



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

TÉZE 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 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 i kvantitativní, a to verifikací a validací naměřených dat in situ, dále 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

Obsah

ABSTRAKT	3
ABSTRACT	3
KLÍČOVÁ SLOVA	3
KEYWORDS	3
1 ÚVOD	5
2 STÁVAJÍCÍ POJETÍ TECHNICKÉ DIAGNOSTIKY	5
2.1 Obecně k pojetí technické diagnostiky.....	6
2.2 Způsoby provádění diagnostiky.....	6
3 IDEOVÝ NÁVRH METODIKY MULTIPARAMETRICKÉ DIAGNOSTIKY6	
3.1 Obecné pojednání o multiparametrickém přístupu.....	7
3.2 Postup při řešení s využitím multiparametrické diagnostiky.....	9
3.3 Technická a organizační příprava.....	10
3.4 Multiparametrická diagnostika.....	11
3.5 Multiparametrická analýza.....	11
3.6 Návrh vhodných opatření, realizace a verifikace.....	12
3.7 Dílčí závěry kapitoly.....	12
4 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	13
5 EXPERIMENTÁLNÍ A PRAKTICKÁ ČÁST	14
5.1 Multiparametrická diagnostika pohonů s frekvenčním měničem.....	14
5.1.1 Návrh metod MPD.....	16
5.1.2 Navržená opatření.....	20
5.1.3 Shrnutí průběhu řešení diagnostického případu.....	21
5.1.4 Závěr daného problému.....	24
6 ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ A DISKUZE	24
6.1 Způsoby provádění diagnostiky a využití multiparametrické diagnostiky.....	25
7 CELKOVÝ ZÁVĚR A PŘÍNOSY PRO VĚDU, PRAXI A PEDAGOGIKU ..	26
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	29

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 (někde používaná zkratka MPD), 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.

2 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 v rámci oborů, jako je vibrodiagnostika, elektrodiagnostika, termodiagnostika, tribodiagnostika apod., dále nedestruktivní metody diagnostiky atd. 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.

U tak složitého zařízení jako jsou pohony, je nutné k diagnostice přistupovat zahrnutím všech vhodných 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 metod 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 jejího 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.

2.1 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. 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.

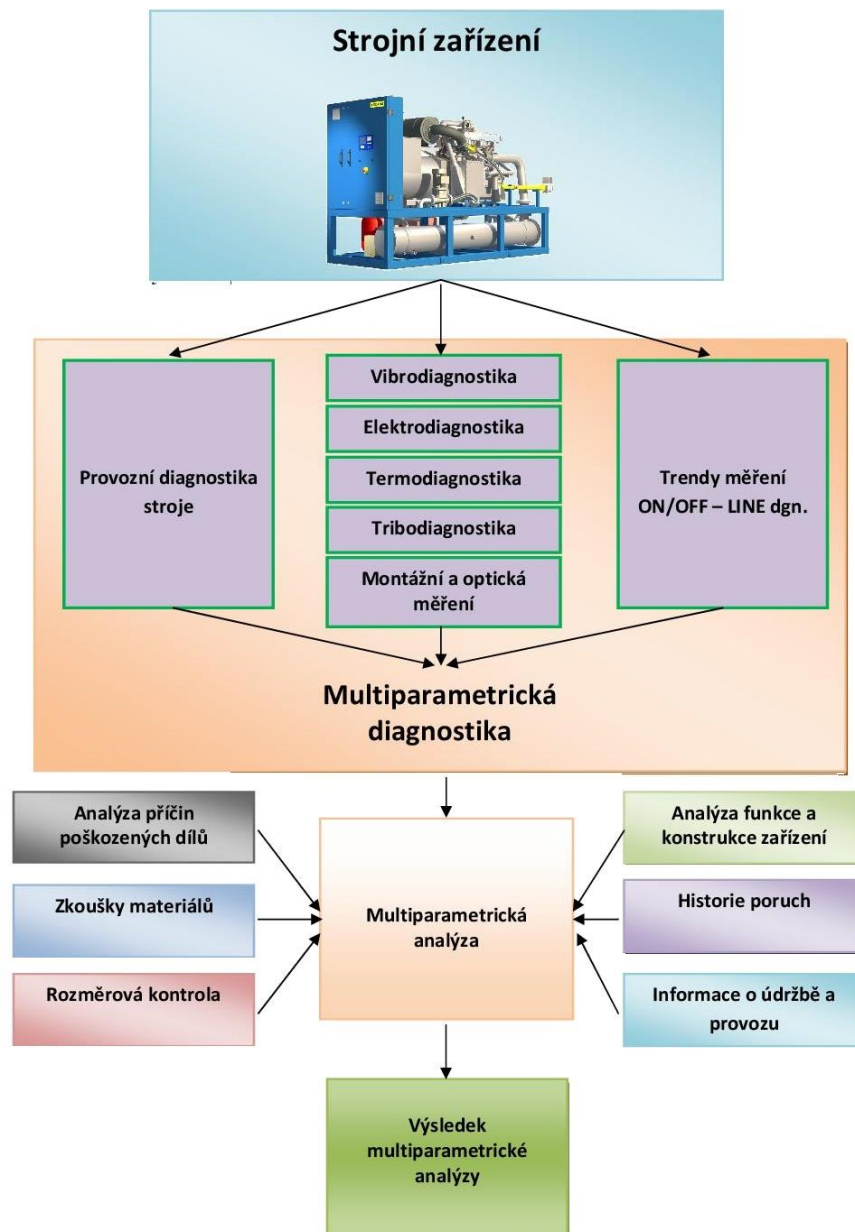
2.2 Způsoby provádění diagnostiky

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.

3 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.

Na obr. 1 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.

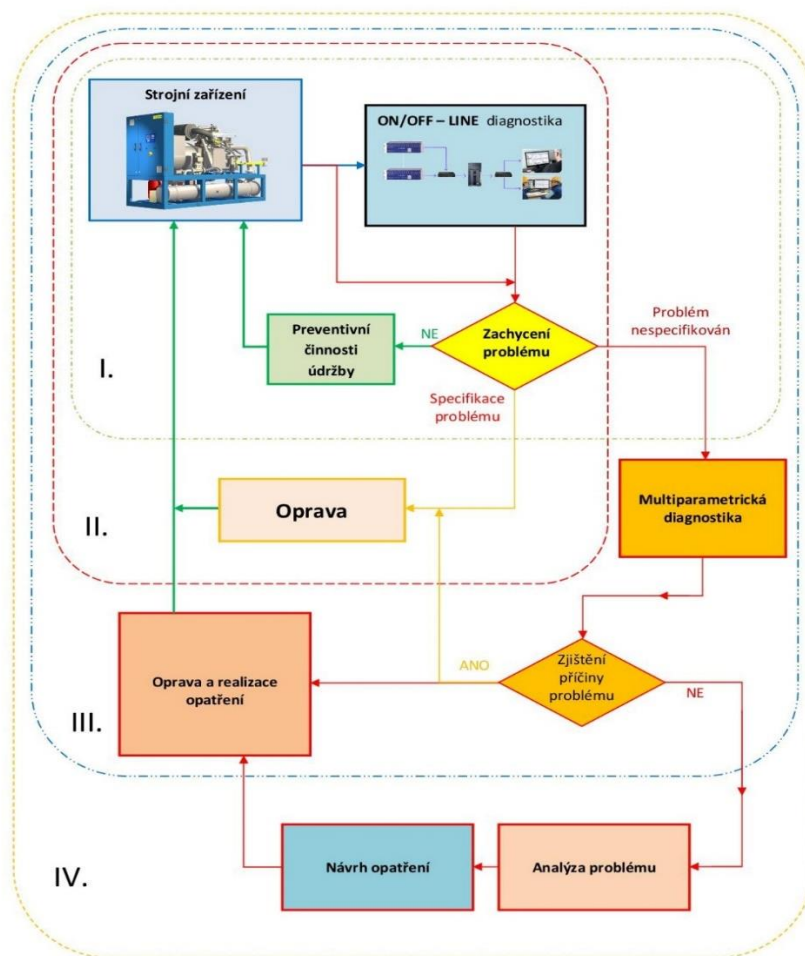


Obr. 1) Schéma multiparametrické diagnostiky

3.1 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. 2) Schéma procesu diagnostiky strojů

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 podle obr. 2 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 omezit jen na jednu diagnostickou metodu, 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.

3.2 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 měřících snímačů pomocí vhodného data-rekordéru, aby bylo možné tato 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.

3.3 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 stanovení, 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 multiparametrické diagnostiky, 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.

3.4 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 tato 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, teploty apod. a ty měřili současně, včetně daných provozních podmínek za účelem následného porovnání.

- **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.

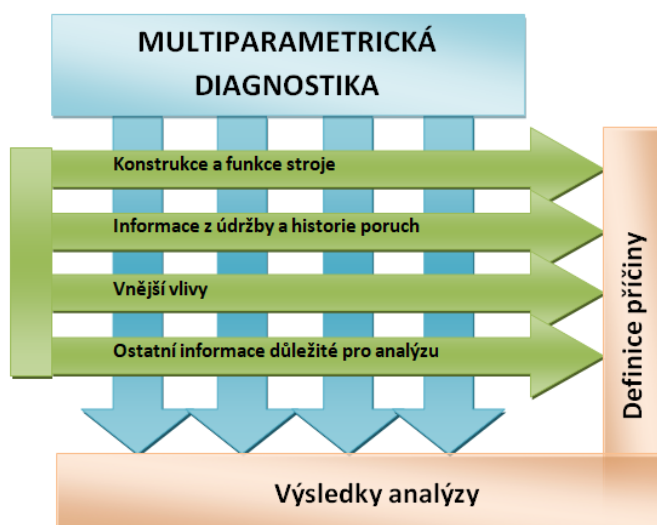
3.5 Multiparametrická analýza

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.

Analýza problému – je hlavním 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. 3. 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 o řetězec příčin.



Obr. 3) Schéma analýzy problému

3.6 Návrh vhodných opatření, realizace a verifikace

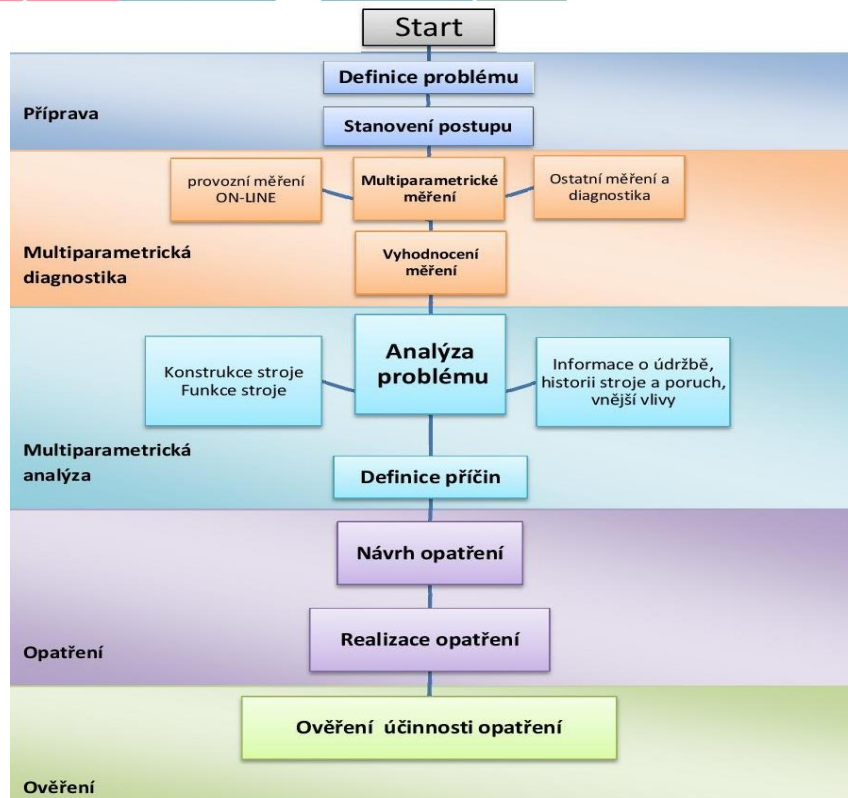
Výsledkem multiparametrické analýzy je pravděpodobná příčina nebo soubor, resp. řetězec příčin. Na základě určení příčiny problému je nutné stanovit vhodná opatření, která minimalizují řešený problém nebo nejlépe celý problém odstraní. Tuto část je nutné řešit nejlépe s projektantem, resp. konstruktérem 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.

3.7 Dílčí závěry kapitoly

Celý proces navržené metodiky je znázorněn v procesním modelu podle obr. 4.



Obr. 4) 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, návrh 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.

4 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 ovládání 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.

Díličí 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 i v in-situ.

Problematika řešená v disertační práci je vysoce aktuální. Motivací pro tvorbu této práce je celá řada. Základní, zcela logický důvod je uveden v hlavním cíli předkládané disertační práce. Další motivace 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.

5 EXPERIMENTÁLNÍ A PRAKTICKÁ ČÁST

V této části disertační 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. Následně je popsán jeden z nich.

5.1 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. Díky vyšší napájecí frekvenci je možné dosáhnout otáček dvoupólového motoru až na 4500 ot.min⁻¹.

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.

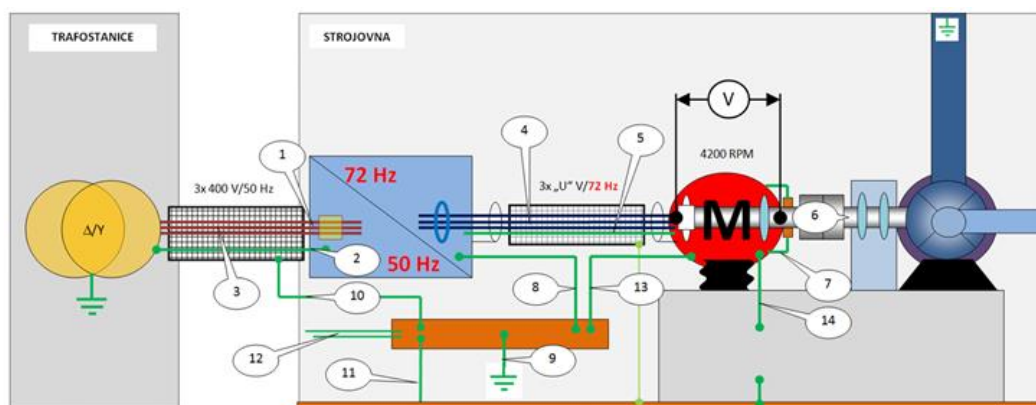
Druhou metodou je elektrodiagnostika. Pomocí této metody sledujeme charakter napájení motoru, symetrie jednotlivých parametrů proudu a napětí, velikosti harmonických frekvencí a hlavně průběhy a velikosti vysokofrekvenčních složek proudu při stabilním provozu a při dynamických dějích. Dalším ne méně 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. 5 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.

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.



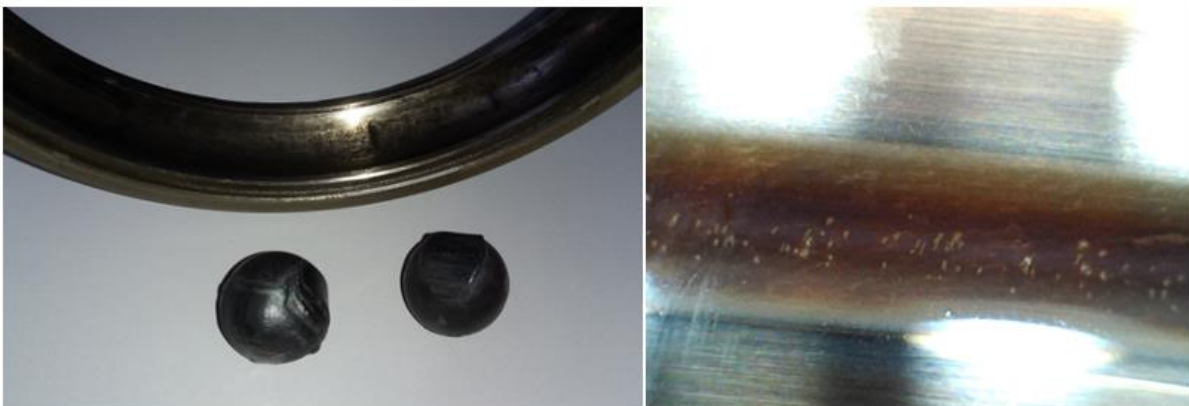
Obr. 5) Příklad diagnostiky zařízení s frekvenčním měničem

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. 6, i když ložiska byla izolovaná. Problémy se projevovaly nárůstem teploty ložisek motoru a současně zvýšenými hodnotami zrychlení vibrací.



Obr. 6) Poškozené NDE ložisko elektromotoru

5.1.1 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 posuzovány 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.

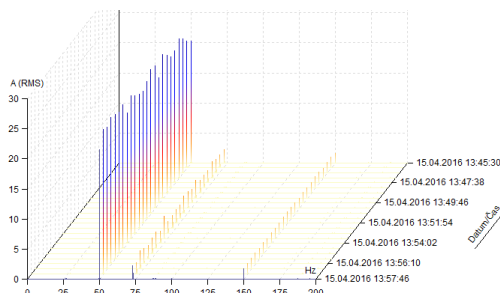
- **Elektrodiagnostika**

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, které 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.

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.

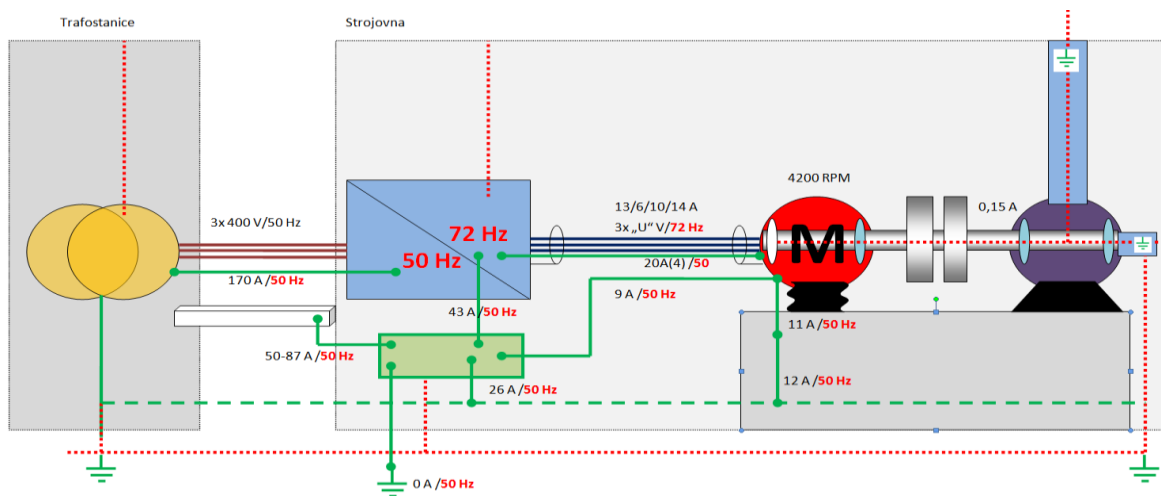
Analýzou těchto proudů lze sestavit tzv. proudové mapy (termín autora) a tím se snažit určit zdroj těchto proudů. Abychom mohli takovou mapu sestavit, je nutné analyzovat nejen RMS hodnoty proudů v PE vodičích a v neživých částech strojů, ale také amplitudy a frekvence těchto proudů. Příklad takového měření je v následující obrázku, kde je měřen proud v PE vodiči uzemnění a pospojování elektromotoru. Na obr. 7, 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. 7) Analýza proudu v PE vodiči motoru

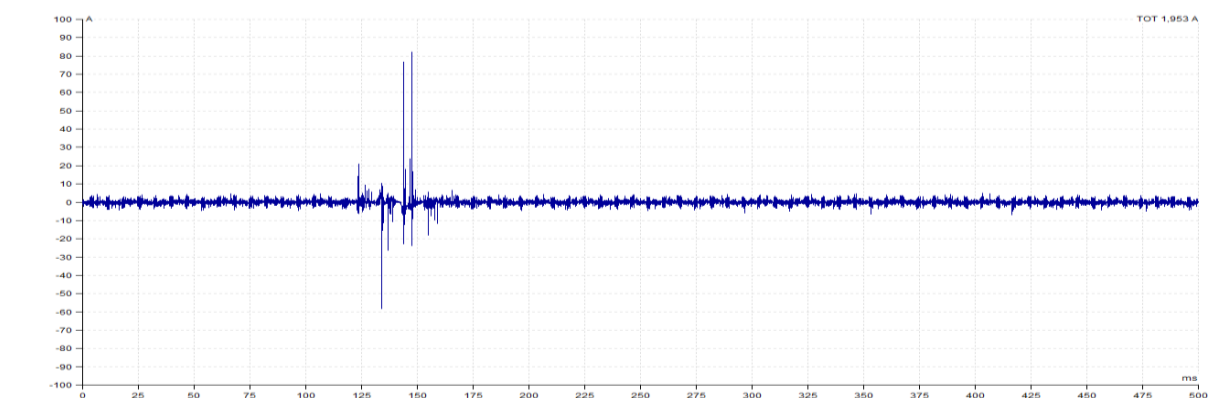
Z proudové mapy - obr. 8, vyplývá následující zjištění. Dominantní amplituda proudu, která se vyskytuje v neživých částech strojního zařízení, je na frekvenci 50 Hz. Největší amplituda na této frekvenci a zároveň největší proud byl naměřen na PE vodiči mezi trafostanicí

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 vysvazkování 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. 8) Proudová mapa v neživých částech a v PE vodičích

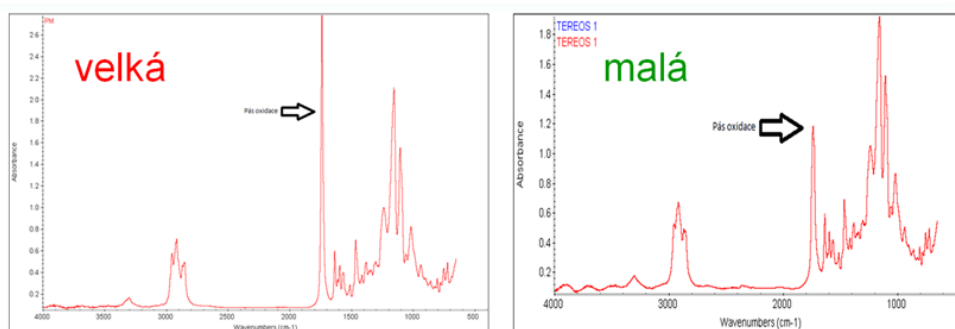
Životnost ložisek se sice prodloužila, ale nedosahovala ještě požadované doby životnosti. Bylo provedeno další měření se zaměřením na kapacitní proudy v neživých částech zařízení. Na přizemnění PE vodiči motoru byly měřeny proudy, které byly analyzovány v časové oblasti. Z této analýzy je zřejmé, že zde dochází ke krátkodobému nárůstu proudu v PE vodiči - obr. 9, který je s největší pravděpodobností způsoben vybíjením nakumulované energie v izolacích (kapacitách) motoru, včetně izolace valivého ložiska.



Obr. 9) 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.



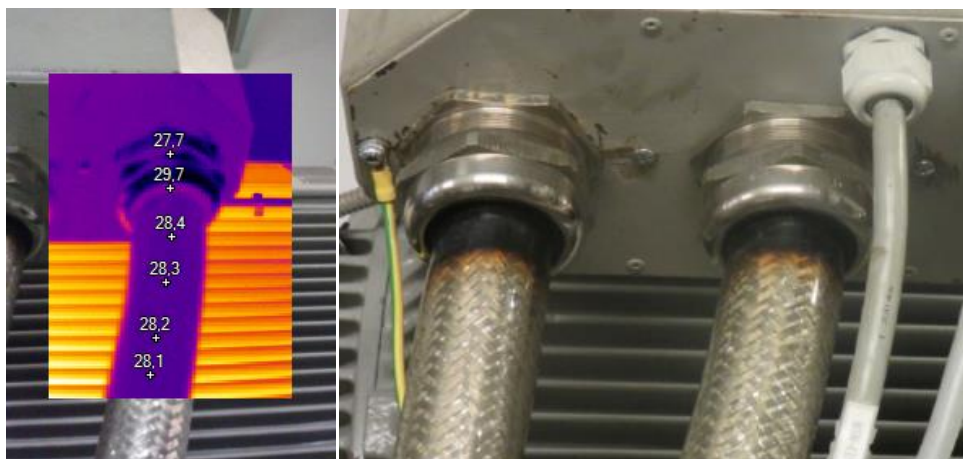
Obr. 10) Analýza mazacího tuku metodou infračervené spektrografie (FTIR)

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. Na obr. 10, je analýza FTIR (spektroskopická metoda) plastického maziva, s velkou hodnotou oxidačního pásma, které je degradováno průchodem elektrického proudu přes ložisko.

• 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. 11, 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.

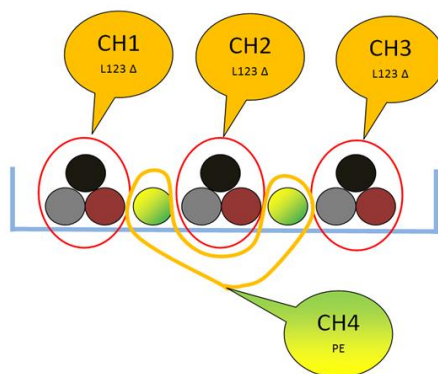


Obr. 11) Termografický snímek napájecího kabelu a zbarvení kabelů

5.1.2 Navržená opatření

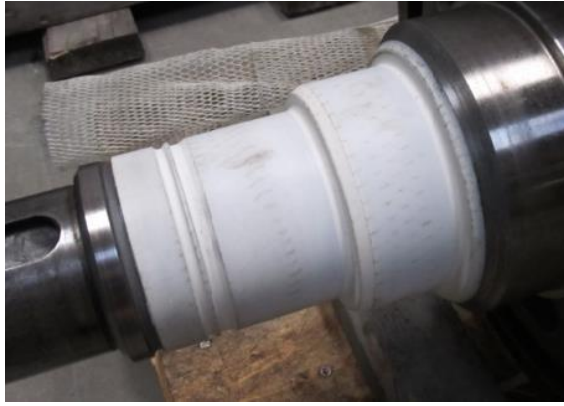
Na základě provedené diagnostiky bylo doporučeno několik opatření, která se realizovala:

- Pro snížení bludných proudů bylo doporučeno vysvazkování napájecích kabelů frekvenčního měniče - obr. 12. Toto opatření značně snížilo proudy v neživých částech strojního zařízení.



Obr. 12) 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. 13.



Obr. 13) Izolovaný nástřik hřídele

- Bylo doporučeno provedení 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.

5.1.3 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.

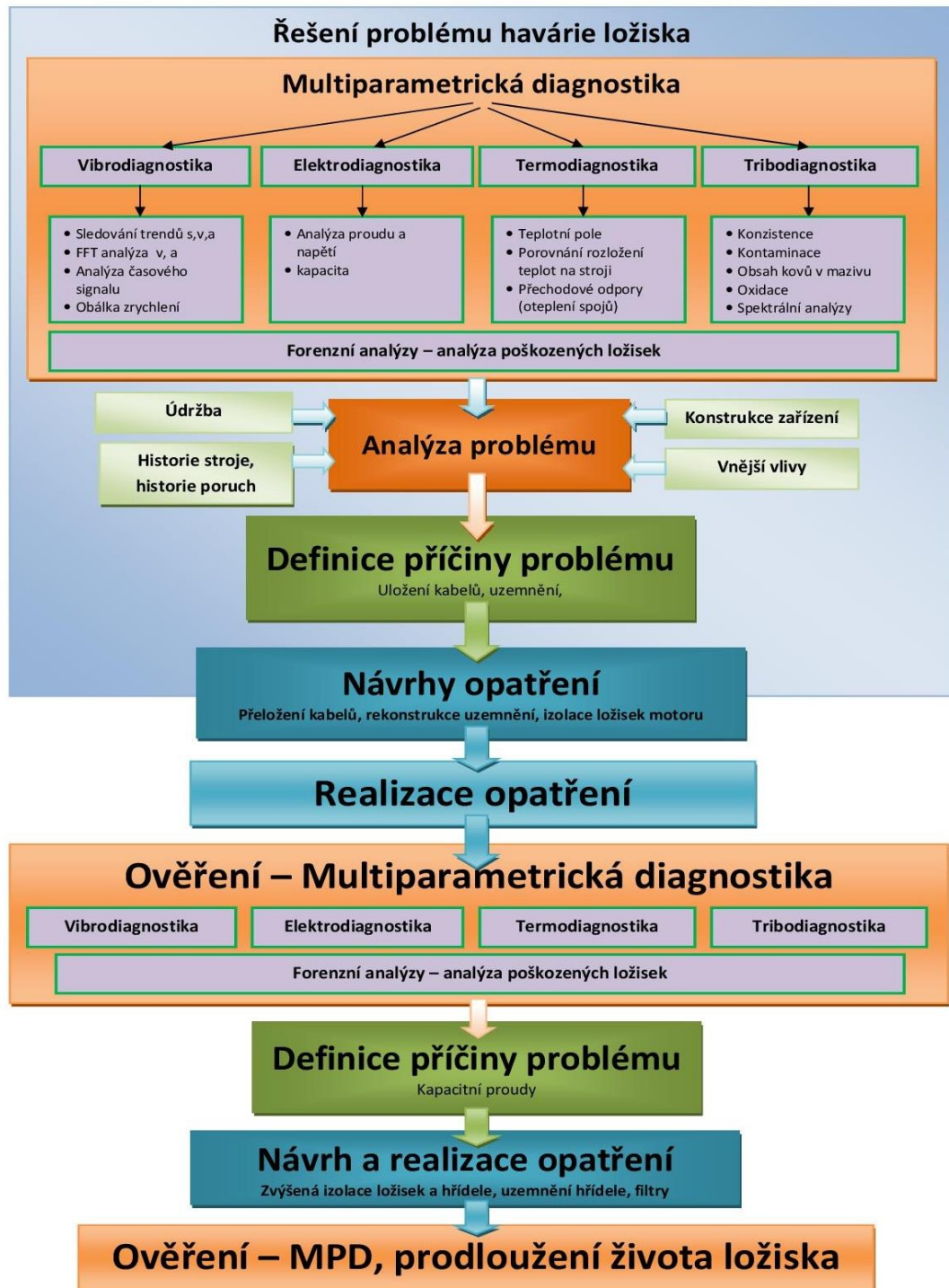
Na základě této diagnostiky byly provedeny určité kontroly k ověření funkčnosti jednotlivých mechanismů tohoto zařízení.

- 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. 12.
 - 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.
- 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. 13.
- 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 dobu. Celý postup multiparametrické diagnostiky je znázorněn v diagramu - obr. 14.



Obr. 14) Diagram postupu řešení

5.1.4 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, vysvazkování 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.

6 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 jeden diagnostický obor, 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. Málomnozí diagnostik je schopen obsáhnout více oborů, a hlavně více typů strojů. Neznamena 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 dizertační práce 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 v práci 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 rozбором 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.

6.1 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.

7 CELKOVÝ ZÁVĚR A PŘÍNOSY PRO VĚDU, PRAXI A PEDAGOGIKU

Popsaného přístupu výše 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.

Hlavní (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 užitečnosti a výrobní provozuschopnosti 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 přidanou hodnotou multiparametrického diagnostického přístupu je možnost využití naměřených dat pro automatizaci a zlepšení procesů daného zařízení s využitím myšlenek a metod digitalizace Průmyslu 4.0.

8 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, 439 s. 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. Kapazitive lagerspannungen und ströme bei umrichteragespeisten 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.