



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**PROAKTIVNÍ DIAGNOSTIKA A MONITOROVÁNÍ STAVU
TROJFÁZOVÝCH ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ V
PRŮMYSLOVÉM PODNIKU**

PROACTIVE DIAGNOSTICS AND MONITORING OF THE STATE OF THREE PHASE ASYNCHRONOUS
MOTORS IN INDUSTRIAL COMPANY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Holub

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

| | |
|-------------------|--|
| Ústav: | Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky |
| Student: | Bc. Ondřej Holub |
| Studijní program: | Strojní inženýrství |
| Studijní obor: | Kvalita, spolehlivost a bezpečnost |
| Vedoucí práce: | doc. Ing. Miloš Hammer, CSc. |
| Akademický rok: | 2015/16 |

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Proaktivní diagnostika a monitorování stavu trojfázových asynchronních motorů v průmyslovém podniku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ve firmě Bosch Jihlava se pro pohon kalírny používají trojfázové asynchronní motory. Problém těchto motorů je v posouzení a predikci jejich stavů. Diplomová práce se snaží řešit tyto problémy, a to na základě teoretických i praktických poznatků z technické diagnostiky.

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je navrhnout monitorování stavu motorů na základě vybraných diagnostických metod, jako je vibrodiagnostika, termodiagnostika a dalších vhodných postupů jako např. posouzení kvality napájecí sítě. K tomuto účelu použijte diagnostická zařízení dostupná ve firmě Bosch Jihlava. Určete limitní hodnoty diagnostických veličin a zaměřte se na posouzení i predikci stavu vybraných motorů.

Seznam literatury:

Vorlíček, Z. (1991): Spolehlivost a diagnostika výrobních strojů. České vysoké učení technické, Praha.

Kreidl, M., Šmíd, R. (2006): Technická diagnostika. Senzory-metody-analýza signálu. BEN - technická literatura, Praha.

Helebrant, F., Ziegler, J. (2005): Technická diagnostika a spolehlivost, II. Vibrodiagnostika. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava.

Mykiska, A. (2006): Bezpečnost a spolehlivost technických systémů. České vysoké učení technické v Praze, Praha.

Legát, V. (2013): Management a inženýrství údržby. Kamil Mařík PBtisk, Příbram.

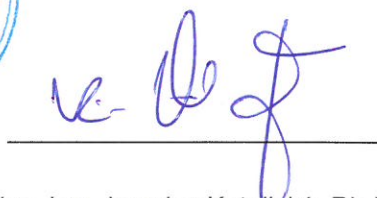
Grenčík, J. (2013): Manažérstvo údržby - Synergia a teorie a praxe. Slovenská spoločnosť údržby, BEKI design, s.r.o., Košice.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 30. 11. 2015



doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Tato diplomová práce pojednává o proaktivní diagnostice a monitorování stavu trojfázových asynchronních motorů v průmyslovém podniku Bosch Diesel s.r.o. v Jihlavě. V práci je vypracován návrh diagnostického systému, který na základě vybraných diagnostických metod a dalších vhodných postupů monitoruje stav těchto technických zařízení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Technická diagnostika, proaktivní diagnostika, monitorování stavu, trojfázový asynchronní motor, vibrodiagnostika, termodiagnostika, kvalita napájecí sítě, vizualizace procesů

ABSTRACT

This master thesis deals with the proactive diagnostics and monitoring of state of the three phase asynchronous motors in industrial company Bosch Diesel Jihlava. In master thesis is designed diagnostics system based on the selected suitable diagnostics methods and other appropriate process monitors the status of these technical equipments.

KEYWORDS

Technical diagnostics, proactive diagnostics, monitoring of the state, three phase asynchronous motor, vibrodiagnostics, termodiagnosics, quality of power supply net, process visualisation

Bibliografická citace

HOLUB, O. *Proaktivní diagnostika a monitorování stavu trojfázových asynchronních motorů v průmyslovém podniku*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2016, 73 s., Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Miloši Hammerovi, CSc. za odborné vedení a cenné rady při zpracování této práce.

Současně děkuji firmě Bosch Diesel s.r.o. - Jihlava za možnost zpracování diplomové práci v zázemí velké mezinárodní firmy. Konkrétně bych rád poděkoval panu Ing. Radkovi Havlovi a panu Bc. Tomáši Smazalovi, za podporu a cenné rady při vypracování diplomové práce.

V neposlední řadě bych rád poděkoval mé rodině, která mě při studiu velmi podporovala a své přítelkyni za trpělivost.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: *Proaktivní diagnostika a monitorování stavu trojfázových asynchronních motorů v průmyslovém podniku*, vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 27. 5. 2016

.....
Bc. Ondřej Holub

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| ÚVOD | 9 |
| 1 INDUSTRY 4.0 | 10 |
| 2 FIRMA BOSCH DIESEL JIHLAVA | 11 |
| 3 PROCES KALENÍ | 12 |
| 3.1 Baitické kalení..... | 12 |
| 3.2 Proces kalení | 13 |
| 4 TROJFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR | 14 |
| 4.1 Konstrukce asynchronního motoru | 14 |
| 4.2 Princip činnosti trojfázového asynchronního motoru | 15 |
| 4.3 Výkon a moment trojfázového asynchronního motoru..... | 16 |
| 5 SPOLEHLIVOST A ÚDRŽBA | 17 |
| 5.1 Spolehlivost..... | 17 |
| 5.2 Údržba | 17 |
| 6 MONITOROVÁNÍ STAVU A DIAGNOSTIKA STROJŮ | 19 |
| 7 VIBRODIAGNOSTIKA | 21 |
| 7.1 Charakteristika vibrací | 21 |
| 7.2 Monitorování stavu vibrací | 22 |
| 7.3 Analyzátor vibrací..... | 22 |
| 7.4 Měřené parametry | 23 |
| 7.5 Snímače vibrací | 23 |
| 7.6 Umístění snímačů..... | 24 |
| 7.7 Kritéria hodnocení..... | 24 |
| 7.8 Zpracování a analýza dat..... | 25 |
| 8 TERMODIAGNOSTIKA | 28 |
| 8.1 Kontaktní měření..... | 28 |
| 8.2 Bezkontaktní měření | 28 |
| 8.3 Vliv teploty na elektromotory | 29 |
| 9 KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE | 30 |
| 9.1 Měření kvality elektrické energie..... | 31 |
| 9.2 Vliv elektrických veličin na elektromotory..... | 32 |
| 10 DIAGNOSTIKA ZÁVAD ELEKTROMOTORŮ | 33 |
| 11 PRAKTICKÁ ČÁST | 35 |
| 11.1 Diagnostický systém | 35 |
| 11.1.1 Diagnostické objekty | 35 |
| 11.1.2 Diagnostické prostředky | 38 |
| 11.1.3 Realizace a nastavení..... | 40 |
| 11.2 Analýza parametrů vibrací a teploty | 41 |
| 11.2.1 Nastavení parametrů | 41 |
| 11.2.2 Vyhodnocení parametru vibrací a teploty..... | 44 |
| 11.2.3 Shrnutí vyhodnocení parametrů vibrací a teploty..... | 53 |
| 11.3 Analýza kvality elektrické energie | 54 |
| 11.3.1 Vyhodnocení kvality elektrické sítě | 55 |
| 11.4 Návrh vizualizace | 55 |

| | | |
|-----------|--------------------------------------|-----------|
| 11.5 | Doporučení | 59 |
| 12 | ZÁVĚR..... | 62 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 64 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ..... | 67 |
| | SEZNAM TABULEK | 68 |
| | SEZNAM PŘÍLOH..... | 69 |
| | PŘÍLOHY | 70 |

ÚVOD

Jedním z hlavních cílů každého podniku patří uspokojení potřeb zákazníka. Jen pokud se daří plnit přání a očekávání zákazníka, může firma pomýšlet na zisk, hospodářský růst a tím možnost investovat další prostředky pro neustálé zlepšování svých procesů a zvyšování konkurenceschopnosti.

K tomu, aby podnik splnil všechny požadavky zákazníka, je nutný systém. Systém, který dává podniku řád, podle kterého se podnik řídí a podle kterého je veden. Aby bylo možné prokázat, že podnik nebo proces je veden správně, je nutné určit parametry, které to mohou ukázat. Tyto stanovené parametry je nutné sledovat a vyhodnocovat. Na nejvyšší úrovni je sledována kvalita produktu, spokojenost zákazníka nebo hodnocení kvality dodavatelů. Je snaha předvídat příjmy, výdaje, zisky a mnoho dalších parametrů na základě minulých zkušeností. To však v této době již nestačí.

Aby byla zajištěna kvalita výrobků, je nutné perfektně znát všechny požadavky zákazníka, nejlépe i ty, které nesdělil. Je nutné mít zvládnuté procesy, které jsou řízeny dle příslušných zákonných požadavků, norem, směrnic a návodů. Pro procesy je potřeba zajistit vhodné zdroje ať lidské či materiální. Tato práce se bude věnovat především materiálním zdrojům, a to konkrétně strojním zařízením.

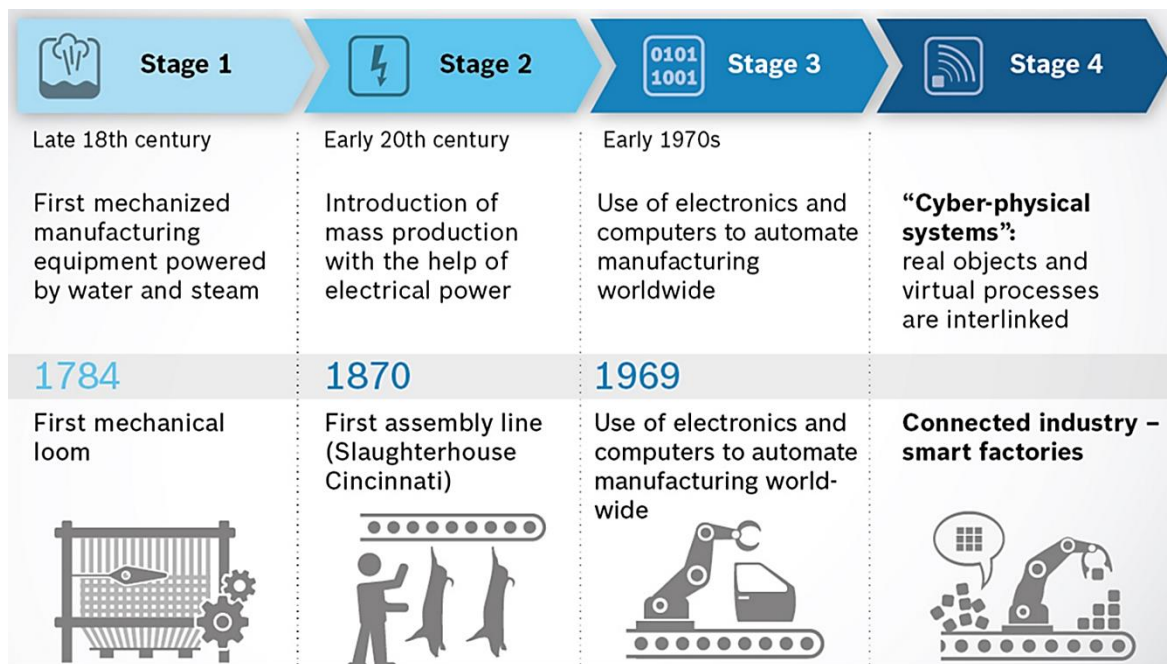
Samotný produkt má několik životních etap přes návrh, vývoj, výrobu až po provoz a odstavení z provozu. K tomu, aby byly jednotlivé etapy realizovány, je zapotřebí technická zařízení, ať už to jsou výrobní stroje, řídicí jednotky, měřicí systémy, počítače a další. Jednou z etap, kde je potřeba nejvíce strojních zařízení, je bezpochyby výroba – výrobní proces. Strojní zařízení, které slouží k výrobě produktu nebo úpravě jeho vlastností je celá řada. V tomto případě se jedná o kalící zařízení, které slouží právě k úpravě vlastnosti daného produktu. Správné fungování tohoto zařízení přímo ovlivňuje kvalitu produktu či operace, které vede k úspěšnému dokončení produktu.

Všechna strojní zařízení mají jedno společné. Ke svému fungování potřebují zdroj energie, který pohání všechny jejich části. K pohonu se v průmyslových podnicích nejčastěji používají elektromotory. Mezi nejrozšířenější patří trojfázové asynchronní motory. Elektromotor je jednou z nejdůležitějších částí strojního zařízení, protože bez jeho energie nemůže fungovat. Pokud zařízení nefunguje nebo nefunguje správně, může dojít k poškození celého zařízení, zastavení výrobní linky a mnoha dalším kritickým situacím, které všechny znamenají jediné, finanční ztrátu podniku.

Ve firmě Bosch Diesel s.r.o - Jihlava slouží trojfázové asynchronní motory k pohonu kalícího zařízení. Cílem je udržovat tyto elektromotory ve stavu, který zaručuje bezporuchový a bezpečný chod. Toho lze dosáhnout jak pomocí pravidelné údržby a správné manipulace, tak i použitím dalších vhodných technických metod pro sledování a předvídaní stavů těchto zařízení. Diplomová práce se bude zabývat některými metodami z technické diagnostiky a to konkrétně vibrodiagnostikou, termodiagnostikou a mimo jiné i sledováním parametrů kvality elektrické energie. Tyto metody mají za úkol sledovat a pomocí daných parametrů vyhodnotit stav těchto zařízení. Díky těmto metodám je možné správně posoudit stav zařízení, a to podniku umožňuje včasné naplánování údržby, opravy nebo výměny zařízení a tím snížení finančních nákladů.

1 INDUSTRY 4.0

Industry 4.0, Internet of Things tak se v zahraničí říká tzv. čtvrté průmyslové revoluci, která stále více mění svět kolem nás a průmyslové podniky nejsou výjimkou. Stroje, zařízení, výrobky i komunikační technologie a jejich elektronika, senzory, software mohou být s lidmi postupně propojeny přes internet. Vytvoří tak spolu výrobní síť, ve které budou sdíleny informace téměř v reálném čase. To umožní lepší spolupráci a nabízí příležitost ke zlepšení kvality a rozhodování při řízení procesů, optimalizovat koordinaci činnosti a zvýšení efektivity v celém procesu tvorby hodnot. V budoucnu se tedy budeme stále více setkávat s kyberfyzikálními systémy, kterou mezi sebou budou schopny vzájemně komunikovat.



Obrázek 1: Vývoj průmyslových aplikací [1].

Díky takto komplexním systémům se bude dále rozvíjet i systém údržby. Údržba bude zahrnovat kontrolu komponentů strojů prostřednictvím vzdáleného přístupu a automatické spouštění servisu a údržby v případě potřeby. Zaznamenaná data budou analyzována s cílem identifikovat možné opotřebení nebo nebezpečí hrozícího selhání stroje. Takto nastavené systémy povedou ke stálému rozšiřování proaktivní a prediktivní údržby. Ta nejenom poskytuje přehled o zhoršeném stavu a možném selhání, ale nasbíraná data umožňují vyvodit závěry o stavu stroje a podniknout požadované akce nebo provedení údržby i s nápravným opatřením a zjištění příčinou vzniku. [2]

Tato diplomová práce je právě jeden z projektů ve firmě Bosch Diesel s.r.o - Jihlava, na téma Industry 4.0, která vede ke zlepšení údržby strojů a zařízení.

2 FIRMA BOSCH DIESEL JIHLAVA

Společnost Bosch Diesel s.r.o v Jihlavě je v současné době největším výrobním závodem pro vstřikovací systémy Common Rail v divizi Diesel Systems v rámci celé společnosti Robert Bosch. Bosch Diesel dodává své výrobky předním výrobcům automobilů, a proto společnost musí splňovat nejpřísnější a nejnáročnější kritéria kvality. Z mnoha mezinárodních certifikátů, který podnik získal lze uvést:

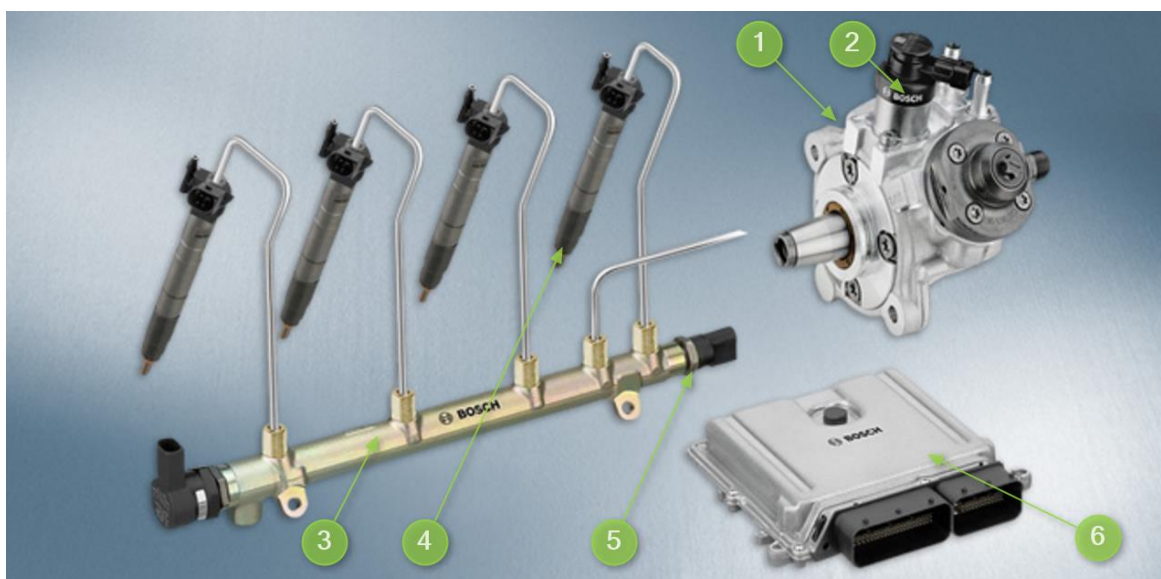


Obrázek 2: Logo firmy Bosch [3].

- management kvality: ISO 9001:2000, TS/ISO 16949,
- management ochrany životního prostředí: ISO 14001:2004,
- management bezpečnosti a ochrany zdraví při práci: OHSAS 18001:2007.

V Jihlavě má společnost Bosch tři výrobní závody, ve kterých se vyrábí komponenty pro dieselový vstřikovací systém. Dieselové vstřikovací systémy přispívají u moderních dieselových motoru ke snížení spotřeby paliva a emisí. Celý systém a jeho provedení, je vidět na obrázku 3. Součástí vstřikovacího systému Common Rail, jsou tyto komponenty:

- vysokotlaké čerpadla – vyráběno je několik typů (1),
- nízkotlaké a vysokotlaké palivové potrubí,
- tlakové regulační ventily (2),
- vysokotlaké zásobníky (3),
- vstřikovací ventily (4),
- senzory, a řídicí jednotka systému (5, 6).



Obrázek 3: Systém Common Rail [4].

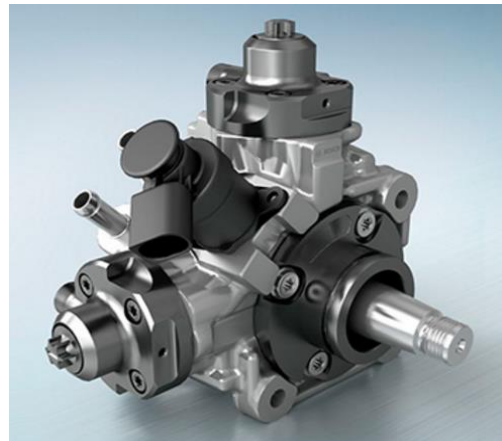
Úkolem vysokotlakého čerpadla je dodávat neustále stlačené palivo v požadovaném množství do vysokotlakého zásobníku čímž udržuje požadovaný tlak v celém systému. Většina Common Rail systému je vybavena radiálními pístovými čerpadly. [3]

3 PROCES KALENÍ

Vysokotlaká čerpadla pro vstřikovací dieselové systémy se v Jihlavě vyrábí v závodě 3 na Pávově. Vyrábí se zde několik typů vysokotlakých čerpadel a to dle požadovaného tlaku a druhu vozidla.

Samotné vysokotlaké čerpadlo se skládá z několika částí, ty lze vidět na obrázku 4. Různé typy čerpadel mají některé své části specifické, ale z velké části jsou komponenty podobné např. těleso čerpadla, excentrická hřídel, příruby, ventily, hlavy ventilů atd.

Všechny části mají své výrobní procesy a až poté se na montážní lince kompletují. Některé z těchto částí však potřebují speciální úpravy, aby získaly potřebné technické vlastnosti, které jsou nutné pro správné fungování a dlouhou životnost. Jednou z těchto speciálních úprav je kalení, v tomto případě bainitické kalení.

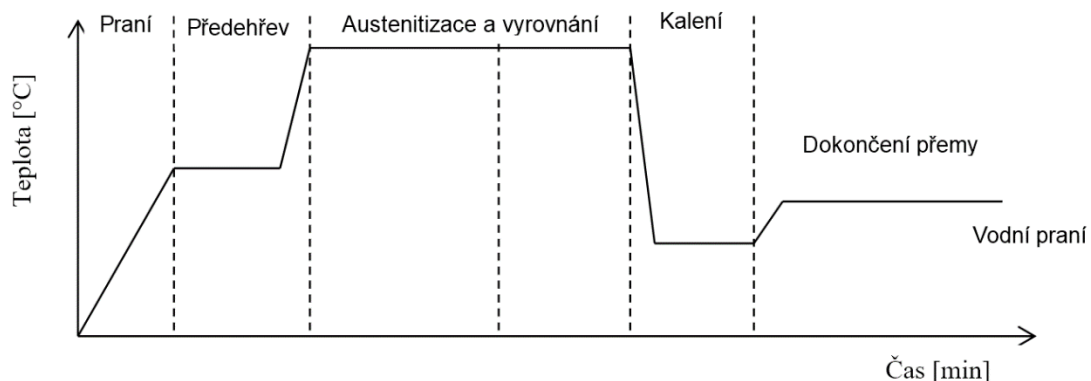


Obrázek 4: Vysokotlaké čerpadlo [4].

3.1 Bainitické kalení

Bainitické kalení lze rozdělit na izotermické a nepřetržité. V tomto případě se jedná o izotermické kalení. Na rozdíl od klasického kalení zde vzniká struktura bainitu, která vzniká tepelným zpracováním uhlíkové oceli izotermickou přeměnou. Při této přeměně dosahuje součást vyšší tvrdosti při současně vyšší houževnatosti. Další výhodou je vyšší odolnost vůči opotřebení a zvýšení meze únavy při kmitavém napětí. To zaručuje zlepšení kvality celého dílce.

Přeměna se řídí dle diagramu IRA, kdy je nejprve součást předehřívána, poté je teplota zvyšována až na austenitizační teplotu okolo 950°C a následně se součást ochlazuje, než se austenit začne přeměňovat na bainit. Poté teplota klesá a následně je udržována až na cca. 250°C, kde dochází k dokončení přeměny. Procesní průběh tepelného zpracování je možné vidět na obrázku 5. Tento způsob kalení se používá pro součásti menšího a středního průřezu. Ve firmě Bosch se toto tepelné zpracování používá pro hlavy ventilů, které jsou nejvíce namáhány při vstřikování paliva pod vysokým tlakem. [5]



Obrázek 5: Procesní průběh tepelného zpracování [5].

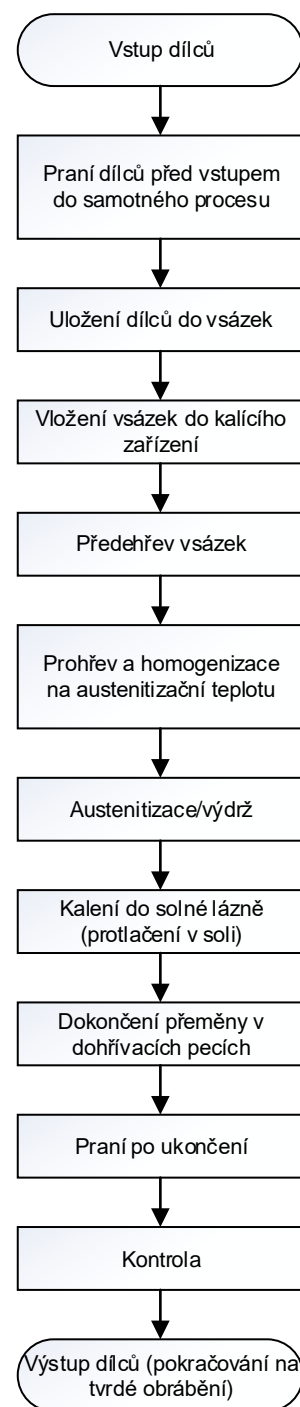
3.2 Proces kalení

Celý proces kalení probíhá v několika krocích pomocí více technických zařízení. Celý průběh procesu lze vidět na obrázku 6, a je popsán v těchto bodech: [5]

1. **Praní dílců.** Před samotným vstupem do procesu dílce prochází prací linkou. Ta slouží k odstranění konzervačních olejů, kapalin, které se používají při dopravě dílců do závodu, aby nedošlo k jejich degradaci.
2. **Uložení dílců do vsázek.** Po očištění dílců, operátor dílce ukládá do připravených vsázek (boxů). Zde každý dílec má své označení a je zaznamenána jeho poloha v boxu pro zpětnou dohledatelnost.
3. **Vložení vsázek do kalícího zařízení.** Až se všechny vsázky naplní, dílce jsou pomocí dopravníkového pásu vloženy do kalícího zařízení. Zde proces již pracuje zcela automaticky bez zásahu obsluhy, která pouze kontroluje provozní stav zařízení a procesu.
4. **Přehřev vsázek.** Vsázky vstupují do přehřívací pece, kde se ohřívají na přehřívací teplotu, která zlepšuje homogenizaci dílců.
5. **Ohřev a austenitizace.** Přehřáté vsázky vstupují do hlavní pece, kde se zahřejí na austenitizační teplotu.
6. **Kalení.** Dílce po austenitizaci jsou dále vloženy do solné lázně, kde probíhá izotermická přeměna.
7. **Dokončení přeměny.** Po kalení jsou dílce přesunuty do dohřívacích pecí, kde zůstávají pro optimální dokončení přeměny.
8. **Praní dílců po dokončení přeměny.** Po celém procesu je z dílců nutné odstranit zbytky solné lázně. K tomu slouží několik ponorných vodních zařízení.
9. **Kontrolní analýza.** Po dokončení pracího cyklu je určitý počet dílců podroben kontrolní analýze, kde se zkoumají požadované vlastnosti.
10. **Dokončovací operace.** Po úspěšném vyhodnocení kontrolní analýzy dílce pokračují na dokončovací operace.

Z tohoto velmi zjednodušeného popisu je patrné, že celý proces tepelného zpracování je náročný, od zvládnutí samotné technologie až po bezporuchový chod celého zařízení. Finanční hodnota vsázek se pohybuje v několika tisících euro a celý proces může trvat až dvacet hodin. Z toho vyplývá, že celé zařízení musí fungovat bezchybně po celý průběh procesu kalení. Pokud by zde nastala jakákoliv porucha, dojde k znehodnocení celé vsázky a velkým finančním ztrátám s dalšími následky, které mohou ovlivnit následující procesy.

Pro pohon všech částí kalícího zařízení slouží několik motorů, které jsou namontovány na zařízení. Jedná se o trojfázové asynchronní motory. Tyto elektromotory zajišťují provoz celého zařízení. Proto je důležité motory udržovat v bezporuchovém a bezpečném stavu.



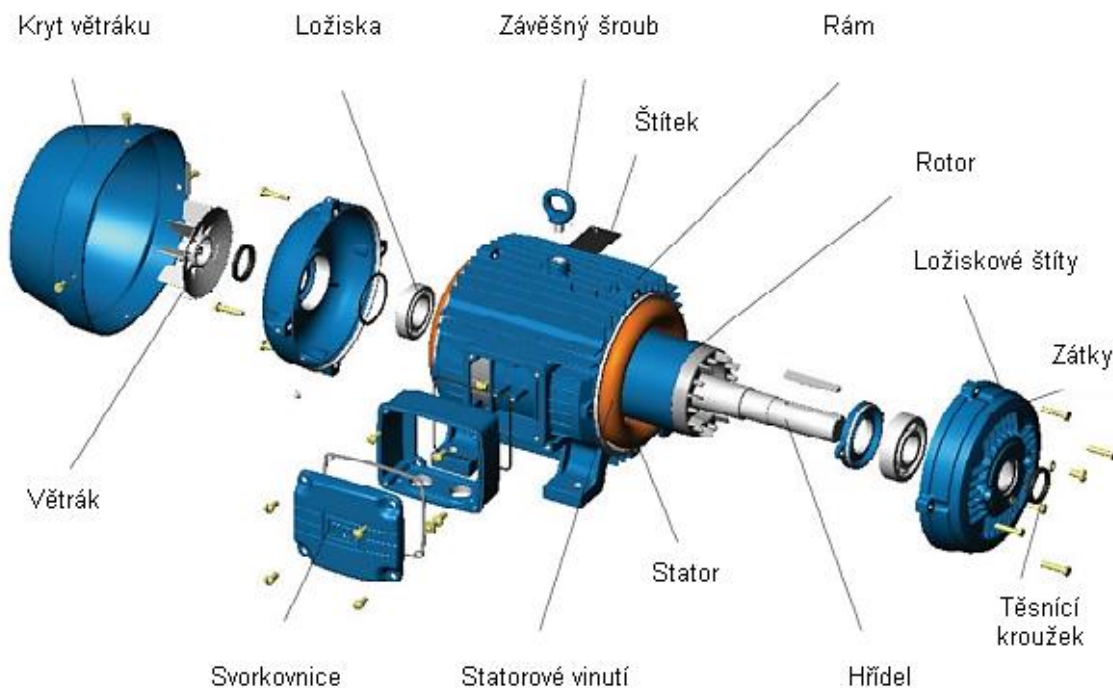
Obrázek 6: Proces kalení [5].

4 TROJFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR

Trojfázové asynchronní motory patří do skupiny elektrických strojů, které umožňují přeměnu elektrické energie na mechanickou a jsou zdrojem točivého momentu. Trojfázové asynchronní motory patří díky své jednoduché konstrukci, provozní spolehlivosti, snadné údržbě a ceně k nejpoužívanějším elektrickým motorům. Používají se například pro pohon čerpadel, ventilátorů, kompresorů a obráběcích strojů.

4.1 Konstrukce asynchronního motoru

Konstrukci asynchronního motoru ukazuje obrázek 7. Je z něj patrné, že se skládá z mnoha komponent.



Obrázek 7: Konstrukce asynchronního elektromotoru s kotvou nakrátko [6].

Nejdůležitější jsou však dvě elektromagnetické části. Stacionární část - stator, která je v našem případě v provedení s kotvou nakrátko a rotační část - rotor, který je uložený v ložiscích na každém konci. Obě části, jak stator a rotor (obrázek 8), jsou tvořeny z:

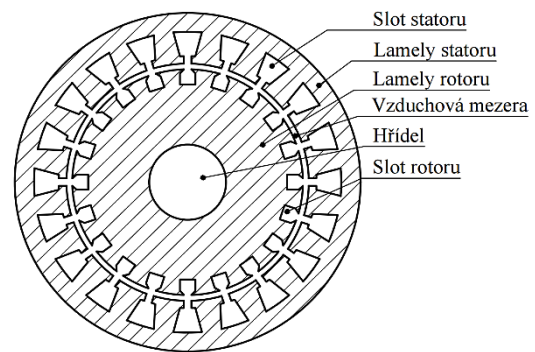
- Elektrického obvodu, obvykle vodičů z mědi pro přenos proudu.
- Magnetického obvodu, obvykle z elektrotechnických plechů pro přenos magnetického toku.

Stator je vnější nepohyblivá část motoru, která je složena z:

- Vnějšího rámu motoru, který je litinový, hliníkový nebo svařovaný.
- V kostře statoru jsou nalisovány elektrotechnické plechy, které mají na vnitřním obvodu vyraženy drážky,
- Trojfázových vinutí, které jsou umístěny uvnitř drážek (rozloženy po celém obvodu). Začátky a konce vinutí jsou vyvedeny na svorkovnici. [7]

Rotor je rotující část motoru, který je uložen v ložiscích. Rotor je tvořen stejně jako stator z elektrotechnických plechů (drážky na vnějším obvodu), které jsou umístěny na hřídeli. U motoru s kotvou na krátko jsou drážky vyplněny tyčemi, které jsou spojeny zkratovými kruhy. Toto uspořádání tyčí a kruhů tvoří klec.

Další části, které jsou nezbytné k funkčnosti asynchronního motoru, jsou koncové příruby (ložiskové štíty), které slouží k podpoře ložisek, ložiska, hřídel, chladicí ventilátor k chlazení statoru a rotoru, svorkovnice připevňovaná na motoru k připojení motoru k napájení a ochraně.



Obrázek 8: Řez statoru a rotoru [7].

4.2 Princip činnosti trojfázového asynchronního motoru

Princip trojfázového asynchronního motoru je založen na indukci napětí a proudů v rotoru. K statorovému vinutí trojfázového asynchronního motoru je připojeno napětí, vinutím začne procházet elektrický proud. Tento proud vytvoří točivé magnetické pole. Vytvořené magnetické pole se otáčí synchronní rychlostí dle vztahu: [6]

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p}, \quad (4.1)$$

kde: n_s - synchronní otáčky točivého magnetického pole statoru [min^{-1}],
 f - je síťová frekvence [Hz],
 p - je počet pólových dvojic [-].

Z rovnice 4.1 je zřejmé, že velikost otáček točivého magnetického pole statoru a tedy i velikost skutečných otáček rotoru je závislá na frekvenci a počtu pólových dvojic.

Činnost asynchronního motoru je založena na vzájemném elektromagnetickém působení točivého magnetického pole statoru a pole rotoru, které je vytvořeno proudem, který vinutím rotoru prochází. Působením obou magnetických polí dojde ke vzniku točivého momentu, který rotor roztočí ve směru působení točivého magnetického pole statoru.

Napětí a proudy v rotoru se podle indukčního zákona mohou indukovat točivým magnetickým polem jenom při otáčkách rotoru odlišných od synchronních otáček točivého pole statoru, tedy při asynchronních otáčkách. Při synchronních otáčkách rotoru by se do něj neindukovalo napětí, neprotékal by jím proud a stroj by měl nulový moment.

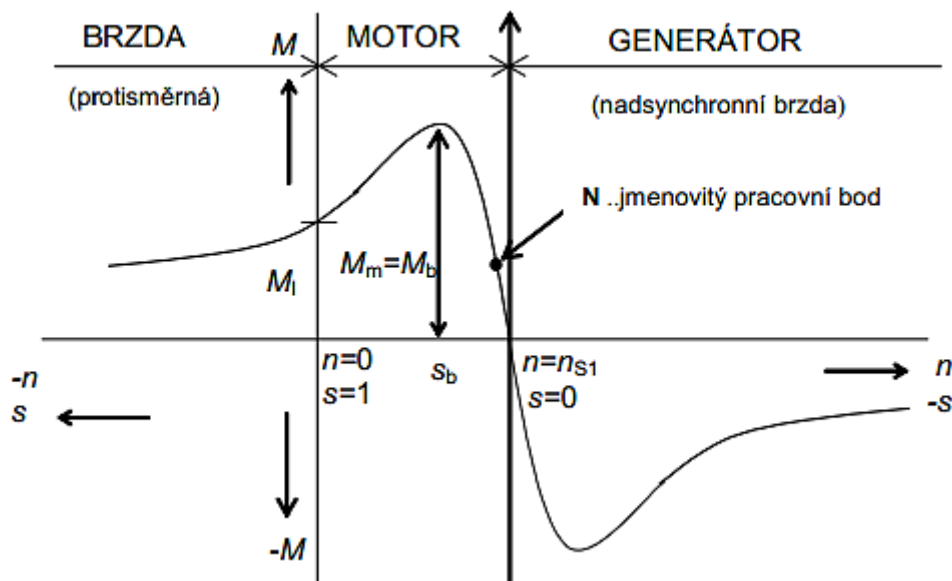
Rozdíl mezi rychlostí točivého magnetického pole n_s a rychlostí otáčení rotoru n je tzv. skluzová rychlost otáčení – skluz, který je definován vztahem: [6]

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100, \quad (4.2)$$

kde: s - skluzová rychlost otáčení [%],
 n_s - synchronní otáčky točivého magnetického pole statoru [min^{-1}],
 n - rychlost otáčení rotoru [min^{-1}].

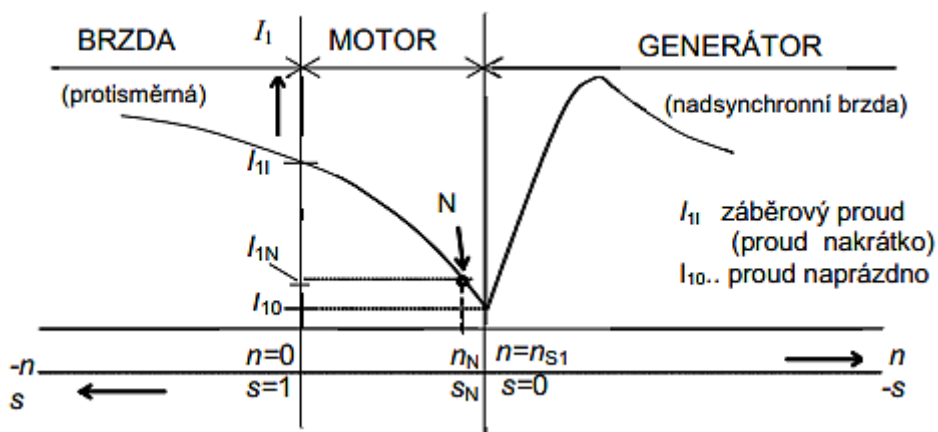
4.3 Výkon a moment trojfázového asynchronního motoru

Protože v této práci je později probírána problematika elektrických veličin, které mají vliv na trojfázové asynchronní motory, je vhodné uvést grafické vyjádření závislosti momentu motoru (M) na otáčkách (n) a skluzu (s), které je zobrazeno na obrázku 9. [8]



Obrázek 9: Momentová charakteristika asynchronního stroje [8].

Moment asynchronních motorů je kromě parametrů motoru závislý i na druhé mocnině napájecího napětí a na kmitočtu napájecí sítě. To znamená, že se snižujícím se napětím klesá moment motoru. Změna kmitočtu mění moment nepřímě úměrně. Závislost proudu motoru na otáčkách nebo skluzu popisuje proudová charakteristika asynchronního stroje, kterou ukazuje obrázek 10. [8]



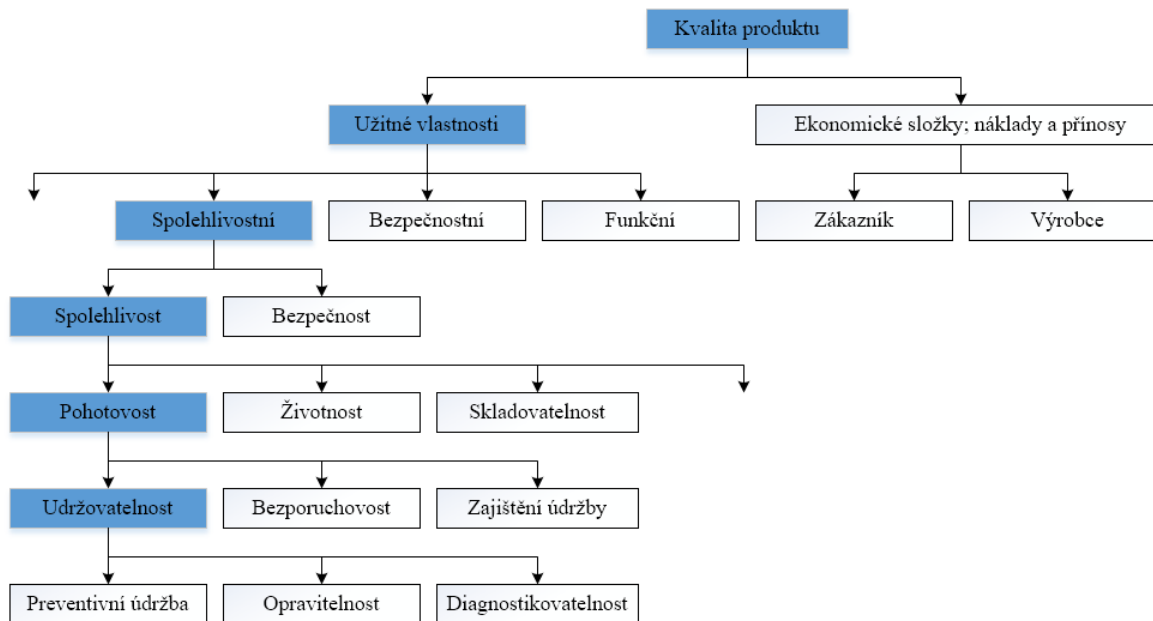
Obrázek 10: Proudová charakteristika asynchronního stroje [8].

5 SPOLEHLIVOST A ÚDRŽBA

5.1 Spolehlivost

Každý stroj, pokud má spolehlivě pracovat po celou dobu plánované životnosti, je třeba udržívat. Pod pojmem spolehlivost je uváděno několik definicí, nejčastěji je však možné se setkat s definicí:

- Spolehlivost je souhrnný termín používaný pro popis pohotovosti a činitelů, které ji ovlivňují: bezporuchovost, udržovatelnost a zajištění údržby. [9]



Obrázek 11: Zařazení spolehlivosti do kvality produktu [9].

Z obrázku 11 je vidět, že pod spolehlivost spadá několik dalších kategorií. V tomto případě se budeme zajímat především o pohotovost a udržovatelnost, které jsou definovány takto:

- **Pohotovost** je vlastnost objektu být ve stavu schopném plnit požadovanou funkci v daných podmínkách, v daném časovém okamžiku nebo v daném časovém intervalu za předpokladu, že jsou zajištěny požadované vnější prostředky. [10]
- **Udržovatelnost** je schopnost objektu v daných podmínkách používání setrvat ve stavu nebo být vrácen do stavu, v němž může vykonávat požadovanou funkci, jestliže se údržba provádí v daných podmínkách a používají se stanovené postupy a zdroje. [11]

5.2 Údržba

Do udržovatelnosti lze zařadit všechny druhy údržby a diagnostikovatelnost. Norma ČSN EN 13306: 2002 – Terminologie údržby, definuje pojmy z oblasti údržby. Je tedy vhodné zmínit zde několik nejdůležitějších pojmů. [11]

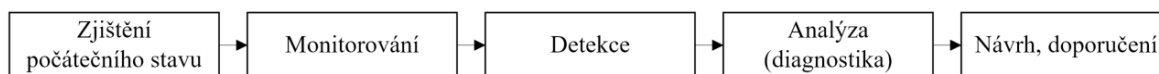
- **Údržba** je kombinace všech technických, administrativních a manažerských činností během životního cyklu objektu zaměřených na jeho udržení ve stavu nebo jeho navrácení do stavu, v němž může vykonávat požadovanou funkci.
- **Objekt** je jakákoliv část, součástka, zařízení, subsystém, funkční jednotka, přístroj nebo systém, se kterým je možné se individuálně zabývat.
- **Bezporuchovost** je schopnost objektu vykonávat požadovanou funkci v daných podmínkách a v daném časovém intervalu.
- **Porucha** je ukončení schopnosti objektu vykonávat požadovanou funkci.

Hlavním úkolem údržby však není opravovat poškozené stroje, ale zabránit všemi dostupnými prostředky jejich poškození. Při provozu v průmyslových podnicích je cílem údržby zajistit bezporuchový nejlépe nepřetržitý provoz po celou dobu životnosti stroje, optimalizovat výkonnost stroje – aby nedocházelo k výkyvům výkonu a tím i k možnému poškození částí stroje a zajistit bezpečný provoz. Údržbu lze všeobecně rozdělit do několika kategorií. [12]

- **Reaktivní údržba** – údržba se provádí až v okamžiku, kdy dojde k poruše. Je zaměřena na okamžité uvedení stroje do stavu, v němž může plnit požadovanou funkci. Tato údržba se často používá u strojů s nízkou prioritou.
- **Preventivní údržba** – údržba je prováděna v předem určených a připravených intervalech. Intervaly jsou předem známy a jsou předepsané postupy, jak a která část zařízení se bude kontrolovat nebo vyměňovat. Tato údržba je zaměřena na snížení pravděpodobnosti poruchy. Vyměňují se pravidelně i dílce, které jsou ještě v dobrém stavu pro předejití poruchy a tím dochází k finanční ztrátě.
- **Prediktivní údržba** – údržba v tomto případě neprobíhá v předem stanovených intervalech, ale pouze tehdy, pokud si to technický stav zařízení vyžaduje. Hlavním nástrojem této údržby je monitorování a diagnostikování stavu daného stroje. Cílem této údržby je průběžně sledovat a zjišťovat o zařízení co nejvíce informací – parametrů. Díky těmto informacím jsou viditelné změny trendu a tím je možné se o poruše nebo problému dozvědět s předstihem a je možné správně reagovat a včas naplánovat odstávku stroje, nebo výměnu součástí. Tím je možné minimalizovat náklady na opravu.
- **Proaktivní údržba** – je jedním z nejdiskutovanějších témat v problematice údržby v dnešní době. Jedná se o vylepšení prediktivní údržby pomocí zahrnutí i základní analýzy příčiny zhoršeného stavu objektu.

Proces prediktivní a proaktivní údržby lze rozdělit do několika etap, které jsou vidět na obrázku 12 a blíže si je lze přiblížit jako: [12]

- **Zjištění počátečního stavu** – od výrobce zařízení jsou většinou známy přípustné hodnoty pro některé z parametrů, které nesou informace o technickém stavu objektu. Je tedy známo, s čím naměřené parametry porovnávat. Pokud tyto hodnoty nejsou dány, je provedeno na novém stroji nebo na stroji, který nevykazuje žádné příznaky poruchy, měření sledovaných parametrů a tím jsou stanoveny limitní hodnoty pro následné porovnání.
- **Monitorování** – na stroji je dle příslušných návodů a norem vytvořen diagnostický systém a v daných časových intervalech jsou sledované parametry zaznamenávány.
- **Detekce** – každý ze sledovaných parametrů má předepsané limitní hodnoty, které jsou určeny z norem, popř. zkušeností z předchozích projektů. Data, která jsou v předchozí etapě monitorování získávána, jsou vyhodnoceny a pokud jsou limitní hodnoty překročeny, dojde k upozornění – detekci problému.
- **Analýza** – po odhalení problému je provedena analýza naměřených dat, a hledá se příčina problému pro další řešení.
- **Návrh, doporučení** - po zjištění příčiny problému, jsou přijata opatření k tomu, aby se v nejlepším případě daný problém či porucha nevyskytovala, popř. je doporučeno další sledování trendu.



Obrázek 12: Proces údržby [12].

6 MONITOROVÁNÍ STAVU A DIAGNOSTIKA STROJŮ

K udržování strojů byla v předchozí kapitole zmíněna údržba. Ta však často používá právě monitorování stavu a diagnostiku strojů. Technická diagnostika patří v dnešní době k důležitým prostředkům k zajištění údržby. Jde o samostatný vědní obor, který se zabývá nejčastěji bezdemontážními a nedestruktivními metodami a prostředky na stanovení technického stavu objektu – tj. sledování parametrů a vyhodnocování stavu stroje za provozu.

Pro potřeby této práce je technická diagnostika rozdělena na diagnostiku aktuální, prediktivní a proaktivní.

- **Aktuální diagnostika** je popis stavu objektu v aktuální době. Toto je běžná forma diagnostiky používaná v technické praxi.
- **Diagnostika prediktivní** slouží k predikci stavu objektu, tedy jak se bude objekt chovat v blízké či vzdálené době. Právě tato diagnostika nabývá v poslední době na významu a může značně ovlivnit kvalitu objektu.
- Podstatou **proaktivní diagnostiky** je, že na základě výsledku této diagnostiky je možné realizovat zásahy do diagnostického systému, např. metody nebo diagnostických prostředků. Důležité místo v této diagnostice hraje monitorování a vizualizace procesů.

Existuje několik druhů diagnostiky dle typu parametrů. Mezi jedny z hlavních metod technické diagnostiky lze zařadit:

- **Vibrodiagnostika** – signál od zdroje vibrací nese informace o příčině vibrací a jeho analýzou lze zjistit vznikající nebo rozvíjející se závadu.
- **Termodiagnostika** – měření teplot a termovizní měření. Měřením povrchové teploty je možné zjistit místa s rozdílnou teplotou a posoudit příčinu této zvýšené teploty (tření, změna elektrického odporu atd.).
- **Tribodiagnostika** – analýza maziva. Tribodiagnostika má dva základní body a to sledování stavu maziva a analýzu nečistot a ořetových částic.
- **Elektrodiagnostika** – na základě analýzy elektrických veličin jsou zjišťovány závady elektrických strojů.

V průmyslových podnicích je však vhodné nebo dokonce často i nutné použít ke sledování stavu zařízení i několik metod současně – multiparametrická diagnostika.

Pro správné pochopení problematiky technické diagnostiky, je nutné uvést alespoň několik základních pojmů: [6]

- **Diagnostický systém** – vyhodnocuje technický stav objektu a skládá se z diagnostických prostředků (zařízení, postupy, metody), diagnostických objektů a obsluhy.
- **Diagnostická veličina** – nese informace o technickém stavu objektů. V této souvislosti se také používá v technické diagnostice pojem diagnostický parametr.

Norma ČSN ISO 17359 – Monitorování stavu a diagnostika strojů – Obecné pokyny, stanovuje pokyny pro obecné postupy, které mají být brány v potaz při sestavování programu pro monitorování stavu strojů v podniku. Norma popisuje jednotlivé kroky, které vedou k vytvoření uceleného přehledu o monitorovaném zařízení tak i o metodách, kterými budou tyto zařízení monitorovány a vyhodnocovány. Postup při monitorování stavu je možné dle normy rozdělit do několika kroků: [13]

1. **Analýza nákladů a zisku.** Tato počáteční analýza pomáhá při nastavení klíčových parametrů výkonnosti a kritérií pro měření efektivitu jakéhokoliv procesu/zařízení. V potaz jsou brány např. náklady na ztracenou produkci nebo následná poškození.

- Audit zařízení.** Ve schématu je sestaven popis stroje s typickými komponenty a procesy, které je nutné zvážit při monitorování. Zjišťuje se samotná funkce zařízení, provozní podmínky a jejich rozsah.
- Audit spolehlivosti a kritičnosti.** Pomocí faktorů spolehlivost a pohotovosti je možné lepší stanovení cílů procesu pro monitorování stavu. Je vytvořeno hodnocení kritičnosti a přiřazena jejich priorita např. na základě výrobních ztrát, četnosti poruch, nákladů na výměnu stroje, nákladů na monitorovací systém.
- Metoda monitorování.** V tomto kroku se určuje způsob měření pro daný parametr. Je vhodné provést úvahu o proveditelnosti měření – snadný přístup, složitost potřebného systému pro sběr dat atd. Určují se místa měření a kritéria výstrahy a poplachu.
- Sběr a analýza dat.** Jeden z nejdůležitějších kroků je samotné měření a stanovení trendů. Porovnání měření s kritérii výstrahy a poplachu. Určení diagnózy a prognózy.
- Určení zásahu údržby.** Obecné rozhodnutí o zásahu údržby. Příklad typických rozhodnutí: pokračovat v monitorování; odstavení stroje; uspíšení plánované údržby.
- Přezkoumání.** Zvážit metody nebo technologie, které dříve nebyly dostupné nebo považované za příliš finančně nákladné.

V normě je uvedeno velké množství příkladů parametrů pro monitorování stavu zařízení. Pro tento případ norma uvádí parametry pro elektromotory, které jsou vhodné měřit a to např.:

- Proud, napětí, odpor, elektrická fáze, příkon, výkon, krouticí moment, otáčky, teplota, vibrace, hluk, akustická emise, ultrazvuk, tlak oleje, spotřeba oleje, tribologie.

V této práci se budu zabývat především parametry vibrací, teplotou a některých elektrických veličin. Norma uvádí také informativní tabulku, která ukazuje příklady přiřazení závad elektromotorů vzhledem k měřeným parametrům a metodám.

Tabulka 1: Příklad přiřazení závad elektromotorů měřeným parametrům a metodám [13].

| Typ stroje: Elektromotor | Symptom nebo změna parametru | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|------------------------------|--------|-------|-----------------|-------|-----------------|--------|---------|---------|--------------|------------------------|------------------|---------------|
| Příklady závad | Proud | Napětí | Odpor | Částečné výboje | Výkon | Krouticí moment | Otáčky | Vibrace | Teplota | Doba do běhu | Axiální magnetický tok | Znečištění oleje | Chladicí plyn |
| Rotorové vinutí | x | | | | x | x | x | x | x | | x | | x |
| Statorové vinutí | x | | | | | | | x | x | | x | | x |
| Excentrický rotor | x | | | | | | | x | | | x | | |
| Závada kartáčů | x | x | | | x | x | | | x | | | | |
| Poškození ložiska | x | | | | | x | | x | x | x | | x | |
| Zhoršení izolace | x | x | x | x | | | | | | | | | x |
| Ztráta napájecí fáze | x | x | | | | | | x | | | x | | |
| Nevyváženost | | | | | | | | x | | | | | |
| Nesouosost | | | | | | | | x | | | | | |

x Označuje, že se může vyskytnout symptom nebo změna parametru, když se vyskytne závada.

Z tabulky 1 vyplývá, že nejvíce závad je možné odhalit při sledování parametru proudu, vibrací a teploty. Je tedy zřejmé, že je nutné použít takové technické metody, které tyto parametry dokážou monitorovat a hodnotit. Jednou z technických metod, která nám některé z těchto parametrů pomůže monitorovat, je např. vibrodiagnostika.

7 VIBRODIAGNOSTIKA

Vibrodiagnostika je jednou z hlavních metod bezdemontážní nedestruktivní diagnostiky. Signál od zdroje vibrací nese informace o příčině vibrací a pomocí analýzy je možné zjistit vznikající závadu. Hlavním cílem vibrodiagnostiky je sledovat a odhalit skutečný stav zařízení a tím umožnit včasné naplánování údržby s minimalizací nákladů na opravy či odstávky. Metody a aplikaci vibrační diagnostiky podrobněji popisují normy:

- ČSN ISO 13373-1: Monitorování stavu a diagnostika strojů – Monitorování stavu vibrací – Část 1: Obecné postupy.
- ČSN ISO 13373-2: Monitorování stavu a diagnostika strojů – Monitorování stavu vibrací – Část 2: Zpracovávání, prezentace a analýza vibračních dat.
- ČSN ISO 10816-1: Vibrace – Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech – Část 1: Všeobecné směrnice.

V této kapitole jsou shrnuty poznatky o monitorování stavu strojů, a hodnocení vibrací z výše uvedených norem [14, 15, 16].

7.1 Charakteristika vibrací

Pohyb v mechanice těles lze popsat periodou, dráhou (výchylka), rychlostí nebo zrychlením. Tyto veličiny jsou navzájem vázány matematickými vztahy, proto nezávisí na volbě veličiny, kterou zvolíme pro měření vibrací. Záleží na měřítku a časovém posunutí (fázi). [17]

Perioda

$$T = \frac{1}{f}, \quad (7.1)$$

kde: T - perioda, doba, během, které se uskuteční jeden úplný kmit,
 f - frekvence [Hz].

Výchylka vibrací

$$x(t) = X \cdot \sin(\omega t), \quad (7.2)$$

kde: $x(t)$ - je výchylka vibrací [μm],
 X - je maximální výchylka [μm],
 ω - je úhlová rychlost [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$],
 t - čas [s].

Rychlost vibrací – se využívá pro identifikaci poruch projevujících se v nízkých nebo středních frekvencích (10- 1000Hz) jako jsou nevyváženost a nesouosost.

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = X \cdot \omega \cdot \sin(\omega t), \quad (7.3)$$

kde: $v(t)$ - je rychlost vibrací [mm/s].

Zrychlení vibrací – slouží k identifikaci poruchy ve vysokých frekvencích (1-10kHz).

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = X \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t), \quad (7.4)$$

kde: $a(t)$ - je zrychlení [m/s^2 , g].

Další veličiny, které charakterizují kmitání, jsou střední absolutní hodnota X_{ave} a střední kvadratická hodnota X_{RMS} – také známé jako efektivní hodnota vibrací. Tyto veličiny je možné vypočítat ze vztahu:

$$X_{ave} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T |x(t)| \cdot dt, \quad (7.5)$$

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T |x^2(t)| \cdot dt}. \quad (7.6)$$

7.2 Monitorování stavu vibrací

Monitorování vibrací pomáhá při hodnocení technického stavu v průběhu provozu. Cílem celého procesu monitorování je rozeznat zhoršený stav zařízení, kdy je ještě dostatečný čas na údržbu nebo výměnu poškozených dílců. Zde lze uvést dva hlavní typy monitorovacích systémů.

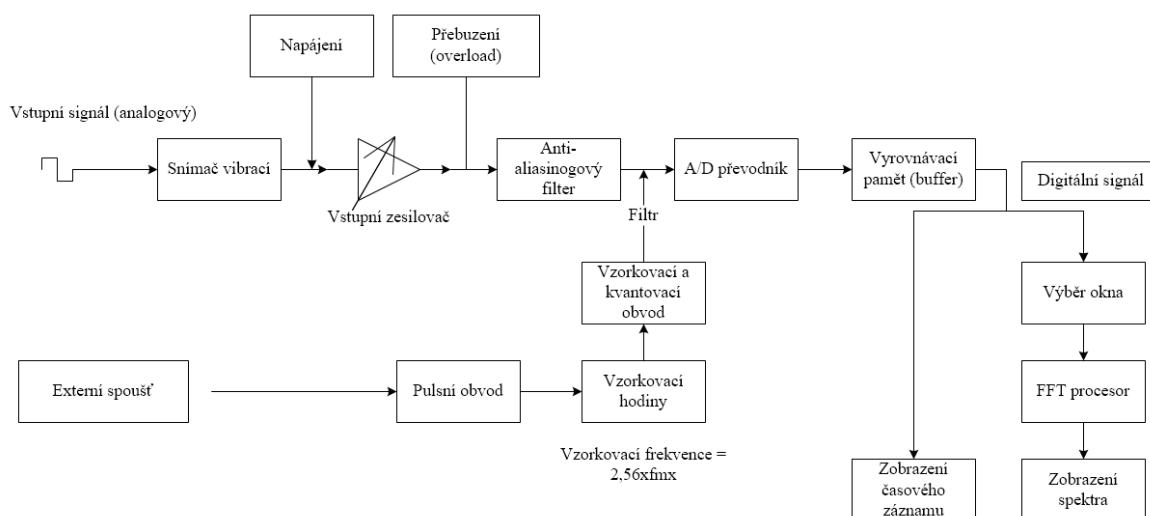
- Trvalé instalované systémy – snímače jsou trvale umístěny na sledovaný objekt. Data jsou sbírána v pravidelných intervalech nebo nepřetržitě. Tyto systémy se využívají nejvíce, pokud se jedná o stroj s vysokou prioritou.
- Mobilní monitorovací systémy – data jsou zaznamenávána pomocí přenosného zařízení. Tento typ je obvykle méně nákladný a je využíván pro stroje s menší prioritou.

Nejčastěji se používají tři typy měření, které jsou využívány pro monitorování stavu vibrací:

- Měření vibrací, která jsou prováděna na nerotující konstrukce stroje, jako jsou ložiskové skříně stroje nebo základna stroje.
- Měření relativního pohybu mezi rotujícími a nerotujícími prvky.
- Měření absolutního vibračního pohybu rotujících prvků.

7.3 Analyzátor vibrací

K měření vibrací je nutné potřebné technické vybavení. V technické praxi se používají prostředky od jednoduchých měřidel celkových vibrací až po vícekanálové analyzátoři, které umožňují samotné měření i analýzu naměřených dat. Základní schéma analyzátoru pro měření vibrací je možné vidět na obrázku 13.



Obrázek 13: Schéma analyzátoru pro měření vibrací [18].

V analyzátoru vibrací prochází analogový signál ze snímače vibrací vstupním zesilovačem, dále anti-aliasingovým filtrem (potlačení chyb při zobrazování) a dále A/D převodníkem, kde je digitalizován a vstupuje do zásobníku dat (buffer). Zde je možné zvolit mezi zobrazením jako časovým záznamem nebo možností zpracovat Fourierovou transformaci a získat frekvenční spektrum.

7.4 Měřené parametry

Pro monitorování stavu musí být měřící zařízení schopno pokrýt široký frekvenční rozsah, nejen pro měření otáčkové frekvence – harmonických násobků, ale i frekvence dalších komponent. Fázový úhel mezi dvěma zdroji vibrací je nutné zvážit při hodnocení signálu. Fáze je měřena jako úhlový nebo časový rozdíl jednoho sinusového vibračního signálu vůči jinému.

V našem případě norma ČSN ISO 10 816-1 určuje veličiny, které je možné použít a to:

- Výchylku vibrací v mikrometrech; pro monitorování relativní polohy a rotujících částí.
- Rychlost vibrací v milimetrech za sekundu; při měření vibrací na konstrukci – nejčastěji by se měla používat efektivní rychlost, která se kombinuje s efektivní výchylkou nebo zrychlením.
- Zrychlení vibrací v metrech za sekundu na druhou.

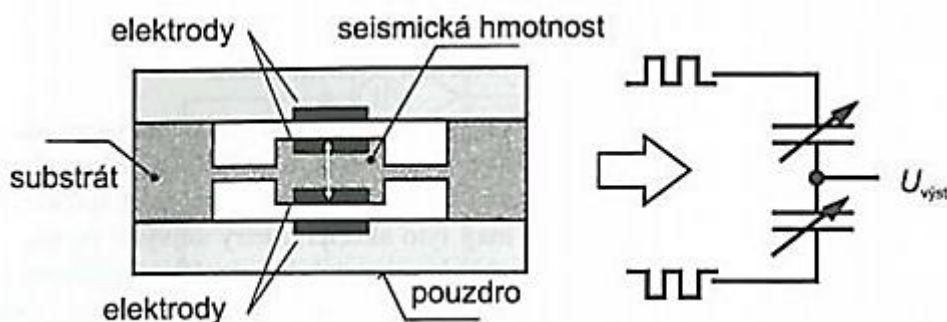
7.5 Snímače vibrací

Pro snímače je důležitý frekvenční rozsah a dynamický rozsah (maximální amplituda, kterou lze změřit, než se snímač poškodí). Základní rozdělení snímačů je na:

- Seismická zařízení, která se upevňují na konstrukci stroje a měří absolutní vibrace.
- Snímače relativní výchylky, které měří relativní vibrační výchylku mezi rotujícími a nerotujícími částmi.

Výběr správného snímače závisí na dané aplikaci, dle typu měřené veličiny lze však snímače rozdělit na:

- **Snímače výchylky** – jedná se o bezkontaktní snímač, který je na bázi vířivých proudů. Snímače výchylky jsou relativně složité, proto se používají v současné době většinou jen pro měření vibrací hřídelů vůči stacionárnímu ložisku nebo skříní stroje.
- **Snímače rychlosti (velometry)** – používají se jako snímače u rotačních strojů. Pracují na principu elektromagnetické indukce. Velikost indukovaného napětí je přímo úměrná rychlosti pohybu (tedy rychlosti vibrací měřeného stroje).
- **Snímače zrychlení (akcelerometry)** – používá se jako základní snímač vibrací. Jedná se o seismické zařízení. Používá se především pro měření na nepohyblivých částech zařízení. Princip funkce je založen na deformaci destičky z piezoelektrického keramického materiálu, při které vzniká elektrický náboj, který je přímo úměrný deformaci. Akcelerometry měří absolutní vibrace. Akcelerometry jsou různých typů a principů. V tomto případě je v praktické části použit právě snímač zrychlení, a to kapacitní. Principem kapacitního akcelerometru je, že při pohybu seismické hmotnosti dochází ke zvětšování jedné kapacity a zároveň se zmenšuje druhá kapacita. Poté se rozdíl kapacity vyhodnocuje. Schéma akcelerometru ukazuje obrázek 14. [19]



Obrázek 14: Kapacitní akcelerometr [19].

Norma ČSN ISO 13373-1 uvádí doporučené vyhodnocovací parametry, typ snímače, místa měření i směr pro měření středních a malých motorů s valivými ložisky (tabulka 2).

Tabulka 2: Typy snímačů a místa měření pro střední a malé motory s valivými ložisky [14].

| Typ stroje | Vyhodnocovací parametry | Typ snímače | Místa měření | Směr |
|--|---------------------------|---|----------------------------|---------------------------|
| Střední a malé motory s valivými ložisky | Rychlost nebo zrychlení | Snímač rychlosti nebo akcelerometr | Na každém ložisku a skříní | Radiálně X a Y, axiálně Z |
| | Fázové reference a otáčky | Snímač na vířivé proudy/indukční/optický snímač | Hřídel | Radiálně |

7.6 Umístění snímačů

Umístění snímačů pro účely monitorování stavu závisí na daném stroji a na specifických parametrech, které mají být měřeny. Obecně se doporučuje, aby snímače byly umístěny co nejbližší ložiskům. Umístění se však může dle stroje a zkušeností měnit a měřit lze i na jiných místech než v ložiscích a to:

- V místech, která nejpravděpodobněji ukazují maximální hodnoty vibrací.
- V místech, kde je malá vůle mezi stojícími a rotujícími částmi.

Způsob upevnění snímače má velký vliv na frekvenční rozsah. Norma ČSN ISO 5348: Vibrace a rázy – Mechanické připevnění akcelerometrů, uvádí doporučené a vhodné připevnění akcelerometrů např.: [20]

- Šroubem – nejspolehlivější uchycení, zanedbatelně snižuje frekvenční rozsah snímače.
- Lepidlem – důležité je použít vhodné lepidlo a plochu pro nalepení dobře očistit, opět nedochází ke snížení frekvenčního rozsahu.
- Magnetem – častý a rychlý způsob uchycení snímače, jen pro běžná provozní měření do 2 kHz.
- Včelím voskem, oboustrannou lepicí páskou atd.

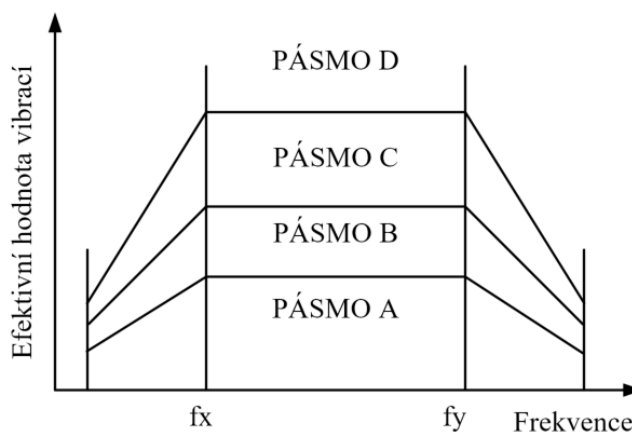
Snímač je nutné umístit na očištěné místo, je dbáno na čistotu dosedací plochy snímače, pokud je magnetické přichycení snímače. Nečistoty dokáží výrazně zkreslit skutečný vibrační signál a celé měření znehodnotit. Snímače jsou umísťovány pokud možno co nejbližší k místu vzniku vibrací, protože při šíření vibrací dochází k útlumu. Měření je nutné provádět v pravidelných intervalech vždy na stejném místě, aby byla zaručena porovnatelnost s předchozími měřeními a za běžných provozních podmínek.

7.7 Kritéria hodnocení

Úkolem diagnostiky není měřit, ale ohodnotit stav zařízení. Norma ČSN ISO 10816-1 hodnotí vibrace stroje na základě měření v pásmu 10 Hz až 1000 Hz, kde se vyskytuje převážná část

informací o zařízeních. Jsou zde uvedeny návody pro hodnocení stavu stroje na základě dvou kritérií: [16]

- Velikost vibrací – nejvyšší hodnota z měření na různých místech stroje se nazývá mohutnost vibrací. V normě jsou dány mezní hodnoty mohutnosti, a to pro 4 pásma (obrázek 15):
 - Pásmo A – za obvyklých podmínek vibrace nově přejímaných strojů.
 - Pásmo B – vibrace jsou v mezích a stroje mohou být provozovány po neomezeně dlouhou dobu.
 - Pásmo C – vibrace jsou považovány za neuspokojivé pro dlouhodobý provoz, provoz jen do doby než se naskytne možnost opravy.
 - Pásmo D – vibrace jsou natolik nebezpečné, že mohou poškodit stroj.



Obrázek 15: Průběh kritéria velikosti vibrací [16].

- Změna vibrací – změna velikosti vibrací vzhledem k předem stanovené referenční hodnotě.

Na základě dlouhodobého sledování se v praxi určí provozní meze a poté se stanoví extrémní meze vibrací, obvykle se jedná o dvě formy:

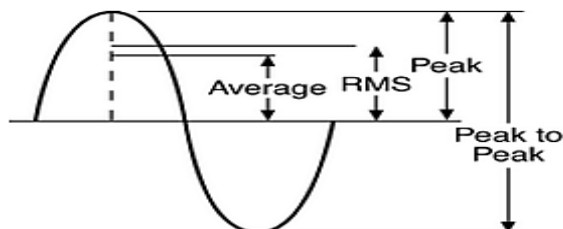
- Výstraha – varování, bylo dosaženo dané hodnoty vibrace, popř. výskyt významné změny a je nutno učinit nápravné opatření.
- Přerušování provozu – překročení limitních hodnot vibrace, které mohou způsobit poškození stroje. Je nutné učinit zásah nebo dle doporučení technika údržby provést potřebné kroky pro zlepšení této situace.

7.8 Zpracování a analýza dat

Než je možné nasbíraná data analyzovat, je nutno analogový signál od snímače upravit do digitální podoby. Signál projde přes celý analyzátor, až se k nám dostane v digitální podobě. Poté je možné přistoupit k samotné analýze. Analýzy je možné rozdělit do dvou hlavních kategorií:

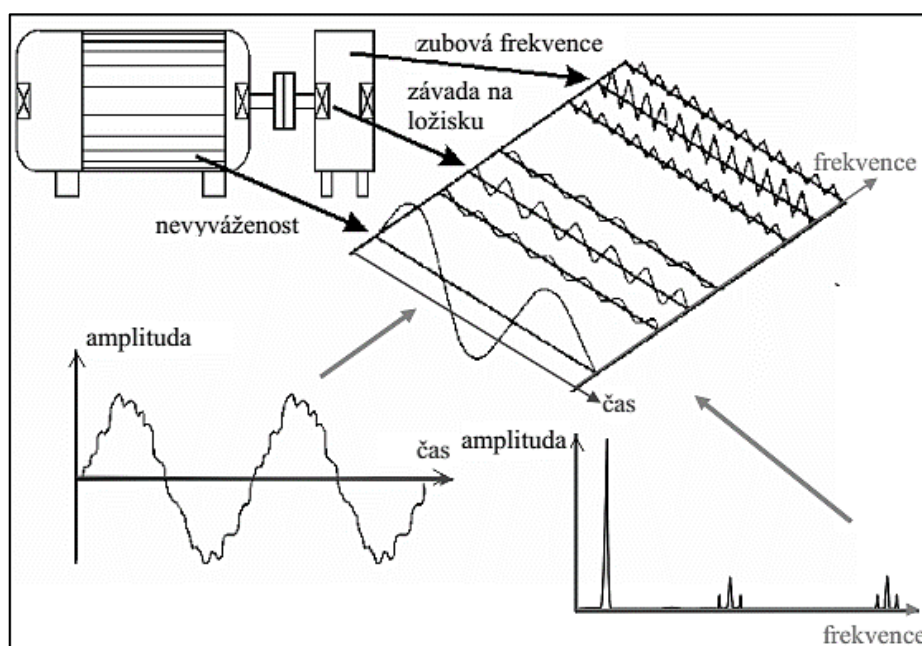
- **Analýza v časové oblasti** – Jedná se o záznam vibrací v závislosti na čase, kde jsou graficky znázorněny amplitudy širokopásmového signálu. Díky této analýze v časové oblasti lze sledovat vývoj trendu vibrací. V časové oblasti je možné se setkat s několika veličinami, které popisují vývoj vibrací:
 - **Špička (peak)** – jedná se o maximální hodnotu amplitudy.
 - **Špička – špička (peak to peak)** – udává maximální rozkmit celého signálu.

- **Efektivní hodnota RMS (Root Mean Square)** – ukazuje časový průběh signálu a je měřítkem nebezpečnosti a škodlivého kmitání. Jedná se o nejdůležitější hodnotu, která má přímý vztah k energii vibrací.
- **Průměrná hodnota (average)**



Obrázek 16: Grafické znázornění veličin vibrací [21].

- **Analýza ve frekvenční oblasti** – Velká část analýzy vibrací se provádí ve frekvenční oblasti. Různé zdroje vibrací lze zjistit podle frekvencí, na kterých se vyskytují. Základní metodou pro převedení časového signálu na frekvenční je použití Fourierovy transformace. V současnosti se však v analyzátoch používá efektivnější rychlá Fourierova transformace (FFT). Frekvenční analýza vibračních signálů pomocí FFT je jednou ze základních a nejrozšířenějších analytických metod. V průběhu vibračního signálu hledá periodické děje, které jsou pak v daném souřadném systému zobrazeny. Mezi další metody vibrodiagnostiky patří např. měření efektivní a špičkové hodnoty zrychlení (RBP), Crest Factor, Kurtosis, metoda SEE. V této práci zmíním pouze jednu z použitých metod v teoretické části a to obálkovou analýzu. [6]



Obrázek 17: Frekvenční analýza [12].

Obálková analýza

Velké množství vibrací vzniká od poškozených ložisek. Pro analýzu dat se zaměřením na poškozená ložiska se v současné době často používá obálková metoda. Metoda nejprve oddělí ložiskové signály od ostatních signálů pomocí filtrů. Díky tomu se zobrazí několik vysokých amplitud, které odpovídají rázům jednotlivých poškozených elementů ložiska. Tyto elementy mají svoje poruchové frekvence, které lze díky obálkové analýze ve spektru signálu odhalit. [6]

Pro výpočet chybových frekvencí impulzů se používají následující vztahy:

Poškození vnitřního kroužku BPFI

$$BPFI = \frac{n}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \phi\right) \quad (7.7)$$

- kde: n - počet valivých elementů,
 RPM - otáčky hřídele [ot/min],
 B_d - průměr valivých elementů [mm],
 P_d - střední průměr ložiska [mm],
 φ - kontaktní úhel [°C].

Poškození vnějšího kroužku BPFO

$$BPFO = \frac{n}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \phi\right) \quad (7.8)$$

Poškození valivých elementů BSF

$$BSF = \frac{P_d}{2 \cdot B_d} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \phi\right)^2\right) \quad (7.9)$$

Poškození klece FTF

$$FTF = \frac{1}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \phi\right) \quad (7.10)$$

Pro naše sledované objekty - motory ukazuje chybové frekvence tabulka 3. Byly vypočteny pomocí daných vzorců a zkontrolovány pomocí kalkulátorů ložiskových frekvencí od firmy SKF [22].

Tabulka 3: Přehled chybových frekvencí pro ložiska sledovaných motorů.

| SKF typ | Střední průměr ložiska Pd [mm] | Průměr valivého elementu Bd [mm] | Počet valivých elementů | Otáčky hřídele [ot/min] | BPFI [Hz] | BPFO [Hz] | FTF [Hz] | BSF [Hz] |
|-------------|--------------------------------|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|-----------|----------|----------|
| 6211 | 77,5 | 14,288 | 10 | 950 | 93,72 | 64,57 | 6,45 | 82,963 |
| | | | | 1465 | 144,59 | 99,57 | 9,95 | 127,93 |
| 6208 | 60 | 12,303 | 9 | 2950 | 266,61 | 175,88 | 19,54 | 229,69 |
| | | | | 2955 | 292,85 | 199,64 | 19,96 | 250,87 |

8 TERMODIAGNOSTIKA

Termodiagnostika je věda o diagnostice teploty. Teplota je stavová veličina charakterizující termodynamický stav. Pro praktická měření teploty se používají teplotní stupnice a to:

- Kelvinova teplotní stupnice – jednotkou je Kelvin [K]. Patří mezi absolutní teplotní stupnice, protože její počátek je v absolutní nule. Druhý základní bod této stupnice je teplota trojného bodu vody, který má hodnotu 273,16 K. V kelvinech se rovněž udává barevná teplota světla (teplota záře). Tento jev je důležitý zejména pro snímání a záznam světla.
- Celsiova teplotní stupnice – původně stupnice, která měla pevně stanovené dva body. Teplotu tání při 0 °C, a teplotu varu vody 100 °C (obě teploty jsou za stálého tlaku vzduchu 1013,25 hPa. Dnes je Celsiův stupeň definován pomocí trojného bodu vody, kterému je přiřazena teplota 0,010 °C.
- Dále se můžeme setkat z Fahrenheitovou stupnicí, která má vztah k celsiově stupnici a to $0\text{ °C} = 32\text{ °F}$.

Měření teploty lze rozdělit na dvě základní metody, a to na měření kontaktní a bezkontaktní.

8.1 Kontaktní měření

Teplotní senzor je připevněn (nebo se dotýká) na objekt, jehož teplotu je zapotřebí sledovat a měřit. Senzor je tedy v přímém kontaktu s měřeným objektem. Využívá se zde přenosu tepla mezi dvěma objekty. Princip dotykového měření spočívá v přenosu tepla materiálu snímaného objektu přes pouzdro samotného senzoru na jeho měřicí místo prostřednictvím tepelně vodivého materiálu. [9]

Kontaktní měření lze využít všude, kde je snadný přístup k měřenému objektu. Rychlost měření však závisí na tepelné vodivosti pouzdra senzoru. Výroba a použití kontaktních senzorů je snadná a rychlá, proto se jedná o cenově velmi dostupné senzory.

Jako i u měření vibrací velmi záleží na připevnění snímače na daný objekt, aby naměřená data měla co největší vypovídající hodnotu. U elektrických strojů jsou používány nejčastěji odporové senzory, termočlánky a indikátory teploty. [9]

- Odporové senzory – pro měření teploty se využívá měnící se elektrický odpor vodiče nebo polovodiče při změně teploty. U kovů většinou s teplotou roste i odpor. Pro odporové senzory teploty se používají materiály jako platina, nikl. U polovodičových senzorů však při zvýšení teploty odpor klesá. Polovodičové odporové senzory lze rozdělit na termistory a monokrystalické senzory.
- Termoelektrické články – princip termoelektrických článků je založen na převodu tepelné energie na elektrickou. Termoelektrické články se skládají ze dvou vodičů (polovodičů), které jsou spojeny – změnou teploty se mění vznikající termoelektrické napětí.
- Indikátory teploty – slouží ke stanovení pouze přibližné hodnoty teploty měřeného objektu. Teplota je stanovena pomocí limitní hodnoty indikátoru. Zjednodušeně lze říci, že při dosažení teploty, na kterou je indikátor navrhnut, změní svůj tvar, barvu atd.

8.2 Bezkontaktní měření

Senzor se nachází v určité vzdálenosti od měřeného objektu a tím nedochází k vzájemnému ovlivňování. Využívá se zde jevu, že všechny objekty, jejichž teplota je vyšší, než absolutní nula vyzařují elektromagnetické záření v určité části spektra. Záření je optickým systémem vedeno na detektor, jeho elektrický signál je dále zpracováván v elektronických obvodech a výstupem je údaj na displeji nebo termograf na monitoru vyhodnocovacího zařízení. Spektrum

záření využívané pro bezdotykové měření teploty je v infračerveném záření o vlnových délkách 25 μm až do 1 μm . [9]

Mezi výhody bezkontaktního měření patří: zanedbatelný vliv měření na měřený objekt, možnost měření teploty na pohyblivých objektech. Pro bezkontaktní měření teploty se využívají: [9]

- Infračervené teploměry (pyrometry) - je možné rozdělit na širokopásmové a úzkopásmové dle použité detekce záření např. termočlánky nebo kvantové detektory. Ve většině případů je výstup pouze digitální údaj o dané teplotě měřeného objektu.
- Infračervené termokamery (termovizní kamery) – představují základní měřicí zařízení infračervené diagnostiky, zjišťuje se rozložení teplotních polí měřeného objektu. Výstupem je termograf, kde pomocí barevné škály, která má přiřazené hodnoty teploty lze určit teplotu jednotlivých objektů na snímku.



Obrázek 18: Příklad snímku s termografem.

V této práci bylo využito jak měření kontaktní tak bezkontaktní. V počáteční fázi tohoto projektu byly všechny motory změřeny termokamerou, pro odhad teploty. Následně byly vybrány teplotní senzory, které se umístily přímo na sledované motory.

8.3 Vliv teploty na elektromotory

V předchozích kapitolách byly uvedeny některé pojmy, které se diagnostiky teploty týkají. Je však nutné zmínit, jaký vliv má teplota na funkci a chod elektromotoru. Všechny naše trojfázové asynchronní motory mají izolační ochranu třídy F. To znamená, že některé z částí jsou speciálně upraveny, navrženy do teploty až 150 $^{\circ}\text{C}$, většinou se jedná o izolační systém motoru. Bohužel ostatní části tyto speciální úpravy nemají, může tedy docházet např. k většímu opotřebení částí.

Praktickým důvodem měření teploty elektromotorů je odhalení jejich možných poruch např.:

- Porušený izolační systém, oslabení izolačního odporu, který se vzrůstem teploty obvykle klesá.
- Závady v rotorovém či statorovém vinutí.
- Závady v chladicím systému – poškozený větrák.

Všechny tyto možné poruchy vedou ke zvýšeným ztrátám daného elektromotoru, kdy se část elektrické energie přemění na tepelnou energii. To způsobí změnu teploty, popř. při měření termokamerou změnu barevného zobrazení teplotních polí, a tím můžeme zjistit, co je příčinou zvýšené teploty.

9 KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE

Dalším možným způsobem monitorování stavu asynchronních motorů je použití elektrických parametrů. Velké množství elektrické energie, která je směřována do průmyslových podniků, je používána právě pro pohon strojních zařízení. Kvalita dodávané elektrické energie tedy hraje významnou roli pro zajištění správného chodu těchto zařízení. Nekvalita elektrické energie se na zařízení může projevit oteplením, které zkracuje životnost nebo způsobuje nestabilitu provozu pohonů či poškození elektroniky. To vše může vést k výpadku ve výrobním procesu, snižování životnosti zařízení nebo růstu nákladů na údržbu.

Kvalita dodávané elektrické energie je popsána v normě:

- ČSN EN 50160: Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě.

Tato norma rozděluje dodávky elektrické energie s nízkým a vysokým napětím a charakterizuje napětí dodávané elektrické energie dvěma kategoriemi: [23]

1. Spojité jevy – jako odchylky od jmenovitých hodnot v závislosti na časovém průběhu a do těchto jevů je možné zařadit např.:
 - Jmenovité napětí U_n - pro veřejnou síť nízkého napětí je $U_n=230/400$ V. Za normálních podmínek je nutné, aby během každého týdne 95 % naměřených hodnot napájecího napětí v intervalech 10 minut bylo v rozsahu $U_n \pm 10$ %.
 - Kmitočet sítě – jmenovitý kmitočet napájecího napětí je 50 Hz. Za normálních podmínek musí být střední hodnota kmitočtu měřena v intervalu 10 s, $50 \text{ Hz} \pm 1$ % během 99,5 roku.
 - Harmonická napětí – celkový činitel harmonického zkreslení THD musí být menší nebo roven 8 %.
 - A další jako: rychlé změny napětí, nesymetrie napájecího napětí.
2. Napěťové události – jedná se o náhlé a závažné odchylky od normálního nebo požadovaného tvaru vlny, do kterých patří:
 - Přerušování napájecího napětí, poklesy/dočasné zvýšení napájecího napětí.

K této normě je však nutné poznamenat, že je primárně určena pro potřeby určení kvality elektrické energie ve vztahu dodavatel a odběratel, tedy na odběrném místě. Informace od distributora elektrické energie, že kvalita sítě na tomto odběrném místě je vyhovující, však nemá téměř žádnou informaci o kvalitě sítě, která je v samotném podniku. Norma se také například vůbec nezabývá proudovými charakteristikami, které protékají sítí.

V dnešní době je ve velké většině podniků zaveden systém monitorování energie, který však sleduje pouze spotřebu energií, tedy hodnocení v závislosti na finančních nákladech. Tyto systémy však nejsou vybaveny technickými funkcemi pro sledování kvality elektřiny. [24]

Ke sledování kvality elektřiny je tedy nedostatečné opírat se jen o samotnou normu ČSN EN 50160. K tomu, aby bylo možné posoudit požadované parametry, které nám mohou reflektovat kvalitu elektřiny, je nutné použít i normu ČSN EN 61000-4-30: Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-30: Zkušební a měřicí technika – Metody měření kvality energie.

9.1 Měření kvality elektrické energie

Kvalita elektrické energie je určena na základě naměřených dat. Metody měření kvality elektrické energie nám definuje mezinárodní norma:

- ČSN EN 61000-4-30: Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-30: Zkušební a měřicí technika – Metody měření kvality energie. [25]

Tato norma definuje metody pro měření a vyhodnocení výsledků pro parametry kvality energie ve střídavých napájecích systémech se základním kmitočtem 50 Hz nebo 60 Hz.

Norma mimo uvádí rozdělení měřících zařízení do měřících tříd A, S, B s tím, že každá třída má specifické použití a různé druhy vyhodnocení. Například třída A se používá při potřebě přesného měření pro aplikaci při přezkoumání smluvních vztahů a ověřování shody s normami.

Přístroje pro měření kvality elektrické energie (analyzátoři) by měly být nejlépe třídy A. Měly by být schopné měřit vždy velikost napájecího napětí a jeho odchylku, kmitočet sítě a k tomu další parametry jako: [25]

1. elektrické veličiny – napětí, proud, výkon: činný, zdánlivý – které nejsou považovány za parametry kvality sítě,
2. poklesy a zvýšení napětí,
3. harmonické napětí, harmonický proud,
4. nesymetrie napětí,
5. přechodné napětí,
6. flicker,
7. meziharmonická napětí a proudy.

Shrnutí poznatků:

V předchozích kapitolách byly rozebrány dvě hlavní normy, které se věnují problematice sledování kvality elektřiny. Je dobré shrnout poznatky z těchto norem pro lepší přehled o dané problematice.

Norma ČSN EN 50160 se zabývá problematikou kvality pouze v případě, že podnik ověřuje kvalitu elektřiny, která přichází od distributora tedy na odběrné místo (nejčastěji transformátor) v blízkosti podniku.

Následně z tohoto odběrného místa je dále elektřina vedena do rozváděcích skříní, zde však může dojít k změnám elektrických veličin. Z rozváděcích skříní je elektřina vedena do koncových zařízení. Tato elektřina, ale může mít už výrazně jiné parametry než na odběrném místě. Je tedy nutné sledovat kvalitu elektřiny nejen na odběrném místě, ale i rozváděcích skříní a nejlépe na koncových zařízeních a poté tyto parametry porovnat.

Pro měření jak v odběrném místě a rozváděcích skříních slouží pro sledování kvality elektřiny velké množství analyzátorů nebo celých systémů a pomocných programů. K tomu, aby bylo možné sledovat vliv elektřiny na strojních zařízeních, je tedy nejen nutné vyhodnocovat dané parametry dle normy ČSN EN 50160, ale také průběžně měřit tyto parametry dle ČSN EN 61000-4-30, metodikou perioda po periodě. Ta poskytuje jasnou představu o velikosti měřených veličin. Současně se musí provádět trvalý záznam všech napětí a proudů pro možnost následné analýzy dle potřeby. Ze zaznamenaných údajů o proudech a napětí je možné zpětně určit jakýkoliv potřebný parametr. [24]

9.2 Vliv elektrických veličin na elektromotory

V předchozí kapitole byly popsány některé parametry kvality elektrické energie, která nám přichází do podniku. Jak tedy mohou tyto parametry v konečném důsledku ovlivňovat elektromotory a jaký vliv mají na jejich chod. Je zde uvedeno několik základních parametrů a jejich vliv. Všechny tyto stručné charakteristiky byly načerpány z elektronického periodika – časopisu Elektro [26, 27, 28, 29].

- **Systémové veličiny frekvence a napětí** – jak bylo již v dřívějších kapitolách shrnuto, z konstrukce trojfázového asynchronního motoru víme, že otáčky statoru resp. rotoru a tím i výkonu jsou závislé na kmitočtu napájecí sítě, tedy frekvenci. Moment asynchronních motorů je kromě parametrů motorů závislý i na druhé mocnině napájecího napětí. Pokud tedy bude do elektromotoru přiváděno větší napětí, než je povolené bude docházet ke stárnutí izolace, vyšším ztrátám a může se zvýšit četnost poruch. Pokud hodnota napětí bude nižší, dojde k výraznému poklesu výkonu.
- **Nesymetrie napětí a proudu** – vinutím jednotlivých fází protéká rozdílný proud, tím se rozdílně oteplují a jsou i následně dlouhodobě tepelně namáhány, rychleji stárne izolace, dříve může nastat průraz. Vlivem nesymetrie magnetického pole při otáčení trpí i ložiska motoru, která jsou namáhány vyššími vibracemi. U motorů, které mají měnič, je zvýšena i nesymetrie proudu. Důležité je tedy sledovat sdružená napětí mezi jednotlivými fázemi a zjistit největší odchylku, ale i proudy v jednotlivých fázích a porovnat vůči provozní hodnotě.
- **Poklesy a zvýšení napětí** – je definováno jako dlouhodobější pokles či zvýšení. Jak již bylo zmíněno výše, dojde ke změně velikosti napětí a jeho následkům. Z pohledu vlivu na provoz elektromotoru nejsou důležité jednorázové pomalejší změny napětí v krátkých intervalech až do několika sekund pokud nejsou větší než 10 %. Větší vliv na stabilitu a životnost mají rychlé změny napětí v řádech několika milisekund, které se pravidelně opakují a to jsou impulzy. Impulzy – změna napětí s vysokou rychlostí, jsou velmi nebezpečné jak pro izolaci motorů, tak pro vinutí motorů nebo další elektroniku. Dlouhou dobu se opakující ostré špičky postupně degradují izolaci vinutí motorů a zvyšují nebezpečí jejího průrazu. Současně jsou zdrojem takzvaných harmonických složek napětí a proudu.
- **Harmonické napětí a proudy** – jako v případě vibrací se jedná o násobky síťové frekvence. Jedná se o úbytek napětí přes impedanci. Impedance popisuje odpor (úbytky) součástky a fázový posuv napětí proti proudu při průchodu harmonického střídavého elektrického proudu dané frekvence. Tyto úbytky harmonických napětí vedou k deformaci časového průběhu napětí ze sinusového průběhu. Parametr, který charakterizuje tento rozdíl je harmonické zkreslení proudu a napětí THD. Tyto harmonické složky mohou napomáhat brzdění motoru, mechanickým vibracím, hluku a opotřebením ložisek motoru. Samozřejmě dochází i k přídatným ztrátám ve vinutí (i železe) motoru, a tím i k jeho oteplení. Vlivem harmonických napětí dochází i ke snížení stejnosměrného napětí meziobvodu a tím k narušení správné funkce spínacích obvodů měniče i vyššímu zahřívání filtračních kondenzátorů meziobvodu.

Z této stručné charakteristiky některých vlivů elektrických veličin na elektromotory a předchozích informací o měření kvality elektrické energie můžeme usoudit, že nejdůležitějšími parametry pro sledování a vyhodnocení budou proudové odběry, všechny druhy výkonů, harmonické zkreslení napětí a proudů, napěťové charakteristiky a frekvence.

10 DIAGNOSTIKA ZÁVAD ELEKTROMOTORŮ

Jak již bylo zmíněno v kapitole 6, diagnostika závad elektromotorů je založena na sledování změn parametrů a jejich vyhodnocení v závislosti na bezporuchovém stavu. Diagnostika závad elektromotorů je komplexní disciplína, která ve většině případů musí použít hned několik sledovaných parametrů – multiparametrická diagnostika ke zjištění stavu. Z hlediska konstrukce asynchronních motorů je možné závady rozdělit do dvou hlavních kategorií a to:

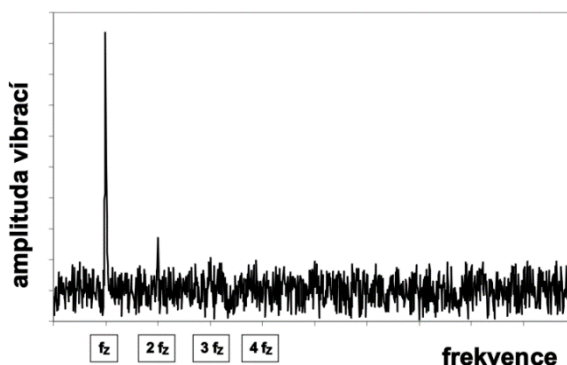
- **Mechanické závady**, do kterých lze zařadit poruchy typu nevyváženosti a ložiskové závady.
- **Elektrické závady**, které se týkají hlavních dvou částí, statoru a rotoru.

V této kapitole budou popsány jen některé závady, které se mohou vyskytovat při vyhodnocení stavu elektromotorů. Protože se v této práci věnují především sledování parametrů vibrací, teploty a hodnocení parametrů elektrických veličin, je vhodné nejprve objasnit několik základních pojmů, které budou v této kapitole použity. [30]

- **Frekvenční spektrum** – bylo vysvětleno v kapitole 7.8.
- **Proudové/napěťové spektrum** – závislost velikosti amplitudy na frekvenci.
- **Základní budící, otáčková frekvence** – je funkcí frekvence hřídele, která se otáčí konstantní frekvencí, nachází se v nízkofrekvenční oblasti spektra. Obvykle se označuje jako $1x$.
- **Harmonické frekvence** – jedná se o celočíselné násobky otáčkové frekvence např. $2x$.
- **Subharmonické/interharmonické frekvence** – celočíselný podíl otáčkové frekvence, neceločíselný násobek/podíl otáčkové frekvence, vyznačuje pokročilé stadium poškození.
- **Frekvence na postranních pásmech** – zobrazuje se kolem otáčkové frekvence nebo harmonických frekvencí, jsou od těchto frekvencí vzdáleny o konstantní vzdálenost na obě strany.
- **Chybové frekvence části asynchronních motorů, připojených komponent** – objevuje se na vypočtené chybové frekvenci určitého komponentu např. ložiska.

Z tohoto přehledu lze vidět, že ve frekvenčním/proudovém/napěťovém spektru se může objevovat hned několik zásadních frekvencí, které mají vliv na vyhodnocení stavu. Velké množství z nich má významný vztah k základní budící frekvenci. Všechny zmíněné frekvence pokud se vyskytují ve frekvenčním spektru, mohou znamenat a často i znamenají, že se strojem není vše v pořádku. V další části této kapitoly je uveden zjednodušený popis některých poruch s jejich možným projevem ve spektrech. [6, 12, 30]

- **Nevyváženost rotoru** – jedná se o mechanickou závadu a jednu z nejběžnějších závad u elektromotorů. V praxi není možné dosáhnout přesně toho, aby těžiště bylo totožné s osou rotace a osa rotace se shodovala s hlavní osou setrvačnosti. Zjednodušeně lze tedy říct, že se jedná o nerovnoměrné rozložení hmoty rotujících dílů v ose rotace. Dle rozložení hmoty je možné nevyváženost rozdělit na statickou, momentovou a dynamickou. V praxi se je možné nejčastěji setkat s dynamickou



Obrázek 19: Příklad nevyváženosti ve frekvenčním spektru [30].

nevyvážeností, která zahrnuje jak statickou tak momentovou. Ve spektru se nejčastěji vyskytuje amplituda otáčkové frekvence rotoru jak v axiálním tak radiálním směru (obrázek 19). Velká nevyváženost se může vyskytnout s dvojnásobnou otáčkovou frekvencí, tedy druhou harmonickou. V důsledku nevyváženosti dochází k opotřebením ložisek, které se opět může zobrazit ve frekvenčním spektru. Dynamickou nevyváženost lze snížit vyvážením minimálně ve dvou rovinách.

- **Opotřebením valivého ložiska** – závady valivých ložisek tvoří převážnou část poruch asynchronních motorů. Tyto poruchy jsou způsobeny hlavně nesprávným mazáním, nečistotami v mazivu, větším zatížením popř. nesprávným zacházením při montáži nebo vlivem opotřebením. Nejčastější příčinou je smykové napětí, které se objevuje pod zatíženými elementy ložiska. To způsobuje časem trhliny. K odhalení slouží již dříve zmiňovaná obálková metoda, která zobrazuje chybové frekvence elementů ložisek.
- **Ohnutý hřídel** – tato chyba se nejčastěji objevuje u hřídelů s velkým poměrem délky vůči průměru. Dalšími příčinami prohnutí mohou být např. nesprávná manipulace během transportu, důsledek velkého tepelného zatížení, popř. vlastní váha. Při měření celkových vibrací a spektrální analýze se ohnutý hřídel projevuje stejně jako nesouosost. Změna na 1x frekvenci je nejobvyklejší. K odhalení této poruchy je nutno provádět spektrální analýzu a měření fáze.
- **Nesouosost rotorů** – Nesouosost rotorů je možné zaznamenat, pokud jsou spolu axiálně spojeny a nemají stejnou přímou osu rotace. Je možné rozeznat paralelní a úhlovou nesouosost. Nastává v důsledku geometrických nepřesností spojky. Charakteristická frekvence vibrací se ukazuje na 1x, 2x nebo vyšší harmonické frekvence.
- **Uvolnění komponent rotoru** - se projevuje často jako dlouhý sled neobvykle vysokých amplitud vyšších harmonických složek 2x, 3x, 4x, subharmonických 1/2, 2/3x a interharmonických složek 1,5x, 2,5x. Velikost těchto amplitud je vyšší než 20 % hodnoty základní otáčkové frekvence.

Všechny závady, které byly uvedeny výše, jsou mechanické závady, které se projevují na výsledné vibrační charakteristice. Mezi další příčiny lze zařadit i teplotní asymetrii, rezonance atd. V druhé části této kapitoly jsou uvedeny některé z elektrických závad, u kterých se často musí provést i proudová/napěťová analýza popř. měření fáze. [12]

- **Statická a dynamická excentricita rotoru** – vzduchová mezera mezi rotorem a státorem není konstantní. Toto může být zapříčiněno např. excentricitou rotoru, vlivem nelinearity magnetické křivky nebo oválností rotoru a statoru, která je zapříčiněna špatně vyrobenou rotující součástí. Objevuje se například na 2x síťové frekvenci.
- **Prasklé, uvolněné rotorové tyče** – z konstrukce asynchronního motoru je známo, že rotorové vinutí je trvale spojeno nakrátko, vinutí je složeno z tyčí uložených v drážkách a spojené na obou stranách – klecové vinutí. Každá z rotorové fáze je tvořena jednou tyčí. V tyčích se indukují napětí, které vyvolává proudy v kleci, které vytváří symetrický vícefázový systém. Každá tyč nebo část kruhu mohou mít různou velikost elektrických odporů. Může dojít i k přerušení těchto komponent a to způsobí zhoršení vlastností motorů. Největší problém vzniká vlivem zvýšení teploty ostatní části vinutí. Tato nesymetrie se projevují deformací magnetického pole ve vzduchové mezeře. Vyskytuje se například 1x postranními pásmy.

11 PRAKTICKÁ ČÁST

Teoretická část práce se věnovala problematice měření vibrací, teploty a zjišťování kvality elektrické energie. Byly popsány stručně jak parametry vibrací, teploty a kvality elektrické energie mají vliv na provoz trojfázových asynchronních motorů a proč mají být tyto parametry sledovány.

V druhé praktické části diplomové práce se budu zabývat návrhem monitorování stavu asynchronních motorů, zjištění důležitých parametrů, doporučené a povolené hodnoty vibrací, teploty a kvality elektrické energie a následnému vyhodnocení.

Praktická část je rozdělena do několika hlavní částí:

- **Kapitola 11.1 Diagnostický systém** – představuje a popisuje diagnostický systém, který se skládá z:
 - diagnostických objektů – sledovaných motorů,
 - senzorů, měřicího systému, vyhodnocovacích jednotek a programů,
 - fyzické instalace snímačů a systému na měření elektrických veličin.
- **Kapitola 11.2 Analýza parametrů vibrací a teploty** – tato kapitola pojednává o nastavení senzorů vibrací a teploty v programu Efactor Octavis a následného vyhodnocení těchto parametrů.
- **Kapitola 11.3 Analýza kvality elektrické energie** – v této kapitole budou uvedeny parametry kvality elektrické energie a elektrické veličiny, které budou sledovány a jejich následné vyhodnocení.
- **Kapitola 11.4 Návrh vizualizace** – prochází návrh a vytvoření designu vizualizace sledovaných parametrů.
- **Kapitola 11.5 Doporučení** – navrhuje další kroky a doporučení pro zlepšení diagnostického systému a návrhu vizualizace.

Před samotným návrhem diagnostického systému je třeba zmínit, že na motorech prozatím neprobíhala žádná měření ani diagnostika jejich stavu. Motory jsou pouze zahrnuty do plánu preventivní údržby a probíhá na nich pravidelná vizuální kontrola s případným čištěním povrchu motorů. Velká generální údržba probíhá pouze jednou ročně, kdy celé zařízení není provozu. Proto jsou jen velmi omezené možnosti vzhledem k možnému odpojení motorů a přeměření např. izolačního odporu apod.

11.1 Diagnostický systém

V této kapitole budou představeny objekty diagnostiky a diagnostické prostředky, které budou použity při monitorování stavu trojfázových asynchronních motorů.

11.1.1 Diagnostické objekty

Objekty diagnostiky jsou ty, na kterých probíhá monitorování a vyhodnocování stavu. Ve firmě Bosch Diesel s.r.o - Jihlava bylo vybráno sedm motorů, které slouží k pohonu kalícího zařízení. Ve všech případech se jedná o trojfázové asynchronní motory, které přímo souvisí s provozem kalícího zařízení a je proto vhodné tyto motory sledovat a průběžně hodnotit jejich technický stav. Pro každý motor byl vytvořen stručný přehled vlastností, které jsou důležité, a které je dobré znát pro monitorování jejich stavu.

Motor 1,2 - Motory pro míchání solné lázně

První dva sledované motory slouží k neustálému míchání solné lázně. Pokud by došlo k jejich poruše, solná lázeň by časem ztuhla a sůl by nebylo možné opět rozmíchat. To by vedlo k výměně celé zabudované nádrže, které by bylo finančně velmi nákladné. Nádrž na solnou lázeň o velikosti zhruba 4x2 m je zabudována do země uprostřed kalického zařízení. Motory jsou umístěny nad zabudovanou nádrží (obrázek 20). Z motorů jsou vyvedeny hřídele, které jsou opatřeny lopatkami míchajícími solnou lázeň. Motory jsou v provozu nepřetržitě, jsou vybaveny měničem a jejich otáčky jsou regulovány dle technologického programu. Jak bylo uvedeno, motory jsou situovány uprostřed kalického zařízení v blízkosti hlavní pece, která dosahuje teploty až 950 °C a míchají solnou lázeň, která má sama okolo 250 °C. Proto je u tohoto motoru velmi důležité sledovat teplotu, která má velký vliv na izolační systém.

Výkon: 7,5 kW Napětí: Δ 400 V
 Otáčky: 950 ot/min Proud: 19,2 A
 Ložiska: 6211 ZR C3 Účinník: 0,7
 Výrobce: Emod
 Typ: WKNV132L/6-220



Obrázek 20: Motor pro míchání solné lázně.

Motor 3,4 – Motory pro přívod vzduchu

Motor číslo 3 (obrázek 21) je situován opět ve středu kalického zařízení, ale nad motory 1 a 2. Tento motor slouží pro pohon ventilátoru, který vhání studený vzduch do solné lázně. Slouží tedy ke chlazení celé solné lázně. V této oblasti kalického zařízení je daleko nižší okolní teplota než u motorů 1 a 2. Motor je v provozu nepřetržitě.

Výkon: 11 kW Napětí: Δ 400 V
 Otáčky: 2955 ot/min Proud: 20,50 A
 Ložiska: 6209 2Z C3 Účinník: Max 0,87
 Výrobce: Siemens
 Typ: 1LE1001-1DA23-4AB4



Obrázek 21: Motor pro přívod studeného vzduchu do solné lázně.

Motor číslo 4 (obrázek 22), je v těsné blízkosti motoru 3 a slouží opět pro pohon ventilátoru, který však přivádí vzduch k hořákům v peci. Motor je v provozu nepřetržitě.

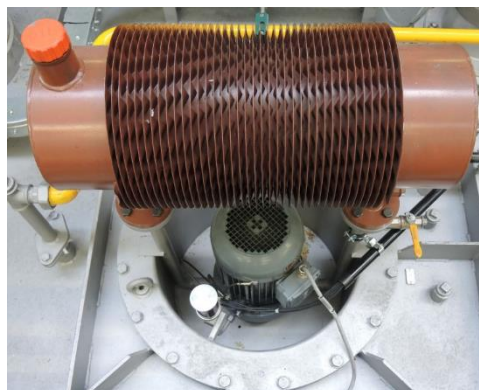
Výkon: 7,5 kW Napětí: Δ 400 V
 Otáčky: 2950 ot/min Proud: 14,1 A
 Ložiska: 6208 2Z C3 Účinník: Max 0,87
 Výrobce: Siemens
 Typ: 1LE1001-1CA13-4AB4



Obrázek 22: Motor pro přívod vzduchu hořákům v peci.

Motor 5, 6 - Motory pro míchání atmosféry v hlavní peci

Motory 5, 6 (obrázek 23) jsou umístěny nad hlavní pecí, kde probíhá ohřev a austenitizace. Tyto motory zajišťují míchání atmosféry v hlavní peci, aby v celé komoře byla stejná teplota. Uvnitř komory jsou ventilátory, do kterých tyto motory vhání vzduch a tím dochází k cirkulaci vzduchu. Pokud by tato podmínka nebyla splněna, mohlo by dojít v některých místech vsázek k nerovnoměrnému prohřátí a tím ke špatným vlastnostem daného dílce. Jak již bylo zmíněno, v hlavní peci je okolo 950 °C. Proto jsou motory, vybaveny olejovými chladiči, které kompenzují zvýšenou teplotu motoru. Motory běží nepřetržitě.



Obrázek 23: Motor pro míchání atmosféry v hlavní peci.

Výkon: 2,2 kW Napětí: Δ400 V
Otáčky: 950 ot/min Proud: 5,25 A
Ložiska: 6211 C3 Účinnost: 0,74
Výrobce: Emod
Typ: HEFIE2 112M/6

Motor 7 – Motor pro míchání atmosféry v předehřívací peci

Motor 7 (obrázek 24) je umístěn na začátku kalícího zařízení. Je namontován nad předehřívací pecí. Slouží k míchání atmosféry v předehřívací peci. Slouží opět jako motory 5, 6 k tomu, aby byla v celé komoře stejná teplota. Pokud by teplota nebyla stejná, došlo by v některých místech vsázek k nerovnoměrnému prohřátí a tím k špatným vlastnostem daného dílce. Motor běží nepřetržitě.



Obrázek 24: Motor pro míchání atmosféry.

Výkon: 7,5 kW Napětí: Δ400 V
Otáčky: 1465 ot/min Proud: 15,2 A
Ložiska: 6211 C3 Účinnost: 0,8
Výrobce: Emod
Typ: HEFIE2 132L/4-230T

Všechny sledované motory mají doporučenou teplotu okolí do 40 °C, napětí 50 Hz a třídu izolace F. Tímto byly představeny objekty diagnostiky a jejich přehled je vidět v tabulce 4.

Tabulka 4: Přehled monitorovaných motorů.

| Číslo motoru | Popis motoru | Typ |
|--------------|---|--------------------|
| M1 | Motor pro míchání solné lázně | WKNV132L/6-220 |
| M2 | Motor pro míchání solné lázně | WKNV132L/6-220 |
| M3 | Motor pro přívod studeného vzduchu do solné lázně | 1LE1001-1DA23-4AB4 |
| M4 | Motor pro přívod vzduchu k hořákům v peci | 1LE1001-1CA13-4AB4 |
| M5 | Motor pro míchání atmosféry v hlavní peci | HEFIE2 112M/6 |
| M6 | Motor pro míchání atmosféry v hlavní peci | HEFIE2 112M/6 |
| M7 | Motor pro míchání atmosféry v předehřívací peci | HEFIE2 132L/4-230T |

11.1.2 Diagnostické prostředky

Do diagnostických prostředků jsou zahrnuta všechna zařízení, postupy, metody, programy, které jsou nutné pro analýzu a vyhodnocení technického stavu našich objektů – motorů. V tomto případě se jedná především o senzory, řídicí jednotky a software pro vyhodnocení. Monitorování těchto zařízení se zaměřuje na diagnostiku pomocí vibrací, teploty a měření elektrických veličin, které nám mohou ukázat kvalitu elektrické energie.

Senzor vibrací VSA005

Pro měření vibrací byl vybrán vibrační senzor VSA005 od firmy IFM (obrázek 25). Senzor byl vybrán na základě zkušenosti firmy z předchozích projektů, kde byly tyto senzory použity. Jedná se o akcelerometr, který se připojuje na externí diagnostickou vyhodnocovací jednotku VSE. Senzor splňuje normy EN 61000-6-2/3 a EN 50178 o elektromagnetické kompatibilitě. [31]

| | |
|--------------------|----------------------------|
| Měřicí princip: | kapacitní |
| Měřicí rozsah: | ± 25 g |
| Frekvenční rozsah: | 0 – 10 000 Hz |
| Linearita: | 0,2 % |
| Citlivost: | 0,2 mg/ $\sqrt{\text{Hz}}$ |



Obrázek 25: Vibrační senzor VSE005 [31].

Vyhodnocovací jednotka pro vibrační senzory VSE100

K tomu, aby bylo možné naměřená data ze senzoru vibrací VSA005 vyhodnotit, je nutné mít vyhodnocovací jednotku VSE100 (obrázek 26). K zaručení kompatibility je tato jednotka také od firmy IFM. Na jednotku je možné připojit několik vibračních senzorů a jednotka tyto údaje zaznamenává a dále je umožní zpracovat. Vyhodnocovací jednotka má interní paměť, která umožňuje ukládat data v reálném čase, je však nutné zvolit vhodný interval záznamu. Jednotka má několik vstupů a výstupů, které je možné kombinovat. V našem případě je nejdůležitější možnost datového rozhraní. To umožňuje jednotku připojit do datové firemní sítě a získaná data hodnotit pomocí vhodného programu. [32]



Obrázek 26: Jednotka VSE100 [32].

Teplotní senzor TS2229 a převodník

Pro snímání teploty byl vybrán teplotní senzor TS2229 (obrázek 27) také od firmy IFM. Jedná se o kontaktní senzor pro pevná tělesa. Měřicí element splňuje normu DIN EN 60 751, třídy B [33]. Pro další práci a vyhodnocení teploty je nutné mít převodník měřicího signálu pro tento druh teplotního senzoru. Převodník TP3231 (obrázek 28) od firmy IFM, slouží k převodu teploty na některou z elektrických veličin, nejčastěji proud. Měřicí rozsah převodníku je od -50 °C do $+300$ °C [34].

| | |
|------------------------|-----------------------------|
| Měřicí rozsah senzoru: | $-40 \sim 90$ °C |
| Přesnost senzoru: | $\pm 0,3$ K + $0,005$ x t |



Obrázek 27: Teplotní senzor TS2229 [33].



Obrázek 28: Převodník měřicího signálu pro teplotní senzory [34].

Termokamera od firmy FLIR ThermoCAM E45

Termokamery Flir řady Exx, jsou určeny pro diagnostiku výrobních strojů, motorů či elektrických rozvaděčů. Objektiv kamery je s manuálním ostřením. Analýzu snímku během měření usnadňuje mnoho měřících funkcí. V kameře je umístěn fotoaparát, který umožňuje pořízení fotografie vždy termovizním snímek. Teplotní citlivost termokamery je menší než 0,07 °C. Měřící rozsah od 0 °C do 650 °C. [35]



Obrázek 29:
Termokamera
řady Exx [35].

Software Efector Octavis

Pro vyhodnocení parametrů vibrací a teploty byl použit program Efector Octavis, který je spolu se snímači dodáván firmou IFM. Jedná se o software, který slouží k ovládní a nastavení sledovaných parametrů pro vibrodiagnostiku technických objektů systému a vyhodnocení. Podrobnějšímu popisu celého programu a jeho funkcí se budou věnovat další kapitoly.

Měření kvality elektrické energie

K měření parametrů elektrických veličin byl zvolen systém DIRIS Digiware od firmy SOCOMEC. Jedná se o komplexní měřící systém elektrických veličin, který se skládá z několika modulů, senzorů a zobrazovacího zařízení. Tyto moduly jsou nainstalovány ve stávajících rozvaděcích elektrické energie. Na obrázku 30 je možné vidět sestavený systém pro měření, který se skládá ze zobrazovací jednotky Diris Digiware D-50, napět'ového a proudového modulu. Celý systém lze napojit na podnikovou datovou síť, což umožňuje záznam a vyhodnocení naměřených dat z těchto modulů. [36]



Obrázek 30: Moduly systému Diris Digiware [38].

Software Reliance 4

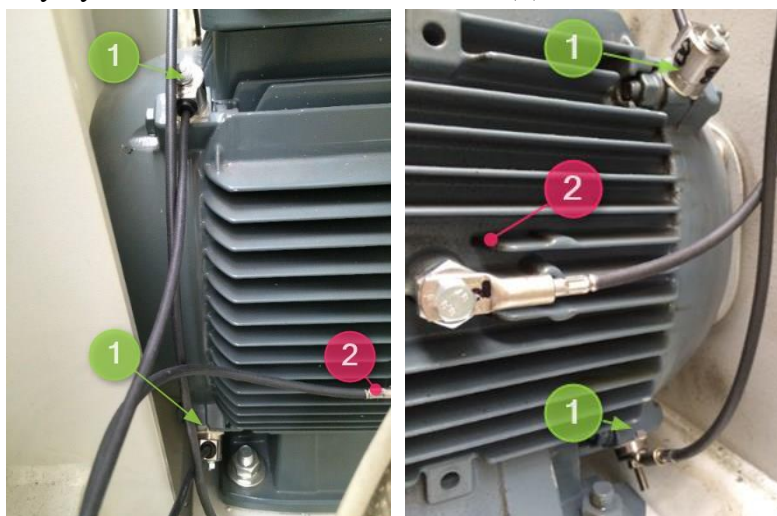
Software Reliance 4 je SCADA/HMI systém určený pro sledování a ovládní průmyslových technologií a aplikací. (SCADA – supervizní řízení a sběr dat, HMI – rozhraní mezi člověkem a strojem). Data jsou získávána z řídicích a vyhodnocovacích jednotek, ukládána do databáze a prezentována v grafické podobě. Program je použit pro propojení řídicích, vyhodnocovacích jednotek s databází, do které se ukládají právě data ze systému SOCOMEC. V posledním kroku je tento program využit pro vytvoření návrhu vizualizace. [37]

11.1.3 Realizace a nastavení

V předchozích dvou kapitolách bylo uvedeno, kolik diagnostických objektů je sledováno a jaké senzory a prostředky pro ně jsou použity. Každý motor je osazen dvěma senzory na sledování vibrací a teploty. K tomu má každý motor v rozváděcí skříni nainstalován systém monitorování elektrických veličin.

Umístění snímačů

Umístění senzorů ukazuje obrázek 31 a 32. Oba snímače vibrací (1) byly umístěny na přední ložiskový štít blíže k přenosu zatížení, a zároveň tak, aby byly splněny požadavky normy na typ a umístění senzorů (ČSN ISO 10 816-1), senzory byly vzájemně pootočený o 90 stupňů. První senzor teploty byl taktéž umístěn na přední ložiskový štít pro sledování teploty u ložisek. Druhý senzor teploty byl umístěn na tělo elektromotoru (2).



Obrázek 31: Umístění senzoru
pohled 1.

Obrázek 32: Umístění senzoru
pohled 2.

Snímače vibrací jsou přimontovány ke speciálnímu přípravku, který je nalepen pomocí keramického lepidla. Tento postup se ve firmě aplikuje již na několika jiných zařízeních, kde jsou takto snímače připevněny. Lepidlo je velmi odolné proti vysokým teplotám a zároveň nesnižuje přesnost měření. [20]

Umístění systému na měření elektrických veličin

Na obrázku 33 je možné vidět systém měření elektrických veličin od firmy SOCOMEC, který byl nainstalován v rozváděcích skříních. Na obrázku je napěťový modul U-30, proudový modul I-35 i zobrazovací jednotku Diris Digiware D-50. Všechny tyto moduly byly instalovány dle návodu výrobce a připojeny na firemní datovou síť.



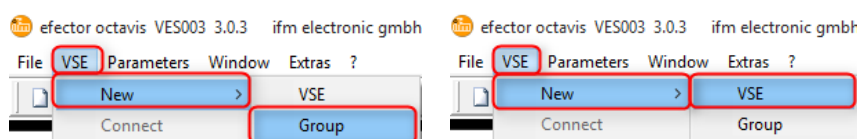
Obrázek 33: Instalovaný systém SOCOMEC v rozváděcí skříni.

11.2 Analýza parametrů vibrací a teploty

Tato kapitola je rozdělena do tří hlavních částí. V první je vytvořena nová skupina (struktura) pro vyhodnocovací jednotky a jsou zde nastaveny sledované parametry pomocí programu Efezor Octavis (EO - zkratka používaná v textu pro tento program). Druhá část popisuje postup práce s programem Efezor Octavis a následně je provedeno vyhodnocení sledovaných parametrů. Ve třetí části jsou uvedeny výsledky analýzy.

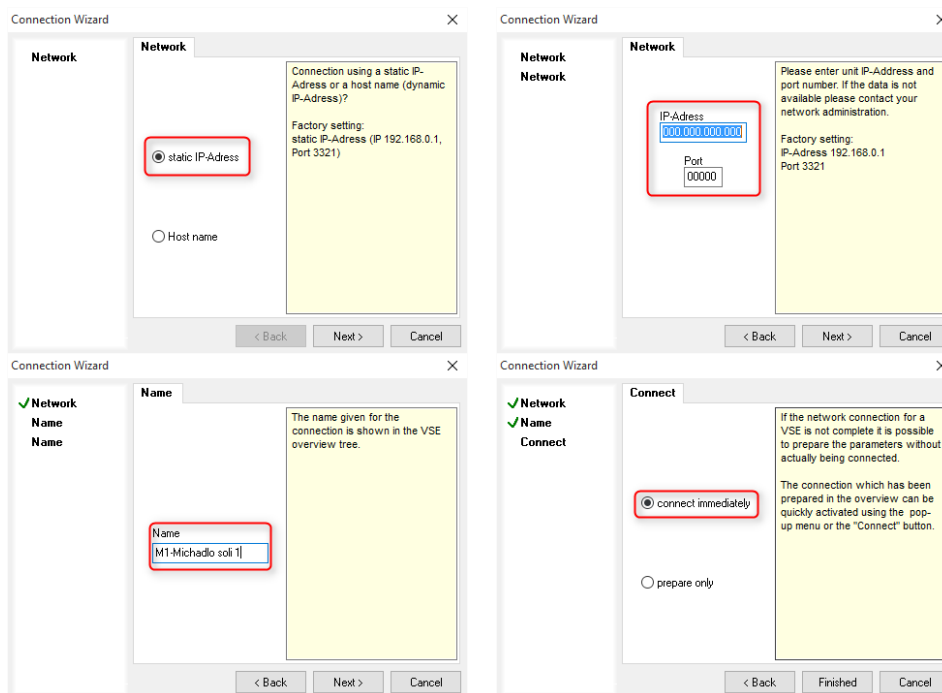
11.2.1 Nastavení parametrů

K tomu, aby senzory vibrací a teploty zobrazovaly měřené hodnoty, je nutné je nejprve propojit s programem EO. V programu EO byla jako první vytvořena skupina, resp. projekt. V našem případě, aby byla jednoznačně rozeznatelná od dalších projektů, byl zvolen název skupiny – Kalírna. Do ní byly postupně připojeny všechny VSE vyhodnocovací jednotky, monitorovaných motorů (obrázek 34).



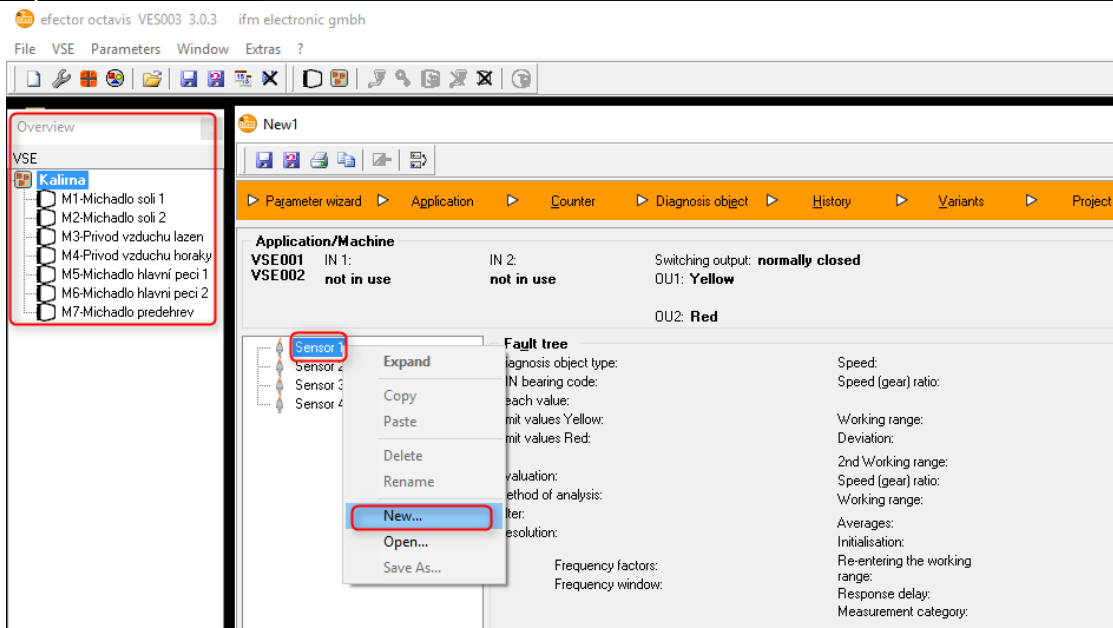
Obrázek 34: Založení nové skupiny a připojení VSE jednotek.

Po zvolení z nabídky pro možnosti připojení nové jednotky program zobrazí několik nabídkových oken, ve kterých uživatele postupně provede připojením nové VSE jednotky. V prvním kroku vyzve k volbě mezi statickou IP nebo dynamickou IP adresou. Všechny naše VSE jednotky mají svojí unikátní statickou IP adresu. Je tedy nutné v dalším kroku tuto adresu zadat. Poté následuje pojmenování jednotky, pod jakým názvem se bude jednotka v naší skupině zobrazovat. Pro jednoduchost a přehlednost byl zvolen název dle čísla motoru a jeho funkce např. M1-Motor pro míchání solí. Program nás následně vyzve pro spojení s danou VSE jednotkou. Celý postup nastavení je uveden na obrázku 35.



Obrázek 35: Nastavení základních parametrů VSE jednotky.

Postup byl aplikován i pro všechny ostatní VSE jednotky, 7 motorů a tedy i 7 VSE (vyhodnocovacích) jednotek. Přehled všech jednotek lze vidět na levé části obrázku 36.



Obrázek 36: Přehled připojených VSE jednotek.

Po připojení všech jednotek je možné začít s nastavením sledovaných parametrů, které jednotky mají zaznamenávat a hodnotit. Začneme tedy prvním senzorem, ve kterém byl vytvořen první parametr (obrázek 36).

Nastavení parametru: efektivní hodnota rychlosti kmitání vibrací (RMS)

Jako první parametr, který byl vytvořen a nastaven, je efektivní hodnota rychlosti kmitání vibrací (zkratka používaná pro tento parametr v textu RMS). Jedná se o jeden z nejdůležitějších parametrů v hodnocení vibrací, protože ukazuje časový průběh, který pomůže odhalit trend vývoje a současně je také měřítkem nebezpečí a škodlivosti mechanického kmitání. Program EO přímo umožňuje nastavení tohoto parametru dle normy ČSN ISO 10816-1. Celý postup nastavení lze najít v příloze 1, Nastavení parametru RMS. Jedním z nejdůležitějších kroků při nastavení tohoto parametru je nastavení jeho limitních hodnot podle požadavků normy ČSN ISO 10816-1. Dle výkonu zařízení zde norma uvádí limitní hodnoty pro typické hranice pásem, které byly již dříve vysvětleny (kapitola 7.7). Všechny motory, které jsou sledovány, mají výkon pod 15 kW (kapitola 11.1.1 Diagnostické objekty), spadají tedy do třídy I.

Limitní hodnoty vibrací byly nastaveny na **1,8 mm/s limit výstrahy (yellow) a 4,5 mm/s limit pro zvážení přerušování provozu nebo okamžitého zásahu (red)**, z tabulky 5. Jednotlivá pásma byla vysvětlena již dříve (kapitola 7.7).

Tabulka 5: Typické hranice pásem [16].

| Efektivní hodnota rychlosti kmitání vibrací [mm/s] pro třídu I. | | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|-----|-----|-----|-----|------|----|----|----|
| 0,28 | 0,45 | 0,71 | 1,12 | 1,8 | 2,8 | 4,5 | 7,1 | 11,2 | 18 | 28 | 45 |
| A | | | B | | C | | D | | | | |

Nastavení parametru: frekvence vad ložisek (Rolling element bearing)

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, sledování ložisek je velmi důležité, protože ložiska stojí za velkou částí poruch elektromotorů. Z konstrukce valivých ložisek je známo, že se skládají z několika elementů. Každý z nich má svoji chybovou frekvenci, kterou lze pomocí obálkové frekvenční analýzy zjistit. Program EO přímo nabízí sledování stavu ložisek – jejich jednotlivých elementů. Program umožňuje opět v několika krocích nastavení tohoto parametru, např. přímo výběr typu ložiska v databázi ložisek, kterou program disponuje. Je nutné nastavit

i další parametry jako jsou otáčky motorů. Celý postup je uveden v příloze 2: Nastavení parametru Rolling element bearing.

Nastavení parametru: nevyváženost (Unbalance)

Dalším sledovaným parametrem je nevyváženost, která je opět velmi častým zdrojem vibrací. Program však umožňuje pouze sledování amplitudy kmitání vibrací na otáčkové frekvenci. Nastavení je prakticky totožné jako u parametru RMS, tak u ložisek. Je nutné jen zvolit jiný typ diagnostického objektu. Dále je nutné nastavit limity. Limity byly vypočteny a určeny ze souboru základního testovacího měření. Z tohoto souboru dat byl vypočtený aritmetický průměr a vypočtena standardní směrodatná odchylka. **Limitní hodnota** výstrahy byla určena jako **aritmetický průměr + dvě směrodatné odchylky**, a **horní limitní** hodnota byla určena jako **aritmetický průměr + tři směrodatné odchylky**. Celý proces nastavení popisuje příloha 3: Nastavení parametru Unbalance.

Nastavení parametru: teplota

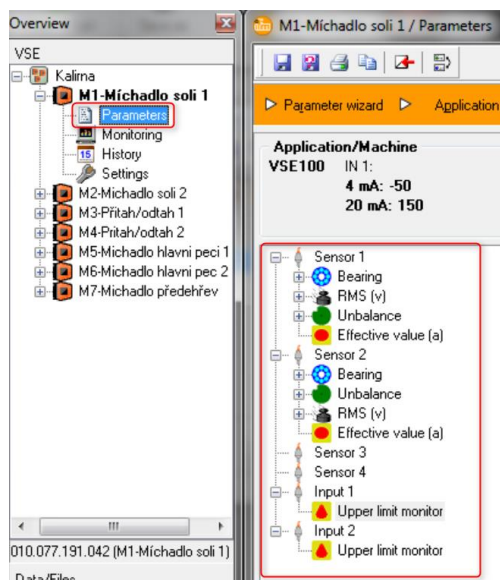
Další parametr, který umožňuje sledovat stav našich objektů je jejich teplota. Každý motor je osazen dvěma snímači teploty. První senzor se nachází na přírubě motoru v oblasti ložisek. Druhý senzor se nachází na těle motoru. K tomu aby bylo možné získat údaje z teplotních senzorů je nutné tyto senzory opět propojit s programem EO. Analogový výstup teplotního převodníku je 4-20 mA. Teplotní senzor je z výroby nastaven na rozmezí -50 °C až 150 °C. Při nastavení parametrů pro vyhodnocení teploty je nutné zvolit v programu EO Měřicí vstupní hodnoty. Na vstup jedna byl připojen tepelný převodník a zvolena vyhodnocující jednotka ve stupních celsia. V dalším kroku byl spárován tepelný převodník s hodnotami ze senzoru, aby byly hodnoty proudu převedeny na stupně celsia. V našem případě tedy minimální hodnoty 4 mA na -50 °C a maximální hodnoty 20 mA na 150 °C.

Limitní hodnoty byly určeny na základě zkušenosti s předchozími projekty ve firmě. **Aritmetický průměr** z testovacích naměřených dat + **10 % z této hodnoty je první limit (yellow)** a dalších **10 % pro horní limit (red)**. Celý postup popisuje příloha 4: Nastavení parametru teploty.

Takto bylo provedeno nastavení všech parametrů, které budou sledovány a následně vyhodnoceny v programu EO. V této fázi byly nastaveny parametry pro senzor jedna, stejný postup byl proveden i pro senzor dva. Pro všechny parametry bylo nutné zvolit také vhodný časový interval pro sbírání dat, aby nedocházelo k zahlcování paměti snímačů, nebo naopak pokud by byly zvoleny dlouhé prodlevy záznamu, nemusíme vůbec odhalit některé trendy. Pro počáteční fázi sledování byl interval záznamu dat zvolen na 5 minut. Senzor při nastavení ukáže, po jakou dobu bude data uchovávaná při zvoleném intervalu záznamu.

Tím bylo ukončeno nastavení a obrázek 37 přehledně zobrazuje všechny nastavené parametry.

Program umožňuje kopírovat nastavené parametry do nastavení ostatních motorů, samozřejmě je nutné upravit některé hodnoty jako je změna otáček nebo jiné typy ložisek pro daný typ motoru zvlášť.



Obrázek 37: Přehled monitorovaných parametrů pro motor 1.

11.2.2 Vyhodnocení parametru vibrací a teploty

Pro analýzu dat byly v programu EO použity záložky Monitoring a History. Pro lepší představu jak bylo provedeno vyhodnocení a následnou lepší orientaci budou tyto dvě záložky blíže vysvětleny.

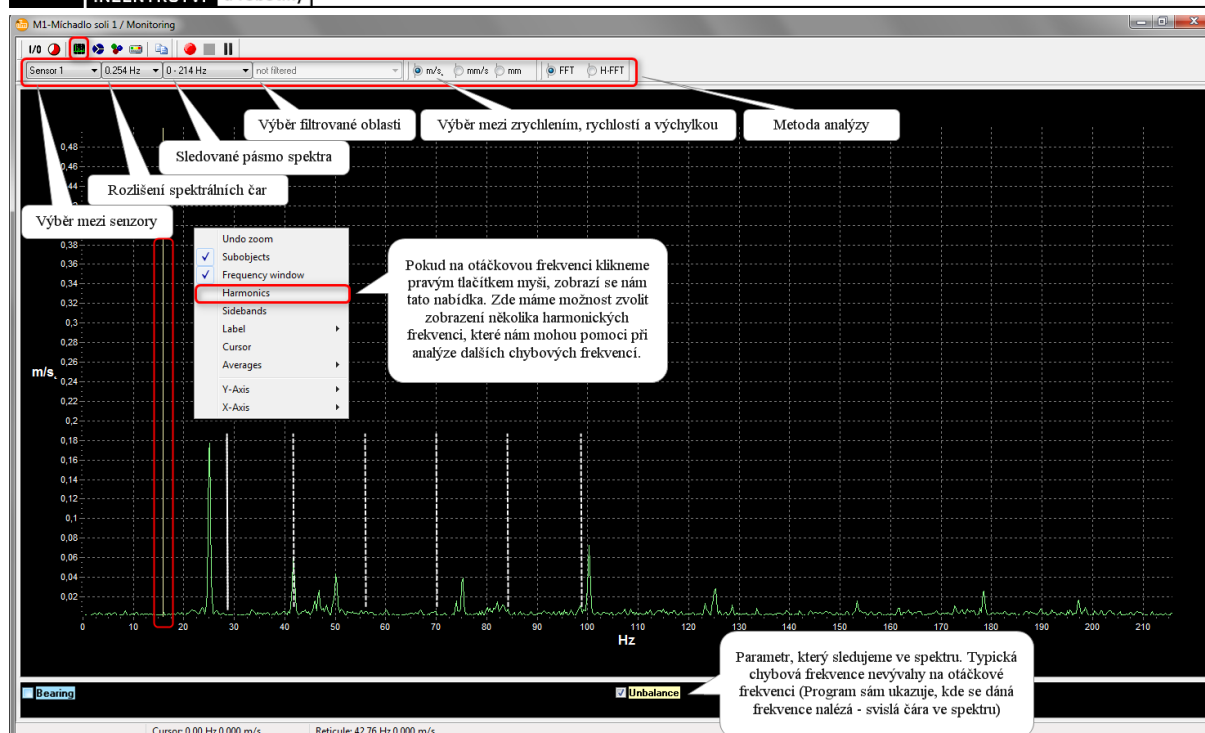
Záložka Monitoring

Obrázek 38 představuje základní rozložení po zvolení záložky Monitoring. Tato záložka slouží pro přehled aktuálního stavu, tedy hodnot v reálných časech. Okno je rozděleno do tří částí. První horní část má několik funkcí, nejdůležitější jsou popsány přímo v obrázku. Prostřední část okna zobrazuje stupeň poškození, a pravá část ukazuje hodnotu vibrací.



Obrázek 38: Záložka Monitoring - okno "Damage Level".

V tomto případě byla jednou z nejdůležitějších funkcí – Výběr spektrálního sledování. EO otevře okno s frekvenční analýzou. Na obrázku 39 jsou popsány všechny důležité funkce v tomto okně. Vybraný případ je pro metodu analýzy FFT, kde v našem případě byla sledována nevyváženost a můžeme nalézt např. i chybové frekvence ložisek (po přepnutí na H-FFT). Nastavení rozlišení spektrálních čar je důležité pro správné vyhodnocení. Pokud je nastavené malé rozlišení, analýza může probíhat velmi dlouho, což je neefektivní. Pokud je nastavené velké rozlišení a například dvě amplitudy jsou blízko sebe, může tento rozdíl splynout v jeden a tím není možné odhalit chybovou frekvenci. Sledované pásmo spektra je nutné zvolit podle toho, jaké typické chybové frekvence mají být odhaleny. V našem případě je snahou odhalit nejběžnější vady jako nevyváženost a špatné komponenty ložisek. Tyto závady se vyskytují v nízké oblasti frekvenčního spektra a jsou většinou násobkem otáčkové frekvence (ne pro špatné komponenty ložisek). Otáčková frekvence je známá, a proto je nutné zvážit, kolikanásobek této frekvence je zapotřebí sledovat. V tomto případě je otáčková frekvence 15,83 Hz (výpočet otáčkových frekvencí motorů v kapitole 7.8). Je tedy uvažováno maximální sledované pásmo v hodnotě desetinásobku této hodnoty [39]. Proti obrázku tedy lze ještě zvýšit rozlišení spektrálních čar na 0,191 Hz a sledované pásmo se nám sníží na 0-160 Hz. V programu EO je možné zobrazení např. i harmonických frekvencí (násobků) základní otáčkové frekvence (bílé přerušované čáry v obrázku 39).

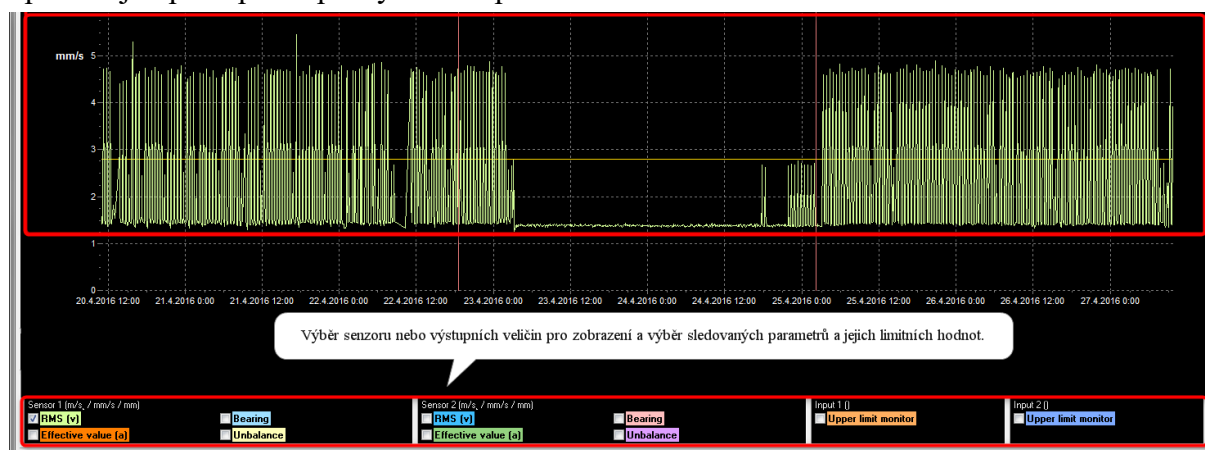


Obrázek 39: Spektrální analýza v programu Efactor Octavis.

Po přepnutí metody analýzy z FFT na H-FFT, se změní sledovací parametr nevyváženost na chybové frekvence ložisek – tedy sledování parametrů ložiska. Program EO vypočte po zadání údajů o ložiscích chybové frekvence (kromě závady klece ložiska). Ty se zobrazí, jako v případě na obrázku, svislou čarou červeně zvýrazněnou čarou, která znamená chybovou frekvenci daného ložiskového elementu, pokud se v její blízkosti nachází vyšší amplituda vibrací.

Záložka History

Záložka Monitoring ukazuje aktuální hodnoty sledovaných parametrů, pokud však je nutné zjistit vývoj trendu v závislosti na čase, musí se použít záložka History. Lze ji rozdělit do dvou hlavních částí (obrázek 40). Spodní část slouží pro výběr senzorů, sledovaných parametrů a jejich limitních hodnot. V prostřední části je vidět sledovaný parametr a jeho limity v závislosti na časové ose. Takto přehledně lze zhodnotit, jaký má zvolený parametr trend vývoje. V případě potřeby je možné snížit nebo zvýšit interval záznamu dat nebo navrhnout další opatření jak postupovat při výrazném překročení limitů.



Obrázek 40: Záložka History v programu Efactor Octavis.

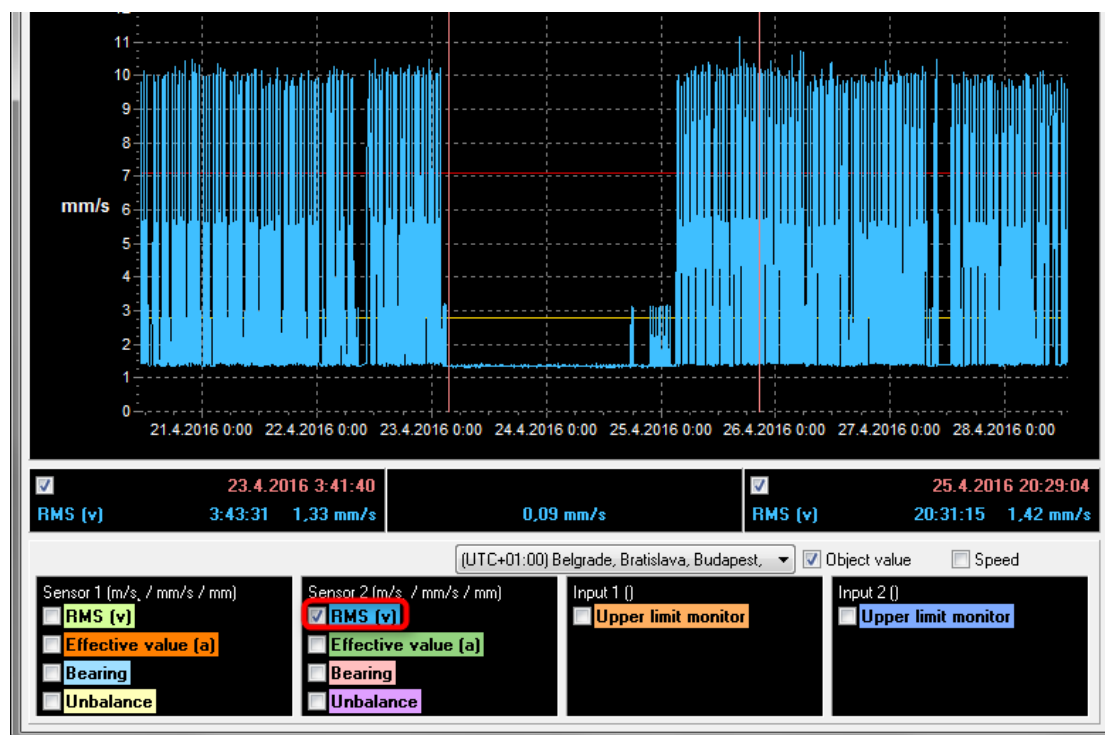
Takto bylo krátce popsáno ovládání programu EO a funkce, které jsou důležité, a které byly použity pro vyhodnocení stavu sledovaných motorů.

Pokud bylo uvedeno, jak naměřená data zobrazit a jak s nimi nakládat, je nutné také určit systém vyhodnocení, který bude nejefektivnější a nejpřesnější. Důsledné sledování všech motorů a všech parametrů je velmi časově náročné. Proto je nutné vytvořit systém, který bude jednoduchý, ale zároveň bude mít vysokou vypovídací schopnost a tedy i hodnotu. Pro zhodnocení všech parametrů popsaných dále v této kapitole je uveden zjednodušený systém vyhodnocení na základě několika tisíc naměřených hodnot z časového období od 20. 4. – 20. 5. 2016. Pro celkové vyhodnocení bylo samozřejmě použito i grafické znázornění vývoje trendů, to zde však pro velký obsah materiálů a grafů není uvedeno. Na začátku vyhodnocení je nutné zmínit, že motor 1 a 2 mění své otáčky dle daného výrobního procesu, což má velký vliv jak na vibrační, tak teplotní trendy. To bude podrobněji rozebráno při vyhodnocení u těchto motorů.

Vyhodnocení parametru: efektivní hodnota rychlosti kmitání vibrací (RMS)

Parametr efektivní hodnota rychlosti kmitání vibrací je vyhodnocen dle normy ČSN ISO 10816-1, která určuje limitní hodnoty. Z předchozího popisu programu EO je známo, že jsou dvě možnosti jak tento parametr vyhodnotit a to v reálném čase (záložka Monitoring) a z historie (záložka History). V této práci jsou hodnoceny dva stavy tohoto parametru. První stav je aktuální hodnota k určitému datu a času, a druhý vyplývá z dlouhodobějšího vývoje. RMS aktuální je k datu 20. 5. 2015 v 8:35 hodin. Pro připomenutí z dřívějších kapitol, **limitní hodnoty** byly nastaveny na: **1,8 mm/s (yellow)** a **4,5 mm/s (red)**. Pro historický přehled byl vypočten aritmetický průměr, maximální hodnota za dané časové období a procentuální překročení limitních hodnot.

Motory 1 a 2 - slouží k míchání solné lázně a jsou vybaveny měničem otáček. Je tedy nutné tyto motory vyhodnotit zvlášť a to pouze na základě teoretických úvah o zvyšování velikosti vibrací při zvyšování otáček (obrázek 41). K tomu, aby bylo možné takovému předpokladu dávat větší váhu by bylo nutné hlubší vyhodnocení, které však přesahuje rámec této diplomové práce.



Obrázek 41: Vývoj trendu parametru RMS na motoru 2, senzor 2. *

(* Pozn.: limitní hodnoty v obrázku pouze ilustrativní, před nastavení limitních hodnot z normy.)

V následné analýze byly tyto hodnoty vibrační brány, jako kdyby se jednalo o vibrace při nejvyšších možných otáčkách motoru.

Tabulka 6: Vyhodnocení parametru RMS pro motor 1 a 2.

| | RMS aktuální [mm/s] | RMS – historie [mm/s] | | % překročení limity | |
|------------------|---------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|-------------|
| | | Průměr | Maximální hodnota | > 2,8 (yellow) | > 4,5 (red) |
| Motor 1 * | | | | | |
| Senzor 1 | 1,35 | 2,13 | 5,45 | 30,5 | 5,3 |
| Senzor 2 | 1,4 | 2,75 | 8,16 | 31,7 | 24,4 |
| Motor 2 * | | | | | |
| Senzor 1 | 1,33 | 2,84 | 7,79 | 30,4 | 25,2 |
| Senzor 2 | 1,32 | 3,5 | 11,25 | 30,4 | 25,9 |

Z tabulky 6 je patrné, že průměrné hodnoty jsou vyšší nebo se blíží hodnotě 2,8 mm/s tedy pásma C, které je považováno za neuspokojivé pro dlouhodobý a trvalý provoz. Následně je vidět ze sloupce procentuální překročení limit. Velká část leží dokonce za hranici 4,5 mm/s, kde může dojít až k poškození zařízení.

Přesto, že tyto motory evidentně přesahují limitní hodnoty, nebo se blíží do pásma D, toto vyhodnocení stavu je pomocné hlavně pro vedoucí techniky údržby, který musí rozhodnout, zda tyto stroje pracují spolehlivě a bezpečně i přes zvýšenou hodnotu vibrační na základě zkušeností s daným typem stroje atd.

K tomu, aby celé vyhodnocení bylo správné, je nutné znát rozsahy otáček a ke každé hodnotě otáček mít přiřazené limitní hodnoty vibrační, tedy mít proměnlivé limitní hodnoty pro více stupňů otáček. Této úvaze se bude věnovat dále kapitola 11.5 Doporučení.

Motory 3 a 4 – slouží pro přívod studeného vzduchu do solné lázně a přivádění vzduchu k hořákům v peci. Oba motory pohání ventilátor, který je připojen přímo na výstupní hřídel. Výsledky naměřených hodnot jsou uvedeny v tabulce 7.

Tabulka 7: Vyhodnocení parametru RMS pro motor 3 a 4.

| | RMS aktuální [mm/s] | RMS – historie [mm/s] | | % překročení limity (>2,8 / >4,5) |
|----------------|---------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------------------|
| | | Průměr | Maximální hodnota | |
| Motor 3 | | | | |
| Senzor 1 | 0,86 | 0,88 | 1,02 | 0 |
| Senzor 2 | 0,83 | 0,83 | 0,96 | 0 |
| Motor 4 | | | | |
| Senzor 1 | 0,22 | 0,28 | 0,92 | 0 |
| Senzor 2 | 0,2 | 0,27 | 0,9 | 0 |

Z tabulky 7 pro motor 3 je vidět, že aktuální hodnota vibrační se od průměrné hodnoty téměř neliší. Limitní hodnoty také nebyly překročeny, to značí, že technický stav tohoto motoru na základě parametru rychlosti kmitání vibrační je stabilní a v pořádku.

Prakticky totožná situace je u motoru 4, kde však hodnoty vibrační jsou výrazně nižší, to je pravděpodobně zapříčiněno menším ventilátorem než u předchozího motoru. Avšak maximální hodnoty jsou poměrně vysoké ve srovnání s průměrnými hodnotami. Z časové analýzy bylo zjištěno, že se jedná o velmi výjimečně vyšší amplitudy rychlosti kmitání vibrační, kterým se v tuto chvíli nemusí věnovat zvýšená pozornost.

Motor 5 a 6 – slouží pro míchání atmosféry v hlavní peci. Naměřené hodnoty ukazuje tabulka 8.

Tabulka 8: Vyhodnocení parametru RMS pro motor 5 a 6.

| | RMS aktuální [mm/s] | RMS – historie [mm/s] | | % překročení limity (>2,8 / >4,5) |
|----------------|---------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------------------|
| | | Průměr | Maximální hodnota | |
| Motor 5 | | | | |
| Senzor 1 | 0,2 | 0,24 | 0,48 | 0 |
| Senzor 2 | 0,22 | 0,23 | 0,64 | 0 |
| Motor 6 | | | | |
| Senzor 1 | 0,34 | 0,23 | 0,48 | 0 |
| Senzor 2 | 0,26 | 0,24 | 0,36 | 0 |

U obou těchto motorů, je velmi malá hodnota vibrací (tabulka 8). To je pravděpodobně způsobeno tím, že tyto motory slouží pouze k víření vzduchu (atmosféry) tzn., neslouží jako pohon ventilátoru. Maximální hodnoty byly podrobeny analýze, kde nebyly zjištěny žádné dlouhodobé výkyvy v hodnotách rychlosti kmitání vibrací. Limitní hodnoty ani u jednoho motoru také nebyly překročeny.

Motor 7 – slouží pro míchání atmosféry v předehřívací peci. Naměřené hodnoty uvádí tabulka 9.

Tabulka 9: Vyhodnocení parametru RMS pro motor 7.

| | RMS aktuální [mm/s] | RMS – historie [mm/s] | | % překročení limity (>2,8 / >4,5) |
|----------------|---------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------------------|
| | | Průměr | Maximální hodnota | |
| Motor 7 | | | | |
| Senzor 1 | 0,51 | 0,53 | 0,75 | 0 |
| Senzor 2 | 0,65 | 0,64 | 0,88 | 0 |

Z tabulky 9 je patrné, že parametr rychlosti kmitání vibrací pro motor 7 nepřekračuje zadané limitní hodnoty. Jeho aktuální i průměrná RMS je prakticky totožná, lze tedy tento motor prohlásit za stabilní a jeho technický stav jako dobrý vzhledem k parametru RMS.

Vyhodnocení parametru: nevyváženost (Unbalance)

V předchozí části práce bylo uvedeno, že chybová frekvence nevyváženosti se nejčastěji vyskytuje v oblasti otáčkové frekvence. Pokud jsou známy otáčky posuzovaných motorů, jsou známy i tyto otáčkové frekvence a lze se zaměřit na zkoumání bližšího pásma v oblasti této frekvence. Je nutné definovat limitní hodnoty vibrací, které byly vypočteny z testovacího souboru dat. Limit výstrahy byl zvolen jako aritmetický průměr + 2 směrodatné odchylky (yellow) a limit přerušení (nutného zásahu) jako aritmetický průměr + 3 směrodatné odchylky (red). V hodnocení se objevují procentuální překročení menší než 2 %, to bylo při kontrole vývoje trendu vyhodnoceno jako nepřekročení limitních hodnot.

Tabulka 10: Vyhodnocení parametru: nevyváženost pro motor 1 a 2.

| | Hodnota vibrací [mm/s] | | | | % Překročení limity | |
|----------------|------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------|-----|
| | Průměr | Směrodatná odchylka | Limit výstrahy (yellow) | Limit přerušení (red) | Yellow | Red |
| | | | | | | |
| Motor 1 | | | | | | |
| Senzor 1 | 0,66 | 0,84 | 2,3 | 3,2 | 4.17 | 0 |
| Senzor 2 | 0,77 | 1,02 | 2,8 | 3,8 | >1 | 0 |
| Motor 2 | | | | | | |
| Senzor 1 | 0,84 | 1,07 | 3 | 4 | 4 | 0 |
| Senzor 2 | 0,8 | 1,02 | 2,9 | 3,9 | 3,73 | 0 |

Z tabulky 10 pro motory 1 a 2 je ze směrodatné odchylky patrné, že hodnoty vibrací se mění ve velkém rozmezí. To je způsobeno již zmíněným měněním otáček dle technologického programu. Z testovacího souboru dat nám hodnoty vibrací překračují zatím pouze výstražné limitní hodnoty.

Tabulka 11: Vyhodnocení parametru: nevyváženost pro motor 3 a 4.

| | Hodnota vibrací [mm/s] | | | | | |
|----------------|------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------|-----|
| | Průměr | Směrodatná odchylka | Limit výstrahy (yellow) | Limit přerušení (red) | % Překročení limity | |
| | | | | | Yellow | Red |
| Motor 3 | | | | | | |
| Senzor 1 | 0,54 | 0,002 | 0,544 | 0,547 | 2,84 | >1 |
| Senzor 2 | 0,46 | 0,002 | 0,471 | 0,473 | 2,85 | >1 |
| Motor 4 | | | | | | |
| Senzor 1 | 0,21 | 0,17 | 0,54 | 0,71 | 5,9 | 5,6 |
| Senzor 2 | 0,2 | 0,15 | 0,5 | 0,65 | 6 | 5,7 |

Motor 3, který slouží pro přívod studeného vzduchu do solné lázně, nevykazuje žádné závažné náznaky nevyváženosti, jedná se o minimální překročení limitních hodnot, navíc směrodatná odchylka značí, že naměřené hodnoty vibrací leží ve velmi úzkém pásmu (tabulka 11).

Naopak u motoru 4 můžeme vidět více než 5 % překročení limitních hodnot. Bylo tedy zapotřebí hlubší analýzy, zda tyto hodnoty jsou v nějakém určitém intervalu, nebo se opakují atd. Po této hlubší analýze, kde byly prozkoumány všechny takto vysoké hodnoty vibrací, bylo zjištěno, že se jedná pouze o nahodilé vysoké amplitudy, které nemají žádný trend. Je však nutné tomuto motoru věnovat zvláštní pozornost, a pokud by se situace horšila a procentuální překročení limit by se zvětšovalo, bylo by zapotřebí učinit příslušná opatření dle doporučení technika údržby.

Tabulka 12: Vyhodnocení parametru: nevyváženost pro motor 5 a 6.

| | Hodnota vibrací [mm/s] | | | | | |
|----------------|------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------|------|
| | Průměr | Směrodatná odchylka | Limit výstrahy (yellow) | Limit přerušení (red) | % Překročení limity | |
| | | | | | Yellow | Red |
| Motor 5 | | | | | | |
| Senzor 1 | 0,11 | 0,035 | 0,18 | 0,22 | 9,05 | 0 |
| Senzor 2 | 0,1 | 0,01 | 0,11 | 0,12 | 5,5 | 1,38 |
| Motor 6 | | | | | | |
| Senzor 1 | 0,1 | 0,01 | 0,12 | 0,13 | 4,9 | 1,95 |
| Senzor 2 | 0,1 | 0,02 | 0,14 | 0,16 | 8,06 | >1 |

Z tabulky 12 vidíme, že hodnoty vibrací nepřesahují žádné limitní hodnoty, jsou velmi ustálené, protože motory slouží jen pro víření vzduchu v hlavní peci, kde je dál vzduch rozváděn pomocí ventilátorů.

Tabulka 13: Vyhodnocení parametru: nevyváženost pro motor 7.

| | Hodnota vibrací [mm/s] | | | | | |
|----------------|------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------|-----|
| | Průměr | Směrodatná odchylka | Limit výstrahy (yellow) | Limit přerušení (red) | % Překročení limity | |
| | | | | | Yellow | Red |
| Motor 7 | | | | | | |
| Senzor 1 | 0,47 | 0,055 | 0,6 | 0,65 | 1,6 | >1 |
| Senzor 2 | 0,61 | 0,075 | 0,75 | 0,83 | >1 | 0 |

Tabulka 13 ukazuje, že motor 7 nejvíce příznaky nevyváženosti. Jeho limitní hodnoty nebyly překročeny.

Vyhodnocení parametru: frekvence vad ložisek (Rolling element bearing)

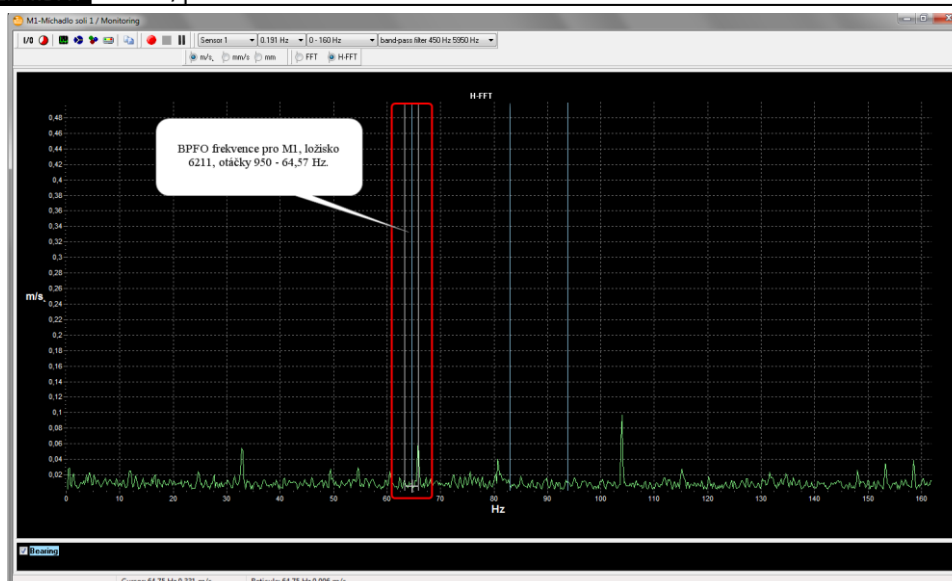
Vyhodnocení parametru ložisek probíhá ve frekvenčním spektru a metodou obávkové analýzy, kde je pomocí chybových frekvencí sledováno, zda se v blízkosti dané chybové frekvence nenachází zvýšená (špičková-peak) amplituda vibrací. Bohužel program EO neumožňuje přímé sledování chybové frekvence klece ložiska, které bylo nutné pro tento případ vyhodnotit manuálně.

Tabulka 14: Vyhodnocení parametru frekvence vad ložisek (Rolling element bearing).

| Motor 1* | FTF [Hz] | BPFO [Hz] | BSF [Hz] | BSFI [Hz] |
|-------------------|----------|-----------|----------|-----------|
| Chybová frekvence | 6,45 | 64,57 | 82,96 | 93,72 |
| Senzor 1 | Ne | Ano | Ne | Ne |
| Senzor 2 | Ne | Ano | Ne | Ne |
| Motor 2* | FTF [Hz] | BPFO [Hz] | BSF [Hz] | BSFI [Hz] |
| Chybová frekvence | 6,45 | 64,57 | 82,96 | 93,72 |
| Senzor 1 | Ne | Ne | Ne | Ne |
| Senzor 2 | Ne | Ne | Ne | Ne |
| Motor 3 | FTF [Hz] | BPFO [Hz] | BSF [Hz] | BSFI [Hz] |
| Chybová frekvence | 19,54 | 175,88 | 127,93 | 266,61 |
| Senzor 1 | Ne | Ne | Ne | Ne |
| Senzor 2 | Ne | Ne | Ne | Ne |
| Motor 4 | FTF [Hz] | BPFO [Hz] | BSF [Hz] | BSFI [Hz] |
| Chybová frekvence | 19,96 | 199,64 | 250,87 | 292,85 |
| Senzor 1 | Ne | Ne | Ne | Ne |
| Senzor 2 | Ne | Ne | Ne | Ne |
| Motor 5 | FTF [Hz] | BPFO [Hz] | BSF [Hz] | BSFI [Hz] |
| Chybová frekvence | 6,45 | 64,57 | 82,96 | 93,72 |
| Senzor 1 | Ne | Ne | Ne | Ne |
| Senzor 2 | Ne | Ne | Ne | Ne |
| Motor 6 | FTF [Hz] | BPFO [Hz] | BSF [Hz] | BSFI [Hz] |
| Chybová frekvence | 6,45 | 64,57 | 82,96 | 93,72 |
| Senzor 1 | Ne | Ne | Ne | Ne |
| Senzor 2 | Ne | Ne | Ne | Ne |
| Motor 7 | FTF [Hz] | BPFO [Hz] | BSF [Hz] | BSFI [Hz] |
| Chybová frekvence | 9,95 | 99,57 | 127,93 | 144,59 |
| Senzor 1 | Ne | Ne | Ne | Ne |
| Senzor 2 | Ne | Ne | Ne | Ne |

- Legenda
- Ne Ve frekvenčním spektru se v blízkosti chybové frekvence nevyskytovala špičková amplituda vibrací.
 - Ano Ve frekvenčním spektru se v blízkosti chybové frekvence vyskytovala špičková amplituda vibrací.

Ve sledovaný datum a čas, 20. 5. 2016 v 9:35 hodin, se vyskytl náznak chybové frekvence pouze u motoru 1 a to BPFO (tabulka 14). Tento náznak je třeba interpretovat tak, že při vyhodnocování není vždy amplituda vibrací přesně situována v chybové frekvenci – je nutné brát danou frekvenci jako orientační a musíme počítat s možným intervalem okolo této hodnoty, kde se může špička vyskytovat (obrázek 42). U dalších motorů se žádné špičkové hodnoty v oblasti chybových frekvencí nevyskytovaly. Zde je však nutné dodat, že tento stav je platný jen k tomuto datu a času, situace ve frekvenčním spektru se může každou chvíli změnit. Sledování tohoto parametru bude v čase nabývat na důležitosti pro dlouhodobé sledování a údržbu těchto motorů.



Obrázek 42: Výskyt BPFO ve frekvenčním spektru.

Vyhodnocení parametru: teplota

Parametr teploty se měří na dvou místech motoru. První je na těle ložiskových štítů a druhé na těle motoru. Teploty lze opět sledovat v reálném čase nebo jako historický vývoj trendů. Všechny motory mají třídu izolace F, tedy chrání izolované části až do teploty 150 °C [40]. Limitní hodnoty pro každý motor byly určeny ze souboru testovacích měření, kde byla vypočtena průměrná hodnota a **limitní hodnoty** byly nastaveny vždy na **zvýšení teploty o 10%** a to podle z předchozích zkušeností firmy. Limity jsou uvedeny v tabulkách níže – př.: Motor 1: 66 °C (yellow), 72 °C (red) vždy u jednotlivé senzoru v závorce. Změna parametru teploty je velmi důležitá pro sledování stavu izolačního systému motoru.

Tabulka 15: Vyhodnocení parametru teploty pro motory 1 a 2.

| | Aktuální teplota [°C] | Vývoj teploty [°C] | | |
|---------------------------|-----------------------|--------------------|-------------------|-------------------------------|
| | | Průměr | Maximální hodnota | % překročení limitních hodnot |
| Motor 1 * | | | | |
| Senzor 1 (66°C, 72°C) | 61 | 59,41 | 66,16 | 0 |
| Senzor 2 (62°C, 67°C) | 56 | 54,5 | 63,1 | 0 |
| Motor 2 * | | | | |
| Senzor 1 (51°C, 57°C) | 49 | 46,9 | 50,84 | 0 |
| Senzor 2 (48,5°C, 53,3°C) | 46 | 43,9 | 48,6 | 0 |

Tabulka 16: Vyhodnocení parametru teploty pro motory 3 a 4.

| | Aktuální teplota [°C] | Vývoj teploty [°C] | | |
|---------------------------|-----------------------|--------------------|-------------------|-------------------------------|
| | | Průměr | Maximální hodnota | % překročení limitních hodnot |
| Motor 3 | | | | |
| Senzor 1 (41,8°C, 46°C) | 37 | 36,1 | 37,8 | 0 |
| Senzor 2 (40,2°C, 44,2°C) | 36 | 34,7 | 36,5 | 0 |
| Motor 4 | | | | |
| Senzor 1 (29,5°C, 32,5°C) | 27 | 25,8 | 31,2 | 0 |
| Senzor 2 (29,5°C, 32,5°C) | 27 | 25,9 | 31,9 | 0 |

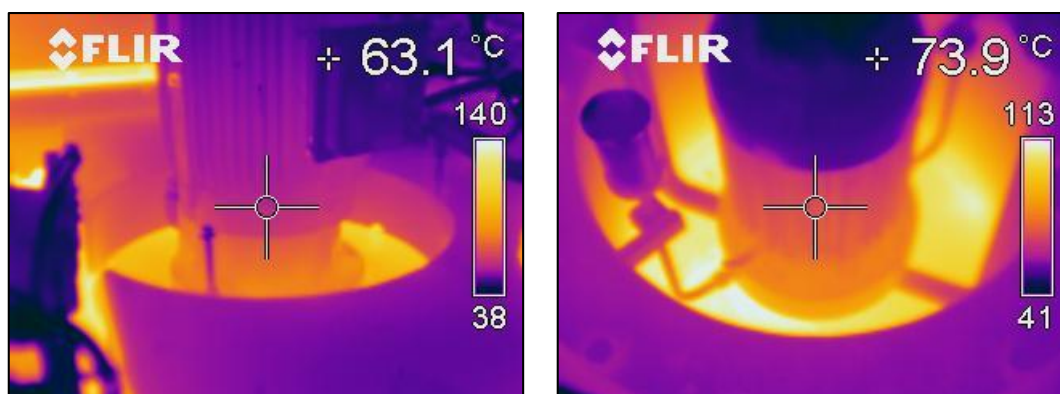
Tabulka 17: Vyhodnocení parametru teploty pro motory 5 a 6.

| | Aktuální teplota [°C] | Vývoj teploty [°C] | | |
|---------------------------|-----------------------|--------------------|-------------------|-------------------------------|
| | | Průměr | Maximální hodnota | % překročení limitních hodnot |
| Motor 5 | | | | |
| Senzor 1 (65,5°C, 72,5°C) | 59 | 58,7 | 60,2 | 0 |
| Senzor 2 (52°C, 57°C) | 47 | 47 | 48,6 | 0 |
| Motor 6 | | | | |
| Senzor 1 (72°C, 79,3°C) | 65 | 63,9 | 67,3 | 0 |
| Senzor 2 (58°C, 64°C) | 53 | 51,9 | 55,5 | 0 |

Tabulka 18: Vyhodnocení parametru teploty pro motor 7.

| | Aktuální teplota [°C] | Vývoj teploty [°C] | | |
|-----------------------|-----------------------|--------------------|-------------------|-------------------------------|
| | | Průměr | Maximální hodnota | % překročení limitních hodnot |
| Motor 7 | | | | |
| Senzor 1 (43°C, 47°C) | 36 | 36,5 | 38,8 | 0 |
| Senzor 2 (43°C, 47°C) | 37 | 37,3 | 41,3 | 0 |

Z uvedených tabulek je patrné, že žádný motor nepřekračuje zadané horní limity (red). Z naměřeného souboru bylo zaznamenáno v několika případech o překročení výstražné hodnoty (yellow), avšak minimálně a na krátký časový úsek proto nejsou tyto údaje zahrnuty v tabulkách. Je třeba však zmínit poměrně vysoké hodnoty u motoru 1 a 6, přestože limity nebyly překročeny. V prvním případě se jedná o motor 1 - míchání solné lázně. Tento motor je situován ve středu kalického zařízení v blízkosti hlavní pece, která má okolo 950 °C, a je umístěn nad solnou lázní, která má teplotu okolo 250 °C. Oba tyto zdroje tepelné energie ovlivňují naměřenou teplotu. Druhý motor, který má vyšší teplotu než ostatní je motor č. 6, který slouží pro míchání atmosféry v hlavní peci. Tato pec, jak už bylo zmíněno, má vysokou teplotu, a motor je umístěn nad touto pecí, což samozřejmě také ovlivňuje jeho výslednou teplotu. Tento motor je proto chlazen olejovým chladičem, který teplotu výrazně redukuje, jinak by tato teplota byla ještě výrazně vyšší. Rozložení teplotních polí u motoru 1 a 6 je vidět na termografických snímcích (obrázek 43), které byly pořízeny pro předběžné zjištění teplot před instalací teplotních senzorů.




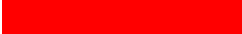
Obrázek 43: Termografické snímky motoru 1, a 6.

11.2.3 Shrnutí vyhodnocení parametrů vibrací a teploty

V kapitole 11.2.2 Vyhodnocení parametrů vibrací a teploty, byl vyhodnocen stav sledovaných motorů. V tabulce 19 je uveden přehled a shrnutí těchto výsledků.

Tabulka 19: Shrnutí výsledku vyhodnocení parametrů vibrací a teploty.

| Číslo motoru | Sledovaný parametr | | | |
|--------------|--------------------|--------------|---------|---------|
| | RMS | Nevyváženost | Ložiska | Teplota |
| Motor 1* | | | BPFO | |
| Motor 2* | | | | |
| Motor 3 | | | | |
| Motor 4 | | | | |
| Motor 5 | | | | |
| Motor 6 | | | | |
| Motor 7 | | | | |

| | | |
|---------|---|---|
| Legenda |  | Sledovaný parametr je v toleranci |
| |  | Sledovaný parametr není v toleranci, překračuje limitní hodnoty |
| | BPFO | Chybová frekvence na vnějším kroužku ložiska |
| | * | Motor vybaven měničem otáček |

Z tabulky 19 a předchozí analýzy je možné shrnout závěry pro jednotlivé motory takto:

Motor 1 – pro míchání solné lázně 1

- Překročeny limitní hodnoty parametru efektivní hodnota rychlosti kmitání vibrací
- Objeveny náznaky poškození na vnějším kroužku ložiska - BPFO

Motor 2 – pro míchání solné lázně 2

- Překročeny limitní hodnoty parametru efektivní hodnota rychlosti kmitání vibrací

Tyto motory jsou vybaveny měničem otáček, který výrazně ovlivňuje průběh a hodnoty parametru vibrací v čase. Je nutné tedy tyto výsledky brát s touto výhradou. Správné vyhodnocení bychom docílili, pokud budeme znát všechny možné úrovně hodnot otáček podle činnosti motoru v průběhu technologického procesu a tím budeme moci nastavit pro každou úroveň hodnot otáček limitní hodnoty. Na obhajobu tohoto řešení je však nutné zmínit, že tento návrh vyhodnocení je první pilotní řešení, a proto vytvoření monitorovacího systému má velký význam. Postupem času se tento systém bude vyvíjet a vylepšovat tak, aby více zohledňoval specifika zařízení, a tím bude nabývat i na hodnotě. Kapitola 11.5 se bude zabývat doporučením zlepšení systému a tato problematika zde bude pojednána širěji.

Motor 3 – pro přívod studeného vzduchu do solné lázně

- Všechny parametry ležely v dané toleranci

Motor 4 – pro přívod vzduchu k hořákům v peci

- Objeveny příznaky nevyváženosti na otáčkové frekvenci

Motoru bylo doporučeno věnovat větší pozornost situaci. V případě, že by došlo k zhoršení stavu, bylo by nutné zvolit vhodné nápravné opatření.

Motor 5, 6 – pro míchání atmosféry v hlavní peci

- Všechny parametry ležely v dané toleranci

Motor 7 – pro míchání atmosféry v hlavní peci

- Všechny parametry ležely v dané toleranci

11.3 Analýza kvality elektrické energie

Jak již bylo uvedeno v kapitole 11.1.2 Diagnostické prostředky, pro analýzu parametrů kvality elektrické energie byl použit systém od firmy SOCOMEC. Celý systém ukládá data do paměti zobrazovací jednotky a tyto parametry je možné dále zaznamenávat. Zaznamenávaná data, které systém umožňuje sledovat popisuje tabulka 20 níže.

Tabulka 20: Měřitelné parametry Diris Digiware D-50 [38].

| Okamžité hodnoty | | | |
|--------------------------------|---------------------|--------------------------------|----------------------|
| Proud [A] | Napětí [V] | THD proud [%] | THD napětí [%] |
| Current/L1 | Voltages/L12 | Current/THDL1 | Voltages/THDL12 |
| Current/L2 | Voltages/L23 | Current/THDL2 | Voltages/THDL23 |
| Current/L3 | Voltages/L31 | Current/THDL3 | Voltages/THDL31 |
| Průměrné hodnoty | | | |
| Proud průměrný [A] | Proud maximální [A] | Napětí průměrné [V] | Napětí maximální [V] |
| Current/AverageL1 | Current/MaxL1 | Voltages/AverageL12 | Voltages/MaxL12 |
| Current/AverageL2 | Current/MaxL2 | Voltages/AverageL23 | Voltages/MaxL23 |
| Current/AverageL3 | Current/MaxL3 | Voltages/AverageL31 | Voltages/MaxL31 |
| Výkonové charakteristiky | | | |
| Okamžité | | Maximální | |
| Current/InstantP [kW] | | Current/MaximumP+ [W] | |
| | | Current/MaximumP- [kW] | |
| Current/InstantQ [kvar] | | Current/MaximumQ+ [Mvarh] | |
| | | Current/MaximumQ- [Mvarh] | |
| Current/InstantS [kVA] | | Current/MaximumS [kVA] | |
| Current/InstantPF | | N/A | |
| Frekvence | | | |
| Voltages/FrequencyInstant [Hz] | | Voltages/FrequencyAverage [Hz] | |

Z tabulky 20 je vidět, že systém SOCOMEC umožňuje měřit jak aktuální (okamžité – instantní) tak průměrné nebo maximální hodnoty, a to pro parametry:

- Proud I [A], který protéká jednotlivými vodiči.
- Napětí U [V] mezi vodiči.
- Harmonické napětí a proudy THD v procentech, které udává procenta zkreslení sinusového průběhu.
- Výkonové charakteristiky – jako výkon: [40]
 - Činný P [kW] – výkon, který je celý zařízením spotřebován a je přeměna na užitečnou formu energie.
 - Jalový Q [kvar] – rozdíl mezi činným a zdánlivým.
 - Zdánlivý S [kVa] – definován jako součin efektivních hodnot napětí U a proudu I procházejícím obvodem (celkový příkon).
 - Účinník = $\cos \varphi$ (PF – power factor) – jedná se o poměr činného a zdánlivého výkonu, vyjadřuje, jak velkou část zdánlivého výkonu přeměňuje obvod na činný výkon, tedy součet užitečného výkonu a ztrát.
- Frekvence [Hz]

Tyto parametry systém zobrazuje automaticky po napojení proudového a napětového měřicího modulu do rozváděče elektrické energie. Poté je však nutné propojit moduly se zobrazovací jednotkou D-50, provést nastavení unikátních adres pro jednotlivé moduly a přiřazení zátěže. Pokud je více motorů připojeno na jeden modul může docházet ke kolizi při čtení dat z jednotlivých modulů. To je důležité právě v našem případě, kdy je zapotřebí sledovat hned několik zařízení a je nutné použít několik proudových a napětových modulů.

11.3.1 Vyhodnocení kvality elektrické sítě

Celý systém je nainstalován, připojen, nastavené adresy a data se zobrazují na zobrazovací jednotce D-50. K tomu, aby bylo možné data analyzovat, bylo nutné zobrazovací jednotku připojit pomocí programu Reliance 4 k databázi, kam se data budou ukládat. V programu Reliance 4 bylo nutné pro každý parametr vložit unikátní adresu ke komunikaci se zobrazovací jednotkou. Celý postup propojení a problematika datové struktury bude rozebrána v kapitole 11.4 Návrh vizualizace. Data z této databáze je možné exportovat do požadovaného formátu jako html, xls, word ap. Souhrn dat využitých k analýze je zpracován z více než tisíce naměřených dat, záznam po 10 vteřinách avšak pouze v krátkém časovém období několika dnů a v testovacím režimu databáze, kdy nezaznamenává data neustále. Pro správné vyhodnocení bude zapotřebí kontinuálního měření a poté zhodnotit výsledky z dlouhodobého hlediska. Pro názornost je zde však uvedeno, jak se některé z měřených veličin budou hodnotit. Pro velký rozměr této tabulky jsou tyto data uvedena v příloze 5: Naměřená data elektrických veličin.

Jsou zde uvedeny výsledky měření těchto parametrů dle normy ČSN EN 50160:

- **Jmenovité napětí U_n** , které musí být v rozsahu $U_n \pm 10 \%$, to je v tomto případě splněno mezi všemi fázemi.
- **Frekvence**, která musí být v rozsahu $50 \text{ Hz} \pm 1 \%$ měřených každých 10 s. Tato podmínka je také splněna.
- **Napětové harmonické zkreslení**, které musí být maximálně **do 8 %**, toto je v tomto případě také splněno.

Jako další parametr, který byl vyhodnocen, je proudové harmonické zkreslení dle IEEE standardu, které se zabývá požadavky na kontrolu harmonických frekvencí v elektrických systémech. Doporučené limity pro proudové harmonické zkreslení jsou dle tohoto standardu: [41]

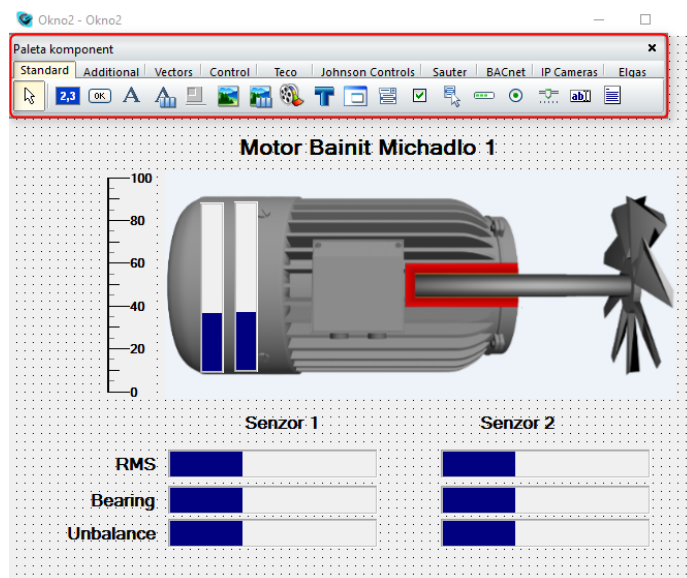
- Pro **proudové harmonické zkreslení** je limit pro elektrický systém od 120V do 69 kV taktéž **5 %**. Naměřená data byla v dané toleranci.

Zároveň jsou zaznamenávány výkonové charakteristiky, napětové a proudové charakteristiky, z kterých je možné zpětně určit jakýkoliv potřebný parametr a tím i možnou příčinu problémů.

11.4 Návrh vizualizace

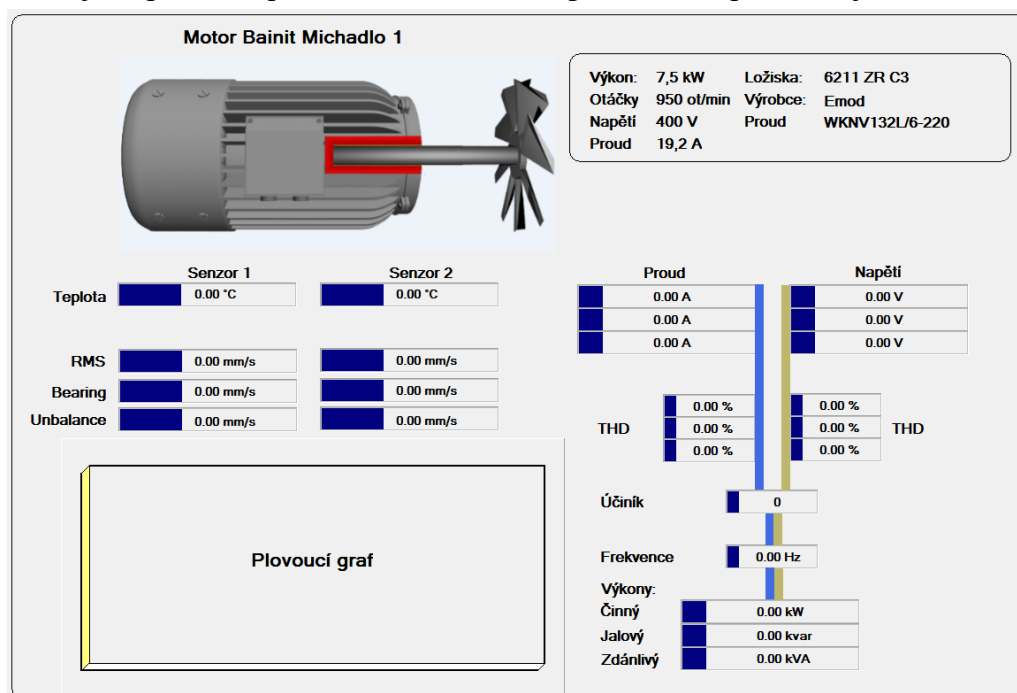
Nejdůležitější fází celého monitorování a diagnostikování stavu, je bezpochyby schopnost správně interpretovat výsledky. Je však často nutné předat výsledky z celého projektu i lidem, kteří v této problematice nemají hlubší znalosti. To dokáže usnadnit řada monitorovacích a vizualizačních systémů. Vizualizace musí být jednoduchá a přehledná, zároveň musí mít vysokou vypovídací schopnost (hodnotu). Proto bylo rozhodnuto o vytvoření vizualizace pro náhled stavu všech motorů, kde se budou zobrazovat pouze ikony motorů s nejdůležitějšími aktuálními hodnotami. Uživatel tak uvidí všech hlavní charakteristiky sedmi sledovaných motorů na jedné obrazovce. Poté si bude moci vybrat jednotlivé motory a podívat se na jejich detail, kde budou i grafické průběhy trendů a také informace o elektrických parametrech. Celý proces tvorby návrhu probíhal převážně v programu Reliance 4 Design a lze jej popsat několika kroky:

1. Návrh šablony "přehled motorů" – v programu byl založen nový projekt, do kterého bude ukládána vytvořená šablona. Nejprve bylo nutné nahrát schéma motoru, který má program v přednastavené databázi komponent. K tomuto schématu byla připojena vrtule, která byla vytvořena v programu Blender. Poté byly tyto dvě části spojeny v grafickém programu Gimp. Celé schéma pak bylo nahráno do programu Reliance 4 Desing, pomocí nabídkové lišty „paleta komponent“. Dále byly pomocí této palety vytvořeny grafické prvky jako displej, indikátory průběhu atd. (obrázek 44).



Obrázek 44: Návrh vizualizace šablony "přehled motorů".

2. Návrh šablony "detail motoru" – podle stejného postupu byl vytvořen návrh detailního zobrazení jednoho motoru. Byly přidány parametry motorů, jako výkon, otáčky atd., a také plovoucí graf, který bude zobrazovat jako hlavní parametr efektivní hodnotu rychlosti kmitání vibrací. Součástí detailu motoru je i celá větev na sledování elektrických veličin jako proud, napětí, THD a další. Kompletní návrh představuje obrázek 45.

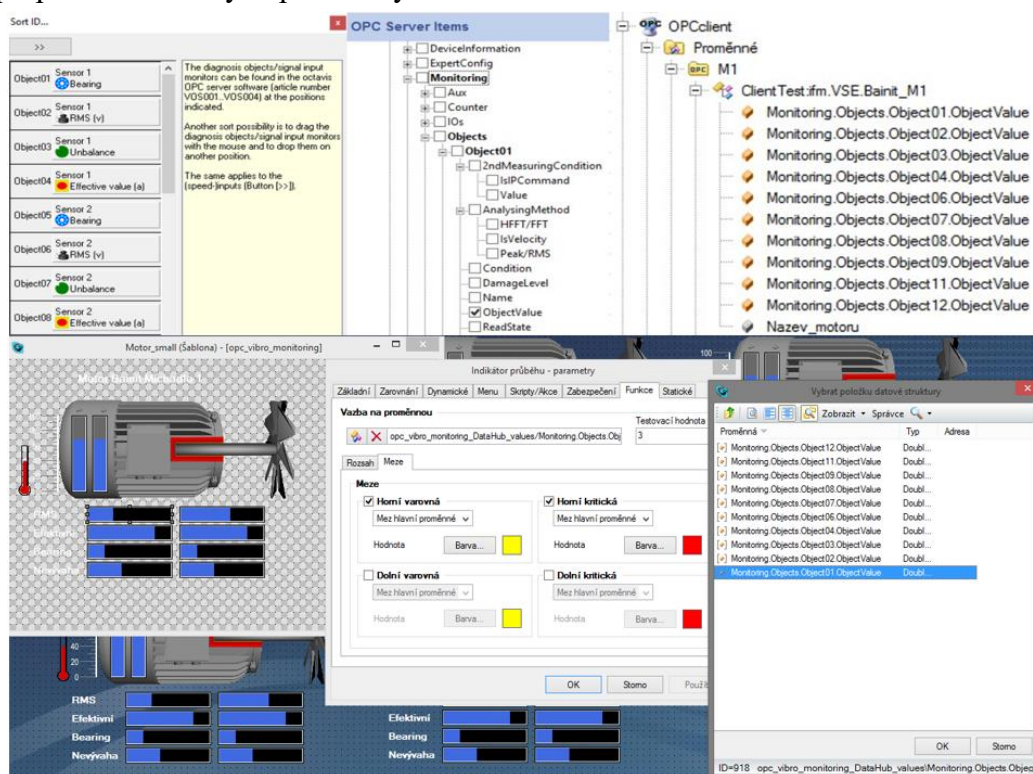


Obrázek 45: Návrh vizualizace šablony "detail motoru".

3. Datová struktura – po vytvoření grafické podoby našich šablon je nutné propojit všechny sledované parametry se svými proměnnými. Celková problematika propojení je poměrně složitá, proto je zde uveden pro ilustraci zjednodušený systém propojení.

- Sensory od firmy IFM jsou připojeny na OPC server. OPC server je možné si představit jako prostředníka – službu, která umí nahlížet na síťové adresy daných senzorů a jednotek a načítat měřené hodnoty. S OPC serverem je schopný program Reliance 4 komunikovat, a pomocí své datové struktury nahrávat jednotlivým vizuálním prvků reálné hodnoty, které přichází ze senzorů.
- Podobným principem funguje i systém SOCOMEC na měření elektrických veličin. Proudové a napěťové moduly jsou spřaženy do zobrazovací jednotky Diris Digiware D-50, poté jsou data přenášena do Modbus tcp, kde jsou nadefinované proměnné, které se propojí s adresami ze systému SOCOMEC. S těmito proměnnými se umí program Reliance 4 spojit a zobrazovat je ve vizuálním návrhu.

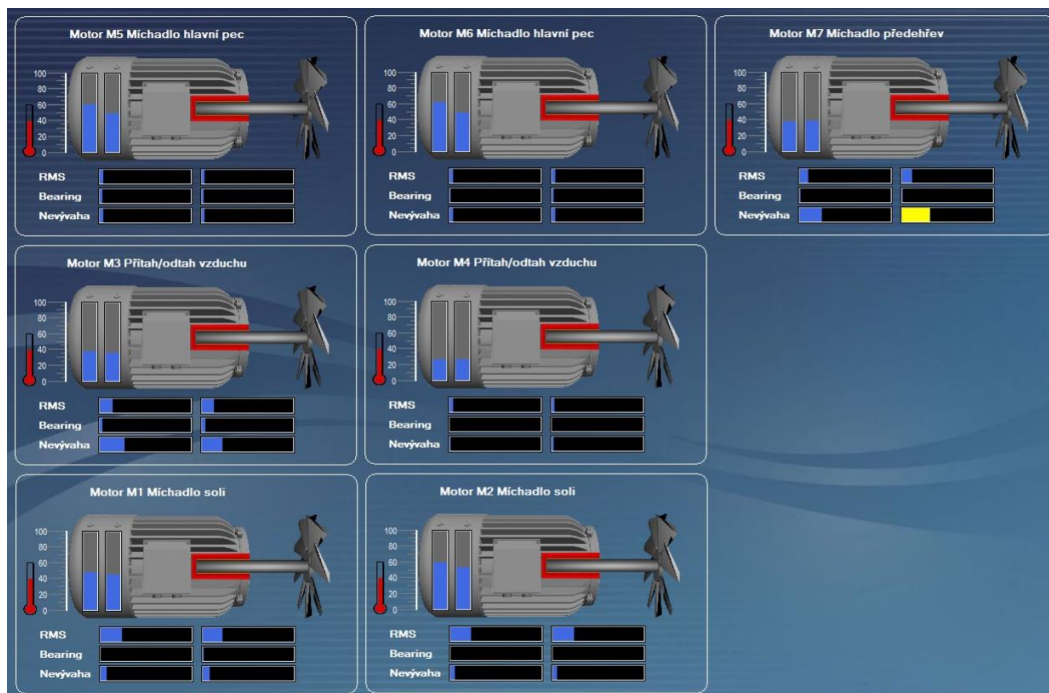
Všechna načtená data je možné také ukládat do databáze MySQL, kde jsou uložena historická data a v případě potřeby jsou možná k načtení i zobrazení grafů. Jedná se o velmi komplexní řešení ukládání dat a v konečném výsledku zobrazení požadovaných dat. Na obrázku 46 lze vidět celou cestu přiřazení určitých objektu přímo v programu EO pro jednotlivé sledované parametry od datové struktury OPC serveru až po propojení proměnných do vizualizačních parametrů. Tento proces je velmi zdlouhavý a je nutné určit si přehledný systém a dodržovat jeho pravidla, aby nedošlo k zaměnění nebo přepsání sledovaných proměnných.



Obrázek 46: Ukázka propojení senzorů přes OPC server až po program Reliance 4.

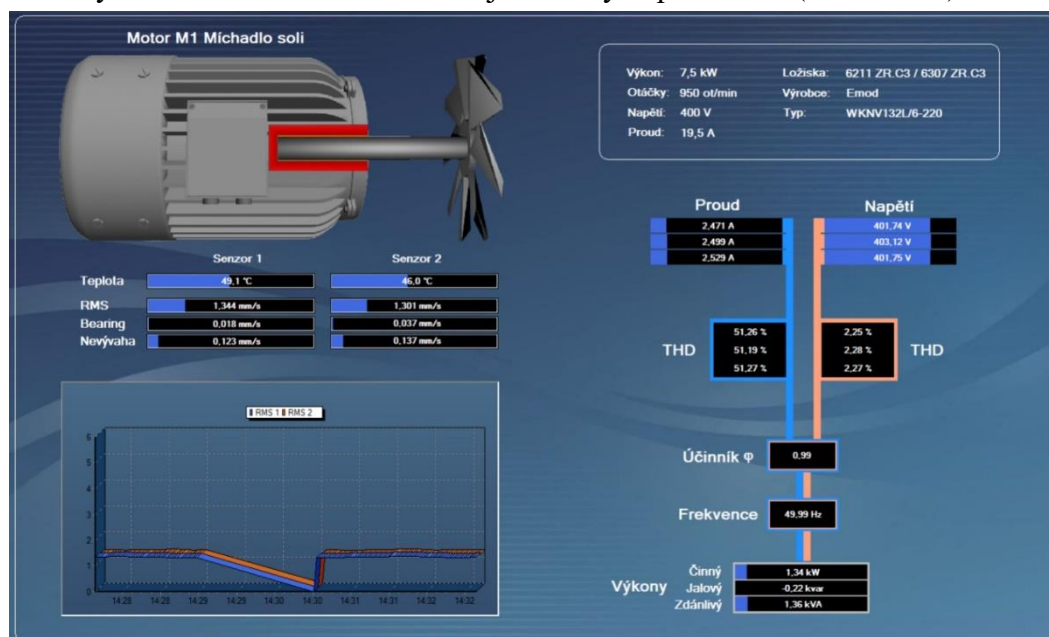
Takto byly připojeny všechny ve vizualizaci požadované proměnné - jak hodnoty vibrací, teploty i elektrických veličin tak i limitní hodnoty u stanových parametrů. Všechna data se zobrazují v aktuálním časovém okamžiku. Lze se podívat i do historie, zjistit vývoj trendů a je možno zobrazit grafy podle požadovaného časového období.

4. Finální zobrazení – všechny úpravy byly provedeny v návrhovém prostředí, po spuštění projektu je možné vidět finální vzhled pro všech 7 motorů (obrázek 47).



Obrázek 47: Vizuální návrh okna "přehled motorů".

Po zvolení prvního motoru se otevře detailní pohled na motor se všemi informacemi a možnými volbami včetně sledování jednotlivých parametrů (obrázek 48).



Obrázek 48: Vizuální návrh okna "detailu motorů".

Všechna data jsou zaznamenávána do firemní databáze a kdykoliv je k nim možný přístup, pokud by bylo třeba zpětně data dohledat. Všechny zobrazené parametry je možné pravým tlačítkem myši rozkliknout a nechat si zobrazit graf a zjistit tak vývoj trendů. Překročení limitních hodnot bude zobrazeno červeným nebo žlutým zobrazením sloupce u daného parametru místo modrého (obrázek 48 - motor 7).

11.5 Doporučení

Tato kapitola se bude zabývat přezkoumáním celého diagnostického systému, analýzy parametrů vibrační a teploty, ale i analýzy elektrických veličin a návrhů vizualizace. Budou zde uvedeny postřehy, doporučení i návrhy na zlepšení celého systému sledování stavu trojfázových elektromotorů.

Návrh na zlepšení systému údržby:

Jak již bylo zmíněno v předchozí části práce, jsou jen velmi omezené možnosti pro možné odpojení motoru či jiného zásadního zásahu do celého zařízení, protože celé zařízení je neustále v chodu. Proto lze u preventivní údržby doporučit provádění pravidelných vizuálních kontrol a udržování čistoty motorů. Pro generální údržbu, která se provádí jednou do roka, je možné doporučit:

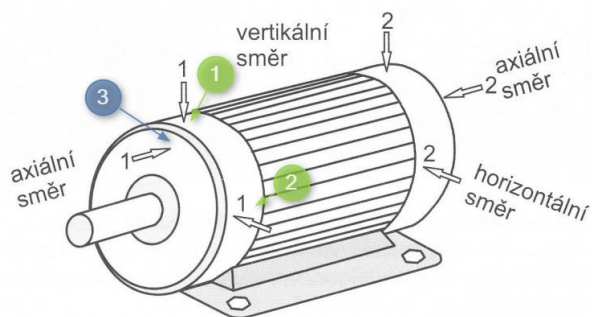
- **Zaměřit se na elektrodiagnostiku** – v technické praxi je v rámci elektrických zařízení důležité provádět elektrodiagnostiku elektrického obvodu a zjištění stavu izolačního systému. Zjišťují se a měří především tyto diagnostické veličiny:
 - **Měření izolačního odporu**, tímto se ověřuje schopnost izolace elektrického zařízení zamezit průniku nebezpečného napětí nebo zabránit nežádoucímu toku proudu mezi částmi elektrického zařízení. Stav izolace má vliv na funkci zařízení i na bezpečnost. Je možného ho měřit pouze při odstavení elektromotorů. K této problematice bych doporučil k prostudování normy a literaturu, které se zabývají měřením a vyhodnocením:
 - **ČSN 33 1600** – Revize a kontroly elektrických spotřebičů během používání
 - **ČSN EN 60204-1** Bezpečnost strojních zařízení – Elektrická zařízení strojů – Část 1: Všeobecné požadavky
 - MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
 - **Polarizační index** – při měření polarizačního indexu (PI) se měří izolační odpor ve dvou po sobě jdoucích intervalech obvykle po jedné minutě od okamžiku připojení měřícího napětí a po 10 minutách. Podíl těchto dvou odporů dává polarizační index. Čím větší hodnota PI, tím je lepší izolace. [42]
 - **Ztrátový činitel** ($\text{tg } \delta$) – který se používá pro rychlé posouzení kvality daného izolantu. Dobrý materiál se uvádí hodnota $\text{tg } \delta$ menší než 10^{-3} , špatný s $\text{tg } \delta$ větší než 10^{-2} . [17]
 - **Napět'ové zkoušky** – které vypovídají o elektrické pevnosti izolačních materiálů. Porušení elektrické pevnosti izolací znamená vyřazení stroje z provozu. [17]

Návrh na zlepšení diagnostického systému:

V kapitole 11.1 byl popsán diagnostický systém, který se skládá ze sledovaných diagnostických objektů - motorů, senzorů a systému měření. V této části jsou uvedené některé z návrhů na zlepšení systému:

- Motory jsou vybaveny dvěma senzory vibrační dle normy ČSN ISO 10816-1 a to ve vertikálním směru a horizontálním (obrázek 49, označené zelené body 1 a 2). Možné zlepšení sledování stavu těchto motorů by bylo podpořeno **umístěním třetího snímače v axiálním směru** (obrázek 49, modře označený bod), který by přidal vyhodnocení i v třetím směru, kde se mohou vyskytovat některé ze špičkových frekvencí. Protože by se však jednalo o další finanční náklady, bylo by nutné zvážit instalaci třetího senzoru

vibrací pouze na problémové elektromotory, které vykazují vyšší hodnoty RMS v našem případě motor 1 a 2.



Obrázek 49: Umístění senzorů vibrací [16, 19].

- Bylo zmíněno, že motory 1 a 2 mají měniče otáček. Pro sledování těchto motorů je nutné **zjišťovat hodnoty otáček** v reálném čase a zobrazovat je v např. ve vizualizaci. Tyto hodnoty je možné zjistit z technologického programu procesu, který tyto elektromotory řídí, nebo motory vybavit snímačem otáček, aby bylo možné zjistit, jak se pohybuje hodnota vibrací v závislosti na otáčkách. Tato závislost je vidět v programu Efactor Octavis, jen pouze odhadem proto by bylo dobré znát přesné hodnoty.

Návrh na zlepšení analýzy vibrací a teploty:



V kapitole 11.2 jsme se věnovali analýze parametrů vibrací a teploty. Tato analýza byla zaměřena především na sledování parametrů RMS, nevyváženosti, komponent ložisek a měření teploty motorů. Po zvládnutí vyhodnocení těchto parametrů by bylo možné systém vylepšit:

- U motoru 1 a 2, vysledovat co je příčinou překračování limitních hodnot vibrací. Ověřit úvahu o závislosti zvýšení velikosti hodnoty vibrací při zvýšení otáček motorů. Jako další vliv, který může ovlivnit velikost vibrací je pohyb vsázek uvnitř kalícího zařízení, kde se vibrace při pohybu na dopravníkovém pásu mohou šířit do celé konstrukce a tím i ovlivňovat sledované objekty.
- Po prodiskutování technického stavu z technikem údržby a ujištění, že hodnoty vibrací u motory nevedou k poškození těchto zařízení. **Zvýšit limitní hodnoty pro motory 1 a 2**, a to na 7,1 mm/s (yellow) a 18 mm/s (red) dle normy ČSN ISO 10816-1. (tabulka 5: Typické hranice pásem [16].).
- **Sledování chybové frekvence FTF – poškození klece ložisek**, které program EO neumožňuje sledovat pomocí obávkové metody. Je zde však možnost tento parametr nastavit zvlášť jako parametr v programu EO a tím i jeho sledování a vyhodnocení.
- **Rozšíření sledování nevyváženosti pro všechny motory na druhou harmonickou frekvenci.**
- Jednou za měsíc provést **srovnání vývoje trendu pro parametr RMS a teploty** pro všechny motory (tabulka 21, 22 pro motor 2), které nám mohou ukázat přehledně vývoj trendu, a tím nám poskytnou možnost reagovat na tyto změny.

Tabulka 21: Porovnání měsíčního vývoje trendu parametru RMS pro motor 2.

| | RMS - Duben | | RMS - Květen | | Vývoj trendu |
|----------------|-------------|--------------------|--------------|--------------------|--------------|
| | Průměr | % překročení limit | Průměr | % překročení limit | |
| Motor 2 | | | | | |
| Senzor 1 | 2,10 | 23,31 | 2,31 | 25,2 | ➔ |
| Senzor 2 | 3,22 | 23,84 | 3,51 | 25,9 | ➔ |

Tabulka 22: Porovnání měsíčního vývoje trendu parametru teploty pro motor 2.

| | Teplota [°C] - Duben | | Teplota [°C] - Květen | | Vývoj trendu |
|----------------|----------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|---|
| | Průměr | % překročení limit | Průměr | % překročení limit | |
| Motor 2 | | | | | |
| Senzor 1 | 46,9 | 0 | 47,1 | 0 |  |
| Senzor 2 | 43,9 | 0 | 43,8 | 0 |  |

- **Jednou měsíčně pořídít termografické snímky všech motorů** a porovnat hodnotu teplotních polí, které nám mohou ukázat závady v izolačním systému motorů.

Návrh na zlepšení analýzy kvality elektrické sítě a elektrických veličin:

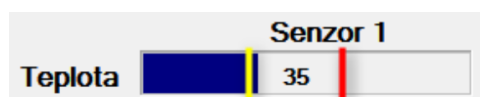
Jak již bylo zmíněno v kapitole 9 Kvalita elektrické energie, hodnocení dle normy ČSN EN 50160 je primárně určené pro potřeby určení kvality elektrické energie ve vztahu dodavatel a odběratel. Jedná se tedy o zjištění kvality elektřiny, která jde od distributora do hlavního transformátoru, který je umístěn v podniku. Avšak po průchodu tímto transformátorem, mohou být jednotlivé parametry různě ovlivněny a vlastnosti elektřiny v podnikové elektrické sítě za tímto transformátorem už zcela jiné. A tyto změněné parametry pak charakterizují kvalitu elektřiny v hlavních rozváděcích pro každý stroj. V rozváděcích skříních může opět dojít k některým změnám těchto veličin, které nám už přímo ovlivňují chod zařízení. Za pomoci normy ČSN EN 61000-4-30 a kvalitních analyzátorů jsme schopni získat věrohodné údaje, jaká je kvalita elektrická energie v rozváděcích skříních, kde jsou systémy na měření kvality v našem případě nainstalovány. To však, ale stále neříká nic o elektrických veličinách, která jsou reálně přiváděny do technických zařízení.

Bylo by tedy nutné, měřit všechny elektrické veličiny přímo na motorech a potom je případně srovnat s naměřenými hodnotami z rozváděcí skříně.

Návrh na zlepšení návrhu vizualizace:

Kapitola 11.4 se zabývá návrhem vizualizace, tedy popis a zjednodušení interpretace výsledku probíhajícího procesu sledování. Je dobré zmínit, že tento návrh je první verze, a bude se tedy postupně vyvíjet a vylepšovat až do finální verze. Po první konzultaci s vedením společnosti je zatím tento návrh dostatečný, můžeme zde zmínit několik menších změn jako:

- Změna zobrazení limitních hodnot, místo změny indikátoru sloupce (modrý na červený), přímo zobrazení limitu v návrhu (obrázek 50).
- Změna zobrazení vrtule pro ostatní motory, které nemají funkci míchání solné lázně.
- Pro zlepšení designové stránky zadat poptávku grafickému studiu.



Obrázek 50: Přidání limitních hodnot do zobrazení vizualizace.

12 ZÁVĚR

Industry 4.0 nebo také čtvrtá průmyslová revoluce představuje kyber-fyzikální systémy, které přinášejí stále více radikálních změn do výrobních podniků. Inteligentní systémy budou stále více zasahovat do činností, které dříve vykonávali lidé. V nedaleké budoucnosti se budeme moci začít setkávat s inteligentními továrnami, které budou mít digitálně řízené procesy. Od prvního kontaktu zákazníka přes výrobní proces až po expedici výrobku ke koncovému zákazníkovi. Tyto chytré továrny, budou schopny reagovat téměř v reálném čase na neustále se měnící požadavky zákazníku a měnit flexibilně svoje procesy dle potřeby.

Tato diplomová práce se zabývá právě jedním z těchto procesů a to procesem monitorování stavu technických zařízení. Cílem této diplomové práce bylo navrhnout diagnostický systém, který bude využívat vybrané technické metody a další vhodné postupy pro posouzení stavu trojfázových asynchronních motorů ve firmě Bosch Diesel s.r.o. – Jihlava.

Tyto trojfázové asynchronní motory se využívají k pohonu všech částí kalícího zařízení, které slouží k úpravě vlastností některých komponent používaných při výrobě vysokotlakých čerpadel. Pokud by došlo k poruše jen jednoho z těchto motorů, celé kalící zařízení se zastaví, a došlo by k znehodnocení všech dílců uvnitř tohoto zařízení. To by vedlo k velkým finančním ztrátám a ohrožení následných výrobních procesů. Proto je cílem celého diagnostického systému monitorovat stav těchto motorů a upozornit uživatele, pokud by se stav těchto zařízení změnil (zhoršil), aby bylo možné zasáhnout dříve, než dojde k fatální poruše, která může zastavit celé zařízení.

Ke sledování a predikci stavu těchto motorů byly vybrány metody z technické diagnostiky a to konkrétně vibrodiagnostika a termodiagnostika. Jako další vhodná metoda byla zvolena hodnocení kvality elektrické energie. Všechny tyto metody byly popsány v teoretické části.

V praktické části jsem se věnoval aplikaci těchto metod pro zhodnocení technického stavu trojfázových asynchronních motorů. Celkem bylo ke sledování vybráno 7 elektromotorů, které mají rozdílné funkce v rámci kalícího zařízení. Praktická část práce byla rozdělena do několika kapitol:

- 11.1 Diagnostický systém – kde byl vytvořen ucelený přehled sledovaných diagnostických objektů, jejich funkce a důležité charakteristiky, které je nutné znát pro monitorování. Byly zde popsány diagnostické prostředky, zařízení a počítačové programy, které byly použity pro monitorování stavu a jejich fyzické připojení ke sledovaným objektům.
- 12.2 Analýza parametrů vibrací a teploty – kde byly vybrány - popsány a nastaveny parametry, které budou hodnotit stav zařízení a jejich limitní hodnoty. Následně byly tyto parametry vyhodnoceny (kapitola 11.2.3).
 - **Motor 1 – pro míchání solné lázně 1**
 - Překročeny limitní hodnoty parametru efektivní hodnota rychlosti kmitání vibrací
 - Objeveny náznaky poškození na vnějším kroužku ložiska - BPFO
 - **Motor 2 – pro míchání solné lázně 2**
 - Překročeny limitní hodnoty parametru efektivní hodnota rychlosti kmitání vibrací
 - **Motor 3 – pro odvádění teplého vzduchu ze solné lázně**
 - Všechny parametry ležely v dané toleranci
 - **Motor 4 – pro přívod studeného vzduchu do solné lázně**

- Objevny příznaky nevyváženosti na otáčkové frekvenci
- **Motor 5, 6 – pro míchání atmosféry v hlavní peci**
 - Všechny parametry ležely v dané toleranci
- **Motor 7 – pro míchání atmosféry v hlavní peci**
 - Všechny parametry ležely v dané toleranci
- 11.3 Analýza kvality elektrické energie – zde byly představeny měřené elektrické veličiny, které byly následně vyhodnoceny.
- 11.4 Návrh vizualizace – v této kapitole byl vytvořen návrh vizualizace sledovaných motorů.
- 11.5 Doporučení – zde byly uvedeny návrhy na zlepšení stávajícího diagnostického systému.

Tato diplomová práce se zabývá velmi komplexním tématem. Rád bych zde uvedl, že tato práce je první, která se zabývá problematikou monitorování stavu asynchronních motorů v podniku Bosch Diesel s.r.o. - Jihlava. Proto jsou v práci uvedeny jen základní úvahy a návrhy možného řešení. Je zde tedy velký prostor pro rozšíření jednotlivých problematik v hlubším pojetí.

Závěrem bych rád dodal, že odevzdáním této diplomové práce, práce na tomto projektu pro mě nekončí. Budu se dále podílet na úpravách a zlepšování celého systému monitorování stavu trojfázových asynchronních motorů v podniku Bosch Diesel s.r.o. – Jihlava.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Präsentation Industry 4.0: Interní dokument firmy Bosch*. 2015. [cit. 2016-05-11]
- [2] *Industry 4.0 - Putting the vision into practice* [Online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <https://www.bosch-si.com/contact-forms/industrial-internet/form-i4-0-vision-into-practice.html>
- [3] BOSCH DIESEL s.r.o. - Jihlava. *Bosch v České republice* [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: http://www.bosch.cz/cs/cz/our_company_7/locations_7/jihlava_menu/jihlava_menu_uvod.html
- [4] Common rail injection. *Bosch automotive - Automobile parts and accessories* [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: http://de.bosch-automotive.com/en/parts_and_accessories/motor_and_systems/diesel/common_rail_injection/common_rail_diesel_motorsys_parts
- [5] *JhP Baint zařízení: Interní prezentace firmy Bosch*. 2013. [cit. 2016-05-11]
- [6] HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER. *Technická diagnostika a spolehlivost*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0650-9.
- [7] Construction of 3-Phase AC induction motors. *EEP - Electrical Engineering Portal* [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://electrical-engineering-portal.com/construction-of-3-phase-ac-induction-motors>
- [8] ASYNCHRONNÍ STROJE Určeno pro studenty bakalářských studijních programů [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/elektrotechnika/sylab_asynchronni_stroje_bc.pdf
- [9] HAMMER, Miloš. *Přednášky z předmětu: Technická diagnostika I (XT1)*. Vysoké učení technické v Brně. [cit. 2016-05-11]
- [10] ČSN IEC 50(191): *Mezinárodní elektrotechnický slovník. Kapitola 191: Spolehlivost a akost' služieb*. 1993.
- [11] ČSN EN 13306: *Terminologie údržby*. 2002.
- [12] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. *Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a vývojářů: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012. ISBN 978-80-248-2755-1.
- [13] ČSN ISO 17359: *Monitorování stavu a diagnostika strojů - Obecné pokyny*. Praha: Ústav pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [14] ČSN ISO 13 373-1: *Monitorování stavu a diagnostika strojů – Monitorování stavu vibrací – Část 1: Obecné postupy*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2003.
- [15] ČSN ISO 13 373-2: *Monitorování stavu a diagnostika strojů – Monitorování stavu vibrací – Část 2: Zpracovávání, prezentace a analýza vibračních dat*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2006.
- [16] ČSN ISO 10816-1: *Vibrace – Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech – Část 1: Všeobecné směrnice*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 1998.
- [17] HAMMER, Miloš. *Přednášky z předmětu: Technická diagnostika II (XT2)*. Vysoké učení technické v Brně. [cit. 2016-05-11]
- [18] Měření vibrací pro diagnostiku opotřebených strojů. *Automatizace.HW.cz | Elektronika v automatizaci* [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/mereni-vibraci-pro-diagnostiku-opotrebenedi-stroju.html>
- [19] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0158-6.

- [20] ČSN ISO 5348: *Vibrace a rázy - Mechanické připevnění akcelerometrů*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 1992.
- [21] Vibration Control. *Newport Corporation* [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.newport.com/Unit-Conversion-Charts-and-Constants-Vibration-Co/168093/1033/content.aspx>
- [22] SKF Frequency Calculator. *SKF.com* [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.skf.com/group/knowledge-centre/engineering-tools/skffrequencycalculator.html>
- [23] ČSN EN 50 160: *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí*. Praha: Ústav pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [24] *Kvalita elektrické energie je pro Industry 4.0 jako betonový základ pro dům* [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: http://www.qmprofi.cz/kvalita-elektricke-energie-je-pro-industry-4-0-jako-betonovy-zaklad-pro-dum-uniqueidgOke4NvrWuOKaQDKuox_Z4V3ydFhnyuY18IFxXkt6lc/?fromemail=1&justlogged=1#documentTabdocumentText
- [25] ČSN EN 61 000-4-30: *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-30: Zkušební a měřicí technika – Metody měření kvality energie*. Praha: Ústav pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [26] *Elektro* [online]. 2016(1) [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2016/01/Elektro_01_2016/index.html#p=1
- [27] *Elektro* [online]. 2016(2) [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2016/02/Elektro_02_2016/index.html#p=1
- [28] *Elektro* [online]. 2016(3) [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2016/03/Elektro_03_2016/index.html#p=1
- [29] *Elektro* [online]. 2016(4) [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2016/04/Elektro_04_2016/index.html#p=1
- [30] *Vibrační diagnostika základních závad strojů* [online]. 2010 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:1851>
- [31] VSA005. *Sensors, networking and control systems - ifm electronic* [online]. 2016 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.ifm.com/products/gb/ds/VSA005.htm>
- [32] VSE100. *Sensors, networking and control systems - ifm electronic* [online]. 2016 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.ifm.com/products/uk/ds/VSE100.htm>
- [33] TS2229. *Sensors, networking and control systems - ifm electronic* [online]. 2016 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.ifm.com/products/sgp/ds/TS2229.htm>
- [34] TP3231. *Sensors, networking and control systems - ifm electronic* [online]. 2016 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.ifm.com/products/us/ds/TP3231.htm>
- [35] Termokamera FLIR E40, FLIR E50 a FLIR E60. *Oficiální dodavatel termokamer FLIR pro ČR a SK | Termokamera FLIR* [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.termokamery-flir.cz/termokamera-flir-e40-e50-e60/>
- [36] *A complete range for metering, monitoring & power quality*. 2015. Dostupné také z: http://www.diris-digiware.com/files/live/sites/digiware/files/documentation/dcg_143023.pdf
- [37] SCADA/HMI systém Reliance. *SCADA/HMI systém Reliance* [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <https://www.reliance.cz/cs/main>

- [38] *DIRIS Digiware D-50 Control and power supply interface* [online]. In.: 2016 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: http://www.socomec.com/files/live/sites/systemsite/files/SCP/15_nouvellemesure/DIRIS%20Digiware/542873c_nmo_diris_d_EN.pdf
- [39] JANKOVÝCH, Róbert. *Vibrační diagnostika odměrových mechanismů tanků*. 2004. HABILITAČNÍ PRÁCE. [cit. 2016-05-11]
- [40] Pohonnatechnika.cz. *Domů - PohonnaTechnika.cz* [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/asynchronni-motor/tridy-izolace>
- [41] IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems [online].[cit. 2016-05-14]. Dostupné z: <http://academic.udru.ac.th/~banyat/Tips/IEEEStd519-2014.pdf>
- [42] *Měření vybraných parametrů izolace* [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/mereni-vybranych-parametru-izolace--10875>

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| Obrázek 1: Vývoj průmyslových aplikací [1]. | 10 |
| Obrázek 2: Logo firmy Bosch [3]. | 11 |
| Obrázek 3: Systém Common Rail [4]. | 11 |
| Obrázek 4: Vysokotlaké čerpadlo [4]. | 12 |
| Obrázek 5: Procesní průběh tepelného zpracování [5]. | 12 |
| Obrázek 6: Proces kalení [5]. | 13 |
| Obrázek 7: Konstrukce asynchronního elektromotoru s kotvou nakrátko [6]. | 14 |
| Obrázek 8: Řez statoru a rotoru [7]. | 15 |
| Obrázek 9: Momentová charakteristika asynchronního stroje [8]. | 16 |
| Obrázek 10: Proudová charakteristika asynchronního stroje [8]. | 16 |
| Obrázek 11: Zařazení spolehlivosti do kvality produktu [9]. | 17 |
| Obrázek 12: Proces údržby [12]. | 18 |
| Obrázek 13: Schéma analyzátoru pro měření vibrací [18]. | 22 |
| Obrázek 14: Kapacitní akcelerometr [19]. | 24 |
| Obrázek 15: Průběh kritéria velikosti vibrací [16]. | 25 |
| Obrázek 16: Grafické znázornění veličin vibrací [21]. | 26 |
| Obrázek 17: Frekvenční analýza [12]. | 26 |
| Obrázek 18: Příklad snímku s termografem. | 29 |
| Obrázek 19: Příklad nevyváženosti ve frekvenčním spektru [30]. | 33 |
| Obrázek 20: Motor pro míchání solné lázně. | 36 |
| Obrázek 21: Motor pro přívod studeného vzduchu do solné lázně. | 36 |
| Obrázek 22: Motor pro přívod vzduchu hořákům v peci. | 36 |
| Obrázek 23: Motor pro míchání atmosféry v hlavní peci. | 37 |
| Obrázek 24: Motor pro míchání atmosféry. | 37 |
| Obrázek 25: Vibrační senzor VSE005 [31]. | 38 |
| Obrázek 26: Jednotka VSE100 [32]. | 38 |
| Obrázek 27: Teplotní senzor TS2229 [33]. | 38 |
| Obrázek 28: Převodník měřicího signálu pro teplotní senzory [34]. | 38 |
| Obrázek 29: Termokamera řady Exx [35]. | 39 |
| Obrázek 30: Moduly systému Diris Digiware [38]. | 39 |
| Obrázek 31: Umístění senzoru pohled 1. | 40 |
| Obrázek 32: Umístění senzoru pohled 2. | 40 |
| Obrázek 33: Instalovaný systém SOCOMEC v rozváděcí skříni. | 40 |
| Obrázek 34: Založení nové skupiny a připojení VSE jednotek. | 41 |
| Obrázek 35: Nastavení základních parametrů VSE jednotky. | 41 |
| Obrázek 36: Přehled připojených VSE jednotek. | 42 |
| Obrázek 37: Přehled monitorovaných parametrů pro motor 1. | 43 |
| Obrázek 38: Záložka Monitoring - okno "Damage Level". | 44 |
| Obrázek 39: Spektrální analýza v programu Efactor Octavis. | 45 |
| Obrázek 40: Záložka History v programu Efactor Octavis. | 45 |
| Obrázek 41: Vývoj trendu parametru RMS na motoru 2, senzor 2. * | 46 |
| Obrázek 42: Výskyt BPFO ve frekvenčním spektru. | 51 |
| Obrázek 43: Termografické snímky motoru 1, a 6. | 52 |
| Obrázek 44: Návrh vizualizace šablony "přehled motorů". | 56 |
| Obrázek 45: Návrh vizualizace šablony "detail motoru". | 56 |
| Obrázek 46: Ukázka propojení senzorů přes OPC server až po program Reliance 4. | 57 |
| Obrázek 47: Vizuální návrh okna "přehled motorů". | 58 |
| Obrázek 48: Vizuální návrh okna "detailu motorů". | 58 |

| | |
|--|----|
| Obrázek 49: Umístění senzorů vibrací [16, 19]. | 60 |
| Obrázek 50: Přidání limitních hodnot do zobrazení vizualizace. | 61 |

SEZNAM TABULEK

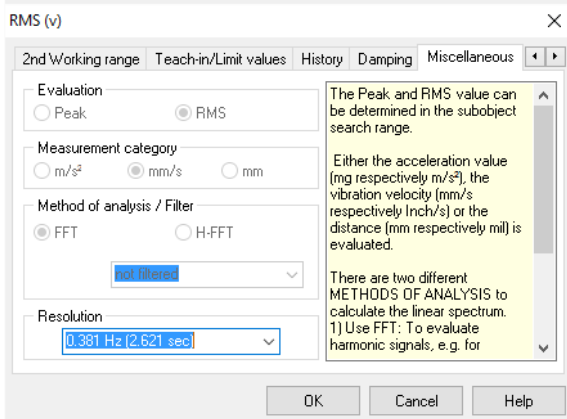
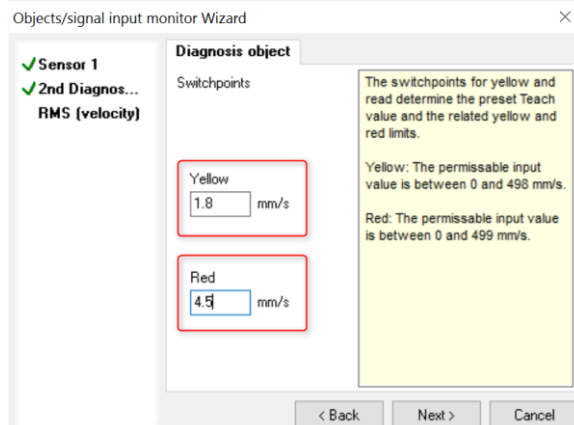
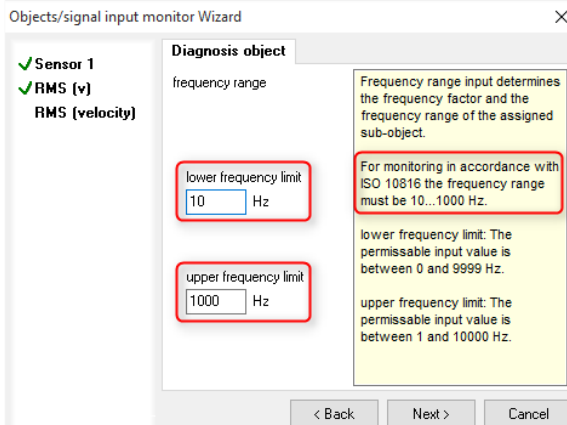
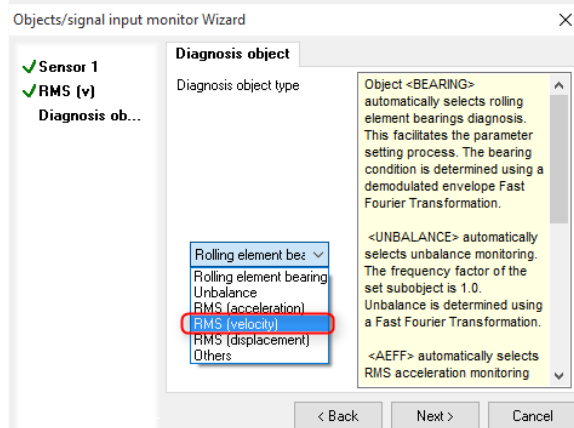
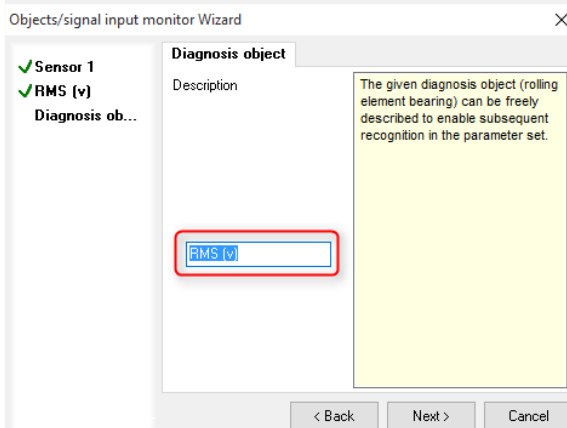
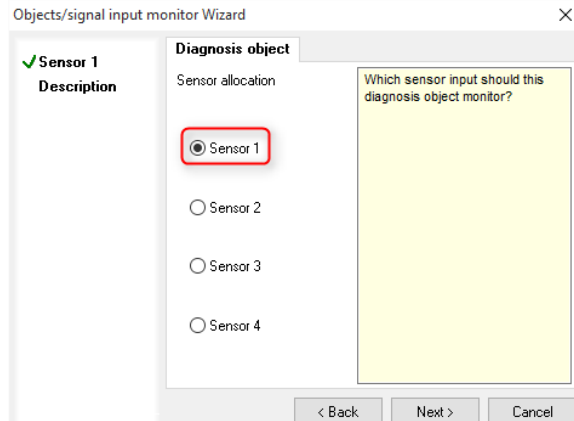
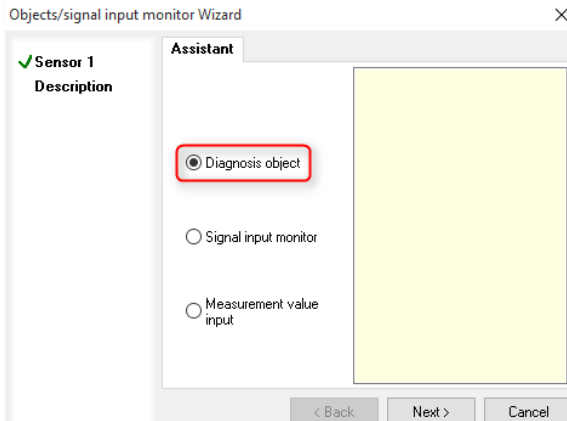
| | |
|---|----|
| Tabulka 1: Příklad přiřazení závad elektromotorů měřeným parametrům a metodám [13]. | 20 |
| Tabulka 2: Typy snímačů a místa měření pro střední a malé motory s valivými ložisky [14]. | 24 |
| Tabulka 3: Přehled chybových frekvencí pro ložiska sledovaných motorů. | 27 |
| Tabulka 4: Přehled monitorovaných motorů. | 37 |
| Tabulka 5: Typické hranice pásem [16]. | 42 |
| Tabulka 6: Vyhodnocení parametru RMS pro motor 1 a 2. | 47 |
| Tabulka 7: Vyhodnocení parametru RMS pro motor 3 a 4. | 47 |
| Tabulka 8: Vyhodnocení parametru RMS pro motor 5 a 6. | 48 |
| Tabulka 9: Vyhodnocení parametru RMS pro motor 7. | 48 |
| Tabulka 10: Vyhodnocení parametru: nevyváženost pro motor 1 a 2. | 48 |
| Tabulka 11: Vyhodnocení parametru: nevyváženost pro motor 3 a 4. | 49 |
| Tabulka 12: Vyhodnocení parametru: nevyváženost pro motor 5 a 6. | 49 |
| Tabulka 13: Vyhodnocení parametru: nevyváženost pro motor 7. | 49 |
| Tabulka 14: Vyhodnocení parametru frekvence vad ložisek (Rolling element bearing). | 50 |
| Tabulka 15: Vyhodnocení parametru teploty pro motory 1 a 2. | 51 |
| Tabulka 16: Vyhodnocení parametru teploty pro motory 3 a 4. | 51 |
| Tabulka 17: Vyhodnocení parametru teploty pro motory 5 a 6. | 52 |
| Tabulka 18: Vyhodnocení parametru teploty pro motor 7. | 52 |
| Tabulka 19: Shrnutí výsledku vyhodnocení parametrů vibrací a teploty. | 53 |
| Tabulka 20: Měřitelné parametry Diris Digiware D-50 [38]. | 54 |
| Tabulka 21: Porovnání měsíčního vývoje trendu parametru RMS pro motor 2. | 60 |
| Tabulka 22: Porovnání měsíčního vývoje trendu parametru teploty pro motor 2. | 61 |

SEZNAM PŘÍLOH

| | |
|--|----|
| Příloha 1: Nastavení parametru RMS..... | 70 |
| Příloha 2: Nastavení parametru Rolling element bearing. | 71 |
| Příloha 3: Nastavení parametru Unbalance..... | 71 |
| Příloha 4: Nastavení parametrů Teplota..... | 72 |
| Příloha 5: Naměřená data elektrických veličin. | 73 |

PŘÍLOHY

Příloha 1: Nastavení parametru RMS.



Příloha 2: Nastavení parametru Rolling element bearing.

The wizard consists of four steps:

- Step 1:** Selects the diagnosis object as 'Bearing'.
- Step 2:** Selects the diagnosis object type as 'Rolling element bearing' from a dropdown menu. The menu also includes 'Unbalance', 'RMS (acceleration)', 'RMS (velocity)', 'RMS (displacement)', and 'Others'.
- Step 3:** Shows a table of bearing specifications with '6211' selected. The table includes columns for DIN Bearing code, Manufacturer, Inner race, Outer race, Rolling element, and Balls.
- Step 4:** Sets the constant speed parameter to '950 rpm'.

| DIN Bearing code | Manufacturer | Inner race | Outer race | Rolling element | Balls |
|------------------|--------------|------------|------------|-----------------|-------|
| 6211 | SNR | 5.467 | 3.532 | 4.434 | 9 |
| 6211E | SF6 | 5.415 | 3.585 | 4.715 | 9 |
| 6211E | FAG | 5.422 | 3.578 | 4.677 | 8 |
| 6211 | KOYO | 5.904 | 4.096 | 5.348 | 10 |
| 6211 | SNR | 5.921 | 4.078 | 5.239 | 10 |
| 6211 | ZKL | 5.522 | 4.078 | 5.24 | 10 |
| 6211 | FAG | 5.332 | 4.078 | 5.24 | 10 |
| 6211 | SF6 | 5.322 | 4.078 | 5.238 | 10 |
| 6211 | NTN | 5.921 | 4.079 | 5.245 | 10 |

Příloha 3: Nastavení parametru Unbalance.

The wizard shows the configuration for 'Unbalance' monitoring:

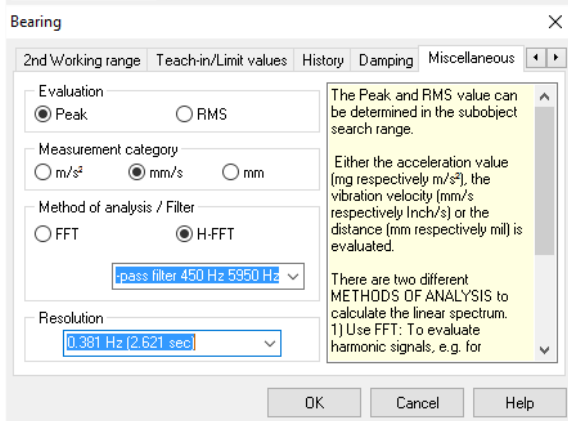
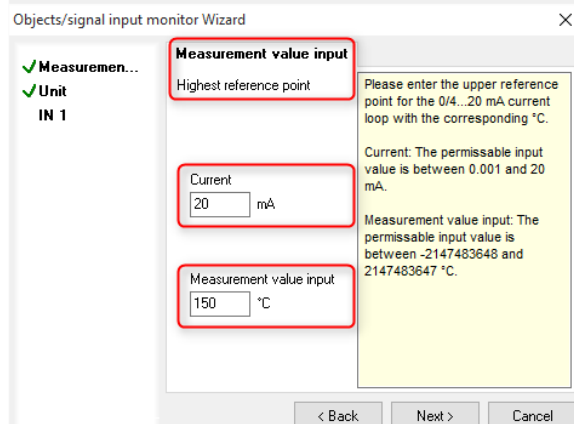
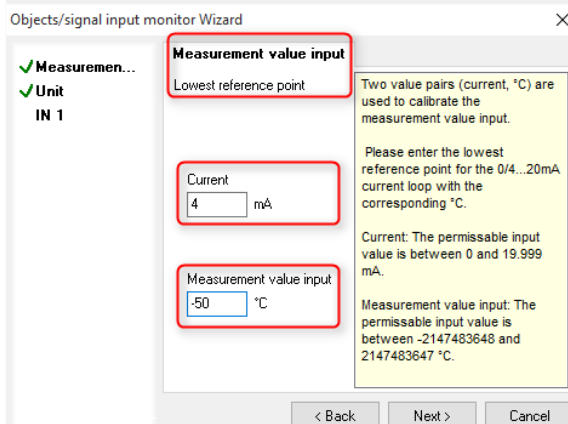
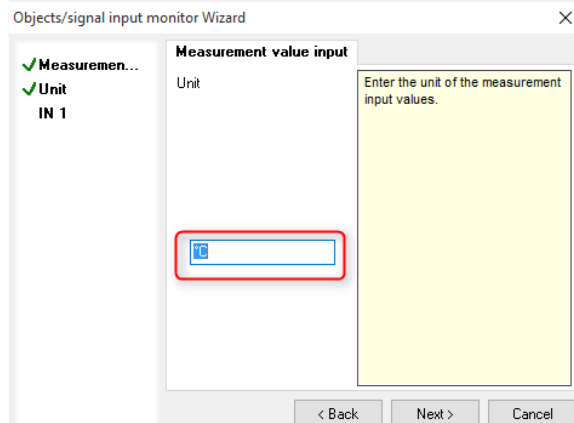
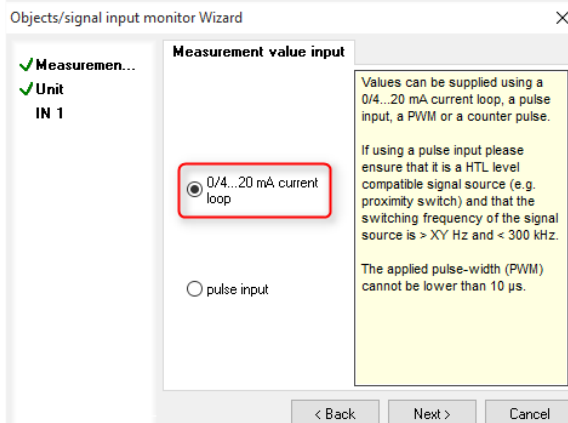
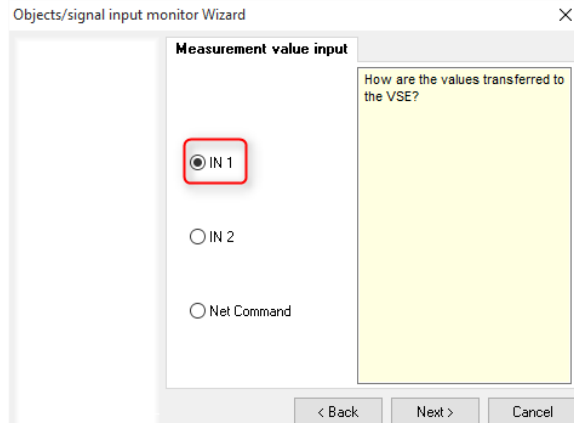
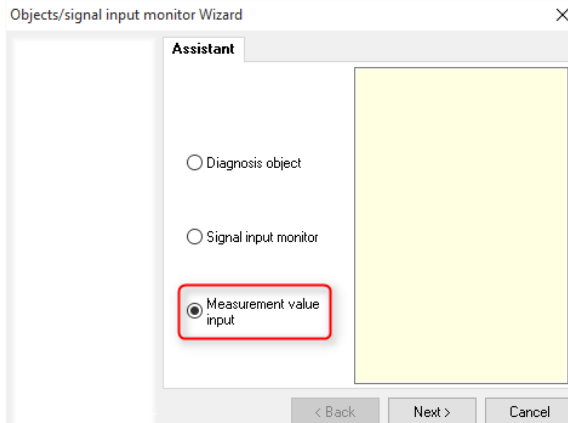
- Step 1:** Selects the diagnosis object type as 'Unbalance'.
- Step 2:** Sets the constant speed parameter to '950 rpm'.

The 'Unbalance' dialog box includes the following settings:

- Evaluation:** Peak, RMS
- Measurement category:** m/s², mm/s, mm
- Method of analysis / Filter:** FFT, H-FFT, Filter: not filtered
- Resolution:** 0.381 Hz (2.621 sec)

Help text in the dialog: 'The Peak and RMS value can be determined in the subobject search range. Either the acceleration value (mg respectively m/s²), the vibration velocity (mm/s respectively Inch/s) or the distance (mm respectively mill) is evaluated. There are two different METHODS OF ANALYSIS to calculate the linear spectrum. 1) Use FFT. To evaluate harmonic signals, e.g. for'

Příloha 4: Nastavení parametrů Teplota



Příloha 5: Naměřená data elektrických veličin.

| | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Current/L1 [A] | 3.61 | 3.64 | 7.73 | 0.49 | 3.37 | 3.65 | 9.05 |
| Current/L2 [A] | 3.65 | 3.68 | 7.94 | 0.51 | 3.53 | 3.61 | 9.63 |
| Current/L3 [A] | 3.67 | 3.70 | 8.09 | 0.50 | 3.60 | 3.67 | 9.56 |
| Current/AverageL1 [A] | 4.07 | 4.10 | 7.75 | 0.66 | 3.37 | 3.65 | 9.55 |
| Current/AverageL2 [A] | 4.11 | 4.14 | 7.96 | 0.68 | 3.53 | 3.62 | 10.16 |
| Current/AverageL3 [A] | 4.13 | 4.16 | 8.10 | 0.67 | 3.60 | 3.67 | 10.08 |
| Current/MaxL1 [A] | 8.19 | 8.53 | 13.42 | 6.06 | 3.50 | 3.79 | 11.94 |
| Current/MaxL2 [A] | 8.25 | 8.60 | 13.73 | 6.10 | 3.63 | 3.72 | 12.76 |
| Current/MaxL3 [A] | 8.24 | 8.59 | 13.92 | 6.11 | 3.74 | 3.82 | 12.63 |
| Current/THDL1 | 4.57 | 4.56 | 0.33 | 3.26 | 0.29 | 0.33 | 0.22 |
| Current/THDL2 | 4.59 | 4.58 | 0.33 | 4.19 | 0.27 | 0.28 | 0.33 |
| Current/THDL3 | 4.63 | 4.62 | 0.34 | 4.61 | 0.25 | 0.30 | 0.23 |
| Voltages/L12 [Hz] | 396.91 | 396.91 | 396.39 | 396.39 | 396.55 | 396.55 | 396.55 |
| Voltages/L23 [V] | 398.84 | 398.84 | 398.29 | 398.29 | 398.54 | 398.54 | 398.54 |
| Voltages/L31 [V] | 397.11 | 397.11 | 396.58 | 396.58 | 396.71 | 396.71 | 396.71 |
| Voltages/AverageL12 [V] | 396.94 | 396.94 | 396.40 | 396.40 | 396.56 | 396.56 | 396.56 |
| Voltages/AverageL23 [V] | 398.86 | 398.86 | 398.30 | 398.30 | 398.54 | 398.54 | 398.54 |
| Voltages/AverageL31 [V] | 397.13 | 397.13 | 396.59 | 396.59 | 396.72 | 396.72 | 396.72 |
| Voltages/MaxL12 [V] | 403.73 | 403.73 | 404.24 | 404.24 | 403.42 | 403.42 | 403.42 |
| Voltages/MaxL23 [V] | 405.93 | 405.93 | 405.46 | 405.46 | 405.69 | 405.69 | 405.69 |
| Voltages/MaxL31 [V] | 404.80 | 404.80 | 404.38 | 404.38 | 404.46 | 404.46 | 404.46 |
| Voltages/THDL12 [%] | 2.12 | 2.12 | 2.12 | 2.12 | 2.12 | 2.12 | 2.12 |
| Voltages/THDL23 [%] | 2.16 | 2.16 | 2.16 | 2.16 | 2.16 | 2.16 | 2.16 |
| Voltages/THDL31 [%] | 2.18 | 2.18 | 2.18 | 2.18 | 2.18 | 2.18 | 2.18 |
| Current/InstantP [kW] | 2.14 | 2.16 | 3.78 | 0.30 | 0.43 | 0.45 | 3.67 |
| Current/InstantPF | 0.99 | 0.99 | 0.69 | 0.96 | 0.18 | 0.18 | 0.57 |
| Current/InstantQ [kvar] | -19.82 | -19.67 | 389.96 | -3.73 | 236.82 | 246.60 | 532.52 |
| Current/InstantS [kVA] | 2.16 | 2.18 | 5.44 | 0.31 | 2.41 | 2.51 | 6.48 |
| Voltages/FrequencyInstant [Hz] | 50.00 | 50.00 | 50.00 | 50.00 | 50.00 | 50.00 | 50.00 |
| Voltages/FrequencyAverage [Hz] | 50.00 | 50.00 | 50.00 | 50.00 | 50.00 | 50.00 | 50.00 |