrum obálky zrychlení používáme filtry 500 Hz a 5000 Hz – obr. 19, což znamená, že pro hledání opakovacích frekvencí vyfiltrujeme nižší frekvence a v takto vyfiltrovaném časovém signálu hledáme pomocí Fourierovy transformace opakovací jevy (rázy).



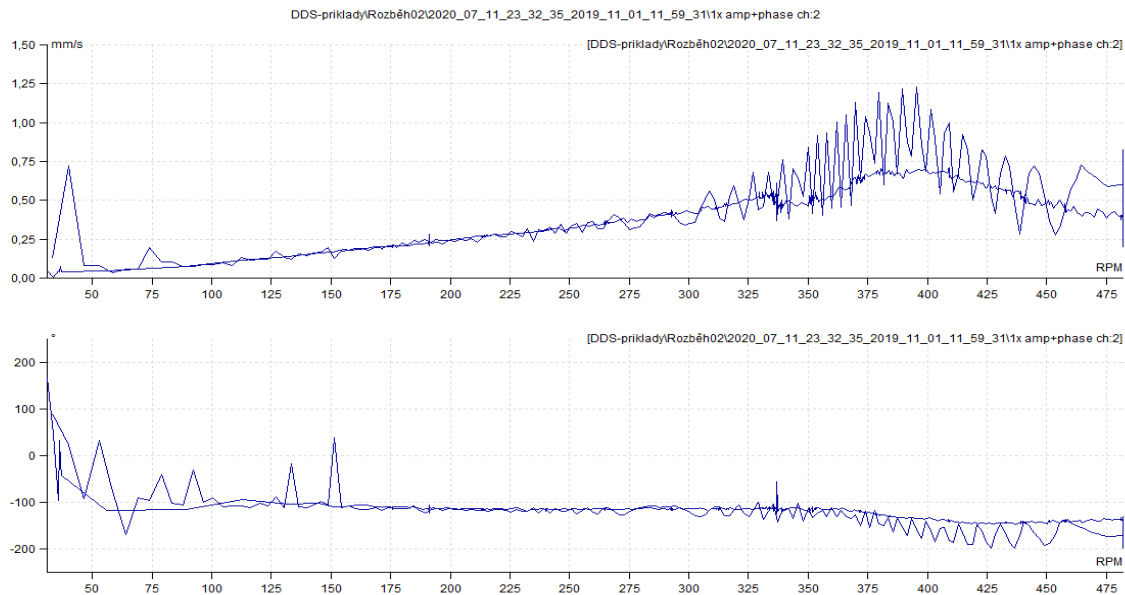
Obr. 19) Spektrum obálky zrychlení s filtrem 0,5 a 5 kHz

- Měření amplitudy a fáze na otáčkové frekvenci** – obr. 20, touto metodou jsme schopni zjistit děje, které mají souvislost přímo s otáčkami stroje jako je např. rezonance, nevyvaha apod.



Obr. 20) Filtrovaná hodnota rychlosti vibrací na otáčkové frekvenci se zobrazením fáze a velikosti otáček

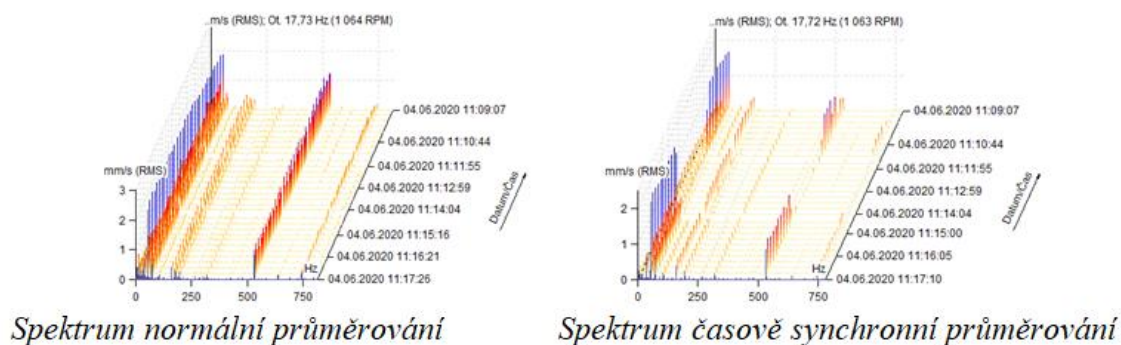
Pomocí různého zobrazení lze vyšetřovat vibrace na otáčkové frekvenci – obr. 21, například při rozběhu zařízení s elektromotorem a následně při doběhu zařízení s vypnutým motorem. Při zobrazení grafu, kde v ose  $x$  místo časové osy je osa otáčková, zjistíme vliv napájení elektromotoru na zařízení.



Obr. 21) Filtrovaná hodnota rychlosti vibrací na otáčkové frekvenci v závislosti na otáčkách stroje

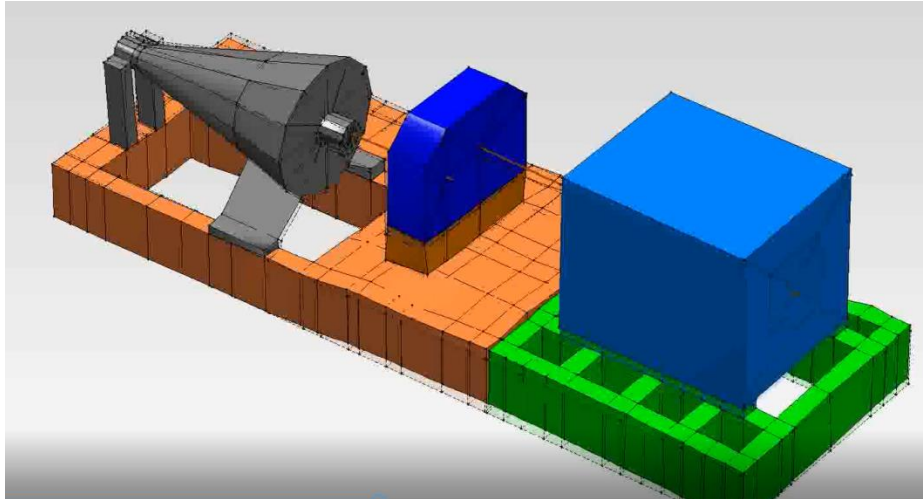
Na výše uvedeném obrázku je znázorněn chod zařízení v rozsahu měřených otáček při napájeném elektromotoru a nestabilní doběh zařízení, kdy zařízení dobíhalo vlastní setrvačností. Při doběhu jsou znatelné značné výkyvy rychlosti vibrací i kolísání fáze na otáčkové frekvenci.

- **Časově synchronní průměrování** – touto metodou jsme schopni odfiltrovat vibrace, které nejsou buzeny měřenou osou (snímáním otáček a z měřené hřídele a průměrováním časového signálu s trigrem otáček, odfiltrujeme frekvence, které jsou buzeny okolím sledované osy rotace) – obr. 22.



Obr. 22) Kaskáda spektra vibrací s časově synchronním průměrováním

- Provozní tvary kmitů (PTK)** – využití této metody je výhodné tam, kde potřebujeme vizualizovat vibrační chování stroje. Měření provádíme do vytvořeného 3D drátového modelu – obr. 23, kde každý uzel (měřící bod) měříme ve třech osách, kde odečítáme amplitudu a fázi na určité frekvenci vůči referenčnímu místu. Tuto metodu používáme tam, kde máme ustálené měřicí podmínky bez přechodových stavů během měření.



Obr. 23) Drátový model pro animaci provozních tvarů kmitů

#### 4.2.2 Elektrodiagnostika

Tato metoda analyzuje elektrické veličiny a pomáhá vytvářet představu o dějích, které probíhají v elektrických strojích a mohou být příčinou nestandardního chování stroje. Náplní elektrodiagnostiky pohonů je například sledování statických hodnot, jako jsou ohmické odpory, izolační stavy, polarizace izolací apod. Pomocí těchto statických metod obvykle hodnotíme stav izolací vinutí.

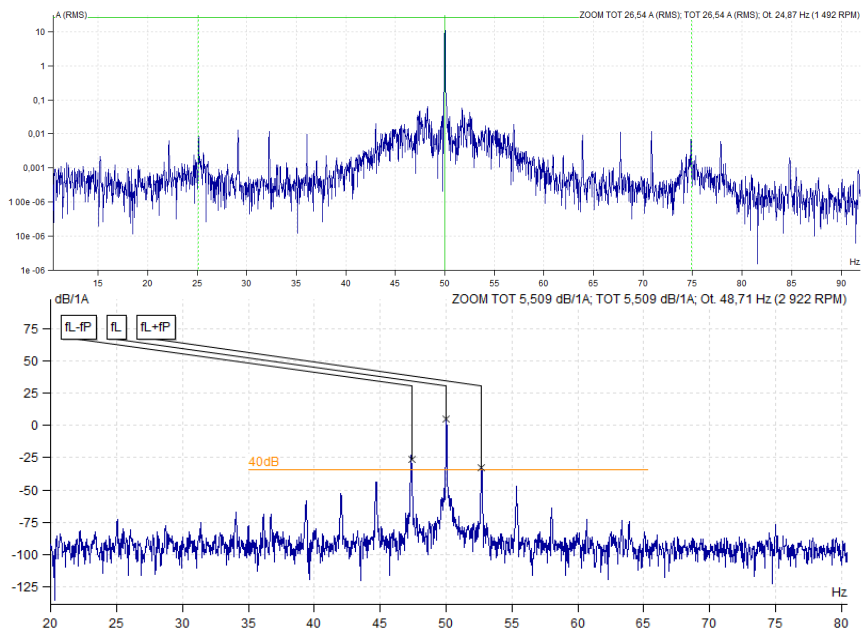
Další oblastí je dynamická elektrodiagnostika. Tato diagnostika představuje již složitější část tohoto oboru, kdy analyzujeme vlastnosti napájecí sítě, sledujeme různé nesymetrie napětí a proudů, analyzují se různé přechodové děje, jako je například rozběh zařízení apod. Dále velmi důležitou částí elektrodiagnostiky je sledování velikosti kapacitních a bludných proudů a napětí v neživých částech zařízení např. hřídelová napětí, parazitní ložiskové a kapacitní proudy, proudy v PE vodičích a na okolních neživých konstrukcích.

Elektrodiagnostika patří dnes již mezi rozšířené metody. Pomocí elektrodiagnostiky lze analyzovat nejenom elektrické parametry stroje, ale pomocí analýzy proudu lze detekovat i mechanické vlastnosti, sledovat změny vibrací apod. Rozlišujeme diagnostiku dynamickou a statickou.

- DYNAMICKÁ DIAGNOSTIKA**

Dynamická diagnostika se provádí za chodu stroje, kde většinou analyzujeme proud a napětí, případně jiné elektrické parametry.

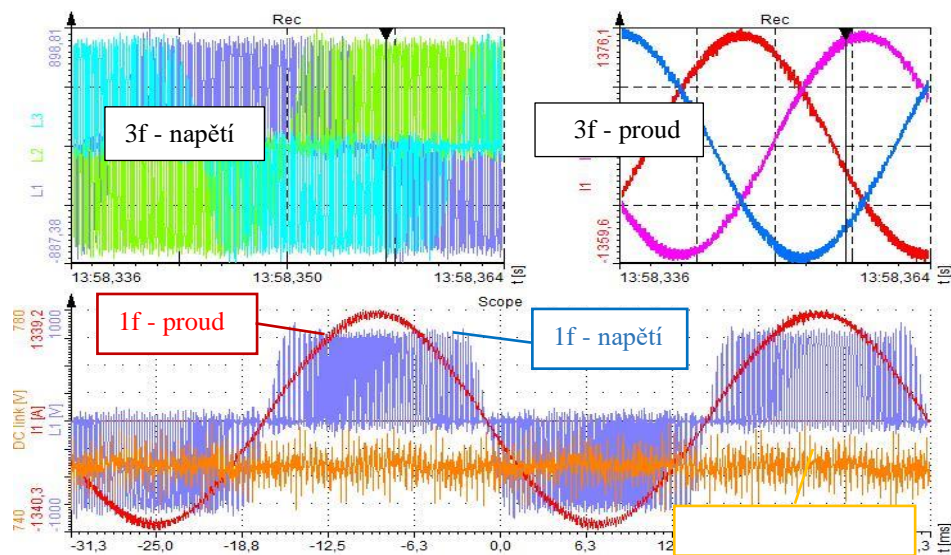
**Analýza proudu** – pomocí analýzy proudu lze diagnostikovat rotory asynchronních motoru – obr. 24, rozběhy strojních zařízení, mechanické problémy strojních zařízení apod.



Obr. 24) Spektrum analýzy napájecího proudu motoru

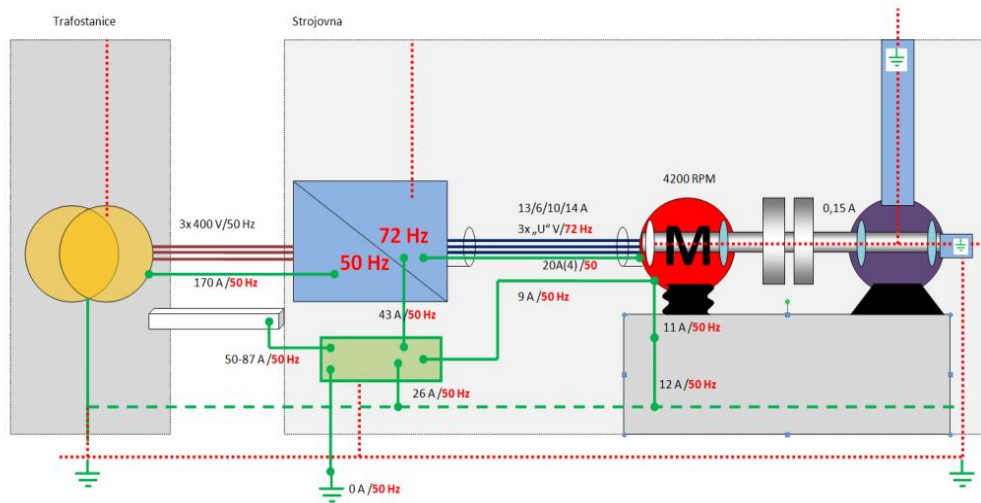
**Analýza napětí** – diagnostikujeme parametry napájecí sítě, poklesy napětí v síti, THD faktor, harmonické složky v síti, symetrii napětí ve fázích, součtové napětí u třífázového napájení (CMV) apod.

**Analýza proudu a napětí** – obr. 25, pomocí této analýzy můžeme analyzovat příkon strojního zařízení, přetížení, ztráty, účinník, účinnost apod.



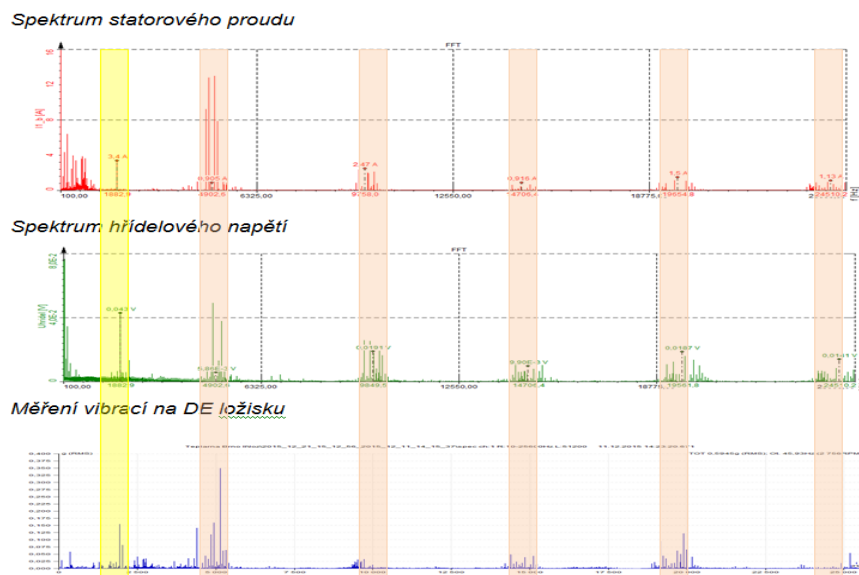
Obr. 25) Zobrazení napájecích proudů a napětí motoru

**Měření zemních proudů a jejich analýza** - pomocí této metody měříme proudy, které tečou zemními vodiči, a jejich uzavírání v neživých částech - obr. 26.



Obr. 26) Schéma vyšetřování zemních proudů

**Měření a analýza hřídelového napětí** – obr. 27, měření napětí na hřídeli, které generují nesymetrie v elektrických strojích.



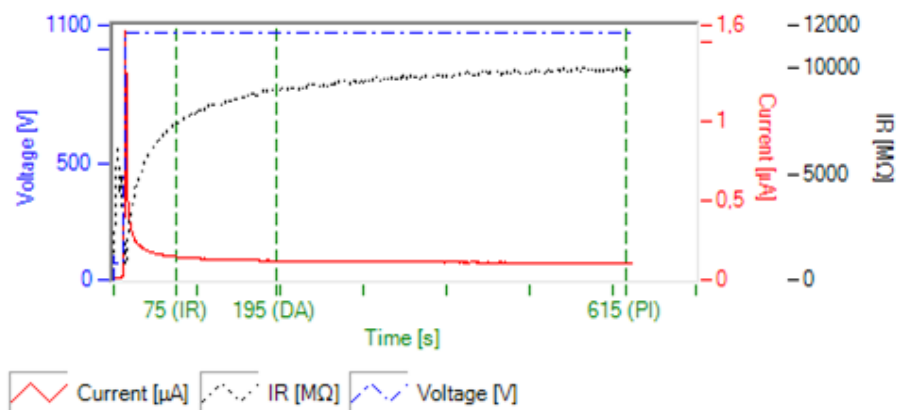
Obr. 27) Porovnání spektra statorového proudu, hřídelového napětí a zrychlení vibrací

**Měření pomocí rozptylových polí** – pro měření rozptylových polí je využívána speciálně navinutá cívka umístěná uvnitř motoru, případně v některých případech i vně motoru. Vyhodnocuje se frekvence napětí indukované do měřicí cívky.

- **STATICÁ DIAGNOSTIKA**

Statická diagnostika se provádí se při stojícím, zajištěném a odpojeném elektrickém zařízení.

**Měření izolačního odporu** – zjištění stavu izolace živých částí (vinutí, kabely, apod) - obr. 28.

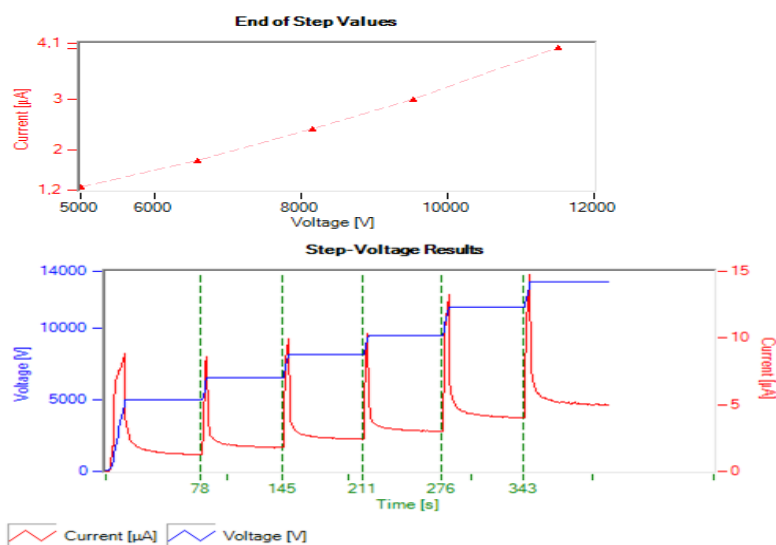


Obr. 28) Graf měření unikajících proudů a izolačních odporů vinutí motoru

**Měření PI a DAR** – měření polarizačního indexu a ztrátového činitele se používá jako první vodítko při měření stavu izolace. Hodnota těchto indexů vypovídá, zda vinutí motoru je navlhle nebo špinavé. Nízká hodnota těchto parametrů zkracuje životnost vinutí.

$$(13) \quad \text{PI} = \frac{R_{iz\ 10min}}{R_{iz\ 1min}}, \quad \text{DAR} = \frac{R_{iz\ 1min}}{R_{iz\ 30\ sec}}$$

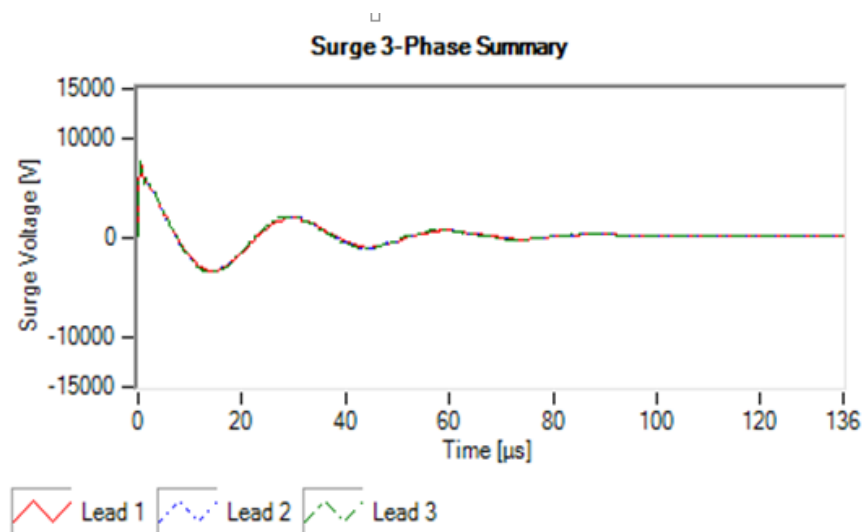
**Step test** – závislost napětí na unikajících proudech. Touto metodou měření zjišťujeme, jaká je závislost unikajících proudů přes izolaci v závislosti na rostoucím napětí - obr. 29.



Obr. 29) Graf závislosti unikajících proudů na napětí



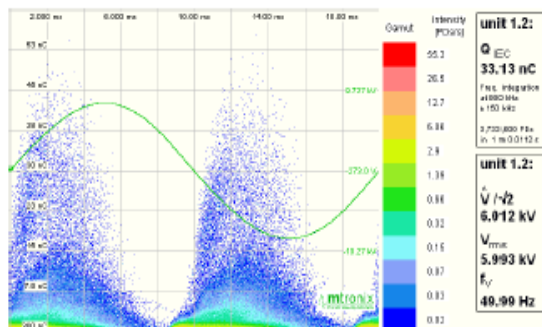
**Zkouška rázovou vlnou** – jedná se o metodu porovnávající, přičemž touto metodou jsme schopni zjistit závitové zkraty mezi jednotlivými závity cívky. K tomuto měření potřebujeme více jak dvě cívky pro porovnání – obr. 30.



Obr. 30) Test vinutí rázovou vlnou

**Měření kapacity a tg delta** – měření na elektrických strojích, hodnoty vypovídají o stárnutí a kvalitě izolace.

**Částečné výboje** – měření částečných výbojů u vysokonapěťových strojů. Tímto měřením lze odhalit unikající elektrický náboj přes izolaci vinutí (lokální zeslabení izolace) – obr. 31.



Obr. 31) Měření částečných výbojů vinutí elektromotoru

**Měření přechodových odporů** – například měření přechodových odporů v pospojování neživých částí, měření v silových vedeních v rozvaděčích apod. Měří se speciálními přístroji (miliohmetrem), kde měřící proud dosahuje velikosti několika ampér.

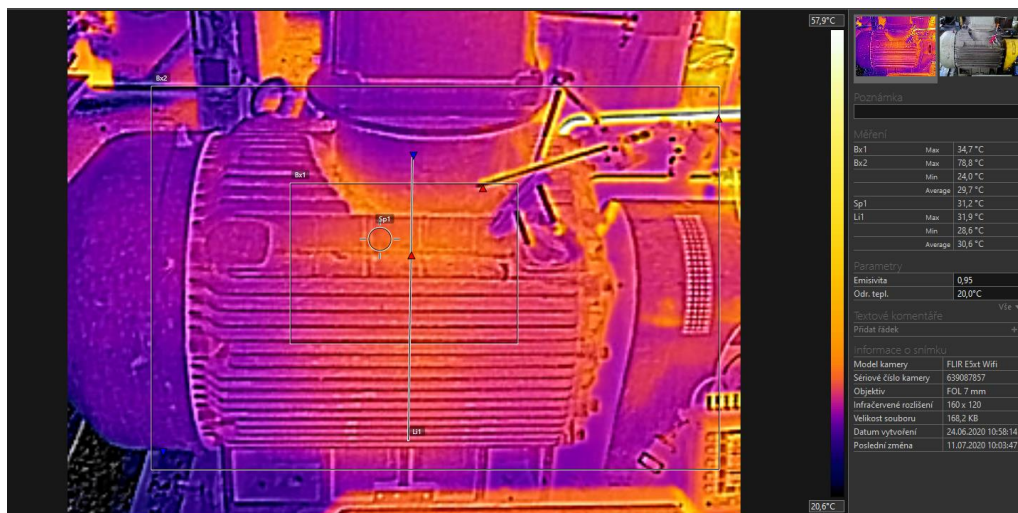
#### 4.2.3 Termodiagnostika

Termodiagnostika je měření teploty v obecné rovině, termografie je změřením teplotního obrazu. Jelikož dnes se používá výhod termografie, tak v dalším textu mluvím pouze o termografii.

Infračervená termografie je vědní obor, který se zabývá analýzou rozložení teplotního pole na povrchu tělesa, a to bezkontaktním způsobem. Úkolem termografie je analýza infračervené energie vyzařované tělesem. Termografickým měřicím systémem lze zobrazit teplotní pole měřeného objektu, ale pouze na jeho povrchu. Obor termografie se v širším měřítku rozvinul společně s rozšířením infračervených kamer, pro které se obecně vžilo slovo termovizní kamera. Úkolem termografie je mimo stanovení rozložení teplot na povrchu zařízení najít místa, která jsou více zahřívána oproti ostatním. Typickým příkladem jsou elektrické spoje v rozvaděcích, kdy teplejší místo na spoji znamená vyšší přechodový odpor a potenciální závadu na rozvaděči.

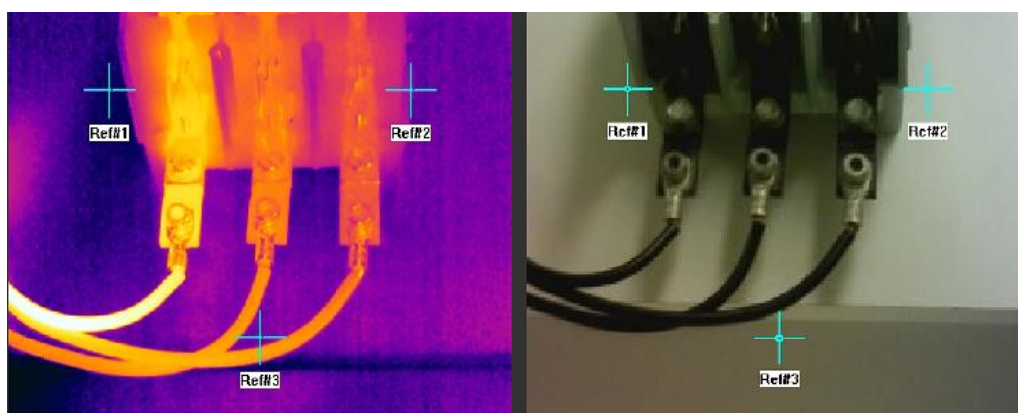
Jedná se o podpůrnou metodu pro diagnostiku strojů, kde pomocí termokamer lze zobrazit rozložení teplot na sledovaném stroji (zařízení), a tím v mnoha případech usnadnit zjištění zdroje poruchy.

**Měření rozložení teplot (teplotní pole) strojních zařízení** – pomocí termokamery lze nasnímat rozložení teplot na strojních dílech a zjistit zdroje tepla – obr. 32.



Obr. 32) Termografické zobrazení teplot elektromotoru

**Termografická zobrazení elektrických rozvaděčů** – zjištění přehřívajících se kabelů a komponentů, zjištění nedotažených spojů a přechodových odporů apod. – obr. 33.



Obr. 33) Termografické zobrazení proudového přetížení jedné fáze v rozvaděči

**Zjištění úniků plynů** – termokamerou lze detekovat úniky medií a plynů z potrubí, úniky chladiv apod. – obr. 34.



Obr. 34) Termografické zobrazení uniku plynu

**Zjištění úniků tepla** – lze detekovat porušení izolace, uniky tepla (energie) z izolovaných komponentů a strojů apod.

**Lokální zeslabení izolací** – lze detekovat zeslabení elektrických izolací, například porušení izolací plechů ve satorovém svazku, porušení izolací kabelů apod.

#### 4.2.4 Tribodiagnostika

Je mezioborová (interdisciplinární) věda vycházející z tribologie, která se zabývá obecně vzájemným působením povrchů tuhých těles při jejich relativním pohybu nebo při pokusu o vzájemný pohyb, kdy vzniká efekt tření. Úkolem tribologie jako vědy je shromažďování, třídění, uplatňování a další rozvoj znalostí o vlastnostech a chování tření a třecích dvojic (tribologických uzlů). Tribodiagnostika pak získává informace o stavu maziva a stavu stroje pomocí testů a zkoušek.

Tribodiagnostické metody jsou podrobně popsány v literatuře [8]. Tribodiagnostika představuje nauku o vědeckém výzkumu a technickém použití zákonitostí a poznatků pro vědní obory tření, opotřebení a mazání třecích dvojic v tribologických uzlech získáváním adekvátních informací z maziva.

Z našeho diagnostického pohledu je tribodiagnostika důležitá z hlediska analýzy a rozboru maziv ložisek a zjištění vlivu okolí na kvalitu maziva, jako je například vliv elektrického proudu na kvalitu a životnost plastického maziva apod. Je všeobecně známé, že mazivo je konstrukční prvek. Z maziva získáváme řadu informací o stroji, z čehož logicky vyplývá, že tribodiagnostika patří dnes mezi nepostradatelné obory diagnostiky strojních zařízení. Stav maziv ovlivňuje životnost strojů, proto je nutné maziva sledovat a pravidelně diagnostikovat.

**Viskozita** – základní funkční a reologická vlastnost mazacích olejů a plastických maziv. Pro účely diagnostiky měříme tzv. kinematickou viskozitu při teplotě 40 a 100 °C, poněvadž velikost viskozity je na teplotě vysoce závislá.

Z pohledu tribodiagnostiky a zjištění stavu maziva rozeznáváme oleje motorové a průmyslové, tzn. převodové, hydraulické, ložiskové, turbínové apod. U těchto olejů mimo zmíněné viskozity musíme zjistit kód čistoty (obsah všech nečistot), obsah vody (kvalitativně

či kvantitativně) a číslo kyselosti a zásaditosti (TAN a TBN). U motorových olejů mluvíme pak i o bodu vzplanutí, zkoušce na glykol (chladicí kapalina), zkoušce CCT (karbonizační zbytek). Pokud se týká tribodiagnostických metod ke zjištění technického stavu stroje či zařízení, tak se nejčastěji používá spektrofotometrie, jak absorpční (AAS), tak emisní (AES) a částicová analýza (ferografie). Další popis najdete např. v [8] a celé řadě nespécifikovaných zdrojů.

U plastického maziva, mimo již uvedené viskozity základového oleje, provádíme penetrační zkoušku, kterou zjistíme konzistenci (tuhost).

**Regenerace maziv a jejich čištění** – provádí se na základě provedené tribodiagnostické analýzy k prodloužení životnosti převážně olejů. O regeneraci mluvíme při doaditivování (přidání požadovaných přísad ke zlepšení vlastností), při doplnění maziva na požadovaný stav, při filtraci různými způsoby včetně by-pass filtrace (obtokově). Výměna znamená obnovu celé náplně maziva. Je třeba dát pozor na tzv. kompatibilitu (snášlivost) maziv, tzn. ne každá maziva jsou zaměnitelná jinými mazivy.

#### 4.2.5 Montážní a optická měření

Tento diagnostický obor je zaměřen především na měření radiálních a axiálních nesouosostí, měření rovinnosti rámců apod. Moderní optické přístroje jsou dnes schopné provádět i měření za provozu jako je například metoda sledování teplotních dilatací při startu a oteplování strojů.

**Měření při ustavování strojů a jeho kontrola** – těmito metodami zjišťujeme správnost usazení a vyrovnaní strojů, vylučují se a případně potvrzují různé možné příčiny problémů jako je nesouosost, tedy vyrovnaní pohonné jednotky do osy. Metody ustavování, tedy odstranění nesouososti jak paralelní, tak úhlové, jsou popsány např. v literatuře [9].

**Měření rovinnosti rámců a základů** – kontrola rovinnosti rámců a základů.

**Měření teplotních dilatací** – live-time metoda měří se teplotní roztažnost dílů, vzájemné ovlivnění strojů.

**Délková a montážní měření** – měření správnosti kotvících bodů pro stroje, zkřížení apod.

**Měření náklonů** – měření úhlů náklonu rovin.

**Nivelační měření** – měření vodorovnosti rovin.

#### 4.2.6 Další metody diagnostiky

Při analýze větších problémů je nutné vycházet také z historie údržby, kdy nám může pomoci například jaký díl a jak často se měnil, jakým způsobem se provádí údržba, zda se provádí pravidelné měření a mnoho dalších aspektů.

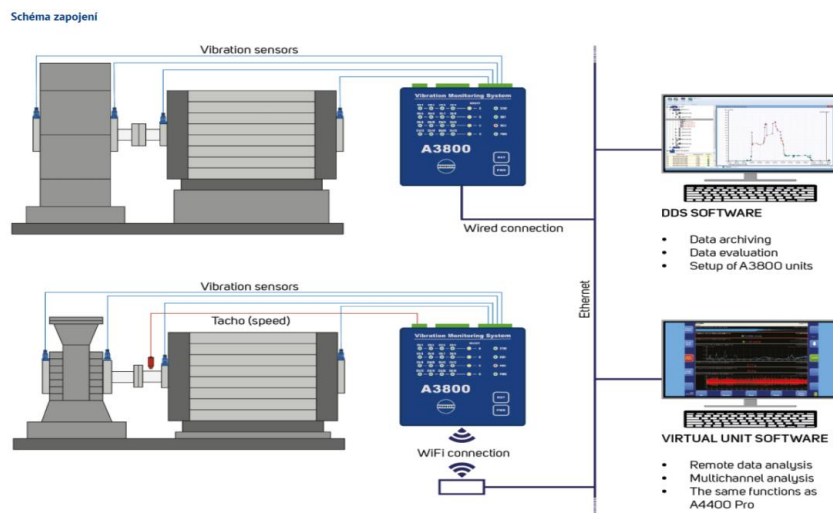
Pokud je možnost a lze provést forenzní analýzu poškozeného stroje ve spojitosti s provedenou multiparametrickou diagnostikou, je tato analýza také nedílnou součástí hledání správného opatření.

Další metody, které lze využít pro analýzu strojů jsou z oboru nedestruktivní diagnostika (defektoskopie), která je popsána např. v literatuře [16], (vizuální prohlídky, rentgen, akustická diagnostika včetně ultrazvuku, magnetická zkouška pro zjištění trhlin), případně další analýzy např. rozborů různých prachů vyskytujících se ve stroji, nebo poškozených povrchů s využitím různých metod skenování povrchu nebo analýz pod mikroskopem.

Při analýze poškození strojů lze využít i destruktivní defektoskopii, která je využívána především u zkoumání příčin závad valivých ložisek, případně materiálové rozboru různých částí strojů. Zde se již nepředpokládá, že valivé ložisko dále ve stroji použijeme, ale vždy je nahrazeno novým. Abychom předešli opakovaným závadám, je nutné zjistit, proč bylo ložisko poškozeno. Proto při demontáži ložiska je nutné označit polohu ložiska ve stroji a označit polohu valivých elementů vůči vnějšímu a vnitřnímu kroužku. Před montáží případně i po ní se ještě odeberou vzorky maziva pro tribodiagnostickou analýzu. Po umytí ložiska se provede měření především radiální a axiální vůle, případně jeho vnějších rozměrů. Následně se rozřízne vnější kroužek ložiska ve vodorovné poloze vůči montážní pozici a prohlídne se dráha vnitřního i vnějšího kroužku a valivých elementů. Zjišťuje se zátěžná stopa na vnějším a vnitřním kroužku, poškození drah, valivých elementů, způsob poškození apod. Při detailnějším zkoumání lze využít mikroskopů s různým rozlišením. Podobně lze postupovat i u forenzních analýz jiných částí strojů, jako jsou například spojky, ucpávky, ozubení apod.

### 4.3 Způsoby provádění diagnostiky

Nasazení způsobu multiparametrické diagnostiky závisí na typu a charakteru sledovaného zařízení. Tam, kde je nutné mít strojní zařízení neustále pod kontrolou a monitorovat jeho stav, se obvykle využívá ON-LINE diagnostických systémů. Výhodou těchto systémů je, že můžeme sledovat paralelně několik diagnostických parametrů, které lze různě zpracovávat a výsledná data pak ukládat do databáze systému. V dnešní době se do této formy diagnostiky řadí i tzv. vzdálená diagnostika. Tam kde není nutné sledovat zařízení trvale, nebo se jedná o zařízení, které nezpůsobí výpadek výroby a je možné ho při poruše velmi rychle nahradit, lze na tyto stroje použít OFF-LINE diagnostiku. Do OFF-LINE diagnostiky lze zahrnout i diagnostická měření, které se provádí za účelem zjištění příčin závad strojů a rozsahu prováděných oprav.



Obr. 35) Příklad využití ON-LINE diagnostiky zařízení

#### 4.3.1 ON-LINE multiparametrická diagnostika

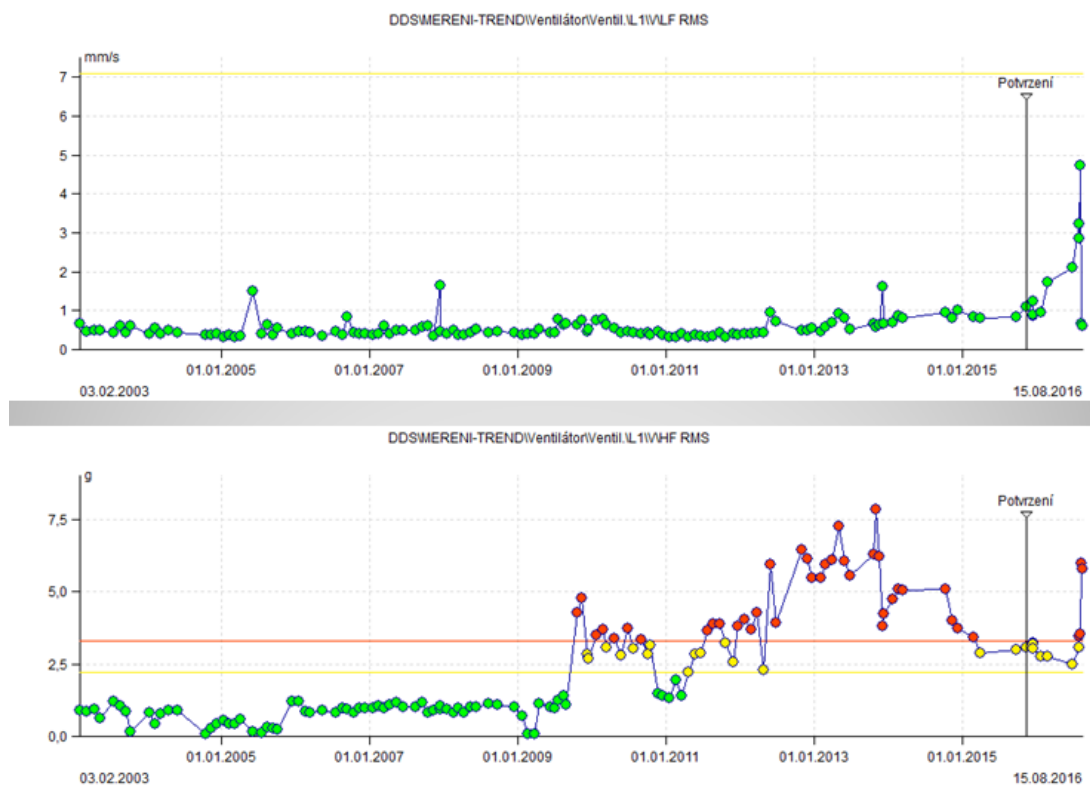
Tento způsob diagnostiky se využívá především tam, kde je nutné sledovat nepřetržitě chování strojů. Typickým příkladem jsou vibrace turbíny a generátoru v elektrárně. Data ze snímačů jsou snímána a zaznamenávána kontinuálně – obr. 35, případně v určitých časových

intervalech řádově v intervalu několika sekund, případně minut. Tyto data jsou okamžitě vyhodnocována a případně změny těchto měřených parametrů lze detekovat závadu či poruchu.

Možnosti využití ON-LINE diagnostiky pro analýzu strojů a zařízení má své nezastupitelné místo. Jak již bylo výše uvedeno, některé děje se v systémech mohou vyskytovat velmi náhodně, avšak jejich vliv na kondici např. ložisek je zásadní. Využití ON-LINE diagnostiky pro analýzu strojů nemusí být dlouhodobé, ale velký přínos má nasazení těchto systémů i po omezenou dobu. Zde je však velmi důležité nakonfigurovat nejen správné měřicí body a vhodné snímače, ale i vhodnou metodu pro vyhodnocení naměřených dat s ohledem na fakt, že děje, které se v systému mohou vyskytovat, bývají často v trvání jen několika málo milisekund.

### 4.3.2 OFF-LINE multiparametrická diagnostika

Tento typ diagnostiky na rozdíl od ON-LINE diagnostiky se provádí tzv. pochůzkou, kdy v diagnostickém obvodu je naplánována trasa, kterou pověřený pracovník obchází a na předem označených místech provádí měření případně snímání dat z přístrojů, které jsou na stroji osazeny. Snímání dat se provádí v pravidelných intervalech řádově několik týdnů či měsíců dle měřicího plánu. Tento typ diagnostiky se provádí tam, kde provoz zařízení není z pohledu výrobního procesu kritický, rozvoj závady se předpokládá pomalý. U těchto strojů je třeba zpravidla sledovat stav zařízení, vyhodnocovat a případně plánovat jejich opravy. Nasbíraná data se vyhodnocují a zaznamenávají do příslušného trendu monitorování stavu stroje - obr. 36, kde se je v trendu zaznamenávána rychlost a zrychlení vibrací. Uvedený způsob vyžaduje vždy přítomnost technika při sběru dat a následné vyhodnocení a zpracování do měřicí databáze.



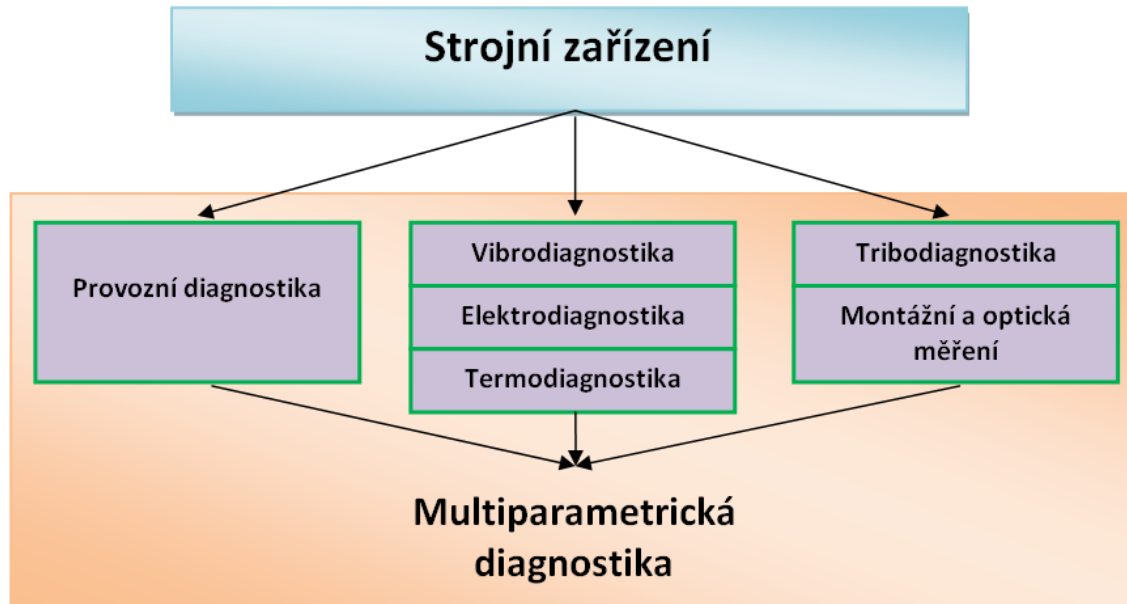
Obr. 36) Trend rychlosti a zrychlení vibrací z OFF-LINE diagnostiky

### 4.3.3 Multiparametrická diagnostika

Jak je popsáno v [1], rozeznáváme provozní diagnostiku podle měřené veličiny, ultrazvukovou diagnostiku, vibrodiagnostiku, termodiagnostiku, tribodiagnostiku, elektrodiagnostiku atd. Právě tyto diagnostiky mají pro průmyslovou praxi značný význam a nejlépe se využívají.

Je třeba mít také na paměti, že při návrhu multiparametrické diagnostiky je nutné přizpůsobit vhodnou metodu vzhledem k diagnostickému objektu, který budeme řešit. Rozdílné diagnostické parametry budou použity u výrobního stroje, čerpadla, ventilátoru, elektrického pohonu apod. Jak již bylo výše naznačeno, technická diagnostika se vyvíjí, a to z hlediska diagnostických prostředků, metod a metodik. Jsou kladeny i vyšší nároky na realizátora diagnostických šetření, tedy diagnostika, především diagnostika analytika. Značný pokrok lze spatřovat rovněž v tom, že se k posouzení stavu sledovaného objektu nevyužívá jen jedna diagnostická metoda, např. určená z dominantního degračního mechanismu, ale běžně se vychází z několika diagnostických metod, nebo v rámci jedné diagnostické metody se sleduje několik diagnostických veličin. Pro takto pojatou diagnostiku technických systémů se již běžně používá pojem multiparametrická diagnostika [6].

V [6] je popisována multiparametrická diagnostika jako multiparametrická alternativní diagnostika, která se zabývá diagnostikou několika parametrů z jedné diagnostické metody. Dále je popisována multiparametrická diagnostika, která se zabývá kombinací diagnostických parametrů různých diagnostických metod. Navrhovaná diagnostika je rozšíření vnímání multiparametrické diagnostiky jako oboru při řešení složitých diagnostických problémů s využitím diagnostických parametrů z různých oborů a poznatků o stroji.



Obr. 37) Multiparametrická diagnostika

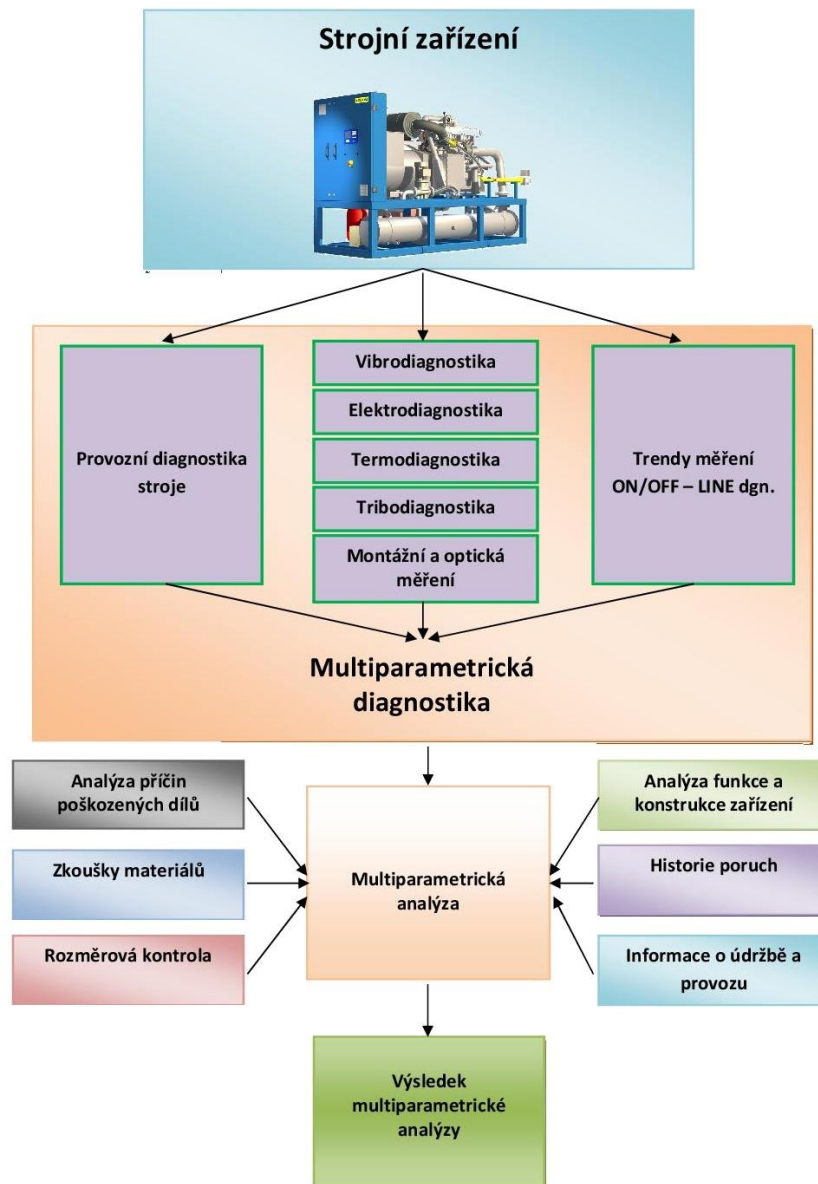
Na obr. 37. je schéma multiparametrické diagnostiky, která je využívána v dnešní době při monitorování a diagnostice strojů. Aby bylo možné získat o strojním zařízení co nejvíce informací, je nutné využít všechny dostupné a proveditelné metody k získání uceleného pohledu na měřené zařízení. Jedná se především o záznamy z provozních dat (výkon, záznamy teplot, počty vyrobených kusů, způsob nasazení technologie apod.), provedení diagnostiky

(vibrodiagnostiky, elektrodiagnostiky, termodiagnostiky) a další podpůrných metod, jako je například tribodiagnostika, montážní a optická měření a další. Vyhodnocení se provádí například sledováním zvolených parametrů měření a hlídáním jejich limitních hodnot, nebo jejich dodatečným zpracováním a vyhodnocením např. ložiskových poruchových frekvencí.



## 5 IDEOVÝ NÁVRH METODIKY MULTIPARAMETRICKÉ DIAGNOSTIKY

Zavedení multiparametrického přístupu je nezbytným předpokladem při řešení a hledání příčin závad a poruch strojů. Dělení diagnostiky na různé diagnostické obory nezaručuje jejich provázanost při multiparametrické analýze, a ne vždy se pak podaří najít hlavní příčinu řešeného problému.



Obr. 38) Schéma multiparametrické diagnostiky

Na obr. 38 je znázorněn obecný postup provedení multiparametrické diagnostiky strojního zařízení, kdy výsledky z provedené multiparametrické diagnostiky společně s výsledky různých analýz, poznatků z historie stroje a z údržby, znalosti funkce a konstrukce analyzujeme pomocí různých metod. Výsledkem této analýzy je popis příčiny problému a následně návrh opatření k jeho odstranění a uvedení do bezporuchového stavu.

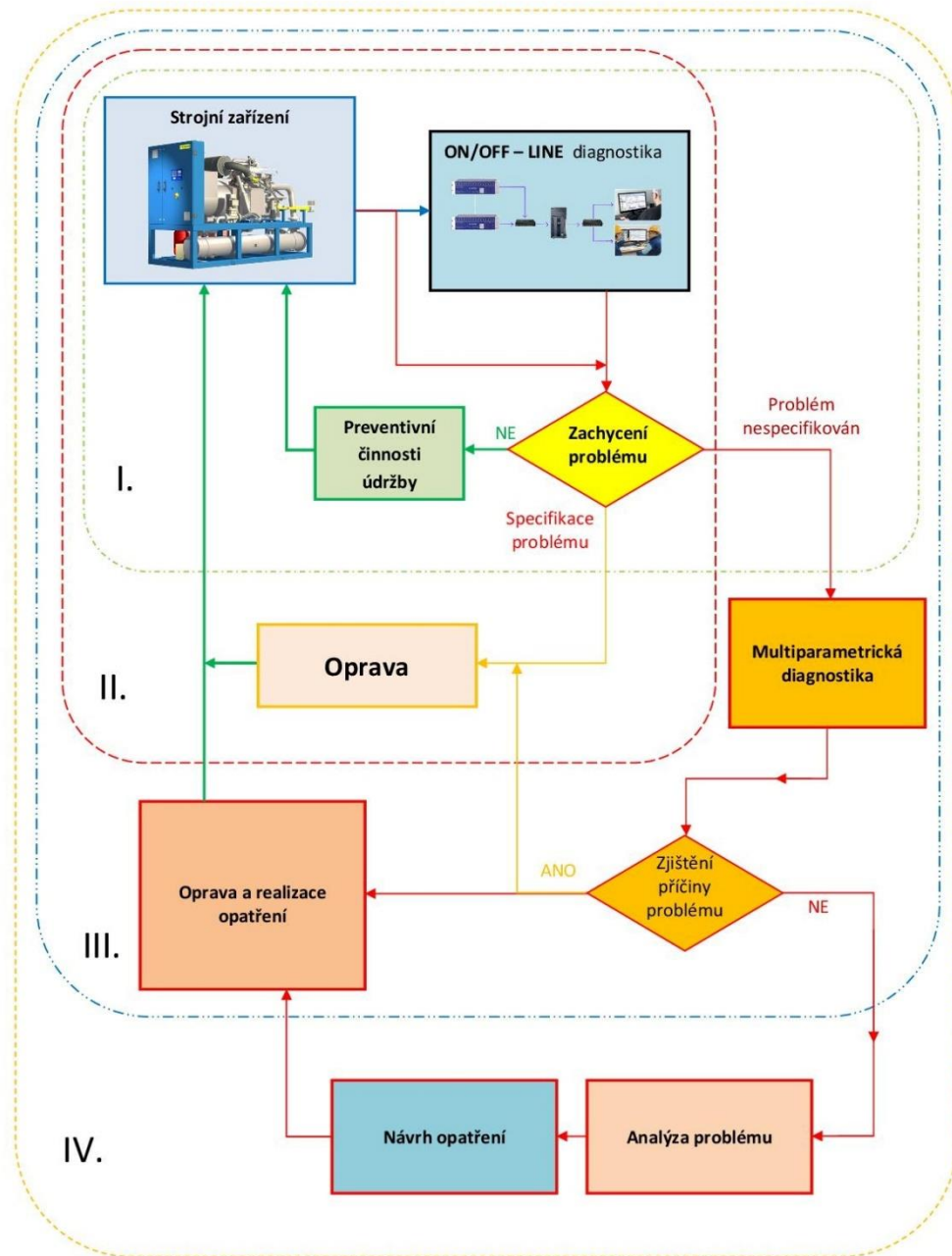
Je třeba rozlišovat pojmy metoda a metodika.

Metoda (z řeckého *met-hodos* – "cesta, následování, postup") je postup nebo návod, jak získávat správné poznatky, prostředek poznání.

Metodika je obecně pracovní postup (metoda) nebo nauka o metodě, popřípadě dokument obsahující metodické informace.

## **5.1 Obecné pojednání o multiparametrickém přístupu**

Aby bylo možné důkladně analyzovat příčinu poruch stroje, nestačí jen provádět jednotlivá měření, která jsou hodnocena dle příslušných norem, či jiných postupů, případně je sledován trend vývoje těchto hodnot, ale je nutné přistupovat k diagnostice strojů komplexně. Multiparametrickou diagnostikou strojů rozumíme analýzu a hodnocení výsledků měření více parametrů z jednotlivých diagnostických oborů jako je např. vibrodiagnostika, elektrodiagnostika apod., spojenou se sledováním dlouhodobých trendů hodnot ON/OFF-LINE diagnostiky. Analýzou a vzájemným propojením těchto směrů dostaneme diagnostický obraz o chování sledovaného zařízení, který dále slouží pro podrobnější analýzu zjištění příčin řešeného problému strojního zařízení. V této části řešení jsou mimo výsledky multiparametrické diagnostiky využity výsledky a poznatky z historie oprav, vlivu vnějšího ovlivnění, rozboru příčin poškozených dílů, záznamů z údržby apod. Výsledkem tohoto snažení je návrh, respektive soubor návrhů opatření pro zlepšení provozu strojního zařízení, snížení počtu opakovaných poruch a prodloužení životnosti jak jednotlivých částí stroje, tak celého stroje.



Obr. 39) Schéma procesu diagnostiky strojů

Proces údržby ve spojení s multiparametrickou diagnostikou spočívá ve vhodném nastavení sledovaných parametrů ON/OFF LINE diagnostiky. Snahou je eliminovat náročné provádění měření specialistou, které bývá velmi drahé a je nasazováno většinou tam, kde standardní metody diagnostiky obvykle selhávají nebo jsou neúplné a nevedou vždy k vyřešení daného problému.

Pokud je dobře nastaven proces ON/OFF-LINE diagnostiky včetně vhodného vytipování sledovaných parametrů a jejich vyhodnocení v rámci nastaveného systému sběru dat, lze mnoho závad odhalit přímo z těchto měření. V předchozím diagramu - obr. 39 jsou znázorněny čtyři úrovně diagnostiky.

- I. Úroveň sledování diagnostických parametrů pro běžnou údržbu strojů (lze například využít pro stanovení vhodné doby domazání ložisek, doplnění provozních náplní apod.).
- II. Úroveň je taková, kdy je detekován poruchový stav, který lze řešit drobnou opravou a není potřeba detailnější rozbor či analýza sledovaných parametrů. Při zjištění poruchy lze v mnoha případech specifikovat příčinu a opravu naplánovat. Není nutné provádět další diagnostické měření. Příkladem může být sledování rozvážení ventilátoru z důvodu jeho zanesení nálepy, kdy po zvýšení vibrací je nutné ventilátor očistit. Zde se jedná o preventivní údržbu.
- III. Úroveň je stav, kdy například z ON-LINE diagnostiky nelze určit příčinu problému a je nutné provést detailnější multiparametrickou diagnostiku. Na základě analýzy této diagnostiky lze stanovit jednoduché nápravné opatření včetně opravy a uvedení do bezporuchového stavu (závada na ložisku, vadné ustavení apod.). Zde můžeme hovořit o prediktivní údržbě, případně aktivní preventivní údržba (ČSN EN 13306).
- IV. Úroveň je stav, kdy je nutné pro stanovení příčiny využít všechny dostupné informace jak z provedené diagnostiky stroje, tak z historie oprav poruch, údržby, výsledky analýzy poškození části strojů (pohony, ložiska, spojky...), chemického rozboru materiálů, konstrukce stroje apod. Tato úroveň zjištění příčin a stanovení vhodných opatření bývá jak časově, tak finančně velmi náročná, a to i z hlediska sestavení řešitelského týmu odborníků v daném oboru. K této úrovni diagnostiky se přistupuje většinou u opakovaných problémů strojů, případně u sériových vad strojů a zařízení, takže někteří výrobci a uživatelé již mluví o inovační rekonstrukci. Zde se jedná o aktivní preventivní údržbu. V mnoha případech se jedná o finančně náročnější zásahy.

Abychom byli schopni provést a navrhnout detailní multiparametrickou analýzu strojního zařízení, je nutné znát funkci zařízení. Principem veškerých analýz je pochopení chování stroje tak, abychom mohli stanovit příčiny problémů, a navrhnou vhodná opatření k jejich odstranění. Z tohoto důvodu se nelze se omezit jen na jednu diagnostickou disciplínu, ale je nezbytné využít všechny dnes dostupné metody a obory diagnostiky.

V dnešní době už nestačí jen provádět vibrodiagnostiku, měřit a sledovat hodnoty vibrací a porovnávat spektra, ale je nutné hledat vazby mezi vibracemi, napájecími proudy, termografickými poli, tribodiagnostikou a v neposlední řadě i dalšími metodami nedestruktivních zkoušek, či analýzou poškozených dílů stroje.

## 5.2 Postup při řešení s využitím multiparametrické diagnostiky

Využití multiparametrické diagnostiky při sledování stavu stroje je velice důležité, tyto metody můžeme využít při všech úrovních diagnostiky včetně trendování měřených veličin, jako jsou například teplota, rychlost a zrychlení vibrací, tlak v potrubí apod. Dále pak je možné vyhodnocovat pouze nastavení alarmových a mezních hodnot jednotlivých parametrů pro signalizaci, nebo při ON-LINE diagnostice, kdy pomocí inteligentních systémů a různých průběžně prováděných automatických výpočtů, jsme automaticky schopni detekovat přímo poruchy jednotlivých částí, jako je například poškození ložiska, nevyvaha ventilátoru apod. bez zásahu diagnostika.

Při řešení složitějších problémů s využitím multiparametrické diagnostiky obvykle postupujeme tak, že z diagnostikovaného stroje nasnímáme záznamy z měřicích snímačů pomocí vhodného data-rekordéru, aby bylo možné tyto nasbíraná data později analyzovat v postprocessingovém zpracování a provést vyhodnocení naměřených dat. Každý diagnostický obor nabízí mnoho diagnostických metod, které lze v rámci multiparametrické diagnostiky využít. Výhodou této metody je ta skutečnost, že data z různých diagnostických disciplín můžeme analyzovat adekvátním způsobem a můžeme mezi sebou provádět různá srovnání, či hledat určité společné znaky, které vedou ke stanovení příčiny problému.

Cíleně vynechávám zvýšení jistoty našeho rozhodnutí. Jsou známy práce, které se daným zvýšením jistoty rozhodnutí zabývaly, jedná se o jednotky procent ve srovnání s rozhodující diagnostickou metodou pro měřený objekt, ale je nutné si plně uvědomit, každé navýšení, byť o jednotky procent, je navýšením jistoty určení se všemi představitelnými důsledky. Další nezanedbatelnou výhodou je ta skutečnost, že nastavení pro vyhodnocení nasbíraných dat lze operativně měnit, kombinovat a tím dále zpřesňovat výsledek analýzy. Tímto způsobem máme zajištěno, že při opakovaném měření vycházíme stále ze stejného zdroje dat a data nejsou v čase ovlivněna například změnou provozních podmínek apod. Velmi důležité pro tyto analýzy je, aby záznam nasnímaných surových dat byl dostatečně dlouhý, aby výpočty a zpracování datových souborů, které potřebujeme provádět, byly schopné zaznamenat dynamické změny, které se na sledovaném zařízení odehrávají.

Při řešení a analýze takto složitých problémů je nutné spojit výsledky multiparametrické diagnostiky s poznatky z historie stroje (jako je například počet vyskytujících se stejných závad, provozních parametrů, vlivu obsluhy apod), jeho údržby (poznatků z dřívějších oprav, apod), znalostí konstrukce a také s ovlivněním vnějších vlivů (například vliv vibrací sousedních strojů, bludné proudy atd..). Výsledkem analýzy je zjištění a definování příčiny problému (závady) a na základě tohoto jsme schopni lépe navrhnout vhodná opatření, které po jeho realizaci je nutné ověřit.

Nejspolehlivějším ověřením provedeného opatření je prodloužení životnosti zařízení, které potlačilo, případně zabránilo dalšímu opakování řešených poruch. Dalším ověřením je provést opakovanou multiparametrickou diagnostiku, která má za úkol provést porovnání sledovaných parametrů před opravou a po opravě.

### 5.3 Technická a organizační příprava

- **Definice problému**

Na začátku každého řešení nějakého problému je nutné tento problém vyspecifikovat, popsat jednotlivé části problému, které je nutné v rámci multiparametrické diagnostiky řešit. Definice problému může být zcela jednoduchá. Jde o to, aby v dalších krocích této metody bylo jasné stanoveny, jaký problém se má řešit a jakého výsledku by mělo být dosaženo.

Příklad definice může vypadat následovně:

Problém - soustrojí pohonu napájecího čerpadla, nízká životnost ložiska elektromotoru, hlučnost ložiska a jeho časté výměny.

- **Stanovení postupu**

Na základě specifikace problému a znalostí konstrukce stroje je třeba navrhnout diagnostické prostředky, metody a systém multiparametrického snímání dat. Nejprve je třeba provést technický rozbor, kde je třeba popsat funkci stroje, mít k dispozici informace o údržbě strojního zařízení, historii oprav, případně zda jsou k dispozici záznamy z ON-LINE měření (vibrace, sledování výkonu, teplot, průtoku apod.). Dále je třeba stanovit, jaké parametry jsme schopni měřit v rámci MPD, měřící místa, měřící rozsahy a metody. Dále je třeba vzít v úvahu potřebnou délku a počet předchozích měření, abychom dostali požadovaný vzorek naměřených dat, bez nějakého případného domodelování potřebného počtu měření. Tuto délku měření stanovíme na základě funkce stroje, například pokud je třeba měřit parametry stroje od startu strojního zařízení při oteplování stroje až do doby, kdy teploty stroje jsou v ustáleném stavu. Dalším příkladem může být měření, kdy stroj má určitý pracovní cyklus, kde se například mění otáčky stroje, zatížení stroje apod.

Při návrhu diagnostických prostředků vycházíme z druhu a rozsahu měřících parametrů, předpokládaného množství zaznamenaných dat, vhodnosti použitých senzorů a výstupních parametrů z těchto senzorů apod.

### 5.4 Multiparametrická diagnostika

V této části metodiky na základě stanoveného postupu měření provedeme multiparametrickou diagnostiku stroje. Abychom mohli z naměřených dat dostat maximum informací, při měření provádíme záznam snímaných dat pomocí vhodného záznamového zařízení, do kterého ukládáme digitalizované časové záznamy tak, abychom mohli tyto data následně zpracovat a vyhodnotit. Záznam dat provádíme v určitém časovém úseku, do kterého se snažíme zaznamenat celý otáčkový rozsah od minimálních otáček do maximálních otáček, přechodové stavy případně celý pracovní cyklus strojního zařízení, kdy stroj pracuje v různých provozních režimech. Měřené parametry, pokud máme dostatek měřících kanálů, je vhodné měřit a zaznamenávat paralelně. Pokud dostatek měřících kanálů nemáme a jsme omezeni pouze několika málo kanály, je nutné, abychom zvolili vhodné představitele měřících kanálů z vibrodiagnostiky, z elektrodiagnostiky, případně tlaku, teploty apod. a ty měřili současně, včetně daných provozních podmínek z účelem následného porovnání.

- **Vibrodiagnostika** – záznam hodnot vibrací.
- **Elektrodiagnostika** – záznam hodnot proudu, případně napětí.
- **Termodiagnostika** – záznam hodnot měřených teplot ve vybraných místech, případně časové termografické snímky.

- **Provozní měření** – záznam dat provozních parametrů (průtok, výkon, ...).
- **Data z ON/OFF-LINE** diagnostického zařízení V mnoha aplikacích se provádí ON-LINE diagnostika zařízení. V rámci této diagnostiky jsou zaznamenávána snímaná data v různých časových intervalech, jako jsou například vibrace motoru a čerpadla, teplota ložisek, vinutí a čerpaného media, napájecí proud motoru, průtok media apod. Tyto data jsou v systému ukládána a z těchto dat lze pak vyčíst velmi užitečné informace vzhledem k historickému chování stroje.
- **Vyhodnocení multiparametrického měření** – z naměřených surových dat v této části provádíme postprocesingové vyhodnocení, pomocí vhodných vyhodnocovacích programů. Díky této metodě, jsme schopni provést opakované vyhodnocení naměřených dat, s různými rozlišovacími parametry, různými frekvenčními filtry a s využitím různých diagnostických metod. Specifikum této metody je, že všechny naměřené a vyhodnocené parametry jak z našeho provedeného měření, které jsme schopni různě nadefinovat, tak i dlouhodobějších dostupných záznamů, které jsou již zpracované systémem, vyhodnocujeme společně a hledáme vzájemné propojení a závislosti. Při vyhodnocení měření využíváme všech dostupných metod, které jsou popsány v kapitole 4.2.

## 5.5 Multiparametrická analýza

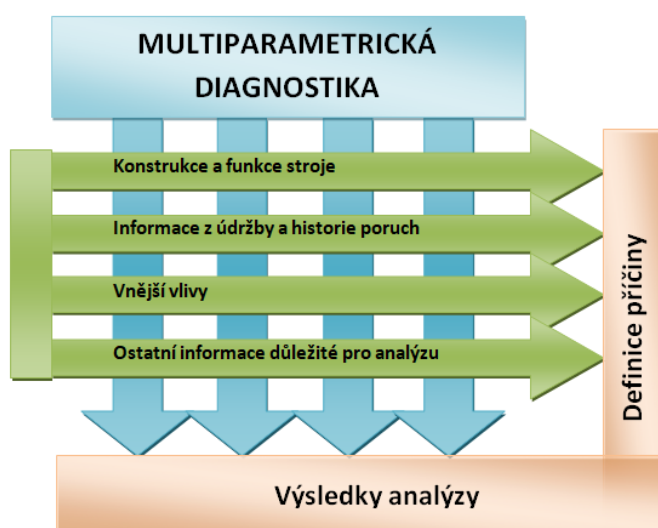
V další části multiparametrické analýzy je třeba dát do souvislosti výsledky provedené multiparametrické diagnostiky s funkcí a konstrukcí stroje a s informacemi, které získáme z údržby, historií poruch a informacemi od obsluhy apod.

- **Tribodiagnostika** – v rámci multiparametrické diagnostiky lze také využít metody tribodiagnostické analýzy maziv.
- **Nedestruktivní zkoušky materiálů** – nedestruktivních diagnostických metod, (defektoskopie, tzn. ultrazvuk, prozařovací metody včetně rentgenu, apod), forenzních analýz poškozených dílů (rozběr a analýza poškozeného ložiska za použití metod jako je například rozběr materiálu, elektronový mikroskop, zjišťování podpovrchových trhlin, struktura materiálu a jeho deformace apod.).
- **Forenzní analýzy** – zjišťování příčin poškozených dílů – poškozené díly jsou podrobeny materiálovým zkouškám, kdy je třeba poškozený díl rozříznout, zhotovit vzorky pro testování nebo pro analýzu poškození součásti pod mikroskopem apod. (zkoumání poškozených ložisek, ucpávek apod.)
- **Rozbor funkce a konstrukce** – na základě zjištěných indicií se provede analýza, zda stroj a jeho funkce pracují v souladu s návrhem stroje.
- **Vliv vnějších vlivů** – funkci stroje mohou často ovlivnit i vnější vlivy, jako například okolní teplota, bludné proudy, vlhkost, prašnost apod.
- **Informace o údržbě** – zde je nutné vzít v úvahu jakým způsobem a v jakém rozsahu se údržba provádí.
- **Informace o výskytu a četnosti poruch** – důležitou informací je také jaké poruchy a jak často se na stroji vyskytují.

**Analýza problému** – je hlavní článkem multiparametrické diagnostiky. Tato část patří k nejdůležitějším krokům této metodiky. Pro analýzu většiny problémů lze využít metod, jako

je například riziková analýza FMEA, či jiné metody rizikové analýzy (FMECA, HAZOP aj.), Ishikawův diagram (Rybí kost) apod. Pomocí těchto metod zde zpracováváme výsledky z provedeného měření, které se snažíme dát do souvislosti s funkcí stroje, informacemi o historii stroje a jeho poruchách, údržbě stroje apod. – obr. 40. Výsledkem každé takové analýzy by měl být soubor potenciálních příčin, které způsobují řešený problém.

**Definice příčiny** – jak již bylo řečeno, výsledkem analýzy je definování souboru možných příčin, které způsobují řešený problém. Ze souboru možných příčin se určí nejpravděpodobnější příčina řešeného problému. Výsledkem může být i více příčin, které se vzájemně ovlivňují, případně ve složitějších případech se může jednat i řetězec příčin.



Obr. 40) Schéma analýzy problému

## 5.6 Návrh vhodných opatření, realizace a verifikace

Výsledkem multiparametrické analýzy je pravděpodobná příčina nebo soubor, resp. řetězec příčin. Na základě určení příčiny problému je nutné stanovit vhodná opatření, která minimalizují řešený problém nebo nejlépe celý problém odstraní. Tuto část je nutné řešit nejlépe s projektantem, resp. konstruktérem zařízení i s ohledem na přijatá opatření pro řešení podobných, či stejných zařízení. Návrhy opatření mohou být různého charakteru. Mohou spočívat v konstrukční úpravě stroje, změně provozních, či technologických podmínek, úpravě pokynů pro obsluhu, či změně systémů údržby.

**Realizace opatření** – zavedení doporučených opatření může být někdy velice jednoduché, kdy postačuje změnit systém údržby nebo upravit provozní podmínky stroje tak, aby se stroj při jeho provozu vyhnul nestandardnímu chování (například rezonanci na určitých otáčkách). Někdy je třeba provést poměrně velký časově i finančně náročný konstrukční zásah. Při realizaci takových zásahů je nutné počítat i s dalšími problémy, které se mohou při realizaci opatření vyskytnout a které je nutné během realizace řešit.

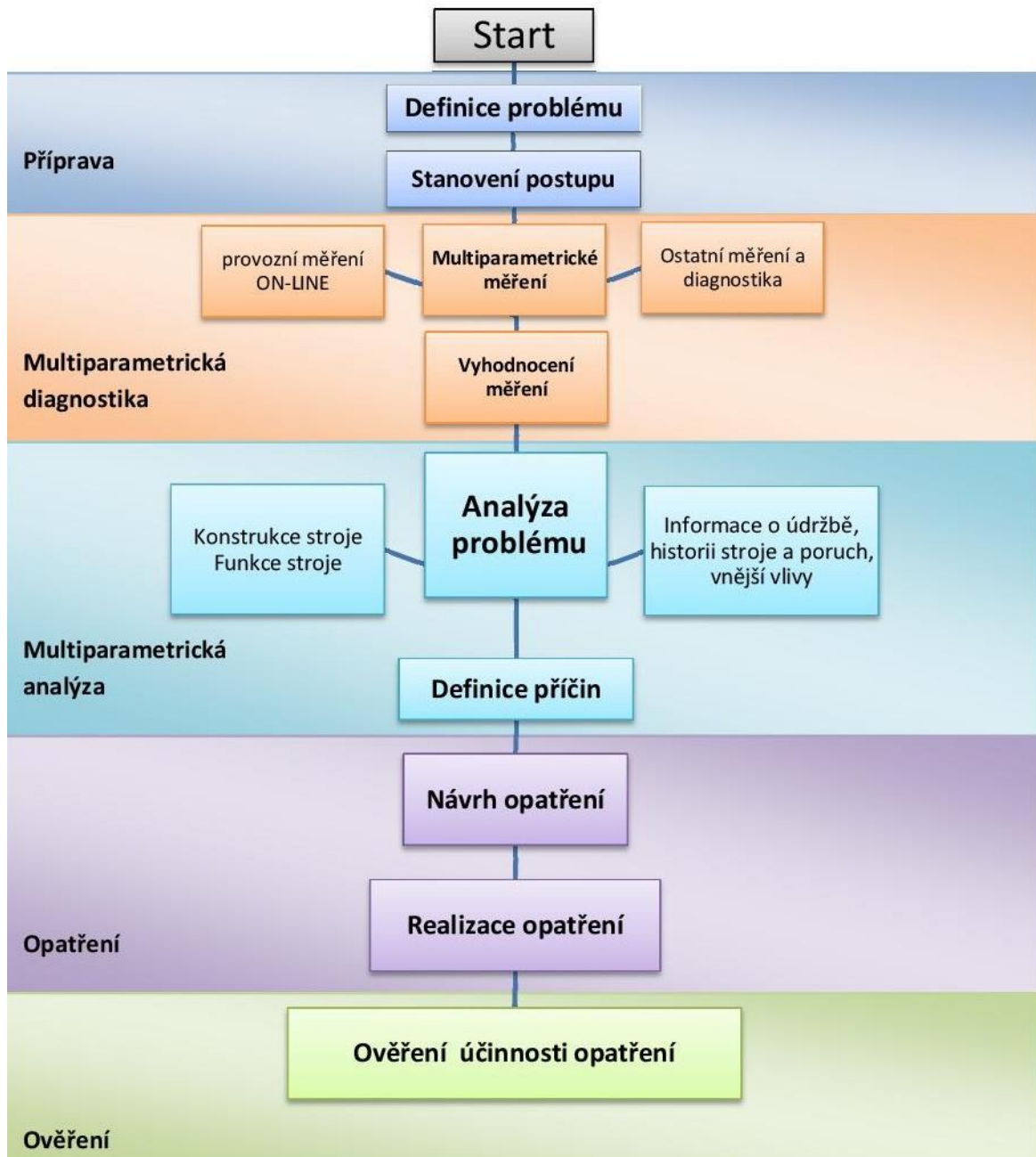
**Ověření** – abychom si ověřili, že specifikace příčiny problému a realizace opatření byla úspěšná, je nutné provést ověření. Jsou v zásadě dva základní druhy ověření možných verifikačních postupů. První způsob je ověření pomocí opakovaného měření a porovnání výsledků s měřením před opravou. Tento způsob se zpravidla používá tam, kde řešíme



nevyhovující procesní a provozní parametry stroje. Druhý způsob se využívá při opakovaných závadách stroje, kde provádíme časté opravy stejného druhu. Zde se jeví jako nejlépe hodnotící parametr prodloužení životnosti stroje nebo prodloužení doby do detekce další poruchy v přijatelných mezích.

### 5.7 Dílčí závěry kapitoly

Celý proces navržené metodiky je znázorněn v následujícím procesním modelu, který znázorňuje – obr. 41.



Obr. 41) Procesní model řešení problému pomocí metodiky multiparametrické diagnostiky

Princip multiparametrické diagnostiky, který je popsán v navržené metodice spočívá v komplexnosti řešení problémů strojů a zařízení. Cílem celého postupu je s co největší pravděpodobností určit příčinu řešeného problému, při použití metod z různých diagnostických oborů. Při diagnostice strojů se nelze omezit jen na určitý diagnostický obor, ale je třeba tyto obory provázat a vnímat souvislosti z těchto oborů. Dále je nutné vzít v úvahu jako parametr řešení i informace z údržby, různých rozborů a analýz materiálů a poškozených dílů, nedestruktivního testování apod. Výsledkem je určení příčiny, navržení a realizace vhodného opatření. Nedílnou součástí celého postupu je nejen verifikace problému, ale i jeho validace v rámci nasazení a využití multiparametrické diagnostiky a analýzy.

## 6 MULTIPARAMETRICKÁ TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA A SYSTÉM ÚDRŽBY

Pojímáme-li údržbu jako procesně technickou činnost výrobního procesu, tak je jednoznačně zřejmé, že neexistuje jeden systém údržby vhodný pro různé výrobní procesy, nýbrž údržba v systémovém přístupu musí být doslova „šitá na míru“ danému výrobnímu procesu, takže mluvíme o celé řadě systémů údržby, např. RCM, RBI, atd.

Základní pravidlo produktivní údržby říká, že údržba musí stejně jako hlavní výrobní oblasti přispívat ke zvyšování produktivity. V současnosti jednou z nejpoužívanějších a nejprosazovanějších z nich je komplexní produktivní údržba (TPM – Total Productive Maintenance), která respektuje vzájemné propojení údržby a výroby s technickým zabezpečením udržitelnosti a zajištěnosti údržby.

TPM firmy je dnes jedna z moderních metod údržby, která využívá technickou diagnostiku jako nástroj pro efektivní řízení údržby výrobních zařízení v rámci podniku. Jde o překonání tradičního dělení lidí na výrobní pracovníky, operátory a na pracovníky mající na starost údržbu strojů. Vychází se z předpokladu, že pracovník, který obsluhuje stroj, má šanci co nejdříve zachytit svými smyslovými prostředky abnormality stroje a případně identifikovat zdroje možných poruch zařízení tzn., že maximum smyslových diagnostických a malých údržbářských činností se přenáší přímo na obsluhu zařízení [2].

Z hlediska charakteru přístupu k údržbě strojů, můžeme obecně rozdělit údržbu dle jejich charakteru do několika všeobecně známých základních typů [2].

### 6.1 Základní systémy údržby

Vyčerpávající popis všech známých a běžně používaných systémů údržby a všeho o údržbě jako takové, je svým způsobem na samostatnou disertační práci, proto jen bezpodmínečně potřebné v návaznosti na téma předkládané disertační práce, které vychází z evropské normy [31].

- **Preventivní údržba s předem stanovenými intervaly**

Spočívá v provádění kontrol nebo prohlídek v pevně daných termínech. Četnost prohlídek je dána statistickým monitorováním, případně odhadem podle zkušeností obsluhy nebo určením výše některého provozního parametru, např. hodiny provozu, či nasazení.

Rizikem jsou případné náklady vzniklé při opětovné montáži a zprovoznění u strojů bez poruchy.

- **Preventivní údržba podle technického stavu**

Základem je monitoring a diagnostikování stavu strojních zařízení a odpovídající reakce údržby. Pro základní subjektivní analýzu se stále využívají lidské smysly i přes aktuální velký rozvoj snímačů a diagnostických přístrojů. S ohledem na cenu těchto zařízení je důležité zvážit kritické nepředvídatelně se měnící parametry, které je třeba sledovat nepřetržitě, zatímco u některých postačuje kontrola v delším časovém úseku. Výhodou tohoto typu údržby je, že se používá, když je jí opravdu potřeba. Snižuje riziko havárie a tím i úrazu a zlepšuje znalosti obsluhy. Z pohledu nasazení technické diagnostiky detekujeme, lokalizujeme a specifikujeme technický stav.

- **Prediktivní údržba**

Plně využívá různých metod technické diagnostiky ve všech jejich možnostech, tzn. detekujeme, lokalizujeme, specifikujeme a predikujeme tzv. zbytkovou životnost, resp. čas do nutné opravy či obnovy ke zjištění potenciálních rizik, jež by mohly negativně ovlivnit další provoz strojů. Analýzou naměřených veličin a následnou predikcí se snaží tato rizika eliminovat a učinit taková opatření, která by zabezpečila bezproblémový chod zařízení.

- **Aktivní údržba**

Část údržby, ve které jsou zásahy prováděny přímo na objektu tak, aby byl udržen ve stavu, ve kterém může vykonávat svou funkci, nebo byl do něho navrácen [31].

Daleko více známější jako údržba po poruše – základní typ údržby praktikovaný u většiny méně významných strojů. Údržba prováděná po zjištění poruchového stavu a zaměřená na obnovu objektu do stavu, ve kterém může vykonávat požadovanou funkci [31].

Někdy se můžeme setkat také s termínem „proaktivní údržba“ [1]. Vznikla evolucí z prediktivní údržby jako reakce na pravidelně se opakující poruchy, jejichž původ bylo nutno identifikovat. Jedná se například o nevhodnou organizaci údržby, nekvalitní instalaci a nastavení objektu, špatně provedenou údržbu nebo nedostatečně proškolený personál. Oproti prediktivní údržbě se proaktivní údržba snaží o hledání spojitostí v širším kontextu, tedy o určitou systematičnost a nastavení správné metodiky. V praxi se to projevuje hlubší analýzou příčin poškození a zavedením odpovídajících opatření, důrazem na dlouhodobě stabilní technický stav objektu a předvídáním jeho budoucího vývoje s pomocí komplexnější databáze diagnostických dat. A neposlední řadě posílením role týmu, který zahrnuje širší okruh pracovníků a rovněž užším propojením údržby s výrobou. Tento typ údržby nejvíce naplňuje požadavky iniciativy Průmysl 4.0. [3]. Osobně jsem přesvědčen, že podstatu proaktivní údržby nejlépe vystihuje vyjádření: „hledání kořenové příčiny poruchy“, takže se jedná především o přístup k údržbě jako takové.

Zařízení pracuje do poruchy, poté je nahrazeno novým (okamžitá údržba, která se provádí bez odkladu). Pokud je schopno vykonávat alespoň částečně svou činnost, lze po

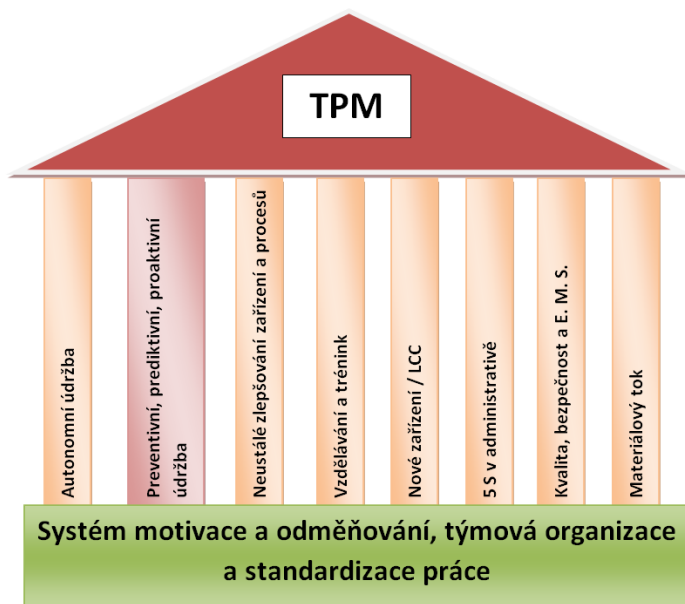
zvážení pracovníkem údržby, tuto výměnu odložit na vhodnější dobu, např. v době odstávky (odložená údržba).

- **Další používaná označení v údržbě**

V rámci jakési úplnosti podotýkám, že v souvislosti s údržbou jako procesně technickou činností se setkáváme postupem času v souvislosti s údržbou také v minulosti s následujícími termíny, péče o majetek, řízení aktiv, správa majetku, profylaktika, ale dnes také s označením outsourcovaná údržba, autonomní údržba apod. a především v návaznosti na „Průmysl 4.0“ s názvem preskriptivní údržba (moderní technologie údržby, kdy každý senzor může posílat datové toky s nastavitelnou vzorkovací frekvencí). Daný systém využívá tzv. big data, řečeno v jednoduché podobě, veškerá možná data vedoucí k zajištění provozuschopnosti, zvýšení provozní spolehlivosti a životnosti provozovaného objektu.

## 6.2 Komplexní produktivní údržba (TPM)

Častým důvodem ztrát, nízké produktivity a vysokých nákladů v podnicích je neuspokojivý provozní stav strojního (výrobního) parku zapříčiněný častými a opakujícími se poruchami, nedostatkem náhradních dílů, ale také v mnoha případech neodbornou údržbou strojů a zařízení. Na druhou stranu jsou pracovníci údržby mnohdy nedoceněni a málo motivováni. Cílem údržby všech technických zařízení je snížit nebo úplně vyloučit ztráty, které vnikají na základě nevhodného způsobu výroby, provozování, instalace a údržby daného zařízení. Základní pravidlo údržby říká, že údržba musí, stejně jako hlavní výrobní oblasti, maximálně přispívat ke zvyšování produktivity a udržení technického stavu zařízení a stát se produktivní údržbou.



Obr. 42) Základní pilíře TPM [2]

Jeden z pilířů – obr. 42. komplexní produktivní údržby je preventivní, plánovaná a prediktivní údržba. Abychom mohli cíleně provádět opravy strojních zařízení, je

bezpodmínečně nutné analyzovat stav strojů. K této analýze nám slouží mnoho metod na základě, kterých můžeme lépe naplánovat opravy a předem se na ně připravit. Pro hodnocení stavu strojního zařízení lze použít ON-LINE diagnostiku, kdy sledované zařízení je během provozu nepřetržitě napojené na diagnostický systém (condition monitoring) a měřená data jsou průběžně sledována a vyhodnocována. Druhým způsobem je použití OFF-LINE diagnostiky, při které pracovník v určitých časových intervalech provádí měření stanovených veličin, které pak následně vyhodnocuje pomocí trendové analýzy. Při zjištění zhoršených parametrů zařízení lze následně provést hlubší měření a analýzu, která vede ke zjištění příčiny neuspokojivých stavů a některou z metod proaktivní údržby zjistit prvotní příčinu vzniku poruchy.

### 6.3 Multiparametrická diagnostika jako součást TPM

Popsaná metodika multiparametrické diagnostiky má velký význam při využívání TPM ve firmách. Řešení problémů strojů touto metodou je vhodným nástrojem při proaktivní údržbě strojů a zařízení, tak abychom odstranili nejen následek poruchy a vyřešili příčinu, proč tato porucha vznikla.

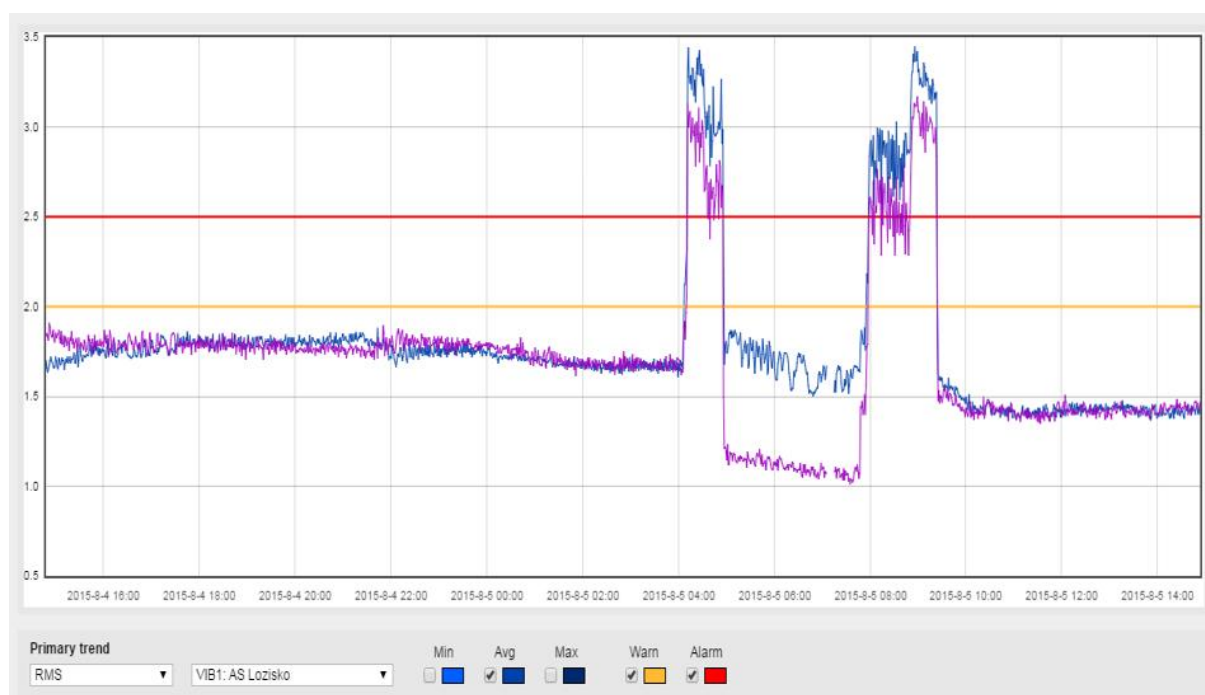
V mnoha firmách se provádí prediktivní údržba strojů, kdy na základě multiparametrické diagnostiky, případně jen její části, se provádí predikce stavu zařízení na základě, které je nutné stanovit a naplánovat případnou opravu tohoto zařízení. Jedná se především o sledování stavu ložisek, izolačního stavu vinutí motoru apod.

Navržená metodika MPD se zabývá komplexnějším vyhodnocením stavu zařízení jako jednoho oboru posouzení stavu strojů a dále pak ve spojení s analýzou MPD a dalších faktorů, objektivního stanovení příčin problému a návrhu vhodných opatření v rámci proaktivní údržby strojů a zařízení.

## 6.4 ON-LINE diagnostika v praxi

V mnoha případech se ON-LINE diagnostika nebo monitoring provádí za účelem sledování určitých provozních parametrů, které mohou mít charakter technologických dat (výrobní parametry např. tloušťka válcovaného plechu, teplota suroviny apod.) nebo provozních dat (diagnostická data – vibrace pohonu, teplota ložisek, příkony motorů...).

Ve většině případů jsou sledována a hodnocena data tak, že pro určité parametry jsou nastaveny limity alarmových – obr.43 a maximálních hodnot nebo určité rozpětí minimálních a maximálních hodnot, případně sledování změn měřených parametrů.

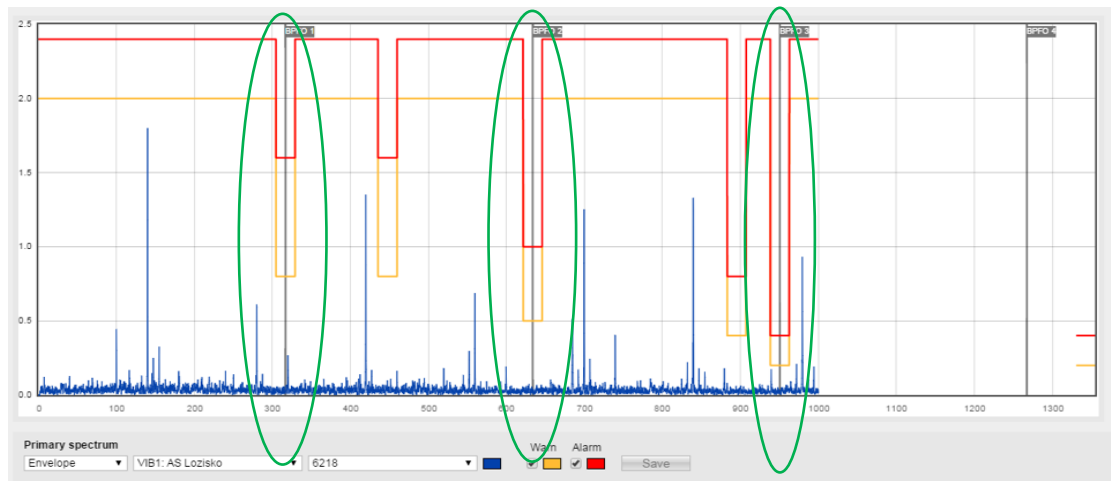


Obr. 43) Sledování trendu hodnot s nastavení varovací a alarmové hodnoty

Určitým posunem v ON-LINE diagnostice je sledování předem definovaných předpokládaných poruch strojního zařízení. Typickým příkladem je sledování poruch ložisek sledovaných strojů. Jak je známo, ložiska vykazují při poruše určité specifické frekvence, které v závislosti na známých otáčkách lze předem určit. Pokud sledované ložisko nevykazuje poruchu, amplitudy na těchto frekvencích jsou malé. Pokud vznikne vada např. na vnějším kroužku ložiska, generuje tato vada poruchové frekvence s harmonickými násobky, které se projeví ve spektrech zvýšením amplitud na těchto frekvencích.

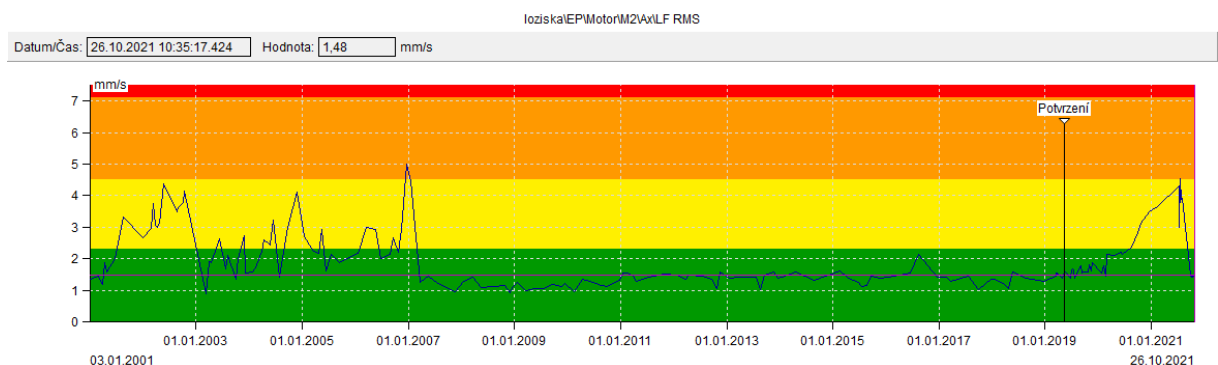
Dnes se objevují na trhu ON-LINE systémy, které umožňují sledovat přímo tato úzká pásma kolem předem definovaných frekvencí a pokud amplituda překročí určitou mez v tomto úzkém pásmu, systém vyhodnotí přímo, že se jedná například o vadu vnějšího kroužku ložiska motoru.

Na obr. 44 je znázorněné spektrum obálky zrychlení, kde jsou definované úzká pásma pro detekci poruchy ložiska. Při překročení amplitudy varovného signálu dá systém informaci, že sledované na sledovaném ložisku se vyskytuje vada a je třeba například připravit opravu, či servisní zásah. V případě překročení poruchového stavu, vyšle zařízení signál nahlášení závady s nutností servisního zásahu. Takto lze poměrně jednoduchým způsobem přímo detekovat jednotlivé závady strojů, u kterých známe jejich projevy při monitoringu stroje.



Obr. 44) Spektrum automatické detekce poruchy

Dalším již moderním způsobem detekce poruch a závad je využití umělé inteligence v diagnostice tzv. datové vědy, respektive počítačového učení pomocí neuronových sítí. Při tomto způsobu vyhodnocení měřených dat je třeba mít k dispozici určitou databázi informací a měření, kde pomocí určitých modelů a algoritmů lze vysledovat blížící se poruchu nebo závadu na stroji. ON-LINE diagnostika má v dnešní době nepostradatelný význam. Její využití je dnes rozšířeno nejen na strategické zařízení, které je nutné monitorovat jak z bezpečnostních důvodů, tak procesních důvodů, ale ON-LINE diagnostika má stále větší význam při multiparametrické diagnostice běžných strojů z hlediska jejich prediktivní údržby. Pro monitoring strojů je důležité sledovat nejen velikosti sledovaných veličin, ale jejich vlastnosti se zaměřením na vývoj specifických poruch zařízení.



Obr. 45) Příklad nastavení limitů pro sledování měřeného parametru

Na obr. 45 je znázorněn příklad vývoje rychlosti vibrací a zrychlení v určitém frekvenčním pásmu. Zde je zobrazen vývoj rychlosti, zrychlení a obálky zrychlení pohonu

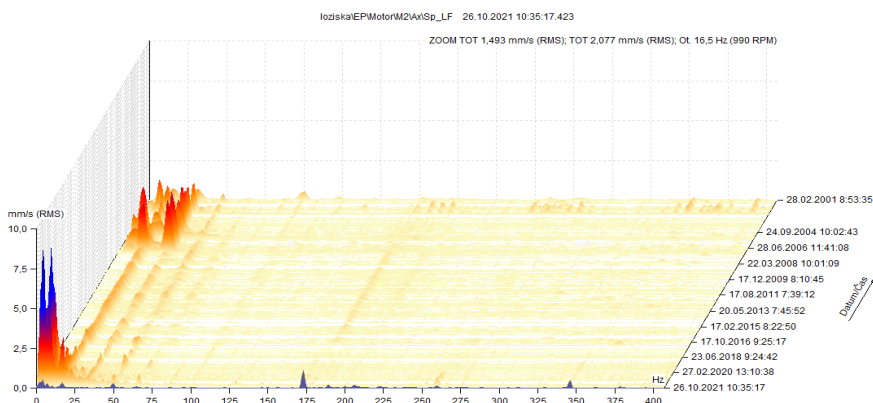
ventilátoru. Sledování těchto širokopásmových hodnot je velmi důležité pro zachycení vznikající závady nebo zhoršení parametrů sledovaného zařízení.

V mnoha případech pro sledování stavu strojů se monitorují jen širokopásmové hodnoty rychlosti vibrací dle příslušných norem. Tento monitoring rychlosti vibrací je značně omezující a v mnoha případech nezachytí zhoršující se stav sledovaného zařízení. Z tohoto důvodu je nutné sledovat i další parametry zařízení, jako je zrychlení a obálky zrychlení, případně další veličiny multiparametrické diagnostiky. V následujícím grafu - obr. 46, jsou zobrazeny hodnoty a okamžik, kdy byla potvrzena závada na ložisku ventilátoru. V rychlosti vibrací se však zvýšení hodnot prozatím neprojevílo.



Obr. 46) Trend zrychlení a obálky zrychlení

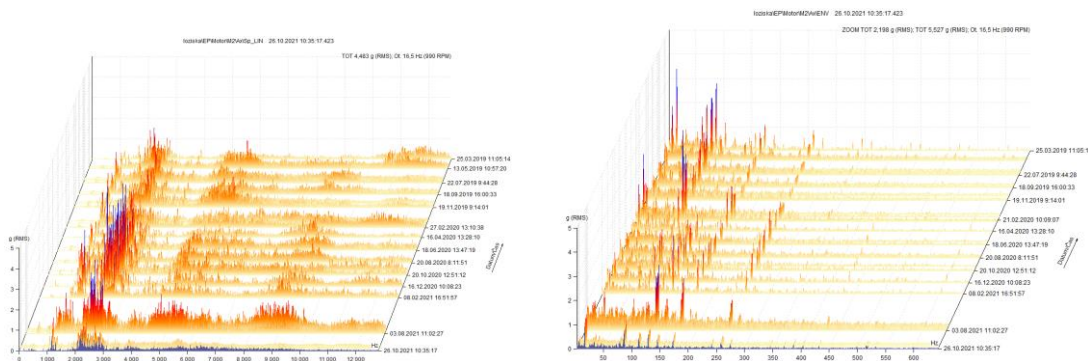
Abychom mohli lépe rozklíčovat zdroj tohoto nepříznivého vývoje, je nutné sledovat jednotlivé frekvenční složky. V následujícím grafu – obr. 47, je znázorněné spektrum rychlosti vibrací po sledovanou dobu monitoringu.



Obr. 47) Kaskáda spektra rychlosti vibrací s časovým průběhem



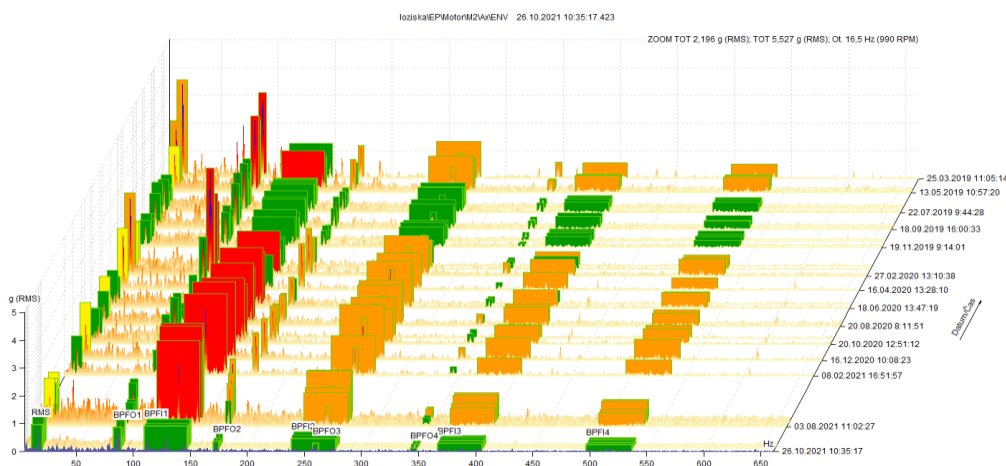
Dále je také nutno sledovat spektra zrychlení a obálky zrychlení – obr. 48.



Obr. 48) Kaskáda spektra zrychlení a obálky zrychlení

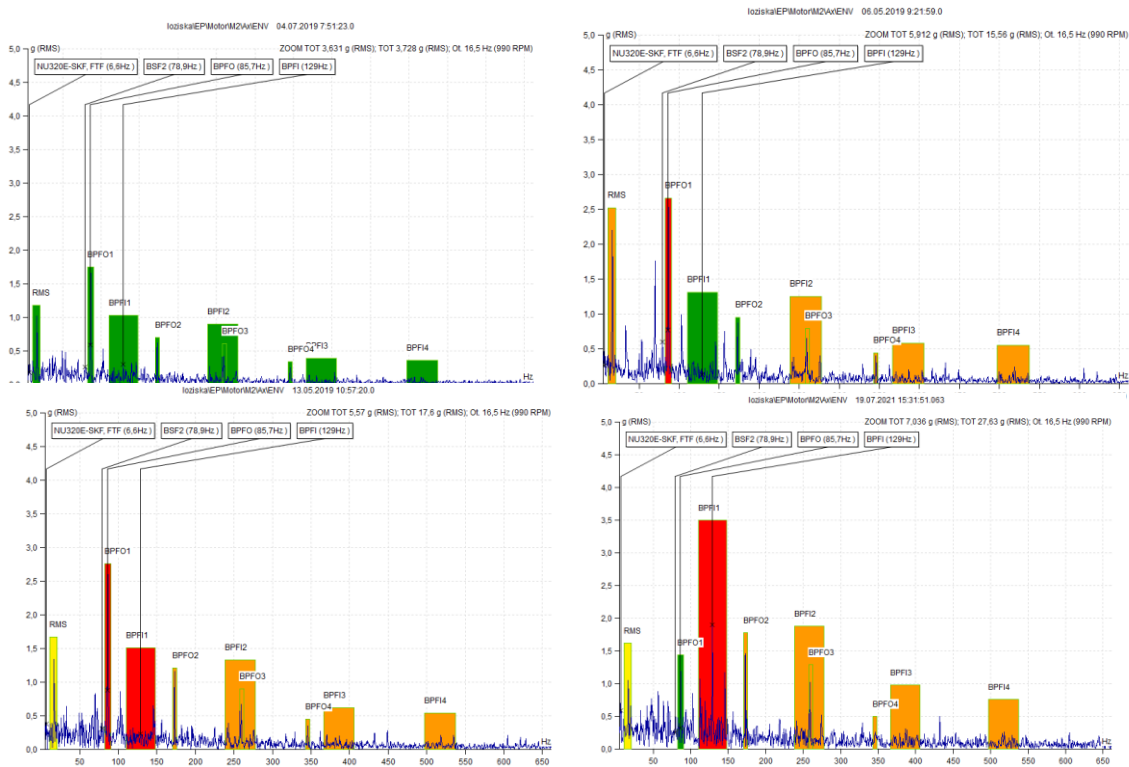
Normální zobrazení spekter nebo spekter v kaskádě může být pro běžného uživatele značně nepřehledné. Proto má velký význam sledovat určité předem definované vady a závady, které lze v monitoringu zúžit na úzké frekvenční pásma a tyto sledovat přímo pomocí předem definovaných mezí, kde jejich hodnoty mohou být závislé například na otáčkách, výkonu zařízení apod.

V následujícím grafu – obr. 49, je pro příklad znázorněn kaskádový graf obálky zrychlení, kde pro jednotlivé poruchové frekvence (v tomto případě vada vnějšího, vnitřního kroužku ložiska a otáčková frekvence) jsou nastaveny limity úzkého pásma, kde se jednotlivé poruchy mohou vyskytovat. Takto nebo obdobně lze postupovat i u jiných ON-LINE monitoringů například z analýzy napájecího proudu apod.



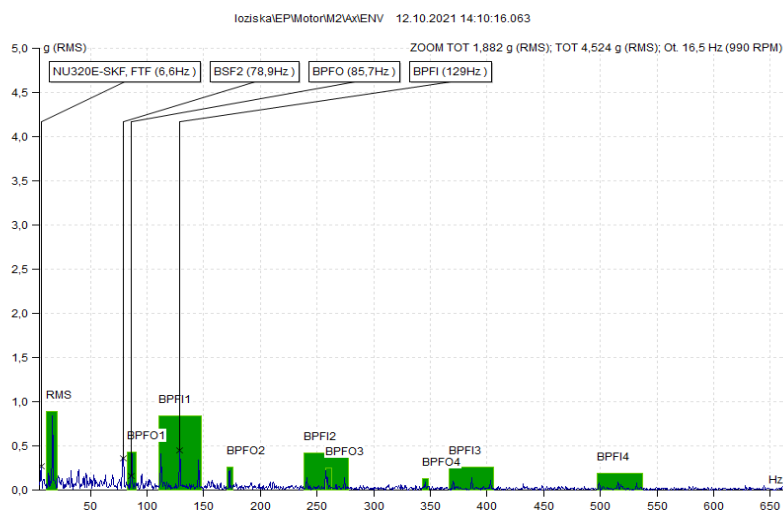
Obr. 49) Kaskáda s nastavením limitů pro úzkopásmové frekvence

V předchozím grafu – obr. 49, je vidět vývoj úzkopásmových hodnot pro jednotlivé poruchy a jejich harmonických násobků. V době kolem 3.8.2021 došlo k výměně ložiska, kde po výměně byly měřené hodnoty již v normálu.



Obr. 50) Příklad spektra s nastavením úzkopásmového limitu pro poruchové frekvence valivého ložiska a jeho harmonických násobků s vývojem poruchy

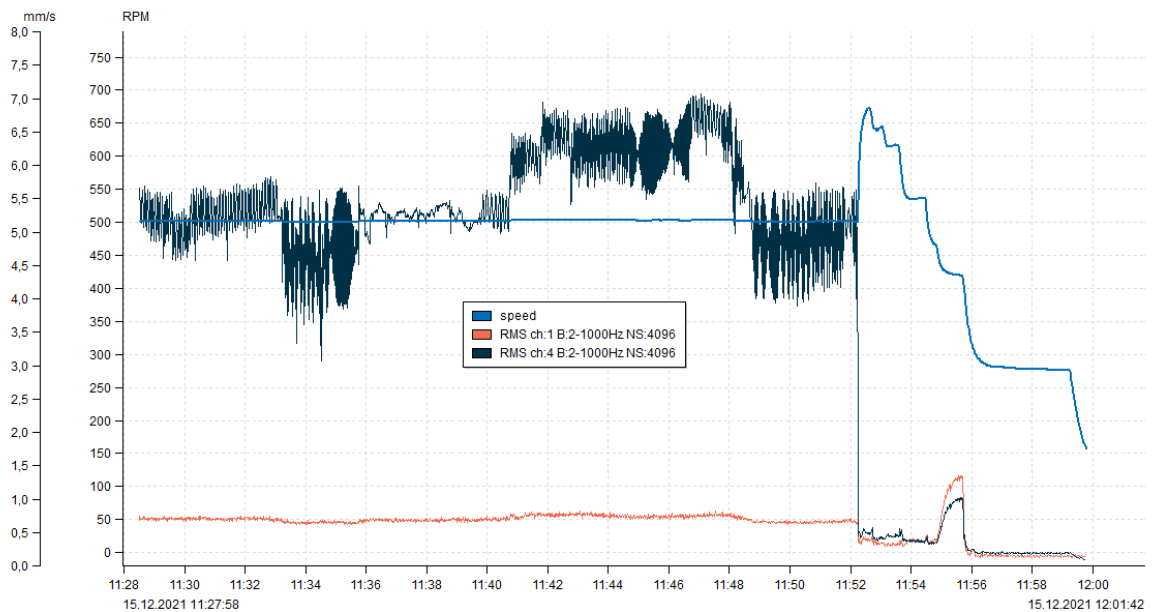
Na předchozích grafech – obr. 50, je vidět postupný vývoj poruchy vnějšího a vnitřního kroužku ložiska.



Obr. 51) Spektrum po provedené opravě

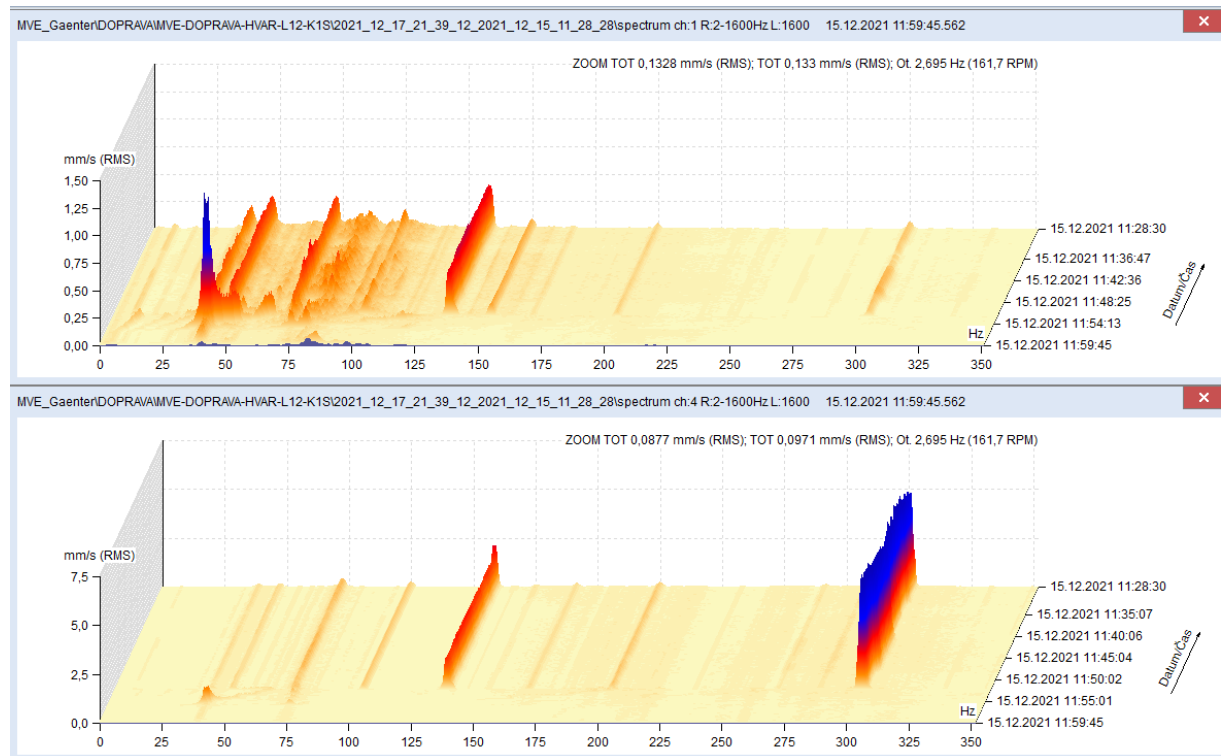
Zde na obr. 51, je vidět stav po opravě zařízení, výměně ložiska, kdy hodnoty byly již v normálu.

Dalším způsobem monitoringu je sledování širokopásmových hodnot v závislosti na otáčkách stroje. Na obr. 52, jsou uvedeny příklady různého znázornění.



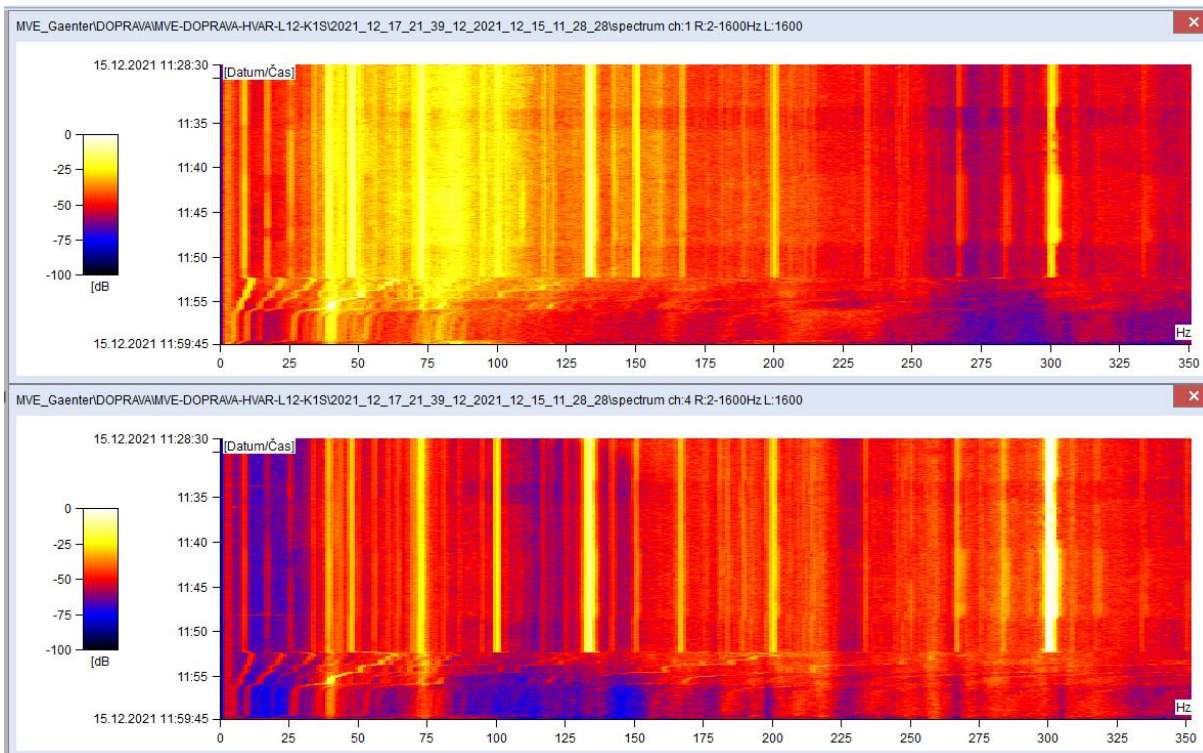
Obr. 52) Příklad závislosti měřených hodnot na otáčkách zařízení

Další běžným způsobem monitoringu je sledování vývoje amplitud na různých frekvencích. K tomuto účelu se používají kaskádová spektra – obr. 53, případně spektrografická spektra.



Obr. 53) Kaskáda spektra se změnou otáček

Druhý způsob zobrazení stejného grafu je zobrazení ve spektrografu – obr. 54.



Obr. 54) Spektrogram se změnou otáček

Obdobným způsobem lze hodnotit poruchy i při různých otáčkách. Zde je nutné brát zřetel na skutečnost, že sledované hodnoty nemusí být přímo úměrné otáčkám z důvodu různých rezonančních vlivů, přechodových stavů, elektrických vlivů apod. Nastavením úzkopásmových limitů tyto vlivy je nutné také zohlednit.

V dnešní době má ON-LINE i OFF-LINE diagnostika velký význam, jak pro sledování technického stavu strojů a zařízení, tak pro sledování provozních parametrů. Z těchto dat lze pak následně čerpat i při moderních metodách diagnostiky, jako je například diagnostika pomocí neuronových sítí a strojového učení apod. Dalším významem tohoto přístupu sledování poruch je možnost rychlé reakce údržby bez nutnosti podrobnějšího zkoumání a analýz sledovaného zařízení.

## 6.5 Dílčí závěr kapitoly

Aby byla technická diagnostika funkční, je třeba na ni pohlížet jako součást údržby. Cílem disertační práce není popsání metod, které se běžně používají. Pro pochopení cílů práce považuji za nutné uvést stručnou zmínku o dalších nezbytných souvislostech, jako je například Demingův cyklus řízení a zlepšovacích procesů PDCA, kde

**P – PLÁNUJ** (Plan), určení cíle, popis procesu a kontrolních bodů k dosažení deklarovaných výsledků.

**D – DĚLEJ** (Do), udělej návrhy podle plánu, řídit výrobu a službu.

**C – KONTROLUJ**, (Check), monitorování a měření procesů ve vztahu k požadavkům.

**A – JEDNEJ** (Act), taková opatření, aby bylo zabezpečeno neustálé zlepšování výkonnosti.

Dalším je tzv. Paretovo pravidlo, jedná se o analýzu vyhodnocení četnosti poruch, která je známá pod vyjádřením 80/20, tzn., že 80% událostí má 20% příčin, což v aplikaci na údržbu znamená, „Pokud údržbou perfektně obsloužím 20 % svého výrobního zařízení, vyřeším 80 % nepříjemností, které mohou vlivem nesprávné údržby nastat“.

Toto lze znázornit tzv. Lorenzovo křivkou, pro kterou platí následující téze z pohledu kritičnosti údržby.

1. **A - „Nejdůležitější“** stroje a zařízení, *cca 10 %* (případná havarijní porucha má vysoký nákladový důsledek, zejm. z prostojů ...) – *proaktivně prediktivní údržba*.
2. **B - „Středně důležité“** stroje a zařízení, *cca 40 %* (havarijní porucha způsobí značné ztráty, ale ne tak vysoké jako u strojů „1“) – *preventivní údržba*, většinou na základě doby používání (kalendářního stáří).
3. **C - „Ostatní“** stroje a zařízení, *cca 50 %* (havarijní porucha téměř nemá vliv na chod výroby ...) – *údržba po poruše*.

Dále je nutné připomenout: na obr. 42 je uvedeno, že jedním ze základních pilířů TPM je i metodika 5S. 5S představuje skupinu metod, metodik a postupů, které se zaměřují na organizaci na pracovišti, dodržování určitých pravidel a norem, posilování neustálého zlepšování kultury výrobního procesu. Je třeba si uvědomit, že tato metoda využívá lidského potenciálu začínající od vedení výrobní společnosti až po nejnižší pracovní pozice ve společnosti. Tento přístup zlepšuje úroveň kultury ve společnosti, zlepšuje komunikaci a motivuje zaměstnance ke zlepšení bezpečnosti a kultury prostředí. Principy 5S lze popsat těmito hesly (kroky).

- **SEIRI – SEPARACE** (roztřídit, pořádek – Sorting). Ponechat na pracovišti pouze nutné věci.
- **SEITON – SYSTEMATIZACE** (uspořádat; Set in Order). Vyjasnit posloupnost pracovních kroků.
- **SEISO - -SANITACE** (stálá čistota; Systematic Cleaning). Pracovní místo je nezbytné udržovat v čistotě, uklizené.
- **SEIKETSU – STANDARDIZACE** (Standardizing). Podporovat vzájemnou zaměnitelnost a jednotné postupy.
- **SHITSUKE – SEBEDISCIPLINOVANOST** (zlepšování, školení; Sustaining). Bezvýhradné dodržování postupů.

V dnešní době je v moderních firmách v rámci TPM zaváděno 5S, které patří k základům nejen štihlé výroby, ale i kultury bezpečnosti a provozní spolehlivosti.

V dalších pramenech se lze dočíst i o 6S, **SAFETY – BEZPEČNOST** (např. Semiklose Tom. *Bezpečnost práce: Šesté „S“ v metodě 5S. Řízení & Údržba průmyslového podniku*, 6-7/2014, ročník VII, s.20-23, ISSN 1803-4535). Lze dokonce dohledat i zmínky k 7S – odpad, tzn. ekologie.

V souvislosti s 5S a údržbou je nutno zmínit dva pojmy:

- **KAIZEN** – filosofie neustálého zdokonalování.

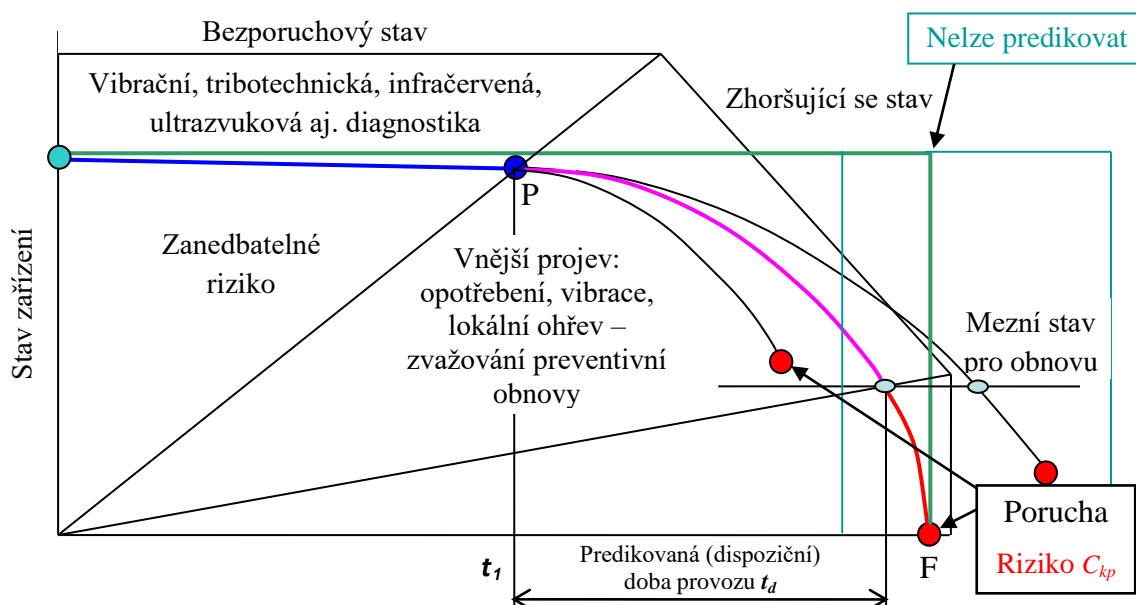
- **KANBAN** – karta, štítek, lístek k organizaci práce, v údržbě např. klasický štítek na každém stroji, názorné postupy k bezpečnosti práce a provozu, čarový kód objektu apod.

Dalším pojmem je problematika bezpečnosti technických systémů (BTS). Řešením problematiky BTS řešíme nejen otázku bezpečného a bezporuchového provozu daného zařízení se všemi možnými negativními důsledky, ale především jeho provozní spolehlivost, tzn. provozuschopnost a produktivitu daného technického zařízení.

BTS i BOZP (Bezpečnost a ochrana zdraví při práci) je v dnešní době samostatným vědním oborem, který má multidisciplinární charakter. Úzce souvisí nejen s konstrukcí a provozem strojů a zařízení, ale elektrotechnikou, ergonomií, hygienou, a dalšími vlivy, ale i implementací provozních aplikací systematickým přístupem. Dnešní pohled na bezpečnost v obecné rovině není jen jako prevence a opatření před pracovním úrazem a poškozením zdraví, ale komplexní pohled má daleko širší záběr. Jedná se o všechny aspekty související s provozem technických zařízení.

Průběh života obecného zařízení lze popsat nejen tzv. „vanovou křivkou“ průběhu diagnostického signálu, ale i tzv. PF křivkami, kde **symbol P** vyjadřuje bod na křivce, v němž je možné pozorovat nežádoucí změnu parametru – počátek vzniku potenciální poruchy a **symbol F** značí bod, ve kterém již došlo k reálné poruše – obr. 55.

Tento obrázek schematicky znázorňuje požadavky na údržbu v různých oblastech PF křivky. Naléhavost údržby (obnovy nebo opravy) v oblasti zhoršujícího stavu PF křivky je dána nejenom pravděpodobností poruchy  $F(t)$ , ale také třídou kritičnosti zařízení (A, B nebo C), jak je popsáno výše.



Obr. 55) PF křivka a oblasti různých koncepcí údržby a průběh pravděpodobnosti poruchy při údržbě po poruše (upraveno podle Ricky Smith, převzato [2])

Pokud máme dobře řídit procesy údržby, musíme bezpodmínečně měřit také jejich výkonnost, efektivitu a účinnost. K tomu slouží celá řada ekonomických nástrojů a metod, k nimž patří např. Benchmarking, Balanced Scorecard, Controlling aj. Dnes je světovým

trendem uplatňování a zavádění těchto nástrojů do managementu majetku a jeho údržby a jejich využívání pro lepší řízení s přihlédnutím k životnímu cyklu strojů a zařízení. V celé Evropě a také v České republice byla přijata norma o definici jednotného systému ukazatelů výkonnosti údržby ČSN EN 15341 Údržba – klíčové ukazatele výkonnosti.

## 7 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

**Hlavním cílem** předložené disertační práce je stanovení postupů a metodik s využitím metod technické diagnostiky.

Tyto musí být použitelné ke zpracování kroků implementace řešení systému údržby jako klíčového nástroje k ovládnutí rizika a bezpečnosti provozu každého technického systému, a tím i řešení problematiky provozuschopnosti, provozní spolehlivosti a životnosti, která by mohla být předložena s danou jistotou rozhodnutí k dalšímu posuzování jejich provozního nasazení sledovaných objektů.

**Dílčí cíle**, resp. kroky vedoucí k naplnění hlavního cíle:

- ✓ Zpracování nutných základních rešerší zaměřených na danou problematiku včetně nutných poznatků z teorie technické diagnostiky a jejího provozního nasazení do systémů údržby.
- ✓ Verifikace funkčnosti metod, metodik a postupů technické diagnostiky a následného systému údržby.
- ✓ Validace prokazujících měření vycházející z naměřených dat experimentálně, tak v in-situ.

Problematika řešená v disertační práci je vysoce aktuální. Motivů pro tvorbu této práce je celá řada. Základní, zcela logický důvod je uveden v hlavním cíli předkládané disertační práce. Další motivy jsou nastíněny v kapitole osobní motivace. Je bezpodmínečnou nutností dnešní doby zvyšovat objektivitu a jistotu rozhodování při posuzování technického stavu každého zařízení a technického systému.



## 8 EXPERIMENTÁLNÍ A PRAKTICKÁ ČÁST

V této části jsou popsány tři příklady řešení závažných provozních problémů strojů s proměnlivými otáčkami s využitím multiparametrické diagnostiky, dynamického hodnocení strojů vedoucí k provedení a realizaci nápravných opatření a doporučení pro údržbu.

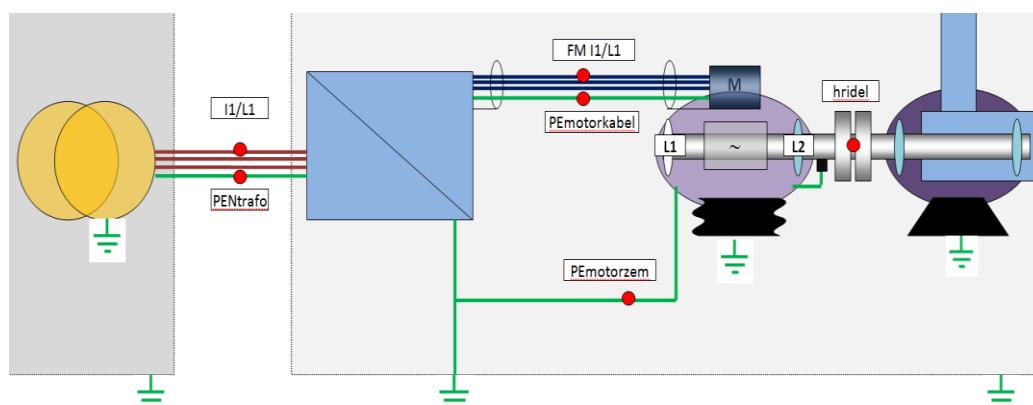
### 8.1 Multiparametrická diagnostika pohonů s frekvenčním měničem

**Problém:** časté výměny ložisek, vysoká teplota ložisek při provozu.

**Metoda řešení:** Frekvenční analýza vibrací motoru, analýza statorového proudu, analýza proudu na neživých částech zařízení, revize uzemnění zařízení, tribodiagnostika maziv, termodiagnostika, proudová mapa, analýza a návrh opatření.

V dnešní době se pro pohon různých zařízení, kde je nutné regulovat otáčky a výkon strojů, používají pohony s frekvenčními měniči. Výhody frekvenčních měničů po stránce regulace jsou nezanedbatelné, nicméně tyto aplikace přináší i řadu problémů, které se obvykle projevují nízkou životností valivých ložisek. Zde je uveden příklad diagnostiky pohonu s frekvenčním měničem, kdy životnost ložisek motoru byla značně omezená. Docházelo k haváriím ložiska po velmi krátké době, případně poruchám ložiska, které bylo signalizováno zvýšením teploty ložiska elektromotoru. Zajímavostí tohoto zařízení bylo, že pracovalo ve stejné konfiguraci několik let bez větších problémů. Problémy nastaly až po určité době, kdy proběhla rekonstrukce části havarovaného zařízení, která přímo nesouvisela s problémovým pohonem.

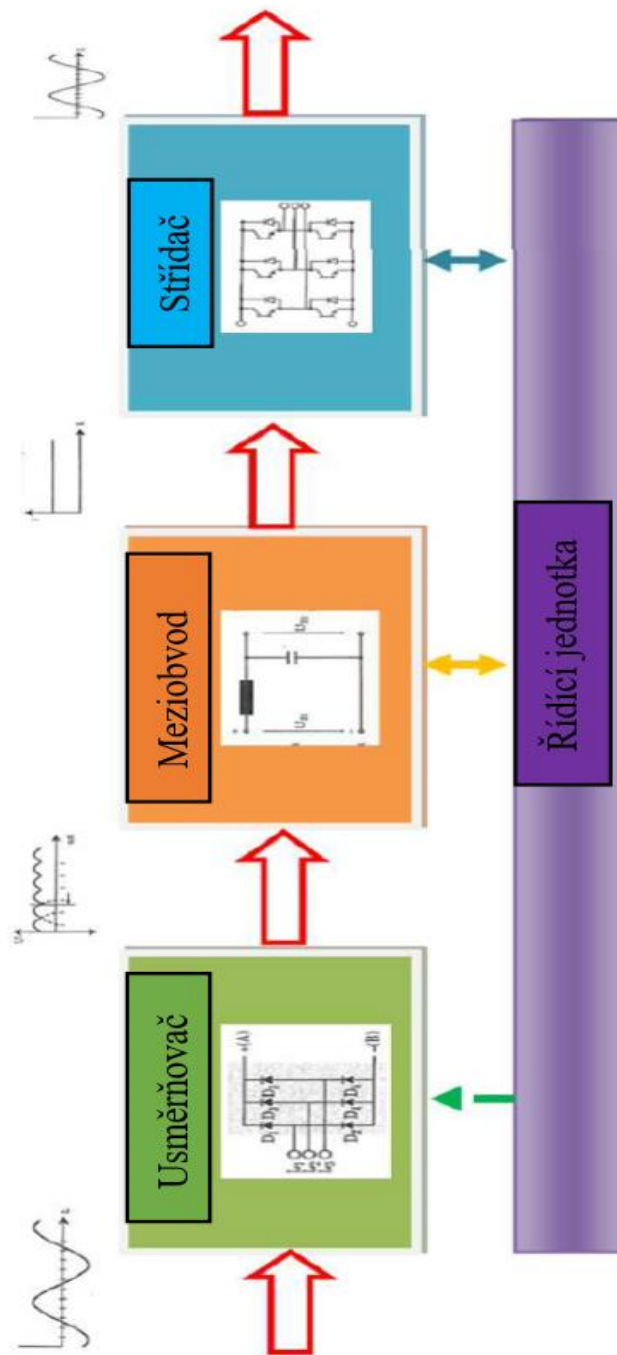
Elektromotor o výkonu 560 kW je napájen pomocí frekvenčního měniče. Aby bylo možné dosáhnout vyšších otáček kompresoru, napájecí frekvence motoru je v rozsahu 20 až 75 Hz. Schéma uspořádání zařízení je znázorněno na obr. 56. Díky vyšší napájecí frekvenci je možné dosáhnout otáček dvoupólového motoru až  $4500 \text{ ot.min}^{-1}$ .



Obr. 56) Schéma uspořádání soustavy TR-FM-AM-PZ

- TR** - transformátor
- FM** - frekvenční měnič
- AM** - asynchronní motor
- PZ** - poháněné zařízení

**Frekvenční měnič** – měniče se začaly používat s nástupem výroby polovodičových součástek. Vzniklo více druhů podle typů pohonů. Jeden z těchto typů je frekvenční měnič, který se využívá k řízení pohonu asynchronního elektromotoru. Hlavní výhodou tohoto spojení je řízení výkonu a otáček.



Obr. 57) Hlavní části měniče

Frekvenční měnič – obr. 57, se skládá z usměrňovače, kde se sinusový proud z napájecí sítě (50 Hz) usměrní. V meziobvodu se stále pulzující proud pomocí kondenzátorů a filtrů vyhladí a přechází do střídače. Střídač je poslední částí měniče. Je složen z polovodičových

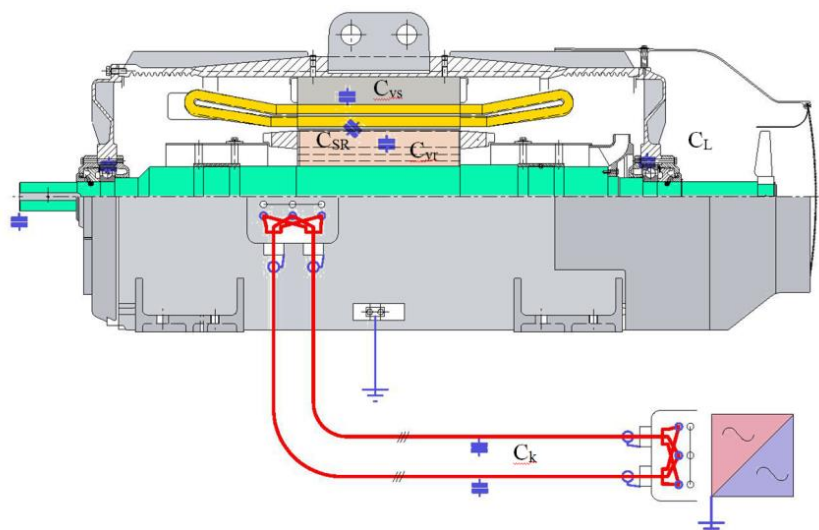
výkonových prvků, kde spínáním o velké frekvenci (např. pulzní frekvence o násobcích 1,25 kHz) generuje strmé obdélníkové pulsy, pomocí níž se modeluje požadovaný průběh proudu, který teče elektromotorem. Toto spínání je řízeno pulzní šířkovou modulací (PWM) z řídicí jednotky. Čím vyšší frekvence pulsů, tím je přesnější a hladší je křivka proudu.

### Kapacitní proudy

Při přímém napájení motorů ze sítě není nutné mít obavu ze vzniku kapacitních proudů. Situace se změní, pokud je motor připojen přes frekvenční měnič. V tomto případě je už vliv kapacitních proudů a souvisejících kapacitních vazeb nezanedbatelný. Důvod vyplyne z následujícího stručného popisu principu měniče.

Negativním důsledkem zvyšování pulzní frekvence je změna chování izolací různých částí motoru. Pro nízkofrekvenční napájení (například 50 Hz ze sítě) je impedance jednotlivých izolací (kapacitních vazeb) dostatečná, avšak z její definice rovnice (12) plyne, že s rostoucí frekvencí  $f$  a kapacitou izolace  $C$ , impedance  $Z$  (odpor vůči střídavému proudu) klesá, což má za následek průchod tzv. kapacitních (vysokofrekvenčních) proudů skrze tyto izolace.

$$(14) \quad Z = \frac{1}{2\pi f C} \quad [\Omega]$$



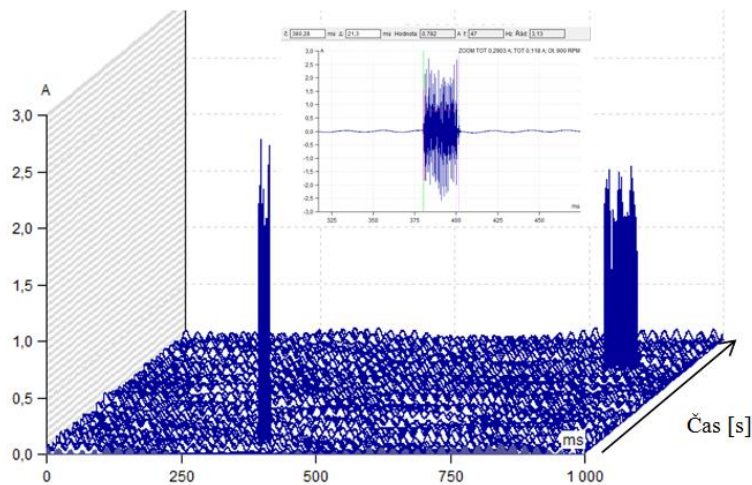
Obr. 58) Přehled hlavních kapacitních vazeb v asynchronním elektromotoru

V asynchronním motoru - obr. 58, se jedná zejména o tyto kapacitní vazby:

- $C_{vr}$  – kapacita mezi vinutím a rotorovým paketem
- $C_{vs}$  – kapacita mezi vinutím a statorovým paketem
- $C_{sr}$  – kapacita mezi statorovým a rotorovým paketem
- $C_k$  – kapacita kabelů
- $C_L$  – kapacita ložiska

Kapacitní proudy v systému se nemusí objevovat trvale, ale mohou se vyskytovat pouze jen v několika krátkých intervalech. To je důsledkem neustálého nabíjení se a vybíjení kapacit

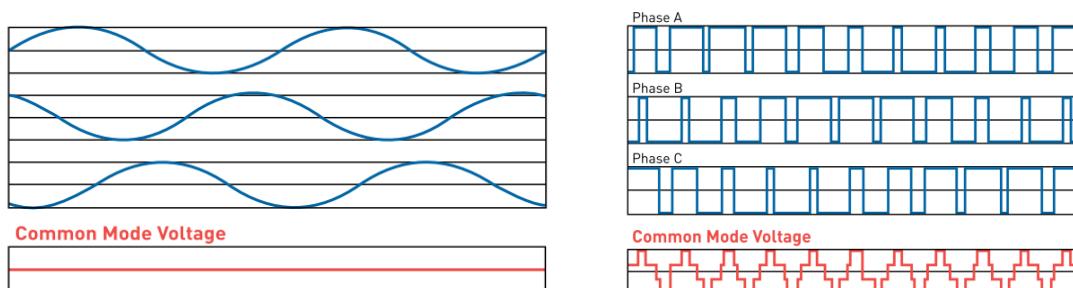
v těchto systémech. Na obr. 59 je znázorněn velmi krátký výskyt kapacitních proudů na hřídeli ventilátoru, který je v délce cca 30 ms. Frekvence této špičky pak odpovídá nastavené pulzní frekvenci frekvenčního měniče.



Obr. 59) Proudové špičky kapacitního proudu v hřídeli stroje

### Hřídelová napětí a ložiskové proudy

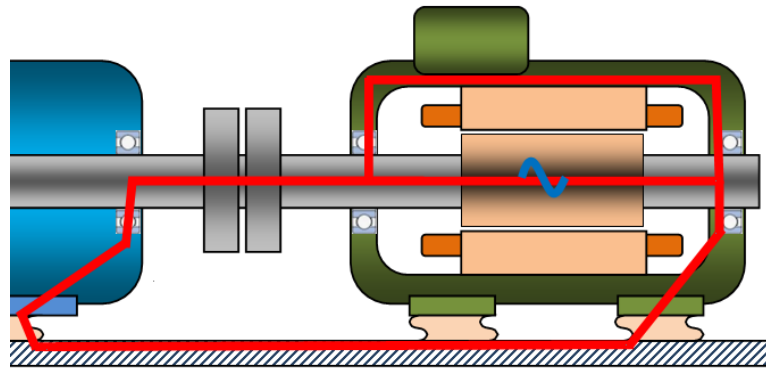
Před příchodem napěťových polovodičových střídačů bylo možné asynchronní motory napájet pouze sinusovými napětími ze střídavé rozvodné sítě. V roce 1907 jako první upozornili F. Punga a W. Hess na střídavá hřídelová napětí mezi konci hřídele, která měla za následek střídavé hřídelové proudy [4]. Fyzikální příčinou těchto hřídelových proudů byly magnetické nesymetrie, popř. technologické nedostatky stroje, které se projeví indukovaným napětím na hřídeli, nejčastěji v důsledku vzájemného pohybu hřídele a magnetického točivého pole stroje. Hřídelové napětí je výsledkem působení magnetického pole na hřídel, kde se díky mechanickým nepřesnostem nebo nesymetrickému napájení deformuje magnetické pole v motoru a tím se indukuje určité napětí mezi konci hřídele. U motoru napájeným frekvenčním měničem z důvodu charakteru nesinusového průběhu napětí ve fázi je magnetické pole motoru značně ovlivněné. Proto je důležité, aby tzv. „common mode voltage“ (CMV), nebo-li souhlasné napětí frekvenčního měniče bylo co nejmenší a tím se eliminovala nesymetrie magnetického pole motoru z důvodu nesymetrie napájecího napětí - obr. 60. Tato hodnota je pak důležitá pro analýzu hřídelových napětí a posouzení poměru ložiskových napětí.



Obr. 60) Zobrazení CMV sinusového a nesinusového průběhu napětí [25]

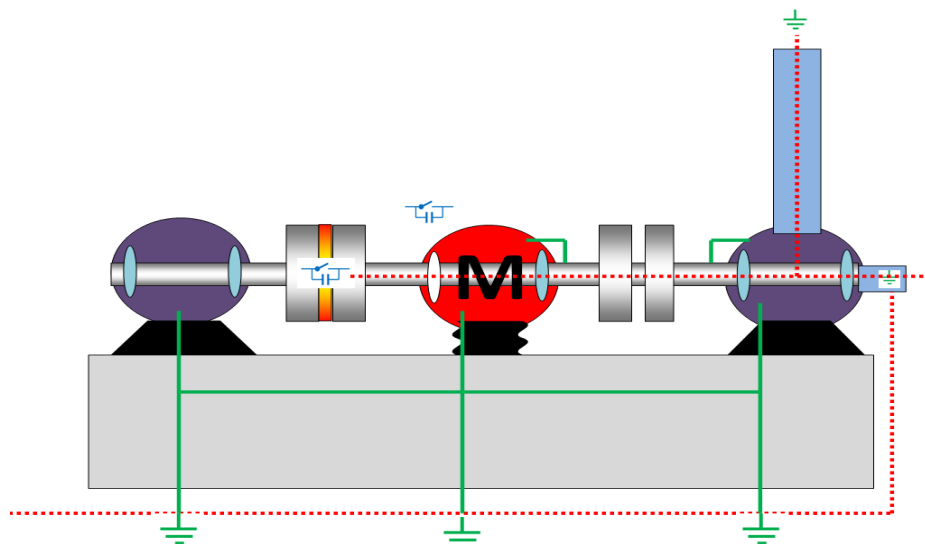
Ložiskové proudy pak nevzniknou, dokud hřídelové napětí nepřekročí mezní hodnotu, závislou na průrazném napětí tukové či olejové vrstvy maziva v ložisku.

Pokud je ložisko domazáváno nedostatečně nebo je hřídelové napětí příliš velké, vzniká vodivým spojením přes ložiska, kostru, spojku a případně poháněné zařízení cesta pro průchod ložiskových proudů, označeno červeně na obr. 61. Obvyklá hodnota hřídelového napětí, vyžadující provést odpovídající ochranné opatření proti parazitnímu proudu, je 0,3 V.



Obr. 61) Cesta parazitního proudu přes ložiska

Aby se zabránilo průchodu proudu přes valivá ložiska, je třeba jedno ložisko izolovat obvykle na opačné straně spojky. V případě, že na motoru jsou dva volné konce, je třeba izolovat i spojku na této straně - obr. 62.



Obr. 62) Elektromotor se dvěma volnými konci a izolovanou spojkou a ložiskem

### Vnější zdroje proudu

Dalšími zdroji proudu mohou být zdroje, které nesouvisí s provozem dotčeného zařízení, nicméně tyto bývají pro jeho funkci velmi nebezpečné. Příkladem takových to proudů jsou:

- Bludné proudy v okolí železnic, proudy při úderu blesku.
- Zkratový proud před sepnutím ochrany, zavlečený proud – při svařování – přivaření valivých těles k ložiskovým kroužkům, indukované napětí v kabelech (kabelové lávky), vyrovnávání potenciálu mezi budovami, statická elektřina.

### Důsledky parazitních proudů

Průchod parazitních proudů způsobený nesymetrií, kapacitními vazbami, případně dalšími příčinami, snižuje životnost a provozuschopnost zasažených ložisek, ozubení převodovek, hřídelových ucpávek a těsnění, a dalších rotujících částí zařízení. Z tohoto důvodu je nutné tyto vlivy omezit a aplikovat taková opatření, která by zabránila poškození části strojů a také zabránila zbytečným odstávkám strojního zařízení.

Multiparametrická diagnostika využívá pro zjištění stavu zařízení dvou a více metod. Dává ucelenější obraz o stavu zařízení a lze ji využít jak pro ON-LINE diagnostiku (condition monitoring), tak pro OFF-LINE diagnostiku (testovací, případně pochůzkovou diagnostiku).

U pohonu s frekvenčním měničem se nejvíce využívá vibrodiagnostika a elektrodiagnostika, kterou doplňuje termodiagnostika a tribodiagnostika.

Abychom mohli spolehlivě posoudit stav zařízení regulovaného pohonu, je nutné přistupovat k diagnostice velmi komplexně. První metodou, kterou posuzujeme stav zařízení, je vibrodiagnostika. Zde se nehodnotí vibrace podle příslušné normy, ale je nutné provádět diagnostiku za účelem sledování dějů a vlivů, které jsou ovlivněny napájením z frekvenčního měniče.

Druhou metodou je elektrodiagnostika. Pomocí této metody sledujeme charakter napájení motoru, symetrie jednotlivých parametrů proudu a napětí, velikosti harmonických frekvencí a hlavně průběhy a velikosti vysokofrekvenčních složek proudu při stabilním provozu a při dynamických dějích. Dalším ne méně důležitým měřením je analýza hřídelových napětí a ložiskových proudů. Toto měření bývá zpravidla velice náročné z důvodu přístupu na rotující části strojního zařízení, a ne vždy toto měření je uskutečnitelné. Také měření proudu přes ložiska bývá velmi komplikované z důvodu, že samotné ložisko je také vodič a odpor v obvodu, a my můžeme jen velmi obtížně tyto proudy vyhodnocovat. Neméně významným měřením je analýza proudů v PE vodičích a ve všech uzemňovacích a propojovacích vodičích. Tato analýza nám může dát ucelený obrázek o způsobu správného pospojování a uzemnění strojního zařízení.

Podpůrnou disciplínou je zde i tribodiagnostika, kterou většinou zjišťujeme stav a kondici plastických maziv a to především, zda odebraná maziva nejsou degradována průchodem proudu a zda neztrácí mazací schopnost pro mazání ložisek.

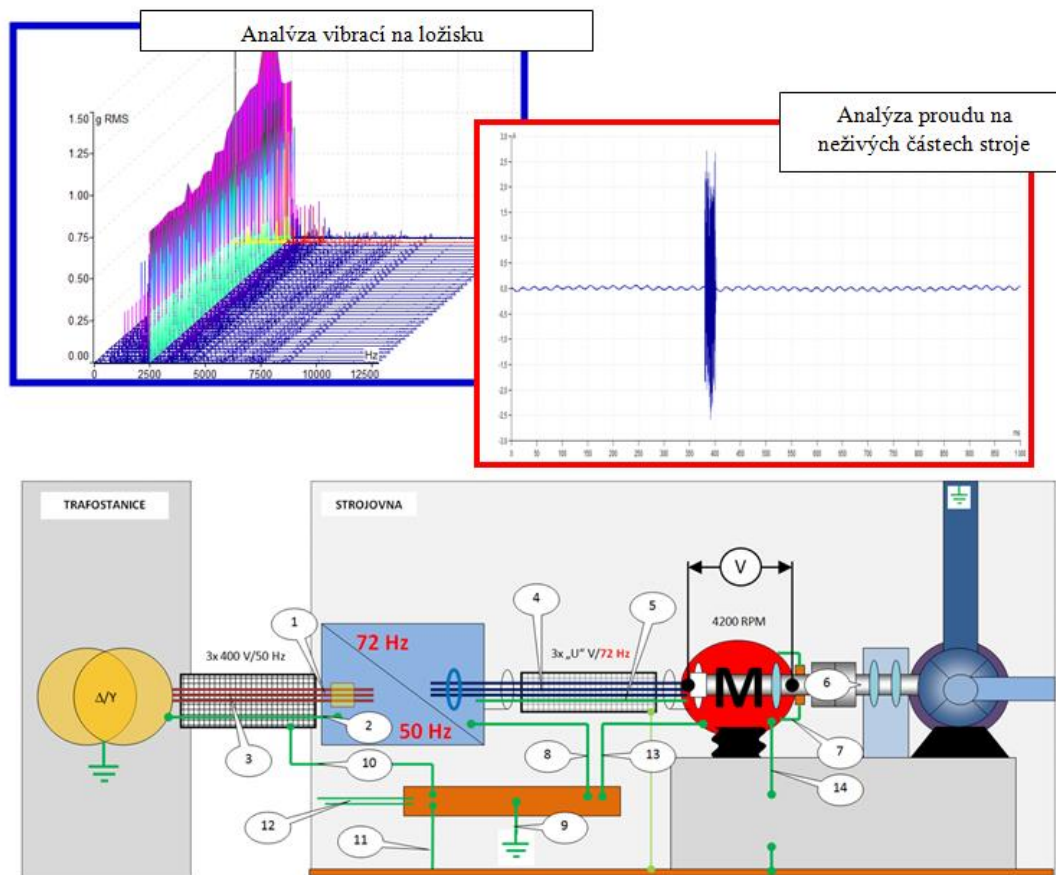
Použití termodiagnostiky spočívá v hledání teplejších míst např. na svorkách kabelových svorkovnic nebo na připojovacích lištách frekvenčního měniče, kde teplejší spoj může znamenat přechodový odpor ve spoji a tím i nerovnoměrné rozdělení proudu mezi paralelními vodiči.

Na obr. 63 je znázorněn příklad objektu diagnosticky, který se skládá z napájecího transformátoru, připojovacích kabelů, frekvenčního měniče, napájecích kabelů motoru, asynchronního motoru, poháněného zařízení a základu se systémem zemnicích bodů.

Je zde znázorněn příklad frekvenční analýzy zrychlení vibrací, kdy při ustáleném chodu dochází během velmi krátkého časového úseku k nárůstu amplitudy na pulzní frekvenci frekvenčního měniče. Dále je zde znázorněn velmi krátký výskyt nárůstu proudu na hřídeli u pulzní frekvenci FM.

Abychom si mohli vytvořit diagnostický obraz o stavu tohoto zařízení, je nutné analyzovat nejen vibrace na ložiscích strojního zařízení a napájecí proud v určitém časovém úseku, ale i proudy v zemních a propojovacích vodičích, hřídeli mezi motorem a poháněným zařízením. Důležitá je i analýza hřídelového napětí motoru.

Na základě těchto dílčích analýz je důležité posoudit i vhodnost konstrukčního a elektrického návrhu řešení stroje a navrhnout vhodná opatření pro eliminaci nežádoucích vlivů frekvenčního měniče.



Obr. 63) Příklad diagnostiky zařízení s frekvenčním měničem

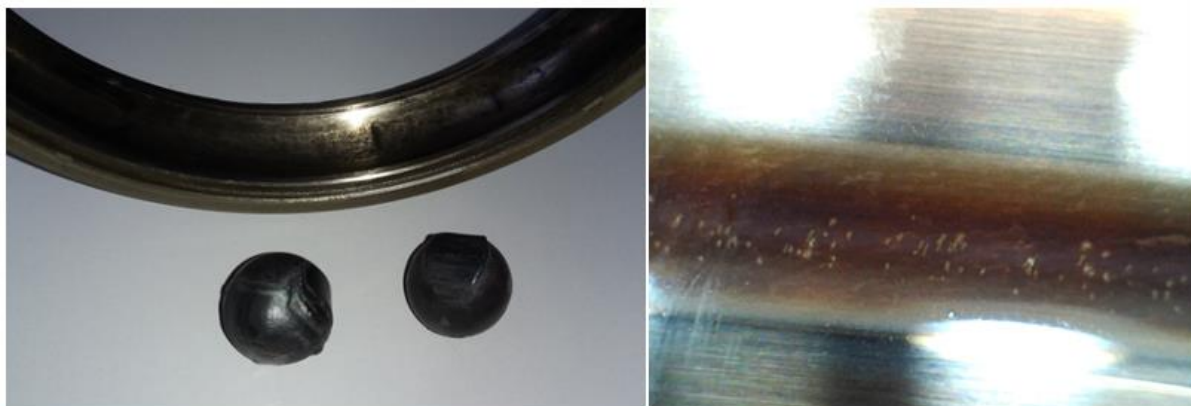
**Legenda:**

1. Měření proudu na fázových vodičích mezi transformátorem a FM.
2. Měření proudu na PE vodiči mezi transformátorem a FM.
3. Měření proudu na nosné lávce vodičů mezi transformátorem a FM.
4. Měření proudu na fázových vodičích mezi FM a AM.

5. Měření proudu na PE vodiči mezi FM a AM.
6. Měření proudu na hřídeli mezi motorem a ventilátorem.
7. Měření proudu na vodiči ukostření hřídelových kartáčů.
8. Zemnicí PE vodič FM na uzemňovací bod strojovny.
9. Vývod na vnější uzemnění.
10. Zemnicí PE vodič nosné lávky mezi transformátorem a FM.
11. Spojení uzemňovacího bodu s hlavní ochranou přípojnicí (HOP) strojovny.
12. PE vodiče místního přizemnění.
13. Zemnicí PE vodič AM na uzemňovací bod strojovny.
14. Ekvipotenciální pospojování motoru s rámem.

- **Definice problému**

Jak již bylo řečeno, docházelo na motoru k častým poškozením ložisek motoru – obr. 64, i když ložiska byla izolovaná. Problémy se projevovaly nárůstem teploty ložisek motoru a současně zvýšenými hodnotami zrychlení vibrací.



Obr. 64) Poškozené NDE ložisko elektromotoru

### 8.1.1 Návrh metod MPD

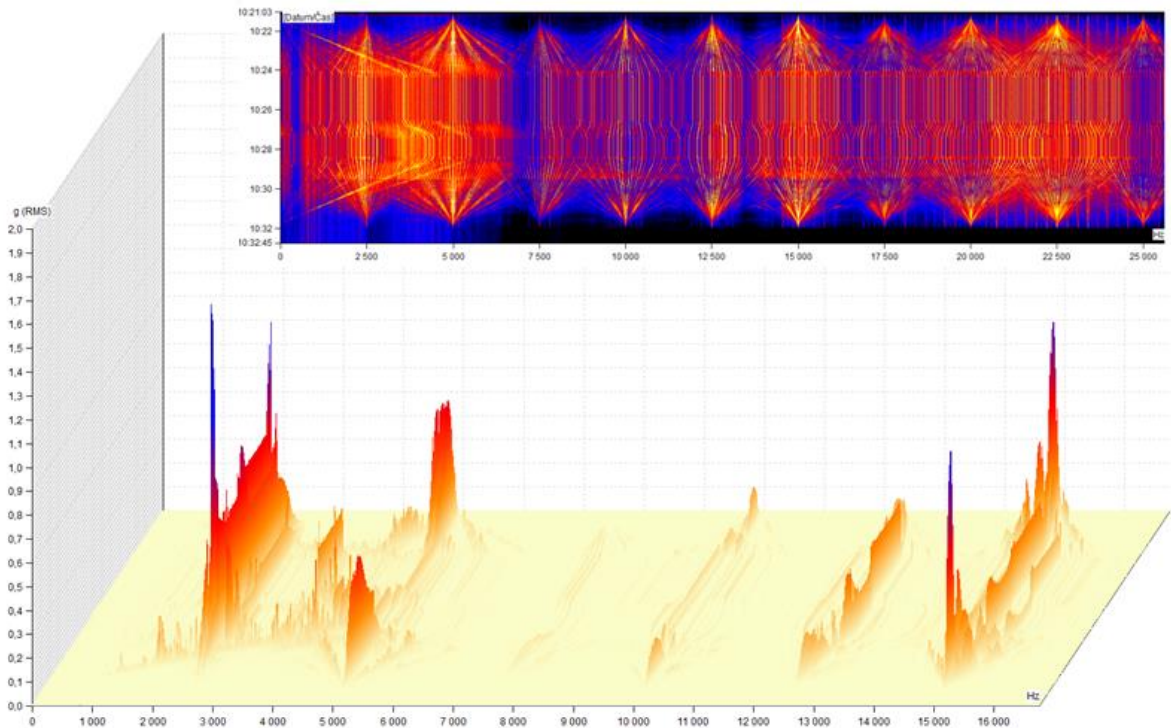
Na základě rozboru konstrukce zařízení, kdy motor je poháněn frekvenčním měničem, byl proveden návrh pro provedení měření tohoto zařízení. Tento návrh spočíval v tom, že celé zařízení bude po určitou dobu sledováno pomocí vibrodiagnostiky, kdy byly sledovány vibrace ložisek na elektromotoru za současného měření napájecích proudů a proudů v PE vodičích. Dále byl navržen pomocí tribodiagnostiky rozbor použitého plastického maziva, který byl odebrán při výměně vadného ložiska. Další metodou pro zjištění příčiny byla navržena termodiagnostika motoru a frekvenčního měniče pomocí termografických snímků.

- **Vibrodiagnostika**

Analýza vibrací pohonu napájeným frekvenčním měničem je především zaměřena na vlivy pulzní frekvence na ložiska soustrojí. Střídavé napájecí napětí motoru o požadované frekvenci je modulováno tzv. pulzně šířkovou modulací (PWM) tak, aby výsledný proud byl sinusový. Základní pulzní frekvence o velikosti jednotek kHz, ze které je střídavé napětí



modulováno, dochází v obvodu asynchronního motoru k průniku VF proudů přes všechny izolace (izolace kabelů a vinutí, vzduchovou mezer motoru apod.) v motoru a uzavírání VF obvodu přes neživé části soustrojí. Tyto VF proudy pak prochází přes ložiska motoru, kde jsme pak schopni měřit reakci na tyto proudy ve formě zrychlení. Reakci vibrací, například během domazání ložiska, jsme pak schopni například posoudit vliv těchto VF proudů na ložisko, případně hledat analogie s analýzou napájecího proudu. Příklad analýzy vibrací je na obr. 65, kde jsou ve spektru zrychlení viditelné harmonické násobky pulzní frekvence s postranními pásmy.



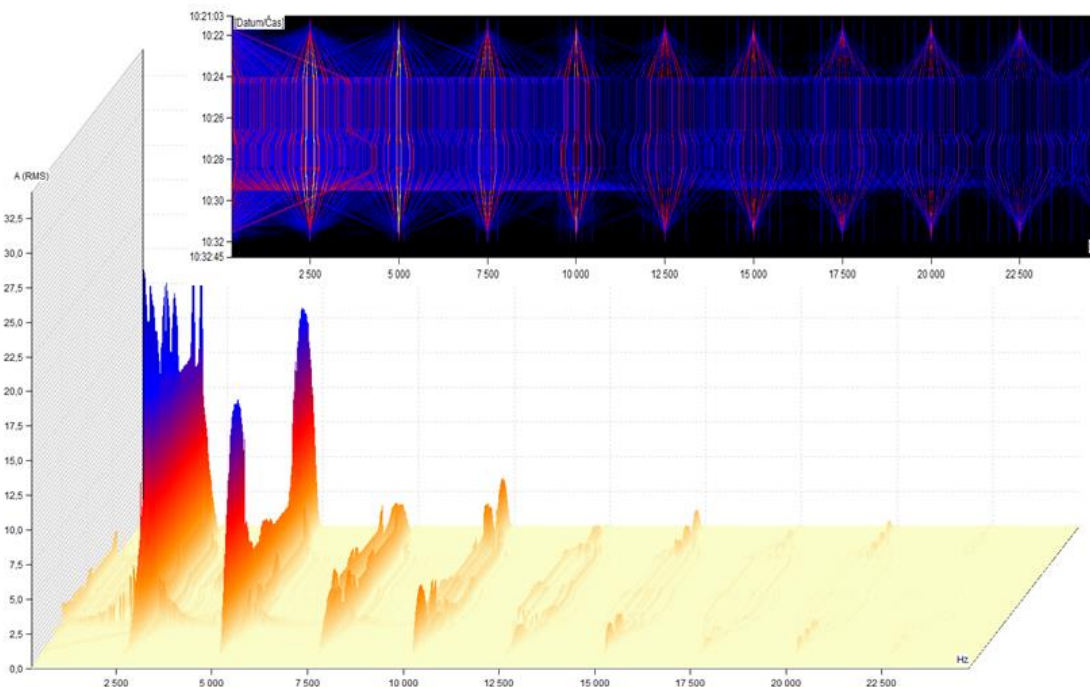
Obr. 65) Frekvenční analýza zrychlení vibrací během rozběhu a doběhu motoru

Z hlediska kompletní analýzy motoru by bylo velmi zajímavé měřit i torzní kmity na hřídeli. Toto měření je však velmi technicky i finančně náročné z důvodu, že je nutné pro měření torzních kmitů použít tenzometry nalepené na hřídeli a pomocí můstkového zapojení ukládat naměřená data do vhodného dataloggeru umístěného na hřídeli, případně zajistit bezdrátový přenos z rotoru. Zde se však u frekvenčních měničů setkáváme s velkým zarušením signálu a tato metoda bývá často nepoužitelná. Druhou metodou je měření torzních kmitů metodou fázové demodulace signálu. Tato metoda také má své nevýhody. Měřený motor musí mít provedenou přípravu pro montáž měřícího senzoru a měření dost často bývá zatížené určitou chybou.

- **Elektrodiagnostika**

Předmětem elektrodiagnostiky pohonů s FM není jen analýza sítě před měničem a za měničem, ale také frekvenční analýza zemničů, propojek neživých částí a konstrukcí. To vše je nutné sledovat v různých režimech a přechodových dějích. Dále je nutné analyzovat vlivy filtrů,

kteře mají eliminovat nepříznivé vlivy spínací frekvence a jejich harmonických složek. Nedílnou součástí tohoto oboru je posouzení vhodnosti zapojení, použití EMC prvků a stínění, navrhnout vhodné filtry pro potlačení VF složek.



Obr. 66) Frekvenční analýza proudu během rozběhu a doběhu motoru

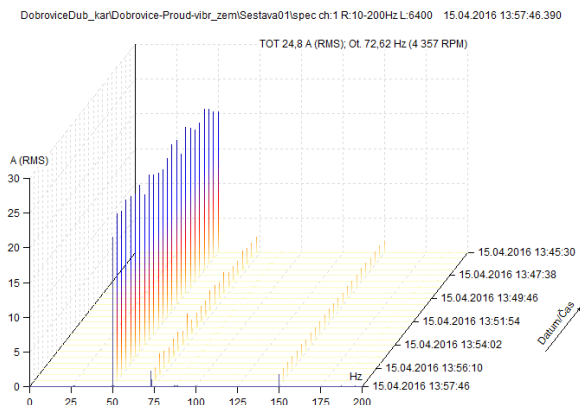
Na obr. 66 je vidět analogie FFT analýzy napájecího proudu a FFT analýzy zrychlení vibrací, které bylo provedeno na ložisku asynchronního motoru.

U těchto pohonů je také velice důležitá analýza hřídelového a ložiskového napětí, kdy je nutné měřit jak RMS hodnoty, tak i špičkové hodnoty a jejich frekvenci. Toto měření bývá někdy velmi obtížné z důvodu, že je nutné měřit sondou na rotující části motoru, nicméně pro hodnocení vlivu frekvenčního měniče má velký význam.

Další důležitou analýzou je měření a analýza proudů a napětí v PE vodičích a v hřídeli, případně jiných měřitelných částí konstrukce apod.

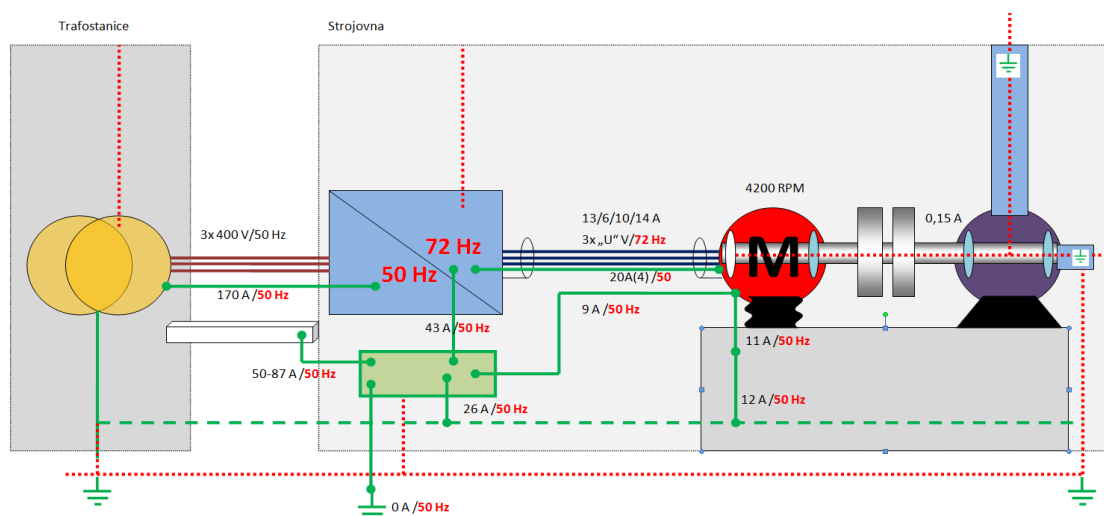
Analýzou těchto proudů lze sestavit tzv. proudové mapy (termín autora) a tím se snažit určit zdroj těchto proudů. Abychom mohli takovou mapu sestavit, je nutné analyzovat nejen RMS hodnoty proudů v PE vodičích a v neživých částech strojů, ale také amplitudy a frekvence těchto proudů. Příklad takového měření je v následujícím obrázku, kde je měřen proud v PE vodiči uzemnění a pospojování elektromotoru.

Na obr. 67, je vidět, že při napájení motoru frekvencí 72 Hz, je značně velká amplituda o frekvenci 50 Hz. Takto byly provedeny měření v různých částech strojního zařízení a zaznamenány do proudové mapy.



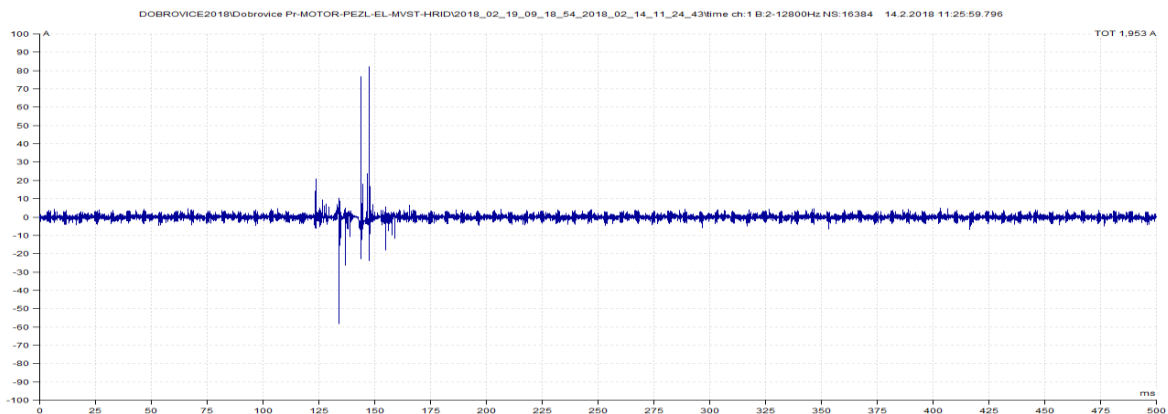
Obr. 67) Analýza proudu v PE vodiči motoru

Z proudové mapy - obr. 68, vyplývá následující zjištění. Dominantní amplituda proudu, která se vyskytuje v neživých částech strojního zařízení, je na frekvenci 50 Hz. Největší amplituda na této frekvenci a zároveň největší proud byl naměřen na PE vodiči mezi trafostanicí a frekvenčním měničem. Ostatní proudy, které byly měřeny, byly rozvětvením mezi jednotlivé proudové okruhy ve strojovně. Zajímavostí bylo, že zemnicí proud (uzemnění strojovny) byl velmi malý. To nasvědčovalo problému, že uzemnění strojovny není funkční, což se později potvrdilo měřením zemního odporu. Při měření PE vodičů v trafostanici bylo zjištěno, že tento maximální proud se vyskytuje pouze na lince do strojovny s frekvenčním měničem. Byla provedena kontrola na vstupu frekvenčního měniče, kde nebylo shledáno žádných závad. Z proudové mapy bylo dále zjištěno, že poměrně velký proud se také nachází v přizemnění kabelové lávky přívodních vodičů. Na základě těchto indicií byla provedena kontrola uložení kabelů, kde bylo zjištěno, že jednožilové kabely jsou uloženy na kabelové lávce vedle sebe. Po vysvazování kabelů v celé délce přívodních vodičů do trojúhelníku, proud v PE vodiči mezi trafostanicí a frekvenčním měničem klesl ze 170 A na 30 A/50 Hz.



Obr. 68) Proudová mapa v neživých částech a v PE vodičích

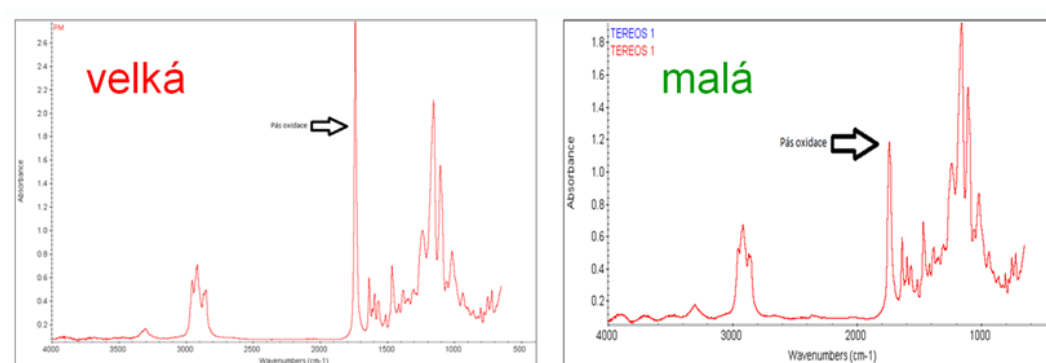
Životnost ložisek se sice prodloužila, ale nedosahovala ještě požadované doby životnosti. Bylo provedeno další měření se zaměřením na kapacitní proudy v neživých částech zařízení. Na přizemnění PE vodiči motoru byly měřeny proudy, které byly analyzovány v časové oblasti. Z této analýzy je zřejmé, že zde dochází ke krátkodobému nárůstu proudu v PE vodiči - obr. 69, který je s největší pravděpodobností způsoben vybíjením nakumulované energie v izolacích (kapacitách) motoru, včetně izolace valivého ložiska.



Obr. 69) Analýza proudu v PE vodiči v časové oblasti

- **Tribodiagnostika**

Úkolem tribodiagnostiky v diagnostice pohonů je zjistit z odebraných vzorků schopnost maziva plnit svou funkci pro mazání ložisek, případně převodovek. Při nesprávné funkci zařízení, bývají maziva velmi často rozkládána a oxidována průchodem proudu a následně z důvodu špatného mazání kontaminována materiálem z mazané části z důvodu, že mazivo již neplní svoji funkci a dochází k otěru povrchu mazaných ploch (například materiál z poškozované dráhy ložisek). Plastické mazivo ztrácí schopnost vázat olejovou složku, dochází k vytečení olejové složky z ložiska a totální degradaci maziva, která se projevuje v poslední fázi nárůstem teploty ložiska.



Obr. 70) Analýza mazacího tuku metodou infračervené spektrografie (FTIR)

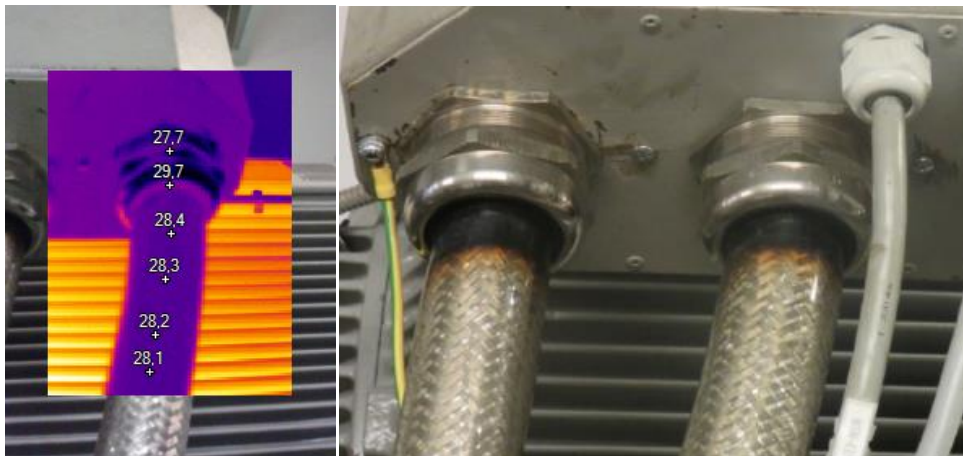
Na obr. 70, je analýza FTIR plastického maziva, s velkou hodnotou oxidačního pásma, které je degradováno průchodem elektrického proudu přes ložisko. Z odebraných vzorků

maziva ložisek elektromotoru bylo zjištěno, že mazivo je ve značně špatném stavu, jeho konzistence je změněna a vlastní pojivo mazacího tuku není schopno udržet olejovou složku. Mazivo také značně změnilo barvu ze žluté na černou.

- **Termodiagnostika**

Vhodnou metodou pro odhalení přechodových odporů ve spojích je porovnávací metoda termografie. Z provedených snímků lze snadno rozdílem teplot zjistit spoje, u kterých je zvýšen přechodový odpor a na těchto spojích pak dochází k úbytku napětí, či nestejnomyšlnému rozložení proudů v paralelních vodičích a tím k jejich přetěžování. Tyto přechodové odpory mohou být způsobeny nedostatečným dotažením spojů, případně oxidací tohoto spoje. Tyto příčiny pak velmi často vedou v prvotní fázi k nesymetrii napětí na svorkách motoru a tím k možnému vzniku hřídelového napětí, a v pozdější fázi k vyhoření vadného spoje, případně celého rozvaděče.

Na obr. 71, je termografický snímek stíněného kabelu, kde je viditelné zvýšení teploty kabelu v místě průchodu izolace EMC kabelovou průchodkou asynchronního motoru. Na kabelu v místě styku pak byla vidět i mírná změna zbarvení izolace kabelu.

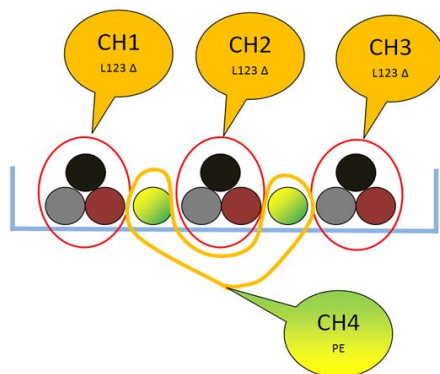


Obr. 71) Termografický snímek napájecího kabelu a zbarvení kabelů

### 8.1.2 Navržená opatření

Na základě provedené diagnostiky bylo doporučeno několik opatření, která se realizovala:

- Pro snížení bludných proudů bylo doporučeno vysvazkování napájecích kabelů frekvenčního měniče - obr. 72. Toto opatření značně snížilo proudy v neživých částech strojního zařízení.



Obr. 72) Rozložení kabelů na kabelové lávce

- Na základě zjištění nefunkčního uzemnění strojovny byla doporučena rekonstrukce uzemnění strojovny.
- Pro snížení vlivu kapacitních proudů bylo doporučeno instalaci sinusového filtru na výstup z frekvenčního měniče a použití feritových jader na vývodní kabely z FM.
- Pro zvýšení impedance ložiskového uložení bylo doporučeno použití izolovaných, případně hybridních ložisek a provést nástřík hřídele pod ložiskovými uzly keramickým izolačním nástříkem – obr. 73.



Obr. 73) Izolovaný nástřík hřídele

- Provést uzemnění rotoru motoru na straně spojky pomocí kluzného kontaktu.

Na základě těchto opatření se podařilo prodloužit životnost ložisek. V současné době motor již druhý rok pracuje bez výměny ložiska.

### 8.1.3 Shrnutí průběhu řešení diagnostického případu

Jak již bylo výše popsáno, motor pracoval na pozici několik let. Po havárii technologie, která se udála v blízkosti tohoto zařízení, byla celá linka odstavena. Po rekonstrukci a opravě technologie byla linka zprovozněna. Velmi krátce na to došlo k havárii ložiska motoru. Po výměně a opravě motoru byla velmi brzy detekována zvýšená teplota na ložiscích a poruchové frekvence při OFF-LINE pochůzkové diagnostice. Na základě tohoto zjištění byla provedena multiparametrická diagnostika, která se skládala z následujících kroků:

- Provedení vibrodiagnostiky se zaměřením na chování motoru při určitých provozních režimech.
- Provedení elektrodiagnostiky motoru, měření napájecích proudů motoru, symetrie, zemních proudů, proudů v pospojování. Zde byl zjištěn vysoký proud v PE vodičích o frekvenci 50 Hz.
  - Z provedené vibrodiagnostiky bylo zjištěno, že ve spektrech zrychlení se vyskytují frekvence a jejich harmonické násobky s postranním pásmem od pulzní frekvence FM, které jsou způsobeny průchodem kapacitních proudů.
  - Měření napájecích proudů nepotvrdilo jejich nesymetrii, které byly měřeny při napájecí frekvenci motoru 72 Hz.
  - Měření proudů v neživých částech motoru bylo zjištěno, že převládající proud, který se vyskytuje na neživých částech (hřídel, spojka, pospojování strojovny) a v PE vodičích je o frekvenci 50 Hz, i když motor byl napájen frekvencí 72 Hz. Na základě tohoto zjištění byly velikosti proudů zaznamenány do proudové mapy. Na základě této proudové mapy a výsledků multiparametrické diagnostiky bylo provedeno několik kontrol a ověření.

Na základě této diagnostiky byly provedeny určité kontroly k ověření funkčnosti jednotlivých mechanismů tohoto zařízení.

- Z provedených kontrol bylo zjištěno:
  - Kontrola usměrňovače FM neprokázala závadu na vstupní části usměrňovače frekvenčního měniče.
  - Z proudové mapy bylo zjištěno, že uzemňovací proud je nulový. Při kontrole uzemnění budovy bylo zjištěno, že uzemnění je po havárii zcela nefunkční. Na základě tohoto zjištění byla provedena rekonstrukce uzemnění a provedeno nové pospojování celého zařízení.
  - Dále z proudové mapy bylo zjištěno, že největší parazitní proud je v PE vodiči mezi frekvenčním měničem a místní trafostanicí. Další poměrně velký proud se vyskytoval na kabelu pospojování mezi zemnicím bodem HOP (hlavní ochranná přípojnice) a kabelovým mostem. Zde bylo zjištěno, že přívodní kabely do frekvenčního měniče jsou jednožilové, poskládané vedle sebe. Tyto kabely byly následně přeloženy a vysvazkovány dle obr. 72.
  - Z tribodiagnostické analýzy se potvrdilo, že mazací tuk je velmi degradován vlivem průchodu elektrického proudu přes ložisko.
  - Stejný výsledek analýzy byl i z prohlídky poškozeného ložiska, průchod elektrického proudu.

- Po opravě poškozeného motoru a všech zjištěných závad bylo provedeno opakované měření, které potvrdilo značné snížení nízkofrekvenčních proudů o frekvenci 50 Hz. V měření však stále zůstaly poměrně vysoké amplitudy o frekvenci 2500 Hz a její harmonické násobky - obr. 66.
- Dále bylo zjištěno pomocí termografického měření, že izolace kabelů je v blízkosti kabelových průchodek tmavá a teplota v tomto místě je teplejší.
- Životnost ložiska se sice prodloužila, nicméně nedosahovala předchozí doby životnosti i když ložisko na NDE straně bylo vždy izolované.

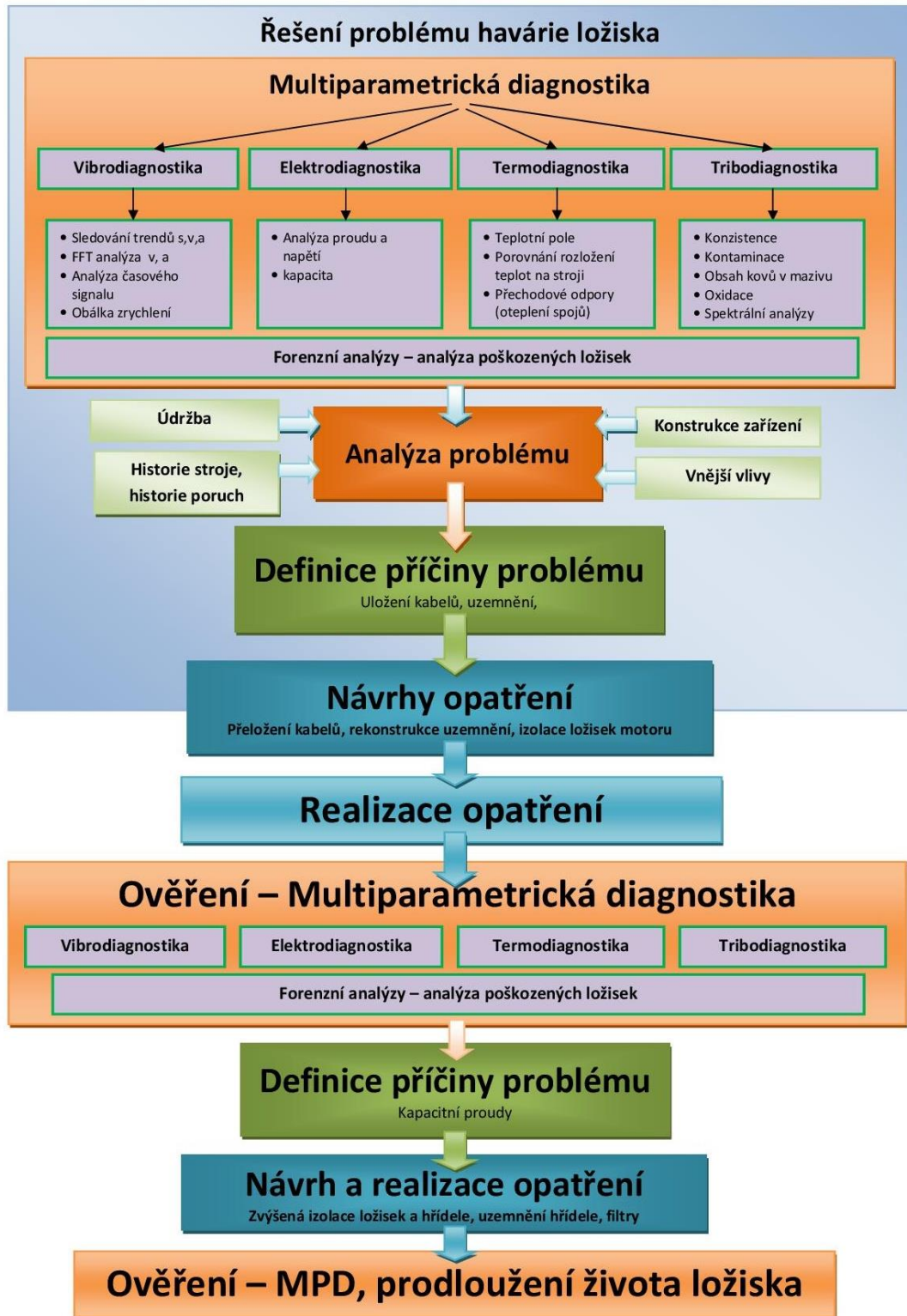
Na základě tohoto opakovaného měření bylo při opravě motoru provedeno následující opatření, které zásadně prodloužilo životnost ložisek.

- Obě ložiska motoru byla vyměněna za izolovaná.
- Hřídel byla opatřena na obou koncích izolovaným nástřikem, který zvýší impedanci izolovaného ložiska - obr. 73.
- Na motor byl osazen zemnicí kartáč hřídele.
- Na výstupní kabely z frekvenčního měniče byla instalována ferritová jádra pro potlačení vyšších frekvencí.

Díky provedeným opatřením se podařilo prodloužit životnost ložisek na přijatelnou mez.

Celý postup multiparametrické diagnostiky je znázorněn v diagramu - obr. 74.





Obr. 74) Diagram postupu řešení

Tab 1) Porovnání a použitelnost zvolených metod

Metoda	Použitelnost	poznámka
Frekvenční analýza rychlosti vibrací	Vhodná	
Frekvenční analýza zrychlení vibrací	Vhodná	Vhodná pro detekci kondice ložisek
Časová analýza rychlosti vibrací	Vhodná	
Časová analýza zrychlení vibrací	Vhodná	
Frekvenční analýza statorového proudu	Vhodná	
Časová analýza statorového proudu	Nevhodná	
Frekvenční analýza PE proudu	Vhodná	Zjištění průsakových proudů
Časová analýza PE proudu	Vhodná	Tvar proudu
Dynamické měření proudu v přechodových stavech	Nevhodná	Stabilní chod stroje,
Dynamická analýza vibrací v přechodových stavech	Nevhodná	Regulace otáček vzhledem k výkonu – ustálený provoz
Analýza vibrací při rozběhu a doběhu	Časově náročná	Nedovoluje technologie výroby
Analýza proudu při rozběhu a doběhu	Časově náročná	Nedovoluje technologie výroby
Data z ON/OFF LINE diagnostiky	Vhodná	Dostupnost potřebných dat
Provozní data - trendy	Vhodná	Trend teplot ložisek
Tribodiagnostika, rozbor maziv	Vhodná	Rozbor tuku
Termodiagnostika	Vhodná	Zahřívání lokálních míst kabelu
Optická měření	Nevhodná	
Rozměrová a montážní měření	Nevhodná	
Analýza poškozených ložisek po poruše	Vhodná	
FMEA	Časově náročná	
Rozbor konstrukce	Méně vhodná	
Rozbor technologie výroby/montáže	Nevhodná	
Optické měření souososti	Nevhodná	
Revize eklektického zařízení	Vhodná	
Rozbor historie poruch a údržby	Vhodná	
Statické testy – elektro R izol, PI,..	Časově náročná	
Částečné výboje	Nevhodná	
Materiálové rozbor	Nevhodná	
Nedestruktivní zkoušky materiálů	Méně vhodná	
Měření hřídelového a ložiskového napětí	Vhodná	

#### 8.1.4 Závěr daného problému

Díky využití multiparametrické diagnostiky (především vibrodiagnostiky, elektrodiagnostiky, tribodiagnostiky a termodiagnostiky a vzájemného ovlivnění), záznamů z předchozí údržby stroje, analýze poškozených ložisek a systematické celkové analýze příčin se podařilo zjistit několik závažných vlivů, které ovlivňují kondici valivých ložisek motoru a stanovit nápravná opatření pro odstranění příčin havárií ložisek motoru.

Jednou z hlavních příčin poškození ložisek byla změna zemních odporů a odporů v rámci celkového pospojování strojů uvnitř budovy. Tím došlo po havárii a rekonstrukci tamního zařízení ke změně cest zpětných proudů, kdy velká část proudu procházela přes ložiska motoru. Dále byly zjištěny velké kapacitní proudy, které také přispěly k poškození ložisek.

Byla doporučena opatření (rekonstrukce zemnicí sítě, pospojování neživých částí, vysvazování přívodních kabelů, zvýšení impedance ložiskového uložení použitím izolovaných ložisek a izolačního keramického nástřiku hřídele, použití vysokofrekvenčních filtrů pro potlačení pulzní frekvence), která zvýšila životnost ložisek na přijatelnou dobu.

Dále byl navržen systém údržby stroje se zaměřením na domazávací intervaly a použití vhodného mazacího tuku.

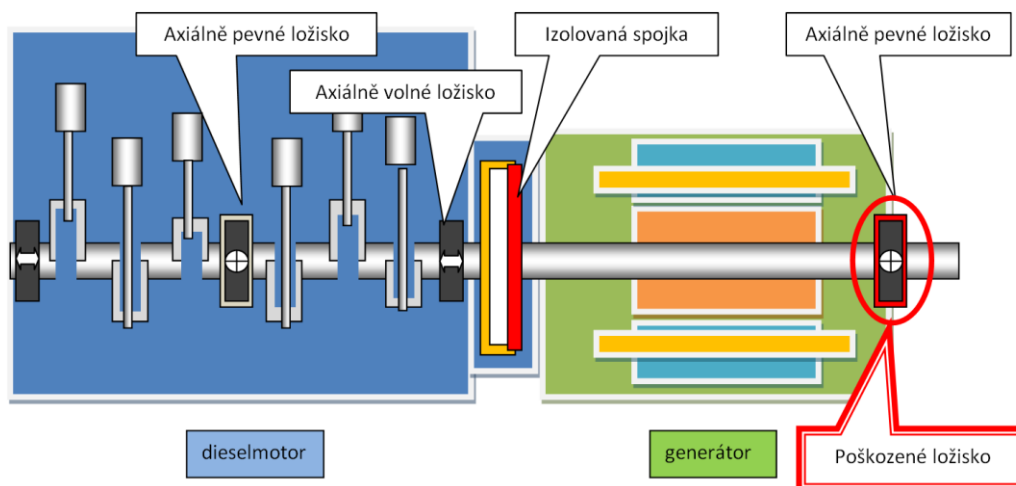
## 8.2 Dieselelektrické soustrojí

**Problém:** závady ložisek a dieselgenerátoru u celé série vozidel.

**Metoda řešení:** Frekvenční analýza vibrací motoru, analýza statorového proudu, diagnostika při jízdě vozidla, analýza proudu na neživých částech zařízení, analýza buzení generátoru, tribodiagnostika maziv, analýza poškozených ložisek, rozbor konstrukce, FMEA a návrh opatření.

V technické praxi se setkáváme s aplikací multiparametrické diagnostiky při řešení složitých technických problémů u strojů, které jsou specifické z hlediska aplikací a použití. Příkladem takového soustrojí je i dieselelektrický motor-generátor sloužící jako zdroj energie pro pohon zařízení a vozidel velkých výkonů.

Dieselelektrické soustrojí se skládá z šestnáctiválcového dieselmotoru, který je spojen s hlavním generátorem pomocí izolované kompozitové diskové spojky. Hlavní dvanáctipólový synchronní generátor o výkonu 2000 kW je jednoložiskový, s valivým jednořadým kuličkovým ložiskem typu 6036. Generátor je buzen přes kroužky ze statického budiče s pulzně-šířkovou modulací řízení napětí a proudu. Výstupní napětí generátoru je usměrněno ve vestavěném výkonovém usměrňovači s výstupním napětím 6 x 430 V DC. Na obr. 75, je schéma uspořádání popisovaného dieselelektrického soustrojí.



Obr. 75) Schéma dieselelektrického soustrojí

Aby bylo možné do relativně malého prostoru stroje „dostat“ velký výkon, je nutné, aby synchronní generátor, který je použit jako zdroj střídavého proudu, měl vysoký výkon. Toho je docíleno použitím vícepólových (až 12 pólových) generátorů pracujících při otáčkách, které jsou běžné pro čtyřpólové stroje. Provozní otáčky těchto dieselelektrických soustrojí bývají v rozmezí 600 až 1800 RPM, což ve výsledku znamená, že výstupní frekvence AC sítě bývá v rozmezí 60 až 180 Hz. Toto napětí je následně usměrněno a využito pro pohon stejnosměrných pohonů, případně přes frekvenční měnič pohonů střídavých.

### 8.2.1 Výchozí premisy dielelektrických pohonů

Z hlediska diagnostiky nestacionárních dielelektrických pohonů je nutné vzít v úvahu několik aspektů, které mají vliv na jejich chování.

V první řadě je to mechanický vliv. Jedná se o rotační stroje, na které působí dynamické účinky z provozu zařízení nebo případně jízdy vozidla. Vznikají přídavná zatížení na ložiska vlivem gyroskopického momentu, působí coriolisovy síly, dále dynamické účinky od setrvačných sil, odstředivých sil působících na rotorové vinutí apod. Stanovení těchto vlivů při konstrukci zařízení bývá mnohdy velmi náročné.

Ve druhé řadě jsou to vlivy elektrické. Synchronní generátor a jeho hlavní frekvence je násobně vyšší, než známe u strojů pracujících s frekvencí 50 Hz. Běžné izolační systémy jsou navrženy na obvyklou frekvenci 50 Hz a při použití vyšších frekvencí je třeba brát v úvahu nejenom odpor izolace, ale především její impedanci, která je závislá na kapacitě izolačního systému, frekvenci sítě, případně vyšších frekvencí, které mohou být zavedeny ze statického budiče - pulzně šířkové modulace (PWM) buzení rotoru generátoru. V důsledku těchto vyšších frekvencí v systému dielelektrického pohonu vznikají kapacitní proudy, které se uzavírají přes valivá ložiska generátoru a v horším případě se mohou uzavírat i přes pohonnou jednotku dieselmotoru.

Tyto popsané vlivy mají nepříznivý vliv na životnost ložiskového uložení soustrojí a pro zjištění příčin je vhodná analýza zařízení právě s využitím multiparametrické diagnostiky.

- **Definice problému**

Na generátoru určitého typu trakčního vozidla se vyskytla série opakovaných závad na ložisku synchronního generátoru. Tyto závady se postupně vyskytovaly u většiny vyrobených vozidel. Z uvedeno vyplývá, že se nejedná o ojedinělou závadu, ale lze ji definovat jako systémovou sériovou vadu stroje.

### 8.2.2 Návrh MPD pro řešení problému

Pro řešení problému bylo nutné nejdříve znát podrobnou konstrukci stroje. Jelikož ne vždy je možné mít k dispozici výrobní dokumentaci zařízení, je nutné provést reverzní inženýring konstrukce generátoru. Dále bylo navrženo provést vibrodiagnostiku vybraných strojů s evidentním poškozením ložiska a bez tohoto poškození ložiska, analýzu proudů a napětí a analýzu vibrací při jízdě vozidla. Bylo nutné získat informace z údržby a provozu zařízení jako je například počet uběhlých motohodin při detekci poruchy ložiska, informace z údržby, kdy byla ložiska domazávána. Dále pak informace, jaké problémy či poruchy, které by mohly mít souvislost s řešením vadného ložiska, se vyskytovaly na vozidle apod. Bylo navrženo provést tribodiagnostiku pro zjištění kondice mazacího tuku a zda nedošlo k záměně použitého maziva. Byla navržena analýza poškozeného ložiska pro zjištění možných příčin.

- **Využití multiparametrické diagnostiky**

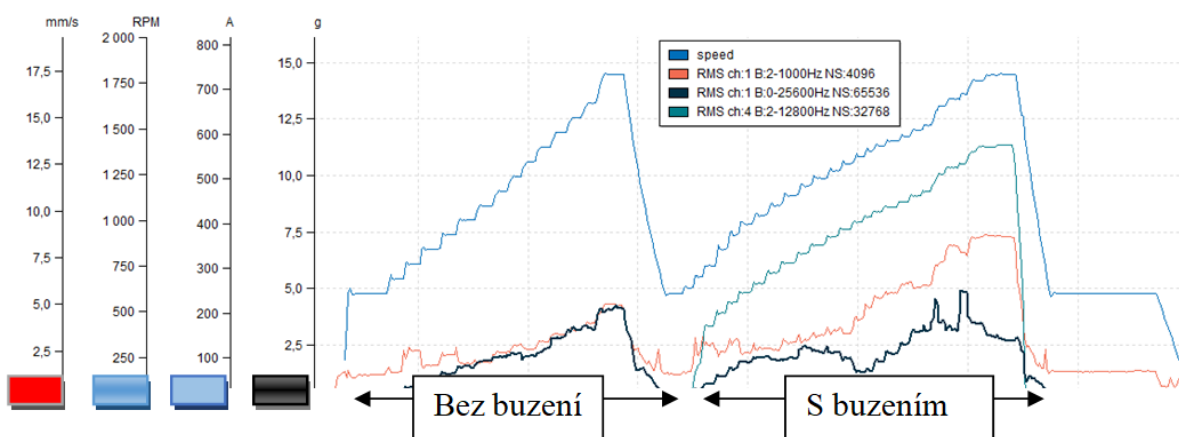
Zde je uveden příklad použití multiparametrické diagnostiky v případě synchronního generátoru, kde se objevila krátká životnost ložiska generátoru. V první fázi bylo provedeno vibrodiagnostické měření soustrojí v rozsahu otáček, kde byla zjištěna závada na vnějším kroužku ložiska. Vzhledem k tomu, že se nejednalo o ojedinělou závadu jen u jednoho zařízení, bylo nutné k diagnostice přistupovat z hlediska stanovení nejenom rozsahu poškození ložiska, ale i z hlediska příčin, které vedou ke snížení životnosti. Proto byla provedena demontáž a

výměna vadného ložiska. Toto ložisko bylo následně podrobena detailnějšímu zkoumání. Byly odebrány vzorky mazacího tuku pro tribodiagnostickou analýzu a také byla provedena prohlídka poškozeného uzlu. Z analýzy poškozeného ložiska bylo zjištěno, že příčinou poškození je nejen mechanický vliv na ložisko, ale také je patrný vliv z důvodu průchodu elektrického proudu. Tyto závěry byly podobné i z dalších posuzovaných strojů.

- **Porovnání výsledku elektro a vibrodiagnostiky**

Nejprve byla provedena vibrodiagnostika a elektrodiagnostika u sledovaného dieselelektrického soustrojí.

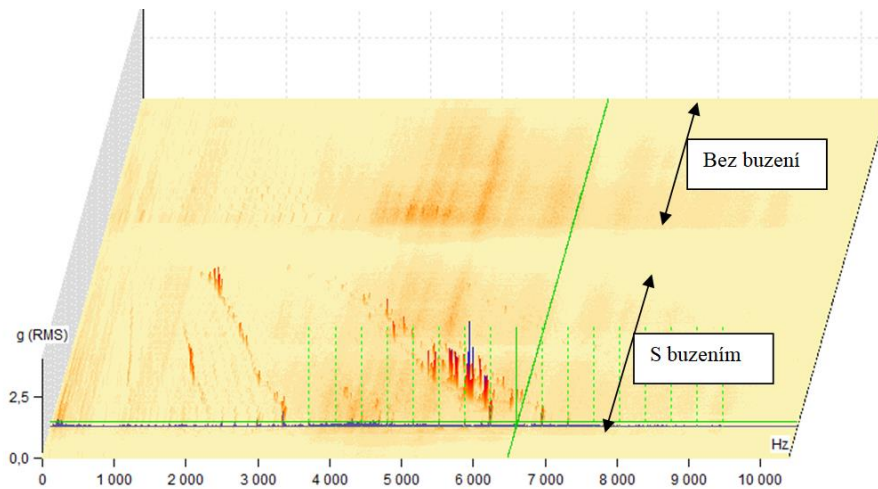
Byly porovnávány širokopásmové hodnoty rychlosti vibrací a zrychlení s hodnotou proudu v závislosti na otáčkách soustrojí. Výsledky jsou na obr. 76. Z provedeného srovnání je vidět, že zatížení generátoru, které se v grafu projevuje zvýšením hodnoty statorového proudu, má vliv na hodnoty rychlosti vibrací, nikoliv na hodnotu zrychlení.



Obr. 76) Závislost širokopásmových hodnot rychlosti a zrychlení vibrací, dále proudu na otáčkách

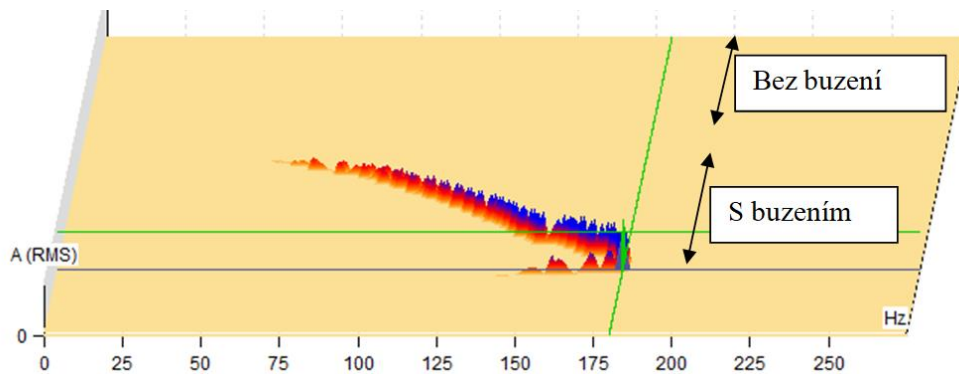
Porovnáním spekter proudu a zrychlení lze vidět určitou souvislost mezi těmito veličinami v naměřených spektrech. Při výstupní frekvenci proudu 180 Hz, je ve spektru zrychlení jasně zřetelná amplituda na 6-ti násobku výstupní frekvence proudu (počet pólových dvojic). Tato harmonická frekvence má dále na 1x (1080 Hz), 2x (2160 Hz) a 3x (3240 Hz) násobku zvýrazněnou amplitudu zrychlení a následně je zřetelný 6-ti násobek této amplitudy (6480 Hz) s postranním pásmem 360 Hz, což je 2x výstupní frekvence proudu.

V běhu bez napětí – bez výkonu (respektive bez buzení generátoru) tyto složky závislé na napětí a proudu se nevyskytují – obr. 77.

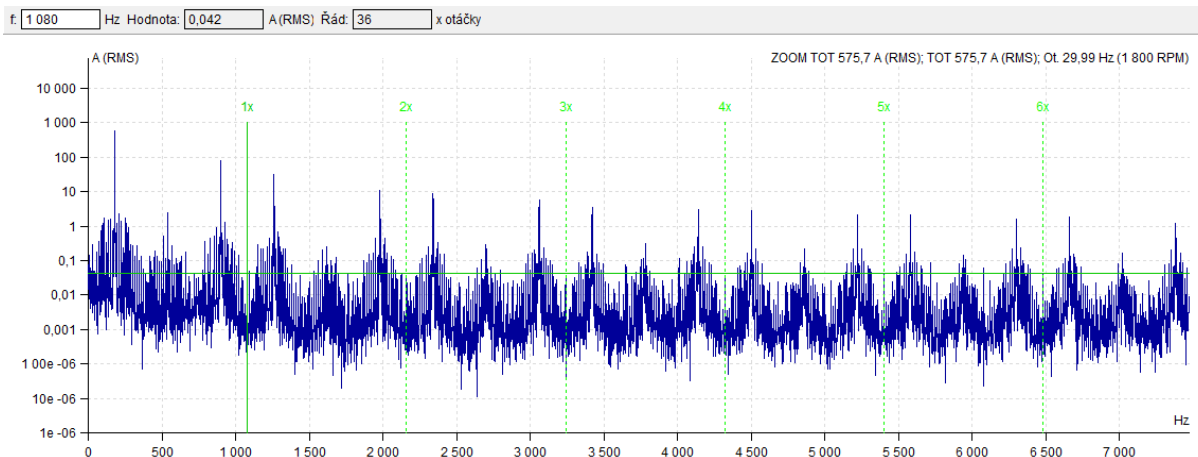


Obr. 77) Spektrum zrychlení při běhu bez napětí a s napětím

Na obr. 78, je vidět proud a jeho frekvence při měření sledovaných hodnot při buzení generátoru v rozsahu otáček 600 až 1800 ot.min<sup>-1</sup> (RPM). Minimální frekvence proudu je 60 Hz při otáčkách 600 RPM a 180 Hz při otáčkách 1800 RPM, která vychází z obecného vztahu  $f = p \cdot n / 60$ .

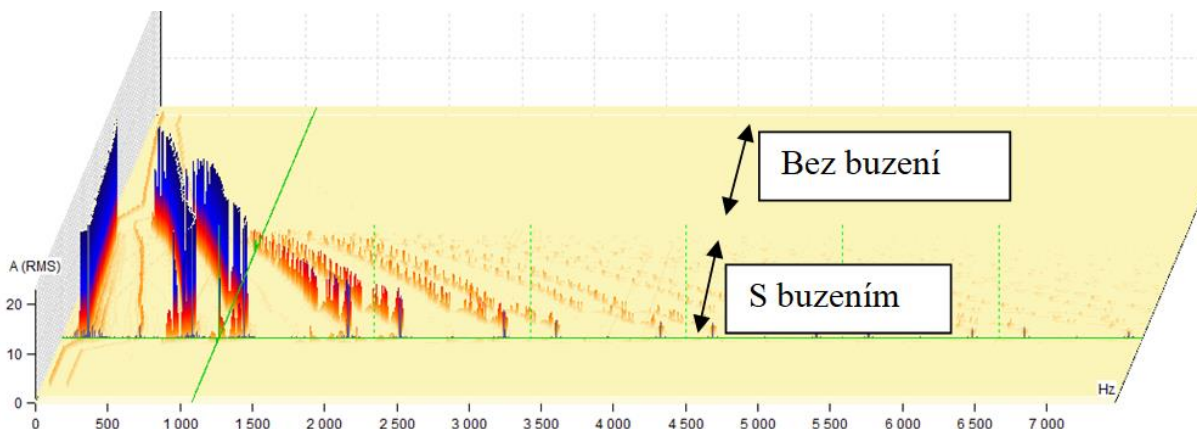


Obr. 78) Spektrum výstupní frekvence proudu



Obr. 79) Spektrum výstupní frekvence proudu při otáčkách motoru 1800 RPM

Na obr. 79, je spektrum statorového proudu, kde jsou zřejmé harmonické násobky dvojic postranního pásma se středem na 6-ti násobku frekvence proudu, tj. na frekvenci 1080 Hz, 2160 Hz, 3240 Hz atd. Tyto frekvence a jejich závislost na otáčkách bez buzení a s buzením - obr. 80, odpovídají frekvenci, která byla naměřena ve spektru zrychlení vibrací a je zde patrná souvislost mezi proudem a zrychlením vibrací.

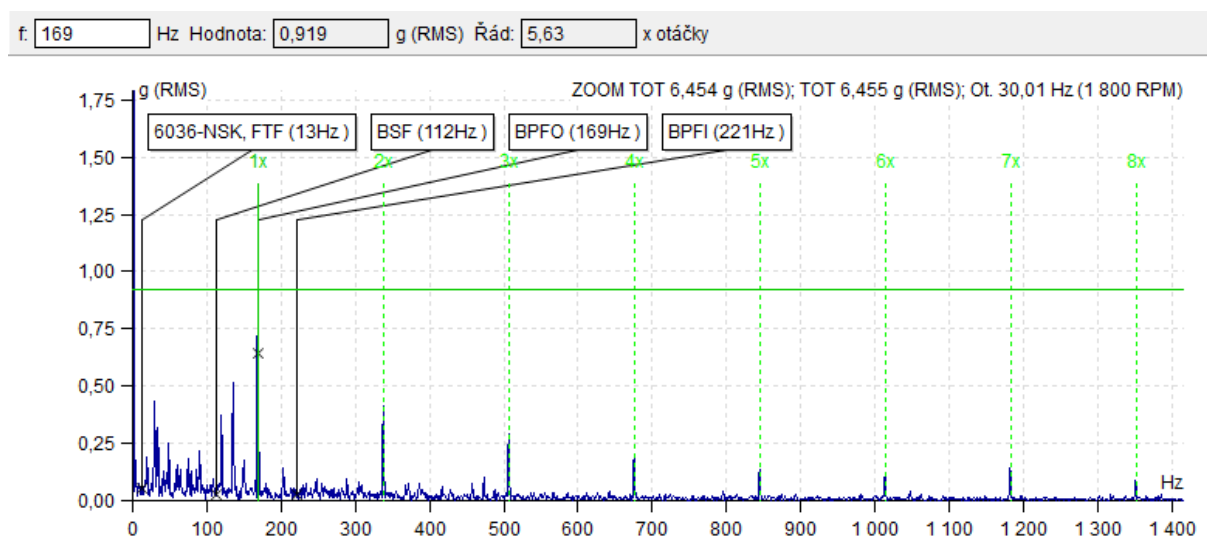


Obr. 80) Spektrum výstupní frekvence proudu v závislosti na otáčkách bez buzení a s buzením generátoru



- **Analýza obálky zrychlení**

Z analýzy obálky - obr. 81, zrychlení ložiska (konkrétní typ 6036 NSK) generátoru, které je použito, je patrné jeho poškození na vnějším kroužku, frekvence BPFO (poškození vnějšího kroužku) a její harmonické násobky.



Obr. 81) Analýza spektra obálky zrychlení vibrační ložiska

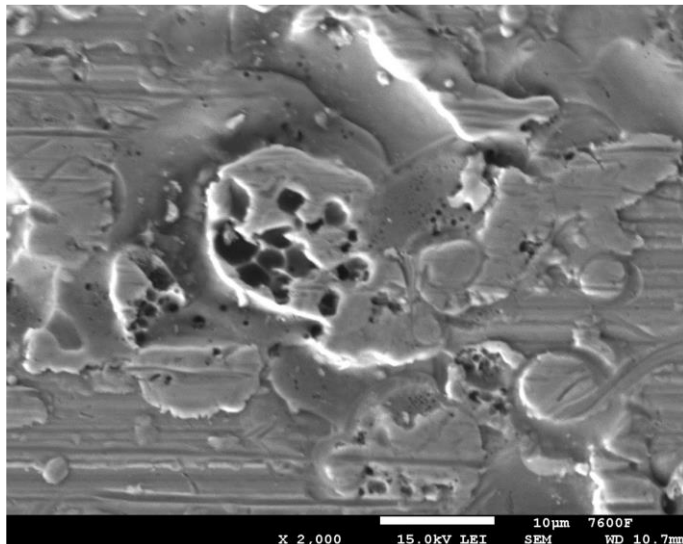
### 8.2.3 Analýza poškozeného ložiska

Po měření bylo ložisko demontováno a vyměněno a proveden rozbor poškozeného ložiska. Jak je vidět na obr. 82, je zde několik problémů od axiálních vtisků způsobených dynamickým zatížením a rázy od setrvačných hmot rotoru, přes průchod elektrického proudu a odlupování horních vrstev způsobené pravděpodobně podpovrchovými trhlinami.



Obr. 82) Snímky poškození ložiska

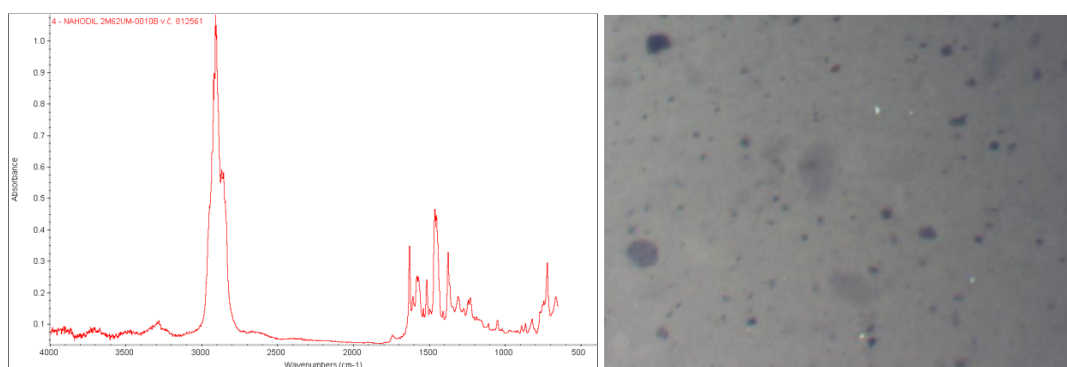
Následně bylo ložisko podrobena zkoumání pod elektronovým mikroskopem - obr. 83. Zmapování valivé dráhy vnějšího kroužku ukázalo na přítomnost nečistot i na stopy po přetaveném materiálu. Dále jsou na valivé dráze patrné jednotlivé důlky větších rozměrů, ve kterých na jejich spodku ulpívají nečistoty a stopy po vychýlení kuliček u stojícího i pomalu se otáčejícího ložiska.



Obr. 83) Snímek dráhy ložiska z elektronového mikroskopu

#### • Tribodiagnostika

Pro ucelený diagnostický obraz tohoto zařízení byl proveden i tribodiagnostický rozbor použitého tuku ložiska. V mazivu se vyskytovalo poměrně velké množství prvku železa a prachových částic, méně pak mědi a olova. Zajímavostí u tohoto poškození proudem bylo, že se metodou infračervené spektroskopie – FTIR - obr. 84, nezjistila oxidace plastického maziva, která bývá u průchodu elektrickým proudem běžná. To lze pravděpodobně vysvětlit tím, že viskozita použitého maziva nebyla vhodně navržena, což potvrdil i kontrolní výpočet pro toto mazivo s uvažováním reálného zatížení maziva.



Obr. 84) FTIR spektrum mazacího tuku a mikroskopický snímek použitého maziva

Z provedených měření a analýz bylo zjištěno několik příčin. Na hlavním generátoru je použito jednořadé kuličkové ložisko. Vzhledem k tomu, že se jednotka neustále pohybuje, dochází v ložisku vlivem velké hmotnosti rotoru a vlivem setrvačných sil k axiálním rázům, které poškozují dráhu ložiska, a především k neustálým změnám rotace valivého elementu, kde se mění osa rotace v závislosti na změně stykového úhlu valivého elementu v ložisku. Vlivem

neustálých změn osy rotace dochází ke smýkání kuličky mezi kroužky ložiska, k vytlačování maziva a k poškození dráhy ložiska.

Na základě rozboru ložiska pod elektronovým mikroskopem bylo potvrzeno, že mimo mechanické příčiny poškození je zde i poškození průchodem elektrického proudu přes ložisko. Z rozboru konstrukce hlavního generátoru a měření elektrického odporu spojky bylo zjištěno, že uzavírání elektrického obvodu z důvodu indukce hřídelového napětí na rotoru přes spojky není možné, a to z důvodu vysokého odporu a impedance spojky.

Další příčinou, kdy může přes ložisko procházet proud, je průchod kapacitních proudů, který je zde vzhledem k vysoké síťové frekvenci více pravděpodobný. Tyto kapacitní proudy dále jsou ovlivněny i použitím buzení z řízeného statického budiče s nosnou frekvencí 1 kHz.

Další příčinou průchodu elektrického proudu je průsakový proud z vinutí rotoru. Rotor vinutí je zhotoveno metodou vsypávaného vinutí z kulatého vodiče, kdy tato technologie pro sledované stroje z hlediska mechanické odolnosti není příliš vhodná. Vzniká zde riziko vzniku závitových zkratů, neustálého pohybu vodičů vlivem odstředivých sil a vibrací, případně k průsaku proudu na rotor v důsledku zeslabení a stárnutí izolace vinutí vlivem vyšší síťové frekvence.

Z provedené tribodiagnostiky a rozboru použitého maziva bylo zjištěno, že navržené mazivo by bylo vhodné pro statický stroj, nikoliv pro dynamicky zatížený stroj, v tomto případě generátor zařízení či vozidla. Pro rázové zatížení má použité mazivo menší únosnost a z hlediska zvýšení únosnosti bylo doporučeno použít mazivo s vyšší viskozitou s přísadou EP (vysokotlaké, protioděrové přísady) složek.

Výše popsané výsledky bylo možné sledovat i u dalších diagnostikovaných dieselelektrických soustrojí, které byly použity u podobně provozovaných průmyslových zařízení.

#### **8.2.4 Analýza problému**

Zde byla použita analýza problému pomocí FMEA. Tato analýza byla zaměřena pouze na možné příčiny poškození ložiska s cílem určení nejpravděpodobnější příčiny poškození ložiska generátoru.

Pro hodnocení byla použita hodnotící kritéria dle následujících tabulek - tab. 1 až 3

Tab 2) Hodnotící kritéria FMEA analýzy – závažnost poruchy

Závažnost	Popis	Hodnocení
Zanedbatelná	Velmi malý vliv, na řešený problém.	1
Nízká	Malé funkční omezení systému.	2-3
Střední	Vliv může omezit funkčnost provozu.	4-5
Vysoká	Velké omezení funkčnosti provozu.	6-9
Velmi vysoká	Vliv ovlivní bezpečnost a nezpůsobilost k provozu.	10

Tab 3) Hodnotící kritéria FMEA analýzy – výskyt poruchy

Výskyt	Popis	Hodnocení
Téměř žádný	Není pravděpodobné, že se chyba vyskytuje.	1
Velmi malý	Ojedinelý výskyt vlivu.	2-3
Střední	Případ náhodných vlivů v malé míře.	4-5
Vysoký	Výskyt vlivů je vysoký.	6-9
Velmi vysoká	Velmi vysoký výskyt – trvalý.	10


Tab 4) Hodnotící kritéria FMEA analýzy – detekce poruchy

Detekce	Popis	Hodnocení
Téměř jistota	Detekce výskytu zřejmý snadno rozpoznatelný.	1
Velmi vysoká	Detekce výskytu vizuálně rozpoznatelný.	2
Vysoká	Detekce výskytu rozpoznatelný zkušeným pracovníkem.	3
Střední	Detekce výskytu rozpoznatelný základními dgn. prostředky.	4
Nízká	Detekce výskytu rozpoznatelná speciálními diagnostickými prostředky.	5-6
Velmi nízká	Detekce výskytu rozpoznatelná speciálními diagnostickými prostředky za použití diagnostických metod a zkušeným diagnostikem.	7
Téměř nízká	Detekce výskytu rozpoznatelná velmi těžce při současných možnostech diagnostiky.	8-9
Téměř vyloučení	Detekce výskytu rozpoznatelná prakticky nerozpoznatelná.	10

Během analýzy byla posuzována konstrukce stroje a jeho funkce při pohybu vozidla vlivem dynamických sil působící na ložisko generátoru. Byly zde posuzovány jak výsledky z provedené multiparametrické diagnostiky, tak výsledky z provedených analýz poškozeného ložiska, mazacího tuku a informací z údržby a provozu vozidla.

Na základě těchto poznatků byla sestavena tabulka 4) možných příčin, kde tyto příčiny byly hodnoceny dle dohodnutých kritérií. Z výsledků bodového hodnocení byly stanoveny pravděpodobné příčiny poškození ložiska generátoru.

Tab 5) Tabulka FMEA analýzy vlivu možných příčin poruchy generátoru

Eventuální příčina	argumenty	Další následky	pravděpodobnost	hodnocení				Stat.
				Závažnost	Výskyt	Detekce	Hodnocení	
Axiální rázy	Nepředepnuté ložisko. Nebyly brány v úvahu axiální zrychlení a síly od posunu a od trakce $F_a=0$	Poškození ložisek, spojky, motoru	Rázy od posunu nárazů a od trakce	10	10	6	600	ANO
								
Axiální síly na ložisko	Brzdění a zrychlení vozidla	Dodatečné zatížení na ložiska motoru a generátoru	Není počítáno s axiální silou $F_a=0$ , podélné uložení ve vozidle – velmi pravděpodobné	4	5	6	120	ne
Přetížené ložisko z důvodu teplotní dilatace	Nepočítáno s axiální dilatací rotoru a statoru a vřim motoru	Únavové poškození klikové hřídele spojky a ložisek	Tepelné dilatace působí na spojku a klikovou hřídel a jejich silová reakce působí na ložiska motoru a generátoru $F_a > 0$ . Axiálně pružná spojka málo pravděpodobné	10	2	4	80	NE
Průchod elektrického proudu	Hřídlové napětí, z důvodu závitových zkratů	Poškození části motoru	Nepravděpodobné, Lamela spojky je izolovaná, která má velký odpor až 80 GΩ. Málo pravděpodobné	8	2	10	160	NE
	Kapacitní proudy, generátor pracuje s frekvencí 60-180 Hz	snížena životnost izolací	Vyšší frekvence výstupního napětí, buzení generátoru polzně šířkovou modulací o frekvenci 1000 Hz, velká kapacita izolace vinutí které je zhotoveno z kulatého drátu. Poškození i izolovaných ložisek, Pravděpodobné	9	10	7	630	ANO
	Souvinnost s poškozením izolace rotoru	poškození vinutí, zavítové zkratky. Již se vyskytly	závitové zkratky ve vinutí, poškození izolace vinutí, Pravděpodobné	10	5	7	350	ANO
	Bludné proudy		Součástí generátoru je i usměrňovač. Vliv usměrňovače a výstupního DC napětí na ložisko, Málo pravděpodobné	8	1	10	80	NE
Vůle v ložisku	prokluzu valivých elementů vlivem neustálé změny osy rotace kuliček		není vymezena vůle v ložisku, při jízdě dochází k neustálému pohybu rotoru v axiálním směru a v ložisku se mění směry axiálních sil	9	10	7	630	ANO
Uvolnění ložiska v náboji štítu	Styková koroze	Uvolnění ložiska v náboji	Rázy, konstrukce uzlu bez předepnutí	5	4	3	60	NE
Stopy poškození ložiska od přepravy	Viditelné stopy v rozteči valivých elementů	Při novém stroji počátek poškození ložiska	Stopy i po zpětné přepravě, Pravděpodobné	5	3	7	105	NE
Mazání ložiska	Tuk černý	Tuk nemá ztracené mazací schopnosti	Dle Tribodiagnostiky mazací vlastnosti tuku OK, v tuku velké procento FE částic, bez oxidace	5	8	2	80	NE
	nehodný mazací tuk		dle výpočtu použitý tuk není vhodný na šokové zatížení rázy	9	10	6	540	ANO
Usazení motoru a generátoru	Při jednoložiskové provedení generátoru je nutné správně vyrovnat osu hřídele, aby nedošlo ke zlomení osy rotace	Deformace spojky a klikového hřídele, únavové poškození kliky a spojky	Ustavovací protokol ve výrobním závodě a při usazení do vozidla chybí protokol, něměří se zalomení osy rotace generátoru s motorem, Měří se jen vzálenost spojky od příruby a ladí se silentbloky	5	2	9	90	NE

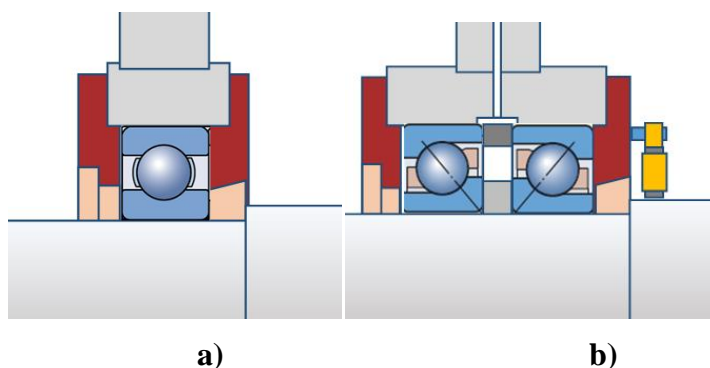
Pokračování na další stránce

## Pokračování tabulky

Vliv jízdy na diaselektřické soustrojí, překročení limitů 3g		Může mít vliv i na další zařízení vozidla	Při jízdě dochází k rázům od přípojných vozidel a od samotné jízdy vozidla po komunikaci. Nepravděpodobné - měření neprokázalo překročení normativních limitů.	2	1	1	2	NE
Údržba	nedodržení domazávacích intervalů		neprokázalo se	5	4	3	60	NE
Obsluha	vadná obsluha a provozování vozidla	může mít vliv na další zařízení vozidla	Projevuje se u více zařízení, nejedná se o jeden stroj. Při měření při jízdě vozidla nebyly zaznamenány nestandardní jevy	4	1	4	16	NE
Konstrukce stroje	bylo zjištěno, že při prototypu bylo původní navržené ložisko souděškové, nahrazeno jiným typem ložiska kuličkovým		Neověřená konstrukce, nebylo počítáno se specifickými provozními požadavky, velice pravděpodobné	10	10	7	700	ANO
Poškození ložiska od průchodu elektrického proudu	Stopy z provedené forenzní analýzy ložiska		Z elektronového mikroskopu vidět krátery s okraji s přetaveným materiálem, U některých ložisek jasně zřetelná charakteristika poškození dráhy od elektrického proudu	10	9	3	270	ANO
Poškození ložiska od prokluzů	Stopy z provedené forenzní analýzy ložiska	kontaminace maziva FE částicemi	Stopy otěru materiálu	5	7	8	280	ANO

### 8.2.5 Návrh na opatření

Z provedené analýzy popsaného diaselektřického soustrojí bylo navrženo několik opatření, které se postupně realizují na dalších zařízeních a vozidlech, která tato soustrojí používají.



Obr. 85) Konstrukce ložiskového uložení: a) původní řešení s kuličkovým ložiskem řady 60, b) navržené řešení s dvojicí kosoúhlých ložisek řady 70 a uzemňovacím kartáčem

- 1) Abychom odstranili vliv mechanického působení na ložisko a zabránilo se prokluzům valivých elementů ložiska, byla provedena rekonstrukce ložiskového uzlu hlavního generátoru. Původní jednořadé kuličko ložisko 6036 - obr. 85 a) bylo nahrazeno dvojicí ložisek s kosoúhlým stykem řady 7036 s předem definovanou ložiskovou vůlí v pozici montáže o „X“ s vloženým distančním kroužkem - obr. 85 b) tak, aby mazání ložisek bylo přiváděno mezi obě ložiska a rovnoměrně rozváděno přes obě tato ložiska. Dále je

zde přesně nastavena ložisková vůle s ohledem na toleranční pole vnitřního a vnějšího kroužku a na tepelné roztažnosti hřídele a ložiskového štítu. Uspořádání ložisek do „X“ a tloušťka distančního kroužku je stanovena z důvodu požadované menší tuhosti ložiskového uspořádání, než má uspořádání do „O“, z důvodu konstrukce jedno-ložiskového generátoru a případného vychýlení osy rotoru v ložisku. Kosoúhlá ložiska lépe zachytávají axiální síly a použitím dvou kosoúhlých ložisek rozdělíme zachytávání sil v různých směrech na příslušné ložisko, tím se zamezí i neustálé změně rotace valivého elementu v ložisku a vyloučí se jeho prokluz.

- 2) Pro mazání ložisek bylo navrženo použití speciálního plastického maziva Klüberlectric HB 72-102, se zvýšenou vodivostí, tím se omezí hoření oblouku mezi valivým elementem a oběžnou dráhou ložiska.
- 3) Použití zemního kartáče ložiska. Abychom ochránili co nejvíce ložisko, byla na vnitřní víčko namontována dvojice zemních kartáčů, které pomohou snížit velikost proudu procházející ložiskem.
- 4) Použití izolovaných ložisek, případně hybridních ložisek, je z hlediska jejich dostupnosti velmi problematické. Nicméně v případě jejich dostupnosti by použití přineslo další zlepšení k zabránění poškození.

### 8.2.6 Shrnutí průběhu řešení diagnostického případu

Zde se jednalo o sérii havárií ložisek u trakčních dieselgenerátorů. Pro řešení tohoto případu byl použit stejný postup multiparametrické diagnostiky.

U prvního havarovaného stroje byla provedena demontážní analýza, kde byla podrobně zkoumána konstrukce havarovaného generátoru, dále z havarovaných ložisek byl odebrán mazací tuk k provedení tribodiagnostické analýzy a ložiska byla podrobena forenzní analýze příčiny poškození. Z provedené analýzy ložiska vyplynuly dvě možné příčiny poškození. Jedna z příčin, které odpovídal charakter poškozené dráhy ložiska, je průchod ložiskových proudů přes ložisko, druhá z příčin detekovala na dráze příčné prokluzy a axiální rázy v ložisku.

Při další havárii dalšího stroje byla provedena analýza vibrací společně s analýzou výstupního proudu. V prvním kroku se hledala souvislost mezi naměřeným spektrem vibrací a spektrem proudu při běhu v rozsahu otáček (600 – 1800 RPM) se zatížením do odporu (s buzením) a bez zatížení (bez buzení). V kaskádách spekter je vidět rozdíl mezi vibracemi, které je způsobené pouze mechanickým buzením a vibracemi, které je ovlivněno elektromagnetickým polem v generátoru.

Další měření, které bylo provedeno, bylo měření vibrací na ložisku a na generátoru za jízdy vozidla. Z těchto výsledků bylo potvrzeno, že během jízdy dochází k nízkofrekvenčním rázům, které však nepřekračují hodnotu zrychlení 3g dané předpisem pro konstrukci těchto vozidel.

Na základě multiparametrické diagnostiky trakčního generátoru, která byla provedena v různých režimech zatížení a jízdy, forenzní analýzy ložiska a znalosti konstrukce byla provedena poměrně rozsáhlá analýza problému, kde výsledky lze shrnout do následujících dvou hlavních příčin.

- **Vliv dynamického chování rotoru na ložisko.** Při použití jednořadého ložiska dochází k neustálým prokluzům valivých elementů v ložisku z důvodu neustále změny osy rotace kuliček.

- **Vliv průchodu elektrického proudu.** Vzhledem k výstupní síťové frekvenci 60 až 180 Hz dochází k průchodu kapacitních proudů přes ložisko generátoru a následně způsobuje jeho poškození.

Na základě tohoto zjištění byla navržena a realizována opatření, které jsou popsána v předchozí kapitole. U prvních opravených strojů proběhl testovací režim a v současné době jsou již opraveny všechny generátory na vozidlech.

Při řešení tohoto problému s využitím multiparametrické diagnostiky je opět využit stejný postup, jak je popsán ve vývojovém diagramu - obr. 74.



Tab 6) Porovnání a použitelnost zvolených metod

Metoda	Vhodnost	poznámka
Frekvenční analýza rychlosti vibrací	Vhodná	Základní diagnostika
Frekvenční analýza zrychlení vibrací	Vhodná	Základní diagnostika
Časová analýza rychlosti vibrací	Vhodná	
Časová analýza zrychlení vibrací	Vhodná	
Frekvenční analýza statorového proudu	Vhodná	
Časová analýza statorového proudu	Vhodná	
Frekvenční analýza PE proudu	Vhodná	Špatný přístup k rotujícím částem
Časová analýza PE proudu	Vhodná	Špatný přístup k rotujícím částem
Dynamické měření proudu v přechodových stavech	Vhodná	V rozsahu otáček a během jízdy – velmi technicky i časově náročné
Dynamická analýza vibrací v přechodových stavech	Vhodná	V rozsahu otáček a během jízdy – velmi technicky i časově náročné
Analýza vibrací při rozběhu a doběhu	Vhodná	Časově náročné, nutno provést na brzdě
Analýza proudu při rozběhu a doběhu	Vhodná	Časově náročné, nutno provést na brzdě
Data z ON/OFF LINE diagnostiky	Nevhodná	Nedostupné
Provozní data - trendy	Nevhodná	Nedostupné
Tribodiagnostika, rozbor maziv	Vhodná	Zjištění degradace maziva
Termodiagnostika	Méně vhodná	Měřící místa nepřístupná
Optická měření	Nevhodná	
Rozměrová a montážní měření	Vhodná	Z důvodu přestavby a nového návrhu
Analýza poškozených ložisek po poruše	Vhodná	Velmi vhodná a vypovídající
FMEA a podobné metody	Vhodná	
Rozbor konstrukce	Vhodná	Velmi důležité
Rozbor technologie výroby/montáže	Nevhodná	
Optické měření souososti	Méně vhodná	
Revize eklektického zařízení	Nevhodná	
Rozbor historie poruch a údržby	Vhodná	Počet odpracovaných hodin do poruchy
Statické testy – elektro R izol, PI,..	Méně vhodná	
Částečné výboje	Nevhodná	
Materiálové rozbory	Méně vhodná	
Nedestruktivní zkoušky materiálů	Nevhodná	
Měření hřídelového a ložiskového napětí	Náročná z hlediska proveditelnosti	Neproveditelná

### 8.2.7 Závěr daného případu

V tomto případě se jednalo o poměrně nové zařízení a velice krátkou životnost ložisek u všech vyrobených strojů (cca 28 ks). Zde opět díky využití multiparametrické diagnostiky (především vibrodiagnostiky, elektrodiagnostiky a tribodiagnostiky a vzájemného ovlivnění), historii vývoje stroje a předchozích problémů s ložisky, detailní analýze konstrukce generátoru, analýze poškozených ložisek a systematické celkové analýze příčin, se podařilo zjistit příčiny selhávání ložisek a navrhnout opatření k odstranění problému s ložisky.

Největším problémem bylo, že zahraniční výrobce zdrojového soustrojí odmítl aktivně spolupracovat na vyřešení problému a nebyla k dispozici potřebná dokumentace.

V první etapě řešení daného problému bylo seznámit se s historií vývoje stroje, kdy bylo zjištěno, že již při vývoji stroje byly určité problémy s daným ložiskem, které pak bylo vyměněno za zcela jiný typ ložiska. Původně dvouřadé soudečkové ložisko bylo výrobcem nahrazeno jednořadým kuličkovým ložiskem. O příčině poškození nebyly dostupné žádné informace.

Dalším problémem bylo, že stroje byly provozovány mimo Českou republiku a veškerá měření a práce mohly být prováděny pouze v místě provozovatele.

Bylo provedeno několik měření u strojů, které vykazovaly zvýšený hluk ložisek. Byla provedena vibrodiagnostika a elektrodiagnostika v různých režimech provozu. Jelikož se jednalo o drážní vozidlo, bylo provedeno měření i během jízdy, aby se zjistilo a zmapovaly externí dynamické vlivy, které působí na samotný stroj. Byl vytypován jeden stroj pro demontáž a zpětný inženýring pro zmapování konstrukce stroje, kde byly zdokumentovány a změřeny důležité rozměry a díly pro řešení samotného problému. Poškozená ložiska byla podrobena detailní analýze příčin poškození, včetně tribodiagnostického rozboru plastického maziva.

Na základě všech dostupných informací z provedeného měření, dílčích analýz byl sestaven pomocí metody FMEA soubor pravděpodobných příčin poškození ložiska.

#### **Jako hlavní příčiny byly stanoveny následující čtyři závažné vlivy:**

- Průchod elektrického proudu přes valivé ložisko.
- Dynamika provozu stroje – neustálá změna zatížení ložisek, prokluzu valivých elementů ložiska.
- Axiální rázy vlivem dynamiky jízdy.
- Nevhodný mazací tuk pro danou aplikaci.

Vzhledem k omezeným možnostem přestavby (montáž a úprava velkého počtu kusů v zahraničí) bylo navrženo nové uspořádání ložiskového uzlu generátoru se dvěma kosoúhlými ložisky s uspořádáním do „X“, doplnění zemnicího kartáče ke svedení hřídelových proudů a použití speciálního elektrovodného plastického maziva pro omezení výbojů mezi valivými elementy a odvalovací dráhou valivého ložiska.

Zajímavostí tohoto řešení bylo i úprava standardních ložisek dodatečným broušením pro optimalizaci správné ložiskové vůle vzhledem ke stávajícím tolerancím průměru hřídele a náboje ložiskového štítu generátoru.

Navržená úprava generátoru byla realizována u všech provozovaných vozidel prozatím bez předchozích problémů. Dál byl zde upraven i rozsah údržby pro periodickou údržbu trakčního generátoru týkající se použitého plastického maziva a dob domazávání, údržby kluzného kontaktu a čištění a kontroly stroje.

### 8.3 Soustrojí čerpadla s proměnlivými otáčkami

**Problém:** výpadky soustrojí čerpadla z důvodu vysokých vibrací.

**Metoda řešení:** Frekvenční analýza vibrací motoru od startu čerpadla do ustálených teplot, data z ON-LINE diagnostiky, měření posunů čerpadla vůči pevnému bodu, rozměrová a montážní měření, rozbor konstrukce, rozbor technologie montáže, analýza a návrh opatření.

Dalším realizovaným návrhem je odstředivé čerpadlo s proměnlivými otáčkami - obr. 86, které pohání turbína s přes hydrodynamickou převodovku. Otáčky čerpadla lze plynule měnit v závislosti na požadovaném výkonu čerpadla. Na tomto čerpadle se vyskytoval problém s vibracemi, kdy ON-LINE systém monitorování vibrací na čerpadle detekoval zvýšené až nebezpečné vibrace na ložiscích čerpadla. Stejná čerpadla byla použita i na jiných zařízeních s konstantními otáčkami, zde se problém s vysokými vibracemi nevyskytoval.



Obr. 86) Čerpadlo s hydrodynamickou převodovkou poháněné turbínou

#### Definice problému

Na lokalitě je provozováno několik stejných čerpadel. Tyto čerpadla pohání buď elektromotor přes dvoustupňovou převodovku, nebo turbína přes hydro-převodovku, kde je možná regulace otáček čerpadla a jeho výkonu. Na čerpadle poháněné turbínou se vyskytují problémy s nárůstem vibrací během jeho provozu, které vedou k odstavení soustrojí. Na pohonech s elektromotory se tyto problémy nevyskytují.

#### 8.3.1 Návrh postupu měření

Na základě vyskytujících se problémů byl navržen postup multiparametrického měření, který se skládal z následujících diagnostických metod:

- **Vibrodiagnostika** – měření vibrací na ložiscích čerpadla v radiálních a v axiálních směrech v závislosti na otáčkách čerpadla a jeho oteplení.

- **Termodiagnostika** – měření oteplování čerpadla průběžně ze studeného stavu do ustáleného (teplého) stavu čerpadla.
- **Optická a montážní měření** – měření teplotních dilatací os čerpadla při jeho oteplení.

Aby bylo možné zachytit děje, které se během provozu vyskytují, bylo nutné provést toto měření po určitou dobu oteplování čerpadla při určitých provozních režimech a zjišťovat vlivy, které mohou mít zásadní charakter na chování čerpadla během provozu.

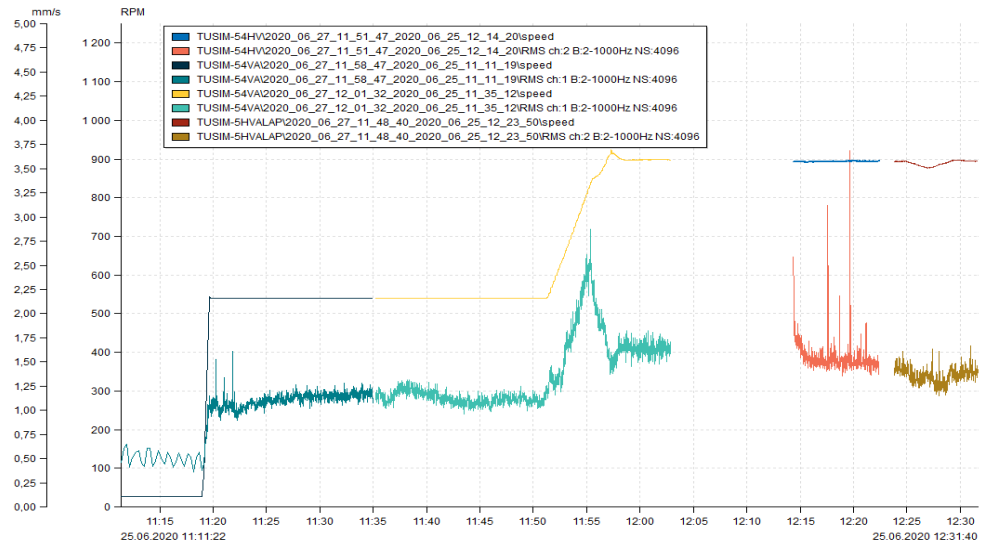
- **Vibrodiagnostika**

Na ložisko čerpadla byly umístěny snímací akcelerometry v radiálním a axiální směru - obr. 87. Tyto senzory byly připojeny do čtyř kanálového analyzátoru (data-recorderu), ve kterém byly zaznamenány data z celého průběhu měření. Dále byly současně zaznamenávány otáčky čerpadla.

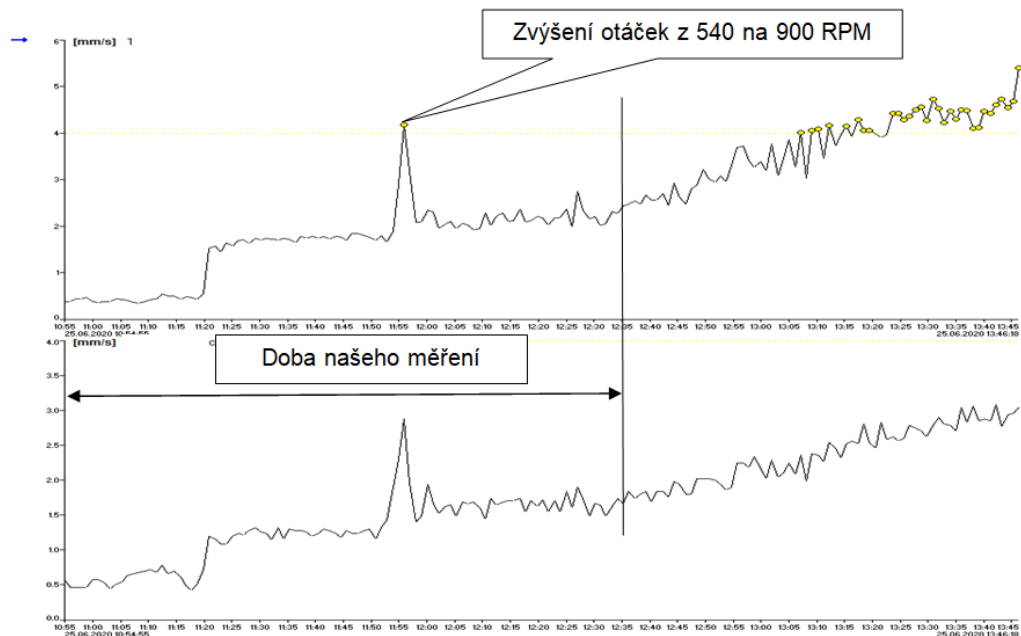


Obr. 87) Osazení čidel vibrací na čerpadle

Naměřené výsledky byly posléze zpracovány a vyhodnoceny. Pro zpracování byly použity různé metody pro vyhodnocení vibrací. Nejprve byly sledovány širokopásmové hodnoty rychlosti a zrychlení vibrací v závislosti na otáčkách čerpadla.



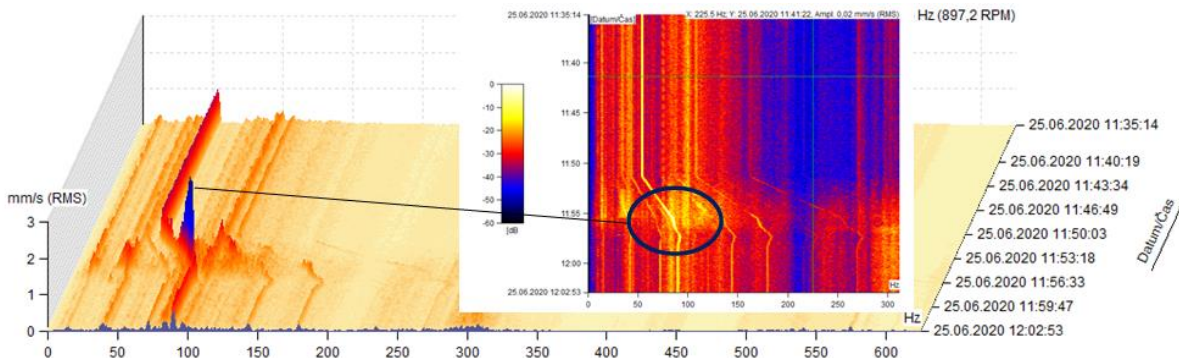
Obr. 88) Průběh rychlosti vibrací v pásmu do 1kHz



Obr. 89) Průběh rychlosti vibrací v pásmu do 1kHz z ON-LINE monitorovacího systému

Z naměřených širokopásmových hodnot rychlosti vibrací - obr. 88 je zřejmé, že po startu čerpadla při otáčkách 540 RPM byly vibrace na čerpadle v přijatelných hodnotách do  $2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Při zvyšování otáček čerpadla na 900 RPM došlo ke krátkodobému nárůstu rychlosti vibrací na dvojnásobné hodnoty při otáčkách 800 RPM. Při plných otáčkách se vibrace snížily. Stejný průběh byl zaznamenán jak na ON-LINE monitoringu vibrací - obr. 89, tak při diagnostickém měření. Z ON-LINE monitoringu je také vidět, že po ukončení diagnostického měření nastal plynulý nárůst hodnot vibrací, který vedl k úplnému odstavení čerpadla.

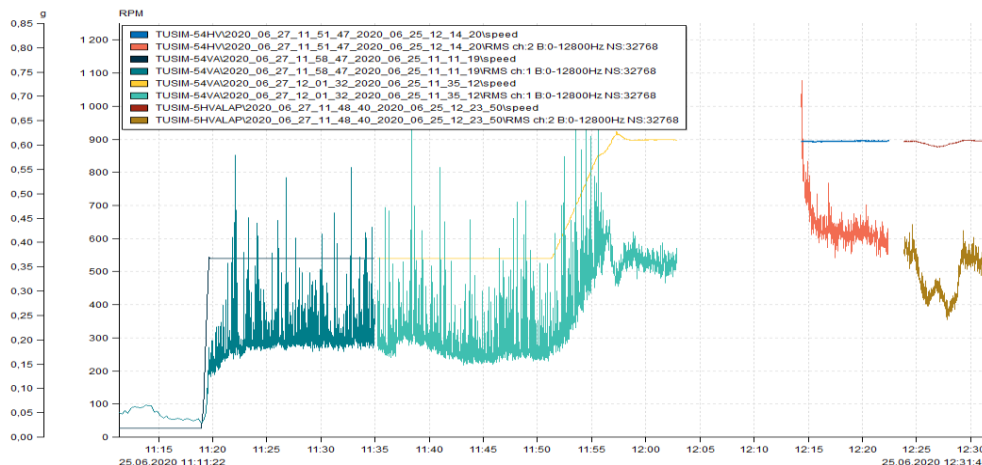
Abychom zjistili důvod zvýšených vibrací při změně otáček, je nutné provést FFT analýzu vibrací v časové závislosti - obr. 90.



Obr. 90) FFT kaskáda a spektrogram rychlosti vibrací v závislosti na čase

Z této analýzy je zřejmý důvod zvýšení vibrací při změně otáček. Ve spektru rychlosti vibrací je viditelná dominantní frekvence, která je šestinásobkem otáčkové frekvence čerpadla. Při zvyšování otáček se tato lopatková frekvence dostane do rezonanční oblasti, která je v blízkosti 70 Hz, kde dojde k zesílení amplitudy na této rezonanční frekvenci. Při přejetí této rezonanční frekvence dojde k opětovnému snížení amplitudy rychlosti vibrací.

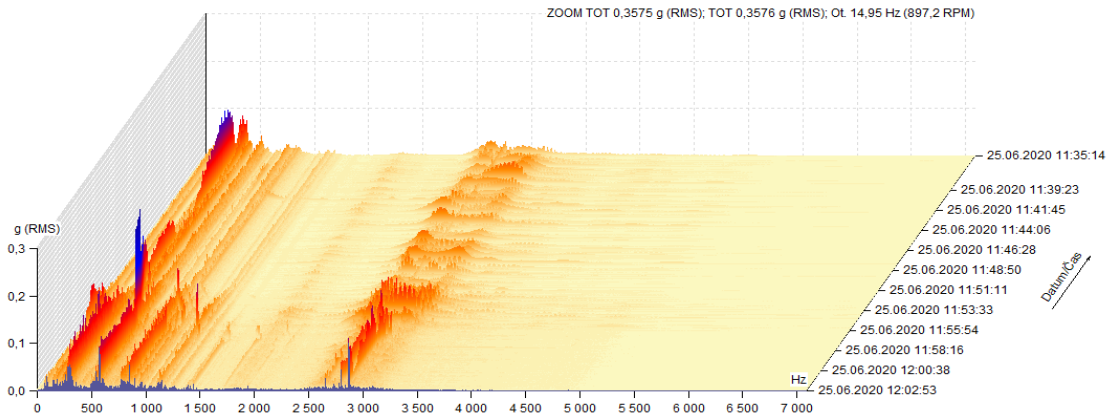
Dále bylo vyšetřováno zrychlení vibrací. Byly měřeny širokopásmové hodnoty zrychlení během oteplování a změny otáček - obr. 91. V průběhu měření byly zaznamenány subjektivní hlukové rázy při nižších otáčkách čerpadla vycházející z ložiskového uložení.



Obr. 91) Průběh zrychlení vibrací v pásmu do 12,8 kHz

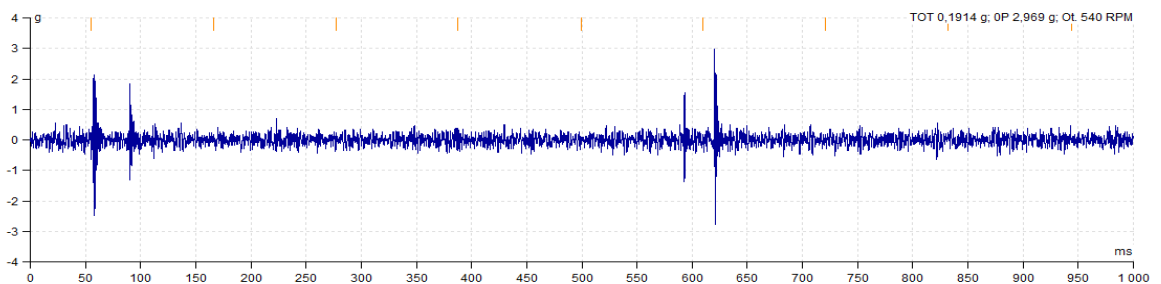
Ze záznamu zrychlení je vidět, že při nižších otáčkách dochází ve zrychlení ke značným skokovým změnám hodnot zrychlení, které se při zvýšených otáčkách stabilizovalo.

Při provedení FFT analýzy vibrací - obr. 92, není zcela zřejmý důvod skokových změn při nižších otáčkách. V nižších otáčkách je pouze vidět nepravidelné zvýšení šumu mezi 2,5 až 3 kHz.

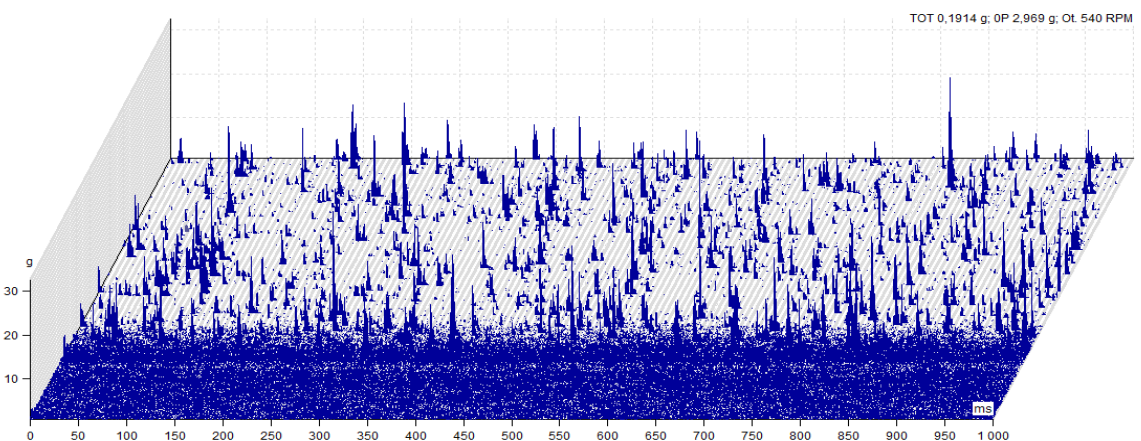


Obr. 92) : FFT spektrum zrychlení

Abychom rozklíčovali tyto skokové změny, je třeba se zaměřit na vyšetřování vibrací v časové oblasti. Z časových záznamů je vidět, velmi výrazné a časově velmi krátké rázy dosahující hodnot několika násobků průměrných hodnot zrychlení - obr. 93. Při zobrazení těchto záznamů v čase do kaskády - obr. 94, a odfiltrování nízkých hodnot amplitud v tomto případě amplitud do zrychlení 0,7g je vidět, že při nižších otáčkách se projevují v časových záznamech nepravidelné rázy.



Obr. 93) Časový záznam zrychlení



Obr. 94) Filtrovaná kaskáda časového záznamu zrychlení vibrací čerpadla

Z provedené vibrodiagnostiky lze usuzovat na problém mechanických rázů pravděpodobně vlivem mechanického uvolnění v ložisku čerpadla a vliv rezonance na hodnotu vibrací.

- **Montážní a optická měření**

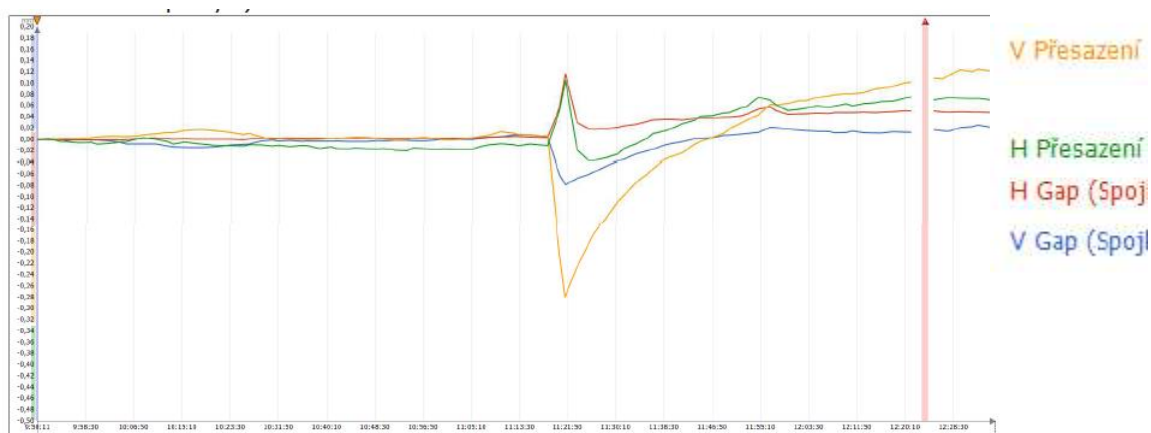
Důvodem provedení tohoto měření bylo podezření na ovlivnění vibrací vlivem roztažnosti potrubí. Z tohoto důvodu bylo provedeno měření metodou sledování pohybu bodu na ose ve dvou rovinách.



Obr. 95) Měření polohy osy (LiveTime metoda) při oteplování čerpadla

Na čerpadlo byly umístěny detektory pohybu - obr. 95, jeden z čelní strany čerpadla, který měřil vychýlení osy rotace ve vertikálním a horizontálním směru a druhý z boku čerpadla u spojky, který měřil vertikální a axiální vychýlení čerpadla. Druhá část senzorů laser byl umístěn na pevném bodě na masivním tuhém stojanu.

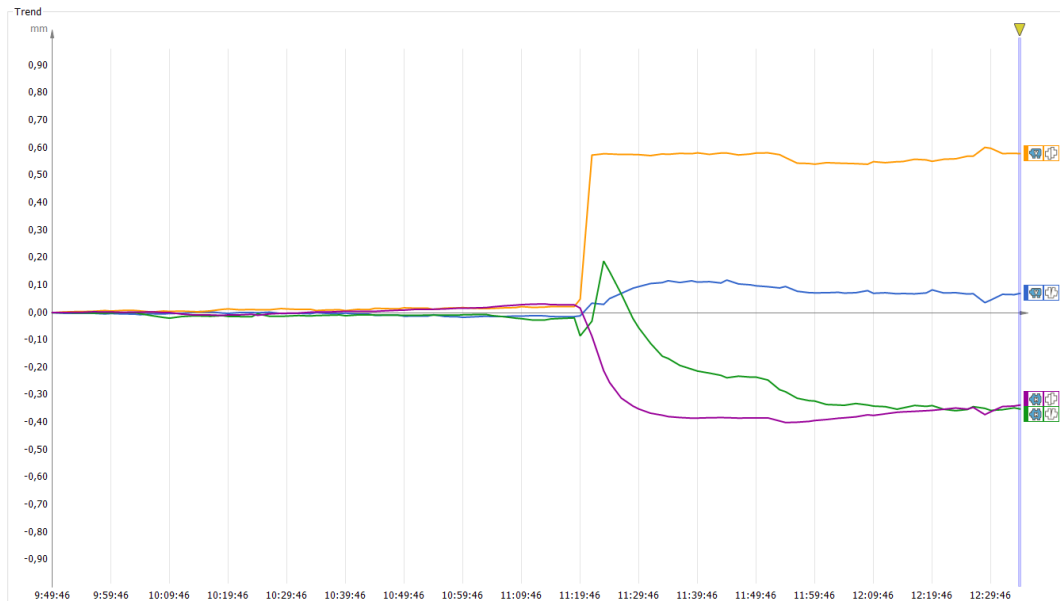
Výsledky měření posuvů jsou znázorněny v následujících grafech. První graf znázorňuje vertikální a horizontální posunutí konce odstředivého čerpadla - obr. 96.



Obr. 96) Vertikální a horizontální posunutí konce čerpadla



Největší pohyb byl zaznamenán ve vertikálním směru (kolmo na osu rotace), kdy hodnota vertikálního přesazení na konci měření činila +0,12 mm, tedy oproti začátku měření byl NDE konec pláště čerpadla (v rovině detektoru) výše o cca 0,12 mm. Důvodem je teplotní růst způsobený prohřátím (změnou teploty) čerpadla, čemuž odpovídá i „skoková“ změna hodnot (zejména vertikální) po najetí na 540 RPM a současném rychlém ohřátí čerpadla. Počáteční propad vertikální hodnoty (žlutá čára v grafu) naznačuje, že DE konec čerpadla se prohřál rychleji než NDE konec (je potřeba vzít v úvahu, že detektor na NDE konci čerpadla byl umístěn na samém konci pláště, tedy na místě, které se pravděpodobně prohřívalo nejpозději).



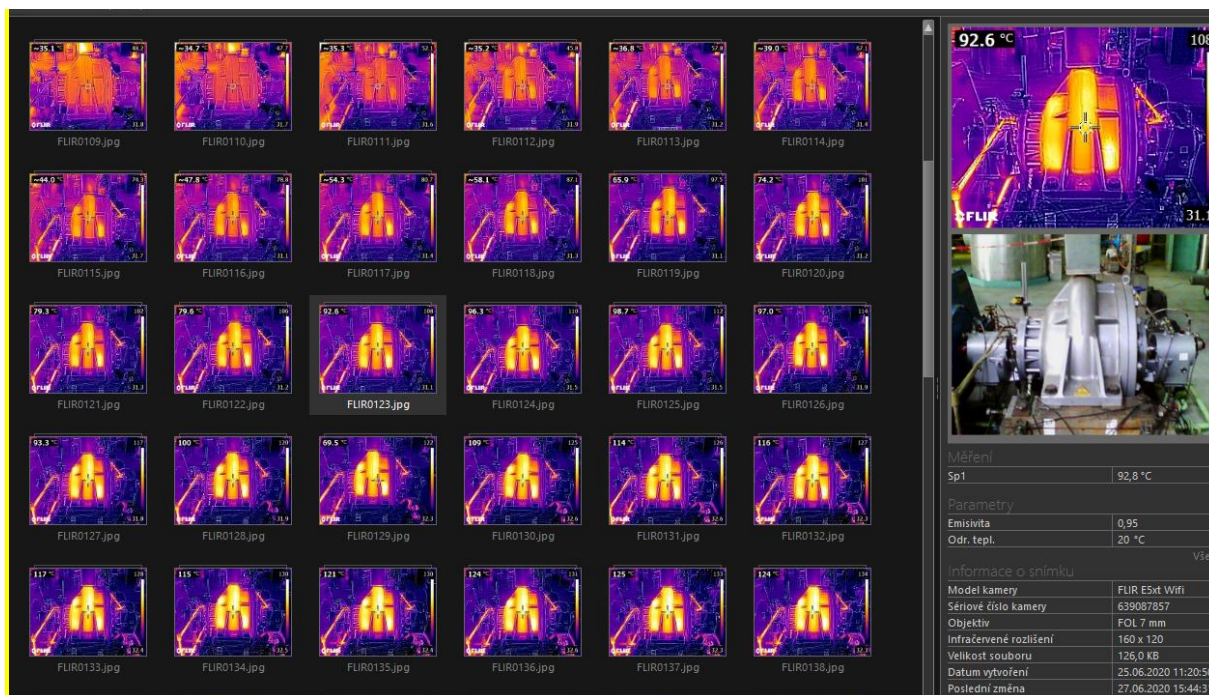
Obr. 97) Vertikální a axiální posunutí čerpadla u spojky

Druhý graf znázorňuje chování čerpadla ve vertikálním a axiálním směru na DE straně čerpadla - obr. 97. Největší pohyb byl zaznamenán ve vertikálním směru (kolmo na osu rotace), kdy hodnota vertikálního přesazení na konci měření činila +0,58 mm, tedy oproti začátku měření byl DE domek ložiska v rovině detektoru výše o cca 0,58 mm. Hodnota pohybu v horizontálním směru (rovnoběžně s osou rotace) na konci měření činila -0,34 mm, tedy oproti začátku měření byl DE domek ložiska v rovině detektoru o cca 0,34 mm blíže směrem k převodovce. Důvodem je teplotní růst způsobený prohřátím (změnou teploty) čerpadla, čemuž odpovídá i „skokový“ nárůst vertikální hodnoty po najetí na 540 RPM a současném rychlém ohřátí čerpadla. Horizontální hodnota rostla o něco pomaleji, ale lze konstatovat, že během 10 minut od najetí na 540 RPM byla již také stabilní.

- **Termografie**

Další metodou diagnostiky, která byla použita při řešení tohoto problému bylo využití termokamery a snímkování čerpadla během prohřívání a oteplování do stabilních teplot čerpadla. Pro snímkování byla využita termokamera FLIR E5xt a diagnostický program Flir tools.

Pomocí této metody pořizování série termografických snímků, bylo vidět prohřívání čerpadla během oteplování do ustálených hodnot - obr. 98.

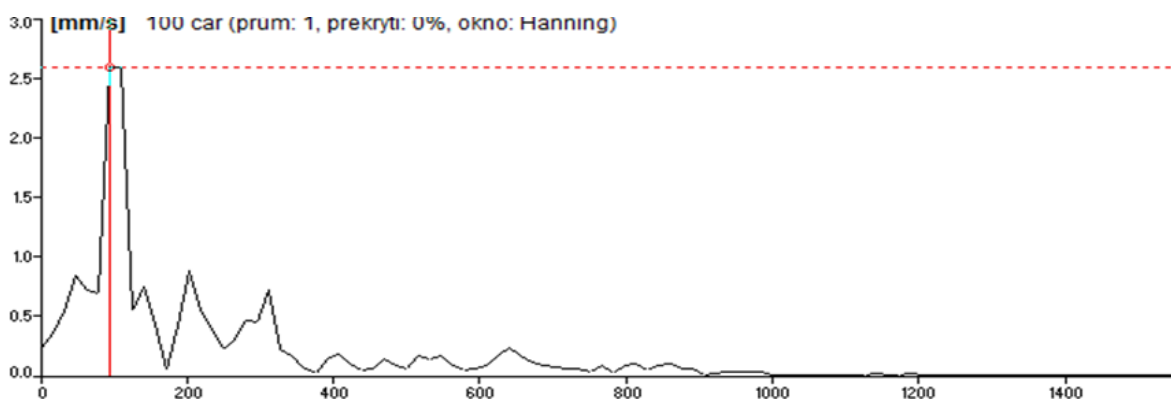


Obr. 98) Termografické snímky čerpadla během jeho oteplování

### 8.3.2 Zjištění příčiny vibrací

Z provedeného měření a průběhu měřených hodnot během oteplování bylo zjištěno:

- Vliv oteplení čerpadla a jeho osových posunů vlivem teplotních dilatace na vibrace čerpadla je zanedbatelný. Nebyla nalezena přímá souvislost s teplotou a osovými posuvy čerpadla.
- Na vibrace čerpadla mají vliv především otáčky čerpadla, které ovlivňují charakter rázů, které byly zaznamenány ve zrychlení vibrací.
- Na hodnotu vibrací má podstatný vliv rezonance soustrojí čerpadla, která se nachází v rozsahu šestnásobku provozní otáčkové frekvence.
- Ze spekter ON-LINE měření vibrací - obr. 99, bylo zjištěno, že dominantní frekvence při zvýšených otáčkách čerpadla je na frekvenci 80-100 Hz.



Obr. 99) FFT spektrum rychlosti čerpadla z ON-LINE systému

- Při měření čerpadla bylo zjištěno, že dochází k viditelnému nepravidelnému axiálnímu pohybu rotoru čerpadla. Dle konstrukce uložení, kde jsou použity pro zachycení axiálních sil a pozice rotoru čerpadla dvojice kosoúhlých ložisek v pozici montáže do „X“ by maximální axiální vůle v ložících neměla přesáhnout 0,043 mm. Vzhledem k naměřeným hodnotám a viditelnému pohybu hřídele lze usuzovat na problém v ložiskovém uložení, který způsobuje snížení tuhosti uložení rotou čerpadla, a rezonanční frekvenci v oblasti pracovních otáček a v blízkosti lopatkové frekvence čerpadla. Vlivem změny tuhosti se tato rezonanční frekvence může více či méně přiblížit k budící frekvenci, kde se tato změna projeví nárůstem vibrací na čerpadle i při ustálených provozních podmínkách.
- Stejný typ čerpadla byl poháněn elektromotory, kde tento problém se nárůstem vibrací neprojevil, i když byl zaznamenán axiální pohyb rotoru čerpadla. Na pozici s proměnlivými otáčkami se stejný problém projevoval i po výměně čerpadla.
- Byla navržena opatření, která vedla ke zvýšení mechanické tuhosti ložiskového uložení čerpadla např. změna tolerance uložení pro kosoúhlá ložiska, axiální fixace vnějších kroužků ložiska apod.

### 8.3.3 Průběh řešení diagnostického případu

Při řešení tohoto problému bylo postupováno dle diagramu – obr. 41. Podmětem pro řešení problému byl stoupající trend rychlosti vibrací do alarmových hodnot při online diagnostice.

Využití multiparametrické diagnostiky při řešení tohoto problému bylo na základě předchozího rozboru chování čerpadla a poznatků z údržby celého zařízení. Jelikož se zde nejedná o stroj poháněný elektromotorem, ale turbínou, byla zvolena metoda multiparametrické diagnostiky sledování parametrů vibrací, optického měření a termodiagnostika při oteplování zařízení od startu do ustálených teplot. Z výsledků měření, které byly dány do souvislosti s konstrukcí ložiskového uložení čerpadla a posléze potvrzeny při demontáži samotného čerpadla, byla navržena opatření, které se realizují při opravě čerpadla. Po jejich realizaci bude provedeno ověření.

Tab 7) Porovnání a použitelnost zvolených metod

Metoda	Vhodnost	poznámka
Frekvenční analýza rychlosti vibrací	Vhodná	Základní diagnostika
Frekvenční analýza zrychlení vibrací	Vhodná	Základní diagnostika
Časová analýza rychlosti vibrací	Vhodná	Základní diagnostika
Časová analýza zrychlení vibrací	Vhodná	Základní diagnostika
Frekvenční analýza statorového proudu	Nevhodná	Nejedná se o čerpadlo s elektromotorem
Časová analýza statorového proudu	Nevhodná	
Frekvenční analýza PE proudu	Nevhodná	
Časová analýza PE proudu	Nevhodná	
Dynamické měření proudu v přechodových stavech	Nevhodná	
Dynamická analýza vibrací v přechodových stavech	Časově náročná	
Analýza vibrací při rozběhu a doběhu	náročná z hlediska proveditelnosti	Proveden rozběh a měření ze studeného stavu do ustálených teplot
Analýza proudu při rozběhu a doběhu	Nevhodná	
Data z ON/OFF LINE diagnostiky	Vhodná	Doplňující měření
Provozní data - trendy	Vhodná	
Tribodiagnostika, rozbor maziv	Nevhodná	
Termodiagnostika	Vhodná	
Optická měření	Vhodná	Měření posunu čerpadla vůči pevnému bodu
Rozměrová a montážní měření	Vhodná	Velmi důležité společně s rozbořem konstrukce
Analýza poškozených ložisek po poruše	Vhodná	
FMEA a podobné metody	Časově náročná	
Rozbor konstrukce	Vhodná	Velmi důležité
Rozbor technologie výroby/montáže	Vhodná	Technologická kázeň
Optické měření sousosti	Méně vhodná	
Revize eklektického zařízení	Nevhodná	
Rozbor historie poruch a údržby	Vhodná	Zjištění problému u jiných čerpadel
Statické testy – elektro R izol, PI,..	Nevhodná	
Částečné výboje	Nevhodná	
Materiálové rozbory	Nevhodná	
Nedestruktivní zkoušky materiálů	Nevhodná	
Měření hřídelového a ložiskového napětí	Nevhodná	

#### 8.3.4 Závěr daného problému

I v tomto případě bylo využito multiparametrické diagnostiky (především vibrodiagnostiky, termodiagnostika a optického měření a vzájemného ovlivnění), demontážní analýzy, záznamů z ON-LINE diagnostiky a systematické celkové analýze příčin se podařilo zjistit příčinu vysokých náhodných vibrací stroje vedoucí k jeho odstavení.

Zde se jednalo o čerpadlo poháněné turbínou se změnou provozních otáček. Na tomto stroji byly časté výpadky z důvodů zvýšených vibrací měřených ON-LINE snímači na čerpadle.

Na základě popisu problému bylo navrženo měření skládající se z několikahodinového záznamu vibrací v určitých pracovních režimech a při oteplování soustrojí ze studeného do ustáleného teplotního stavu. Součástí měření bylo i měření optické, které mělo za úkol sledovat polohu osy hřídele čerpadla vůči převodovce a turbíně.

Během měření byly zjištěny vyšší vibrace v axiálním směru doprovázející viditelný axiální pohyb hřídele čerpadla.

Po provedeném měření byla provedena demontáž čerpadla se zaměřením na zjištění příčin se zaměřením na možné uvolnění rotoru v axiálním směru u pevného ložiska.

Při této demontážní analýze bylo zjištěno, že zde nejsou dodrženy doporučené tolerance pro uložení ložisek a dále zde není vymezena axiální vůle pro dvojici kosoúhlých ložisek.

Na základě tohoto zjištění byla navržena konstrukční úprava ložiskového uzlu a postup pro montáž a správné nastavení a vymezení axiální vůle v sestavě ložisek.

## 9 ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ A DISKUZE

Popsané postupy byly s úspěchem aplikovány při řešení několika složitých případů, kdy se podařilo vyřešit pomocí multiparametrické diagnostiky a multiparametrického přístupu několik závažných a opakujících se problémů u strojních zařízeních.

Jak je v této práci popsáno, diagnostika je velmi široký obor zahrnující poměrně široké spektrum znalostí technických oborů. Při multiparametrické diagnostice se nelze omezovat pouze na jednu diagnostickou disciplínu, ale je nutné propojit diagnostické obory jako je vibrodiagnostika, elektrodiagnostika, termodiagnostika, tribodiagnostika a montážní a optická měření s obory, jako jsou různé analýzy poškozených dílů. Aby mohly být výsledky multiparametrické diagnostiky správně interpretovány, je nutné pochopit funkci stroje znát, jeho historii, informace o údržbě, opravách apod. Výsledkem takové multiparametrické diagnostiky musí být návrh vhodných opatření, která přispějí či vyřeší daný problém.

Jak již bylo řečeno, multiparametrická diagnostika není jen o měření a srovnání naměřených hodnot s hodnotami limitními, či hodnotami dané příslušnou normou, ale je o diagnostice, kterou je třeba chápat jako určení problému, vymezení, stanovení příčin nějakého jevu, stavu, nebo poškození.

Největší úskalí tohoto oboru je personální a odborné obsazení pozice diagnostika specialisty. V dnešní praxi je většina diagnostiků úzce specializována na určitý obor diagnostiky v souvislosti s určitým typem diagnostikovaných strojů. Málo, který diagnostik je schopen obsáhnout více oborů, a hlavně více typů strojů. Neznamená to, že pokud diagnosticky řeším čerpadlo, který pohání elektromotor napájený frekvenčním měničem, nebudu řešit vliv elektrického proudu na ložiska čerpadla.

Nový systémový přístup k diagnostice strojů je dán širší pohledu na hodnocení stavu strojů a zařízení s využitím různých oborů diagnostiky, ON-LINE diagnostiky a dalších důležitých informací o stroji, údržbě a jeho historii. Tato disertační práce se zabývá multiparametrickou diagnostikou a propojení diagnostiky s obory jako forenzní analýza poškozených dílů, nedestruktivní testování při analýze řešeného problému v návaznosti na znalosti konstrukce a informací z údržby a historii stroje. Zvláště u strojů s proměnlivými otáčkami je důležité sledovat provozní a diagnostické parametry v různých režimech a v přechodových stavech.

V článku 5 je popsán návrh nové metodiky, která spočívá ve vyhodnocení multiparametrické ON/OFF-LINE diagnostiky, a dále pak analýze stavu stroje, která zohledňuje veškeré dostupné informace o stroji, jeho historii a údržbě. Výsledkem této analýzy může být návrh opatření k odstranění problému, případně soubor návrhů pro údržbu apod. Dalším přínosem této metody může být i optimalizace a způsob hodnocení ON-LINE multiparametrické diagnostiky, kdy můžeme pro ON-LINE diagnostiku zvolit vhodné parametry pro měření a způsob jejich hodnocení.

V prezentovaných příkladech jsou uvedeny příklady řešení dle této metodiky z praxe. Ve všech třech případech se tato metodika značně osvědčila. Pomocí multiparametrické diagnostiky byl analyzován problém stroje a dále dalším rozborem informací o stroji a jeho

konstrukci byly popsány příčiny problémů. Na základě všech těchto informací bylo navrženo opatření, které bylo realizováno a odzkoušeno v praxi.

Využití multiparametrické diagnostiky v dnešním průmyslu má stále větší význam při zavádění různých diagnostických systémů a inteligentního vyhodnocování v rámci Průmyslu 4.0, následně logicky musí daný přístup nacházet odezvu k údržbě jako systému u daných objektů, takže mluvíme o reengineeringu systému údržby.

## 9.1 Způsoby provádění diagnostiky a využití multiparametrické diagnostiky

Vzhledem k moderním metodám údržby má multiparametrická diagnostika v dnešní době velký význam. Abychom mohli stroje správně udržovat v provozuschopném stavu, na který byly navrženy, nestačí jen dělat běžnou údržbu doporučenou výrobcem stroje, ale je nutné přistupovat k údržbě systémově. V některých případech to znamená i nutnost provést zásadní opatření, které vedou ke zlepšení provozuschopnosti stroje, tzn. systému údržby, který je tím jediným nástrojem a k odstranění nežádoucích vlivů, v některých případech i ke změně vlastní konstrukce. Jak bylo znázorněno na příkladech, multiparametrická diagnostika má v tomto směru nezastupitelný význam a postavení. Je nepostradatelnou součástí řešení složitých problémů vedoucí k odstranění příčin opakovaných poruch, či důležitým podkladem nastavení, optimalizování a racionalizace údržby strojů.

Tam, kde je zavedená ON-LINE diagnostika, je důležité zvolit vhodně měřené parametry a úlohy tak, abychom mohli při řešení daného problému mít dostatek potřebných informací o trendech a vývoji daných provozních parametrů stroje. Toto měření je pak doplněno specializovaným podrobnějším měřením za kratší časový úsek pomocí OFF-LINE diagnostiky a dalšími potřebnými analýzami.

Na základě vyhodnocení těchto analýz pak lze lépe stanovit nápravná opatření pro odstranění problému, a dále pak optimalizovat provádění údržby.

Tento nový nezastupitelný přístup provádění multiparametrické diagnostiky je dnes vyžadován především v energetice, kde jsou stále větší nároky na způsob provádění údržby a bezporuchový provoz zařízení.

## 10 CELKOVÝ ZÁVĚR A PŘÍNOSY PRO VĚDU, PRAXI A PEDAGOGIKU

Využití popsaného přístupu lze využít i v moderních metodách Průmyslu 4.0 respektive „chytrého průmyslu“, kde multiparametrický přístup znamená nejen digitalizaci a mobilitu, která má v průmyslu stále větší význam, ale i využití těchto dat pro efektivnější obsluhu a údržbu strojních zařízení. Počet zařízení připojených k internetu neustále vzrůstá a během několika uplynulých let se snaží mnoho společností zaujmout přední místo v tomto odvětví a posunout téma Průmysl 4.0 do oblasti „smartifikace průmyslu“. Konektivita roste nejrychlejším tempem právě ve výrobě a podle předpokladů představuje téměř 1/3 celkové hodnoty Průmyslu 4.0.

V tomto odvětví Průmyslu 4.0 má své nezastupitelné místo i multiparametrická diagnostika, která vychází z dosavadních poznatků klasické technické diagnostiky. Dnešní inteligentní systémy dokážou nejenom sbírat data, ukládat do cloudových jednotek a případně vyhodnocovat a sledovat technický stav zařízení, ale na základě získaných dat upravovat a řídit výrobní procesy. Využití multiparametrické diagnostiky v této oblasti je velice široké. Jako příklad lze uvést multiparametrickou diagnostiku zařízení, kterou pohání frekvenční měnič. Toto zařízení je osazeno několika senzory vibrací, které snímají jak rychlost a zrychlení vibrací, tak monitorují teplotu určité kritické části zařízení. Na základě změřených dat, systém zjistí, že zařízení se dostalo např. do rezonance, nebo se v technologii zpracování materiálu změnila jeho struktura, a to se projevilo například ve změně velikosti hodnot zrychlení. Na základě předem definovaných algoritmů a naměřených hodnot je systém schopen změnit otáčky zařízení a přizpůsobit technologický proces, jak schopnosti stroje plnit svoji funkci, tak druhu zpracovávaného materiálu.

Multiparametrický přístup k diagnostice strojů a zařízení napájených frekvenčním měničem je v dnešní době důležitý. V systému napájecí transformátor, frekvenční měnič a asynchronní motor existuje mnoho možných potenciálních rizik pro správnou funkci tohoto zařízení. Objasnění určitých dějů, postupů a metod, které je nutné využívat pro objasnění a zjišťování prvotních příčin opakovaného poškození určitých částí zařízení a nalézt způsoby, jak efektivně diagnostikovat tato zařízení s využitím moderních přístupů, a především najít vhodná opatření pro odstranění prvotních příčin problémů. Při řešení a sledování stavu zařízení se dnes již nejedná o diagnostiku, která má za cíl pouze stanovit současný stav zařízení, ale o multiparametrickou diagnostiku, kterou lze využít i k optimalizaci výrobních procesů a spolehlivého chodu pohonů strojů a zařízení.



**Nosné (disertabilní) přínosy disertační práce jsou shrnuty do následujících bodů:**

- Nový systémový přístup k diagnostice pohonů s frekvenčním měničem a strojů s proměnlivými otáčkami.
- Návrh nové metodiky k posuzování technického stavu strojů.
- Reengineering systému údržby strojních zařízení.
- Využití multiparametrické diagnostiky (řetězec metod vibrodiagnostiky – elektrodiagnostiky – tribodiagnostiky apod.) k analýze pohonů s frekvenčním měničem.
- Návrh způsobu nového sledování a hodnocení předpokládaných poruch v ON-LINE diagnostice strojních zařízení.
- Predikování poruch s využitím multiparametrické diagnostiky.
- Využití multiparametrické diagnostiky pro optimalizaci provozních parametrů strojních zařízení s využitím Průmyslu 4.0.
- Vytvoření odborných předpokladů pro rozvoj nového systémového pojetí nového moderního oboru zaměřeného na multiparametrickou diagnostiku, údržbu a automatizaci strojních zařízení.

Z předchozích odrážek jsou jednoznačně patrné přínosy pro praxi a vědu. V oblasti rozšíření aplikace vědeckých poznatků tak mluvíme především o aplikované vědě s využitím, jak do nově stavěných technických systémů, tak současně provozovaných, s aplikací odpovídacích změn jejich konstrukčního provedení a tím zajištění zvýšení jejich diagnostikovatelności, spolehlivosti, bezpečnosti a v neposlední řadě užítності a výrobní provozuschopností ve všech svých důsledcích.

Pedagogický přínos určitě není zapotřebí komentovat, pouze si je třeba plně uvědomit, kolik procent absolventů technických škol se v průběhu svého aktivního života zabývá provozem a neposlední řadě údržbou výrobních systémů. Tato skutečnost musí nacházet odraz v plánech studia, tzn. zvyšovat rozsah výuky, studenty více motivovat a zapojovat do projektů zabývajících se výzkumem provozování a údržby, a také automatizací strojních zařízení. Předpokladem pro zvládnutí oboru diagnostiky je znalost nejen diagnostických metod, ale i funkce a principy strojních zařízení, jak po stránce mechanické, tak po stránce elektrické se všemi jejími vazbami.

Závěrem bych chtěl zmínit jedno důležité pravidlo:

aby provedená diagnostika strojů měla význam pro praxi, nestačí jen měřit a srovnat naměřené výsledky s příslušnými normami. Naměřená data je nutné správně vyhodnotit, najít správná řešení a opatření jak pro odstranění příčin řešených problémů, tak pro nastavení správné údržby strojních zařízení. Další velmi přidanou hodnotou multiparametrického diagnostického přístupu je využití naměřených dat pro automatizaci a zlepšení procesů daného zařízení s využitím myšlenek a metod digitalizace Průmyslu 4.0.



## 11 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BILOŠ, J., BILOŠOVÁ, A., Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a vývojářů: studijní opora. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012, 1 CD-ROM. ISBN 9788024827551.
- [2] LEGÁT, V. Management a inženýrství údržby. Praha: Professional Publishing, 2013. ISBN 978-80-7431-119-2.
- [3] NĚMEČEK, P. Proaktivní údržba: studijní materiály. Katedra vozidel a motorů, Fakulta strojní, TU v Liberci. Liberec. Prezentace na: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:1850>.
- [4] CHMELÍK, K., POSPIŠILÍK, J., FOLDYNA, J.. Ložiskové proudy v elektrických strojích: odborná publikace. Ostrava: VŠB-TU ve vydavatelství Montanex, 2008. ISBN 978-80-7225-290-9.
- [5] KREIDL, M., ŠMÍD, R.. Technická diagnostika. Senzory - metody - analýza signálu. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. 408 s. ISBN 80-7300-158-6.
- [6] HELEBRANT, F., ZIEGLER, J.. Technická diagnostika a spolehlivost, II. Vibrodiagnostika. 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2005. 178 s. ISBN 80-248-0650-9.
- [7] MENTLIK V. A KOL. Diagnostika elektrických zařízení. 1.vyd. Praha: BEN Praha 2008, 439s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [8] HELEBRANT, F., ZIEGLER, J., MARASOVÁ, D., Technická diagnostika a spolehlivost, I. Tribodiagnostika. 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2001. 155 s. ISBN: 80-7078-883-6.
- [9] HRABEC, L., HELEBRANT, F., MAZALOVÁ, J., Technická diagnostika a spolehlivost, III. Ustavování strojů. 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2006. 91 s. ISBN: 978-80-248-1449-0.
- [10] ŽIARAN, S., Technická diagnostika. 1.vyd. Bratislava: Slovenská technická univerzita. 2013. 332 s. ISBN 978-80-227-4051-7.
- [11] JANOUSEK, I., a kol. Technická diagnostika. 1.vyd. Praha: SNTL Nakladatelství technické literatury. 1988. 432 s DT681.518.54/04-236-88.
- [12] GREŇČÍK, J. A KOL. Manažerstvo údržby- synergia a teorie a praxe. 1. vyd. Košice: Slovenská spoločnosť údržby vo vydavateľstve: BEKI design, s.r.o Košice, 2013. 630 s. ISBN 978-80-89522-03-3.
- [13] MYKISKA, A., Bezpečnost a spolehlivost technických systémů. 1. Vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2006. 206 s. ISBN 80-01-02868-2.
- [14] CHMELÍK, K., A KOL., Technická diagnostika na elektrických zařízeních. Ostrava: Studijní materiál Asociace technických diagnostiků ČR, 194 s.
- [15] PAČAIOVÁ, H., Riadenie údržby ii. Efektivnosť a bezpečnosť v údržbe. 1. vyd. Košice: TU v Košiciach, Strojnícka fakulta, 2011. 112 s. ISBN 987-80-553-0856-2.
- [16] KOPEC, B., a kol. Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM. C2008 572 s. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [17] NAHODIL, P.; HAMMER, M. Selected characteristics and diagnostics of motor powered by frequency converter, MM Science Journal, pp.2077-2084, ISSN 1805-0476, MM publishing, s.r.o. (2017), článek v časopise.

- [18] OPOČENSKÁ, H.; NAHODIL, P.; HAMMER, M. Use of multiparametric diagnostics in predictive maintenance, MM Science Journal, pp.2090-2093, ISSN 1805-0476, MM publishing, s.r.o. (2017), článek v časopise.
- [19] OPOČENSKÁ, H.; HAMMER, M. Use of technical diagnostics in predictive maintenance, 17th MECHATRONIKA 2016 Proceedings of the 2016 17th International Conference on Mechatronics – Mechatronika (ME) 2016, pp.317-322, ISBN 978-80-01-05882-4, (2016), článek ve sborníku akce: 17th International Conference on Mechatronics - Mechatronika 2016, Praha, 07.12.2016-09.12.2016.
- [20] HAUSBERG, V. ; SEINSCH, H. O. Kapazitivní lagerspannungen und ströme bei umrichter- gespeisten induktionsmaschinen. Electrical Engineering, 2000, 82, s. 153–162.
- [21] CHEN, S.; LIPO, T. A. Circulating type motor bearing current in inverter drives. IEEE Industry Appl. Magazine, Jan./Feb. 1998, s. 32–38.
- [22] MUETZE, A.; BINDER, A. Calculation of circulating bearing currents in machines of inverter-based drive systems. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, Vol. 54, No. 2, , s. 932–938.
- [23] HEINO, T. Bearing currents and their mitigation in frequency converter-driven induction motors. Bachelor's thesis Electrical Engineering Vaasa 2014.
- [24] BARTOS, S.; Ložiskové proudy u asynchronních motorů napájených z napěťových polovodičových střídačů, hlavní článek v časopisu ELEKTRO 11/2011.
- [25] Common Mode Overview and Reduction Guide, MTE Corporation. c2016 MTE Corporation Printed in U.S.A. SP-003-E 06/16.
- [26] ČSN ISO 13372 (01 1470) – Monitorování stavu a diagnostika strojů – Slovník, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha c2013, 28 s.
- [27] ČSN ISO 117359 (01 1443) – Monitorování stavu a diagnostika strojů – Obecné pokyny, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha c2018, 36 s.
- [28] ČSN ISO 18436 (01 1445) – Monitorování stavu a diagnostika strojů – Požadavky na kvalifikaci a posuzování pracovníků Část 2: Monitorování stavu a diagnostika vibrací, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha c2014, 32 s.
- [29] Produktový katalog f. Adash 2020. URL <<https://adash.com/documents/Adash-Products-2020-CZ.pdf>>. [cit. 2020-08-20].
- [30] BLATA, J., Prezentace - Laboratoř technické diagnostiky na katedře výrobních strojů a konstruování. Ostrava : VŠB – Katedra výrobních strojů a konstruování.
- [31] ČSN EN 13306 (01 0660) – Údržba, Terminologie údržby, Praha c2018, 60 s.

## 12 SEZNAM ZKRATEK A POJMŮ

### 12.1 Seznam zkratk a pojmů

- **AC** – střídavá veličina
- **AM** – asynchronní motor
- **Amplituda** (amplitude) - velikost nebo hodnota veličiny
- **ATD** – Asociace technických diagnostiků České republiky
- **buzení** (excitation), podnět (stimulus) - vnější síla (nebo jiný vstup) působící na soustavu tak, že vyvolává nějakou odezvu soustavy
- **CF** – Crest faktor
- **CMV** (CMC) - souhlasné napětí (proud) common mode voltage (current) - aritmetický průměr fázových napětí (proudů) proti zemi
- **ČR** – Česká republika
- **DC** – stejnosměrná veličina
- **DE (AS)** strana ložiska – ložisko na straně spojky
- **Diagnostika** - zjišťování technického stavu určitého stroje nebo zařízení
- **Dominantní frekvence** (dominant frequency) - frekvence, při níž se ve spektru vyskytuje maximální hodnota
- **DTO CZ** - Dům techniky Ostrava
- **f-frekvence** - kmitočet (frequency) - převrácená hodnota periody. Jednotkou frekvence je hertz (Hz), který odpovídá jednomu cyklu za sekundu.
- **FFT** – rychlá Fourierova transformace – integrální transformace převádějící signál mezi časově a frekvenčně závislým vyjádřením pomocí harmonických signálů
- **FM** – frekvenční měnič
- **FMEA** (Failure Modes and Effects Analysis) – **analýza** způsobů a důsledků poruch
- **FMECA** - (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) – analýza způsobů, následků a kritičnosti poruch
- **Geneze** – vznik, původ, proces vzniku
- **Harmonická** (periodické veličiny) (harmonic of a periodic quantity)) - harmonické vibrace, jejichž frekvence je celistvým násobkem základní frekvence
- **HAZOP** – (Hazard and Operability) – Studie nebezpečí a provozuschopnosti
- **Jednoduché harmonické vibrace** (simple harmonic vibration) - sinusové vibrace (sinusoidal vibration) - periodické vibrace, u kterých mohou být hodnoty parametrů vibrací popsány jako sinusové funkce nezávislé časové proměnné
- **Kapacitní proudy** (capacity current) – proud o vyšších frekvencích protékající přes izolační materiály, jako např. izolace kabelů, vinutí apod. (capacity)
- **Konektivita** - propojení počítačů nebo jiných elektronických zařízení v počítačové síti
- **Měnič (converter)** - jednotka pro elektronickou přeměnu energie, měnící jednu nebo více elektrických charakteristik a zahrnující jednu nebo více elektronických spínacích součástek a přidružených součástí, jako jsou transformátory, filtry, komutační prostředky, řídicí zařízení, ochrany a pomocná zařízení, pokud jsou použity
- **MPD** – multiparametrická diagnostika
- **NDE (BS)** strana ložiska – ložisko na opačné straně spojky

- **NF (LF)** – nízkofrekvenční (řádově Hz)
- **OFF-LINE** – diagnostika prováděná diagnostikem, například pochůzkou
- **ON-LINE** – nepřetržitá diagnostika pomocí nainstalovaných pevných diagnostických systémů
- **PDCA** – (plan-do-check-act) - plánuj-dělej-kontroluj-jednej
- **Poměr ložiskového napětí (BVR)** (bearing voltage ratio (BVR)) - poměr ložiskového napětí s kapacitní vazbou k souhlasnému napětí
- **Pospojování (bonding)** - elektrické propojení kovových částí instalace mezi sebou a se zemí
- **Predikce** - odhad budoucích hodnot skutečného průběhu
- **Prognóza** – stanovení a odhad dalšího vývoje stavu zařízení
- **Přechodové vibrace** (transient vibration) - vibrace, obvykle s krátkou dobou trvání, které zanikají s časem
- **PWM** – pulzní šířková modulace proudu a napětí frekvenčního měniče o požadované frekvenci
- **RBI** – Reliability centred maintenance - inspekce na základě rizik
- **RCM** – údržba zaměřená na bezporuchovost
- **Spektrum** (spectrum) - popis veličiny jako funkce frekvence nebo vlnové délky
- **Subharmonická (sub harmonic)** - harmonické vibrace, jejichž frekvence je celistvým podílem základní frekvence veličiny, ke které se vztahují
- **THD faktor** – podíl harmonických
- **TPM** – totálně produktivní údržba
- **VF (HF)** – vysokofrekvenční (řádově kHz)