



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

PREDIKTIVNÍ SYSTÉM ÚDRŽBY OBRÁBĚCÍCH STROJŮ S VYUŽITÍM VIBRODIAGNOSTIKY

PREDICTIVE MACHINE TOOLS MAINTENANCE SYSTEM WITH THE USE OF
VIBRODIAGNOSTICS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Semotam

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Bc. Petr Semotam**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce: **doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.**
Akademický rok: 2017/18

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:

Prediktivní systém údržby obráběcích strojů s využitím vibrodiagnostiky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Firma Siemens, s.r.o., odštěpný závod Industrial Turbomachinery se zabývá výrobou průmyslových parních turbín s výkonem do 150 MW pro všechny typy aplikací. K tomuto účelu používá obráběcí stroje různých typů. V současné době se kromě rozvíjení reaktivní údržby věnuje možnosti nasazení preventivní a prediktivní údržby spojené s využitím technické diagnostiky, a to především vibrodiagnostiky.

Cíle diplomové práce:

1. Pojedejte obecně o údržbě a vibrodiagnostice v technické praxi.
2. Ve firmě Siemens, s.r.o., odštěpný závod Industrial Turbomachinery realizujte:
 - 2.1 Popište stávající stav údržby obráběcích strojů.
 - 2.2 Soustřeďte se na možnosti využití vibrodiagnostiky u obráběcích strojů.
 - 2.3 Navrhněte začlenění vibrodiagnostiky do systému údržby a informačního systému firmy.
 - 2.4 Realizujte diagnostická měření a výsledky vyhodnoťte.
 - 2.5 Rozeberte ekonomický přínos závěrů diplomové práce pro firmu.
3. Získané výsledky náležitě vyhodnoťte.

Seznam doporučené literatury:

VORLÍČEK, Zdeněk. Spolehlivost a diagnostika výrobních strojů. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1991. 128 s. ISBN 80-01-00510-0.

KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. Technická diagnostika. Senzory - metody - analýza signálu. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. 408 s. ISBN 80-7300-158-6.

HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER. Technická diagnostika a spolehlivost, II. Vibrodiagnostika. 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2005. 178 s. ISBN 80-248-0650-9.

LEGÁT, Václav a kol. Management a inženýrství údržby. 1. vyd. Příbram: Kamil Mařík PBtisk, 2013. 570 s. ISBN 978-80-7431-119-2.

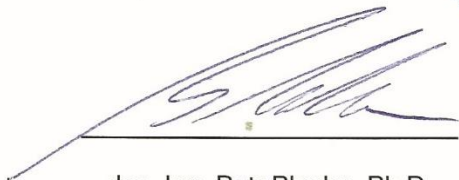
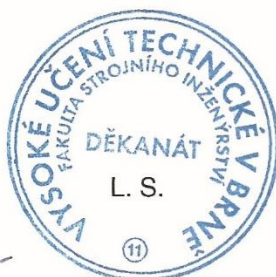
GREŇČÍK, Juraj a kol. Manažérstvo údržby- Synergia a teorie a praxe. 1. vyd. Košice: Slovenská spoločnosť údržby vo vydavateľstve: BEKI design, s.r.o Košice, 2013. 630 s. ISBN 978-80-89522-03-3.

MYKISKA, Antonín. Bezpečnost a spolehlivost technických systémů. 1. vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2006. 206 s. ISBN 80-01-02868-2.

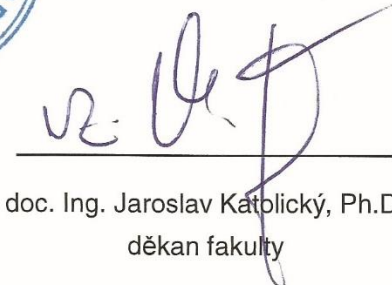
PAČAIOVÁ, Hana. Riadenie údržby II. Efektivnosť a bezpečnosť v údržbe. 1. vyd. Košice: TU v Košiciach, Strojnícka fakulta, 2011. 112 s. ISBN 987-80-553-0856-2.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne 27. 10. 2017



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



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

ABSTRAKT

Diplomová práce řeší problematiku systému prediktivní a preventivní diagnostické údržby obráběcích strojů s využitím vibrodiagnostiky. Studuje a zkoumá její vlivy napříč základními procesy systému údržby a charakterizuje vibrační diagnostiku jakožto její nástroj a prostředek. V praktické části je popsán proces zavádění diagnostické údržby do praxe. Vývoj je uskutečněn ve firmě Siemens, s. r. o. v Brně se všemi svými náležitostmi a aspekty jako např. audit údržby, tedy rozhodnutí o příhodnosti diagnostické údržby v rámci současného systému údržby, technické analýzy jako součást zavádění vibrační diagnostiky a praktická ukázka získávání, záznamu a posuzování změřených vibrací. Práce je zakončena ekonomickým zhodnocením projektovaného prediktivního systému údržby a návrhem obecného modelu vývoje a zavádění systému údržby do praxe.

ABSTRACT

This diploma thesis concerns issues of predictive and condition based maintenance system of machine tools with using a vibrodiagnostics. It studies and researches its impacts through the basic processes of the maintenance system and characterizes the vibration diagnosis as its tool and mean. There is also described a process of putting condition based maintenance into practice in the practical part of the thesis. The development is realized at Siemens Ltd. Brno with all its requirements and aspects such as a maintenance audit which means the decision on the suitability of condition based maintenance within the current maintenance system, technical analysis as a part of introduction of vibration diagnosis and the practical example of acquiring, recording and assessment of measured vibration. Prior to the end the economic evaluation of the planned predictive maintenance system and the design of the general model of development and implementation of the maintenance system into practice are included.

KLÍČOVÁ SLOVA

prediktivní systém údržby obráběcích strojů, systém preventivní diagnostické údržby, vibrační diagnostika, vibrodiagnostika, diagnostika strojních zařízení, procesy managementu údržby, TPM, totálně produktivní údržba, provozní spolehlivost, analýza způsobů a důsledků poruch, FMEA, FMECA, audit údržby

KEYWORDS

predictive maintenance system of machine tools, condition based maintenance system, vibration diagnosis, vibrodiagnostics, diagnostics of machineries, processes of maintenance management, TPM, Total Productive Maintenance, operational dependability, failure mode and effects analysis, FMEA, FMECA, maintenance audit

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SEMOTAM, P. Prediktivní systém údržby obráběcích strojů s využitím vibrodiagnostiky. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 109 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat p. doc. Ing. Miloši Hammerovi, CSc. za odborné vedení diplomové práce a vstřícnost při konzultacích.

Mé poděkování také patří firmě Siemens, s.r.o., odštěpnému závodu Industrial Turbomachinery v Brně za příležitost k vypracování praktické části diplomové práce, p. Vladimíru Pernicovi za ochotu, pomoc a věcné připomínky a mnoha dalším zaměstnancům za poskytnutí cenných rad.

Nakonec bych rád poděkoval své přítelkyni a rodině. Jsem vděčný za jejich vytrvalou podporu v průběhu celého studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 24. 05. 18

.....

Bc. Petr Semotam

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	TEORETICKÁ ČÁST	17
2.1	Údržba na základě skutečného technického stavu objektu	18
2.2	Charakteristika procesů managementu údržby	19
2.3	Vibrační diagnostika rotačních strojů	24
2.3.1	Klasifikace vibrací	25
2.3.2	Měření vibrací	27
2.3.3	Fourierova analýza	29
2.4	Komplexní produktivní údržba	31
2.4.1	Sledování celkové organizační efektivnosti	32
2.4.2	Plánování a kvalita v údržbě	33
2.5	Prediktivní údržba v integraci s informačním systémem firmy	35
3	PRAKTICKÁ ČÁST	37
3.1	Siemens, s. r. o., odštěpný závod Industrial Turbomachinery	37
3.2	Současný stav údržby v Siemens, s. r. o., odštěpný závod Industrial Turbomachinery	38
3.2.1	Finanční náročnost udržování majetku	41
3.2.2	Četnost odstávek klíčových strojních zařízení	42
3.2.3	Současný vývoj systému údržby v Siemens, s. r. o., odštěpný závod Industrial Turbomachinery	43
3.2.4	Vyhodnocení stávajícího stavu systému údržby	44
3.3	Využití vibrační diagnostiky u obráběcích strojů	44
3.3.1	Analýza historie poruch strojů Liechti	46
3.3.2	Systémová analýza Liechti Turbomill 800g	48
3.3.3	Specifikace měření	58
3.3.4	Analýza a posouzení rizik při měření	63
3.3.5	Postup pro vibrační měření	69
3.4	Záznam a vyhodnocení vibrací	72
3.4.1	Specifikace frekvenčních spekter vibrací	75
3.4.2	Analýza stroje Liechti BRQ100250 (4)	77
3.4.3	Analýza stroje Liechti BRQ100236 (3)	79
3.4.4	Analýza stroje Liechti BRQ100251 (1)	84

3.5	Integrace do podnikového informačního systému	86
3.6	Ekonomické zhodnocení.....	87
3.7	Další doporučení.....	91
3.7.1	Silové zatížení řezných nástrojů při frézování	91
3.7.2	Monitoring vibrací v reálném čase	93
4	ZHODNOCENÍ A DISKUZE.....	94
5	ZÁVĚR	97
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	99
7	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK	103
7.1	Seznam symbolů.....	103
7.2	Seznam zkratk.....	104
7.3	Seznam tabulek.....	106
7.4	Seznam obrázků.....	107
8	SEZNAM PŘÍLOH.....	109

1 ÚVOD

Údržba a zajištění údržby v mnoha strojírenských organizacích jsou považovány za nedílné podpůrné procesy s cílem zachovat provozuschopnost a způsobilost hmotného majetku, resp. dosáhnout a udržet požadované provozní spolehlivosti. Od 80. let 20. století údržba prošla svým značným vývojem a evolucí do podoby současného moderního pojetí. Údržbu a její zajištění je již nutné vzít v potaz v celém životním cyklu udržovaného objektu, přičemž je záměrem systému údržby zvyšovat spolehlivost a pohotovost objektu, efektivnost využívání dostupných finančních a materiálních prostředků, dosahovat vyšší bezpečnosti provozu a kvality produkce a snižovat dopad svých činností na životní prostředí. Veškeré takto zmíněné charakteristiky současné údržby sebou sice přináší např. vyšší výkonnost a efektivitu vynaložených nákladů, spolehlivost a pohotovost strojních zařízení, ale pro zachování konkurenceschopnosti organizací také vyžaduje pokročilý systémový a procesní přístup k řešení údržby s využitím dostupných aktuálních technických a informačních systémů.

Jedním z často využívaných přístupů k modernizaci údržby a také důležitým krokem na cestě k excelenci managementu údržby je diagnostická údržba využívající rozmanité a pokročilé měřicí a testovací prostředky s cílem diagnostikovat, resp. sledovat a zjistit poruchový stav udržovaného objektu. V rámci řízení údržby správně zavedené a funkční diagnostické systémy tak významně optimalizují plánování preventivního servisu, předcházející neočekávaným havarijním stavům a celkově zvyšují efektivnost provozu.

Diplomová práce se tedy zabývá tzv. 3. vývojovým stupněm systému údržby, a to prediktivní a preventivní diagnostickou údržbou dle skutečného technického stavu udržovaného objektu. V teoretické části práce je systém popsán a jsou naznačeny jeho jednotlivé vlivy napříč všemi základními činnostmi a procesy údržby a zajištěnosti údržby. Z důvodu, že jedním z nejpoužívanějších nástrojů tohoto systému údržby je vibrační diagnostika, součástí práce je také souhrn poznatků o ni. Jsou popsány vibrace jakožto zdroj informací pro stanovení provozního stavu technického zařízení, metody snímání a následně princip a postup v případě jejich hodnocení a analýzy.

Teoretická část je zakončena přehledem totální produktivní údržby v souvislosti s údržbou na základě technického stavu objektu a dále kapitolou týkající se integrace diagnostické údržby do informačního systému podniku.

V praktické části je demonstrován příklad zavádění a testování prediktivního systému údržby. Záměr je uskutečněn ve firmě Siemens, s. r. o. v Brně v rámci jejich současného vývoje v oblasti systému údržby, přičemž je brán ohled na jejich individuální technické, procesní a bezpečnostní aspekty. Praktická část je uzavřena podrobným ekonomickým výpočtem prezentující možné ušetřené finanční zdroje při využití navrženého systému prediktivní údržby a návrhem dalších doporučení usilujících o zlepšení údržby a provozu podniku.

V poslední řadě jako součást celkového zhodnocení je navržen obecný model a postup zavádění prediktivního systému údržby s využitím vibrační diagnostiky.

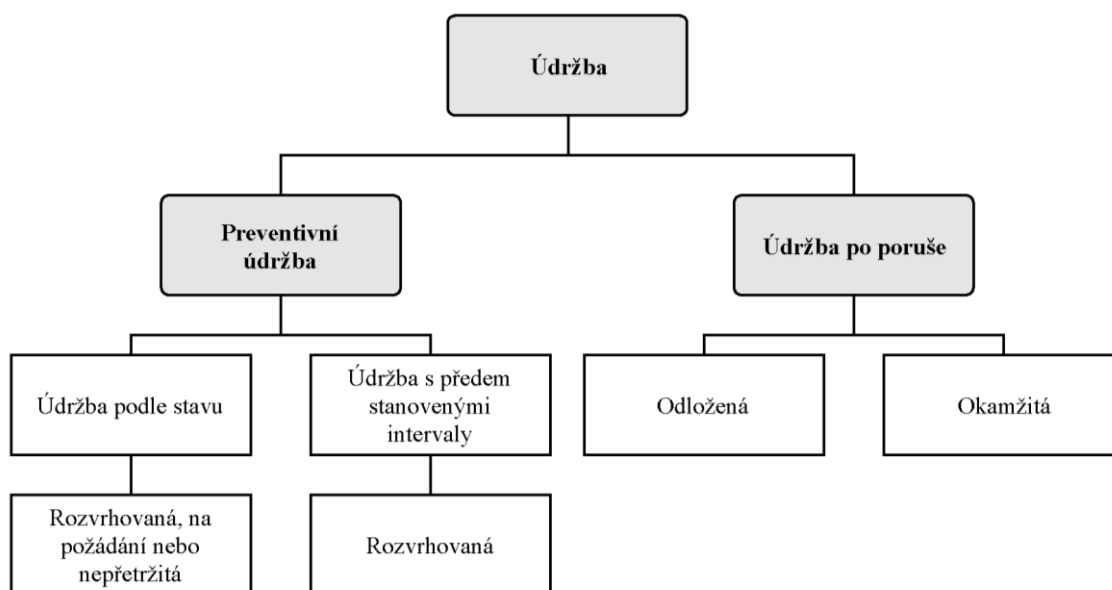
2 TEORETICKÁ ČÁST

Hlavní poslání údržby lze shrnout do úmyslu neustálého zvyšování provozní spolehlivosti v podniku. Provozní spolehlivost, tedy spolehlivost objektu v etapě provozu životního cyklu, závisí na poskytování údržby a jejího zajištění. „Údržba je klíčovým prvkem při zajišťování provozní spolehlivosti“. Její rozsah, typ a zajištění závisí na potřebách zákazníka/provozovatele, povaze objektu, jeho stavu a požadované pohotovosti. [1]

Na obr. 1 je znázorněné základní rozdělení využívaných systémů údržby. Ve výrobních závodech po celém světě se lze setkat s nejméně jedním typem daného systému, ne-li s jejich kombinacemi. Pro každé výrobní zařízení, systém, subsystém nebo součást a pro každý druh poruchy je vhodná jiná politika (systém) údržby. Rozhodnutí o aplikaci dané politiky všeobecně záleží na veškerých administrativních, ekonomických a technických aspektech organizace.

Dle normy ČSN EN 13306:2011 je údržba dělena na tři základní systémy údržby se všemi svými klady a zápory:

- Údržba po poruše (odložená x okamžitá);
- Preventivní periodická údržba (s předem stanovenými intervaly);
- Preventivní diagnostická údržba na základě technického stavu objektu (s předpovědí nebo bez). [2]



Obr. 1) Základní systémy údržby dle ČSN EN 13306:2011 [2]

V rámci teoretické části diplomové práce je zkoumána preventivní diagnostická údržba a její souvislost a vztah vůči hlavním procesům a činnostem údržby. V kapitole 2.1 je popsána podstata tohoto systému údržby a v kapitole 2.2 jsou vyličené základní fáze a stavební bloky vývoje systému údržby, přičemž je pozornost soustředěna na diagnostickou údržbu a její vliv na jednotlivé postupy. Kapitola 2.3 se zabývá popisem vibrační diagnostiky jakožto nástroje prediktivní údržby, charakteristikou vibrací a vibračního signálu, postupů jeho měření a následné analýzy. Teoretická část je zakončena tématem koncepce totálně produktivní údržby, resp. dosažení excelence a dále integrace diagnostické údržby do informačního systému firmy.

2.1 Údržba na základě skutečného technického stavu objektu

K teoretickému popisu a souhrnu strategie údržby na základě skutečného technického stavu objektu je využit článek autorů Ashok Prajapati¹, James Bechtel² a Subramaniam Ganesan³, jenž je vytvořen za účelem poskytnout stručný přehled o dané strategii údržby.

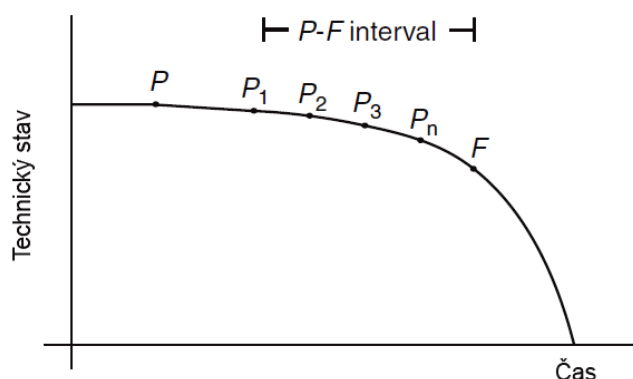
Údržba na základě technického stavu objektu (dále CBM⁴) je považována oproti preventivní a reaktivní údržbě za třetí možnou strategii k přístupu údržby strojních zařízení. Obecně se předpokládá, že strategie s postupným vývojem průmyslového odvětví se stále komplexnějšími technickými a výrobními zařízeními bude nadále nabývat na významu. Dle autorů tkví potenciál využívání především ve finančních úsporách z nákladů na údržbu, zlepšení provozní efektivity, snížení prostojů a zlepšení image firmy. [3]

Pro podnikový vývoj CBM je nezbytné porozumět průběhu selhávání využívaných zařízení, k čemuž může posloužit obr. 2. Křivka P – F zde znázorňuje postupný zhoršující se technický stav objektu v průběhu času. Křivka dále ukazuje významné body v provozní etapě životního cyklu výrobku. Bod (P) představuje počáteční, ale stále ještě nedetekovatelný výskyt poruchy, bod (P1) již poruchu potenciálně detekovatelnou a následně bod (F), tedy výskyt jevu porucha. Body (P2) až (Pn) následně představují možné, potenciální okamžiky k detekci nadcházejícího se poruchového stavu v závislosti na použité metodě detekce. Využití CBM tedy spočívá v sledování kritických a kriticky důležitých součástí při jejich postupné degradaci. [3]

S využitím CBM úzce souvisí technická diagnostika jakožto nástroj sloužící právě ke sledování, detekci, lokalizaci a identifikaci možné vzniklé nebo vznikající poruchy, přičemž diagnostika probíhá v testovém nebo v provozním režimu. Existují různé diagnostické metody využívány v rámci strategie CBM jako např. elektrodiagnostika, vibrodiagnostika, tribodiagnostika, termodiagnostika nebo ultrazvuková diagnostika. [3]

Kromě včasné detekce rozvíjející se poruchy je hlavním jádrem CBM prognóza, a tedy odhad časového období výskytu poruchy. V současné době je výzvou k daným aplikacím najít nebo vyvinout algoritmus dostatečně přesný, aby umožnil na základě dostupných dat odhadnout druh a termín výskytu chybového stavu provozovaného objektu. [3]

Závislost selhávání technického stavu objektu na čase provozu



Obr. 2) Průběh selhávání objektu v průběhu času (P – F křivka) [3]

¹ Ashok Prajapati z FANUC Robotics America Corporation, Oakland, Michigan, USA

² James Bechtel z PM Heavy Brigade Combat Team, US Army

³ Subramaniam Ganesan z Oakland University, Oakland, Michigan, USA

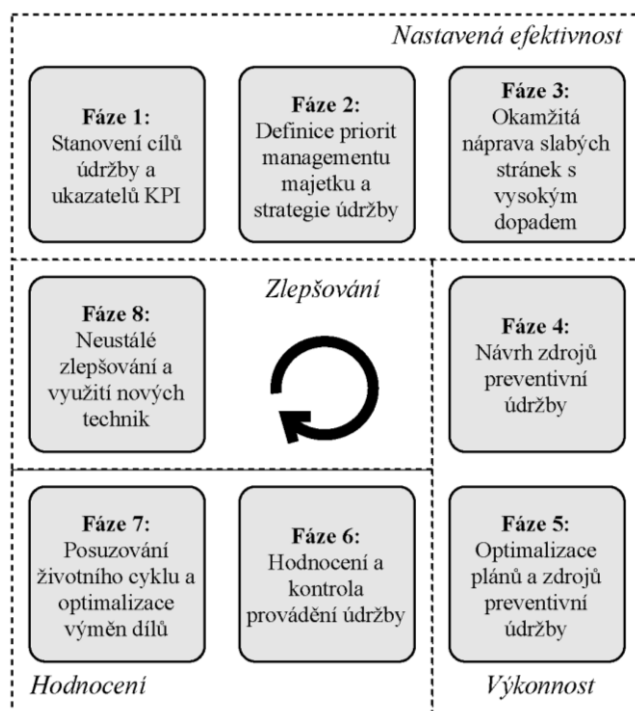
⁴ Zkratka CBM – Condition Based Maintenance v překladu údržba založená na technickém stavu objektu

Ze závěru textu vyplývá a autoři svůj článek zakončují stručným souhrnem o vývoji a možnostech využití koncepce údržby založené na skutečném technickém stavu. Údržba byla vždy nedílnou součástí každého podpůrného systému organizace. Většina takto fungujících procesů přísně dodržovala stanovené postupy a intervaly preventivní údržby bez ohledu na skutečný aktuální technický stav udržovaného objektu a skutečné životnosti součástí objektu s důsledkem plýtvání jak finančních, tak i časových prostředků. CBM v tomto případě tak poskytuje alternativní přístup k udržování hmotného majetku společnosti, který je v mnoha případech již prokázán jako významně efektivnější než dosud používané tradiční přístupy k údržbě. [3]

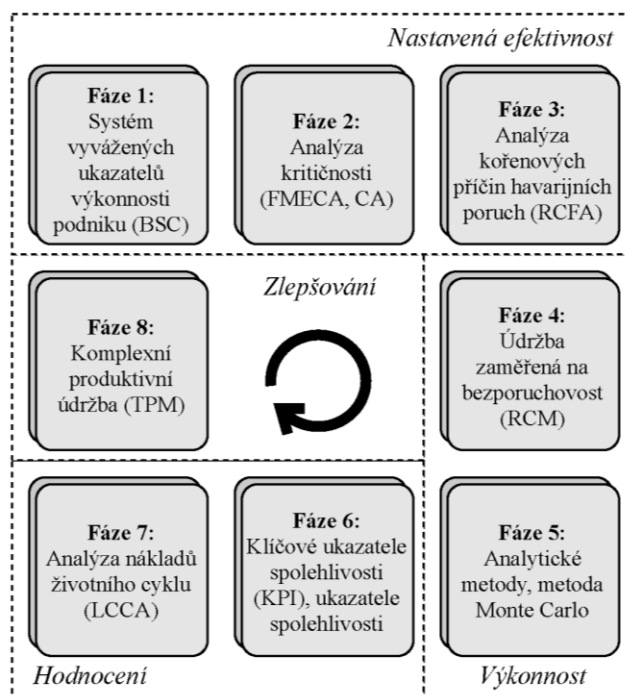
2.2 Charakteristika procesů managementu údržby

Proces systému řízení údržby a zajištění údržby může být jak v počátku zavádění, tak i v průběhu již fungujícího systému rozdělen na dvě části, na definici strategie údržby a implementaci této strategie. V případě první části je definována výkonnost, efektivita údržby a s ní také spjaté podmínky úspěšnosti údržby v organizaci. Efektivnost údržby zde obecně umožňuje minimalizaci nepřímých nákladů spojených s výrobními ztrátami v důsledku snížené kapacity výroby včetně také nespokojenosti zákazníků. Druhá část rozdělení, implementace stanovené strategie údržby, dovoluje minimalizaci přímých nákladů na údržbu, kdy vlivem zvýšené účinnosti údržby je produkováno méně nákladů, odpadu a zbytečných pracovních činností. [4]

Základní model managementu údržby může být složen z osmi sekvenčně řízených stavebních bloků. Model je zobrazen na obr. 3, přičemž na obr. 4 jsou dále navrženy nástroje k dosažení funkčnosti jednotlivých bloků. Necht' je v rámci diplomové práce model zobrazen za účelem stručného souhrnu vývojových etap organizace údržby a zmíněné nástroje jako přehled základních nástrojů údržby. [4]



Obr. 3) Model managementu údržby [5]



Obr. 4) Příklad nástrojů využívaných ve stavebních blocích managementu údržby [5]

Fáze 1: Stanovení cílů a ukazatelů údržby

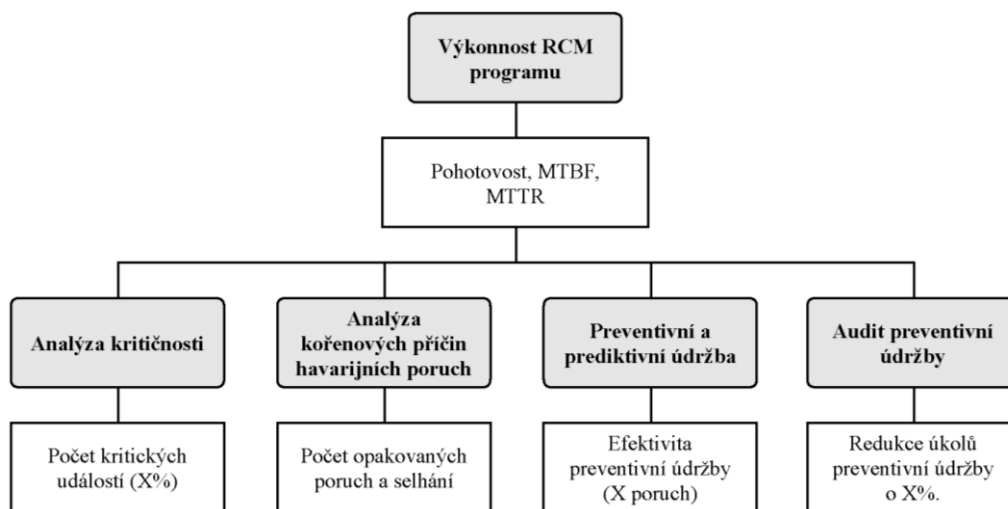
Pro úspěch útvaru údržby, potažmo celé organizace jsou správně stanovené cíle a strategie velmi důležité. Obecně by takto stanovené cíle, strategie a dále např. výkonnostní ukazatele neměly být v rozporu s politikou a strategií celé organizace. V této fázi je doporučeno využívat metody Balanced Scorecard (BSC), v překladu systém vyvážených ukazatelů výkonnosti podniku, jenž je pro danou organizaci vždy optimalizovaný a umožňuje správně stanovit výkonnostní cíle v podobě klíčových ukazatelů výkonnosti. BSC zde nastavuje celkovou strategii s důrazem na dosažení stanovených výkonnostních cílů. [5]

BSC je model, který překládá vizi a strategii do konkrétních a kvantifikovaných cílů, přičemž možné cíle rozděluje na finanční, uživatelské, vnitropodnikové procesy a vzdělávání. Příklad definovaných záměrů, cílů a strategie je ukázán v tab. 1. [5]

Tab 1) Příklad modelu BSC pro údržbu [5]

	Strategický cíl	KPI	Cíl	Akční plán	Perspektiva
Poslání a strategie	Zvýšit efektivitu údržby ve využívání financí	KPI I01	Současný: 5% Cíl: 4%	- Zajistit získávání správných dat - Analýza kritičnosti (FMECA) - Dodržování preventivní údržby	Finanční
	Zlepšit pohotovost klíčových výrobních zařízení	MTBF MTTR	↑ 20% MTBF ↓ 10% MTTR	- RCM program - Zlepšit managementu zdrojů zajištění údržby	Uživatelské
	Zlepšit procesy a dokumentaci údržby	Zavedení ISO 9001	Certifikace systému kvality před 31.12.2018	- Vyvinout veškeré zbývající postupy a technické specifikace	Interní procesy
	Zajistit vyhovující úroveň vzdělávání	Úroveň vzdělávání	Definovat přesné úrovně vzdělání a výcviku	- Definovat přesné úrovně vzdělání a výcviku - Hodnotit dosaženou úroveň odborné přípravy	Vzdělávání

Jak lze vidět ve schématu níže, v obr. 5, základní námi stanovený ukazatel, v tomto případě pohotovost, MTBF nebo MTTR, můžou mít v sobě zakomponované další ukazatele jej ovlivňující. Jestliže tak nastane s jedním z těchto ukazatelů problém, lze následně snadnějším způsobem zjistit příčinu případného zhoršení. [5]



Obr. 5) Indikátory zlepšující výkonnost RCM programu (viz. fáze 4) [5]

Fáze 2: Definice priorit managementu majetku a strategie údržby

Jakmile jsou z fáze 1 definované údržbářské záměry a strategie, existuje velké množství kvantitativních a kvalitativních technik a metod snažících se poskytnout systematický základ pro stanovení objektů a součástí, které by měly mít v rámci managementu údržby vyšší prioritu, resp. který hmotný majetek vyžaduje vyšší požadavek na případná opatření. Většina ze zmíněných kvantitativních technik využívá ke svému účelu tzv. „probability/risk number“ (PRN), v překladu „pravděpodobnostní/rizikové číslo“ které pro určení rizikovosti kombinuje pravděpodobnost vzniku nežádoucí události (P) se svou závažností a dopadem (C). Vzorec pro výpočet rizikového čísla je tak uveden v rovnici (1) níže. Výsledné kritické číslo je následně srovnáno s maticí kritičnosti, jež rozhodne o výši priority. [5]

$$R = P \cdot C \quad (1)$$

Jako další postup analýzy kritičnosti je využíván postup Failure mode, effects and criticality analysis - FMEA/FMECA, v překladu analýza způsobů, důsledků a kritičnosti poruch, jež v sobě kombinuje další parametr, možnost detekce (D). Metoda a její vypracování je sice časově a odborně více náročnější, za to ale poskytuje podrobný a systematický popis způsobů a příčin poruch. Její podrobnější popis a praktická ukázka aplikace se nachází v kap. 3.3.2.

Fáze 3: Opatření slabých stránek

Fáze 3 se zabývá zjišťováním a eliminací kořenových příčin selhání a poruch vyskytujících se u objektů s vysokým rizikovým číslem, resp. u takových položek, jejichž případné selhání má vysoký ekonomický, environmentální nebo bezpečnostní dopad.

Jako jedna z nejčastěji využívaných metod ke zjištění těchto kořenových příčin je metoda Root-cause failure analysis (RCFA), v překladu analýza kořenových příčin poruch. Metoda se skládá ze série kroků podniknutých za účelem zjištění skutečného důvodu, proč konkrétní chyba nebo problém nastává a dále se záměrem vyloučit tyto příčiny vhodnými opatřeními. [4]

Fáze 4: Návrh zdrojů a plánu preventivní údržby

4. fáze se na základě zjištěných rizikových položek a jejich kořenových příčin zabývá návrhem optimálního plánu preventivní údržby tvořeného použitelnými a účinnými údržbářskými úkony. Formální metodou ke stanovení těchto úkolů, potažmo celého plánu je využívána metoda Reliability Centre Maintenance (RCM), v překladu údržba zaměřená na bezporuchovost. [4]

Pro úplnost, údržbou zaměřenou na bezporuchovost (RCM) se zabývá norma ČSN EN 60300-3-11:2010 a definuje ji jako: „RCM je metoda pro identifikaci a výběr takových politik managementu poruch, aby se efektivně dosáhlo vyžadované bezpečnosti, pohotovosti a hospodárnosti provozu. Politiky řízení poruch mohou zahrnovat činnosti údržby, změny provozu, obměny návrhu či jiné zákroky za účelem zmíněných následků poruchy.“ [6]

Fáze 5: Optimalizace zdrojů a plánů preventivní údržby

Vykonávání stanovených údržbářských úkolů vyžaduje mnoho různých zdrojů, např. náhradní díly, spotřební materiál, vyškolené pracovníky údržby, nástroje a finanční prostředky. Řízení těchto zdrojů současně s jejich plánováním je nutné provádět tak, aby optimální množství zdrojů bylo k dispozici v potřebném termínu a v potřebné formě. V důsledku dostupnosti tak některé organizace vynakládají řadu finančních prostředků na udržování určitých a často zbytečných zdrojů, zatímco jiné zásadnější zdroje chybí.

Se záměrem zvýšit efektivitu politik údržby vycházejících z počátečního návrhu plánu a programu preventivní údržby se tak provádí optimalizace jak těchto plánů, tak i zdrojů údržby. K optimalizacím jsou využívány pokročilé analytické a matematické modely jako např. Markovovy spolehlivostní modely nebo model Monte Carlo. [5] „Markovův proces je definován jako konečný náhodný proces skládající se z posloupnosti provozních stavů systému, kdy pravděpodobnost kteréhokoliv stavu pouze závisí na stavu, jenž bezprostředně předchází a je nezávislý na stavech dřívějších.“ [7]

Využití modelu Monte Carlo pak tkví v generování určitých náhodných a diskrétních událostí za účelem vytvoření reálného scénáře fungování systému s následnou kalkulací odhadů parametrů výkonnosti. [5]

Fáze 6: Hodnocení a kontrola systému údržby

Fáze 6. se zabývá činnostmi údržby ve fázi provozu a udržováním hmotného majetku organizace. Za účelem neustálého zlepšování a dosahování stanovených cílů údržby se tak provádí kontrola a hodnocení těchto procesů. K posuzování se využívají ukazatele kvality, popřípadě i výkonnosti údržby. Využívá se zde kvantifikace důležitých vlastností procesu jako jsou bezporuchovost, udržovatelnost, pohotovost a životnost strojních zařízení. [8]

Hodnocení může být provedeno řadou spolehlivostních ukazatelů, např.:

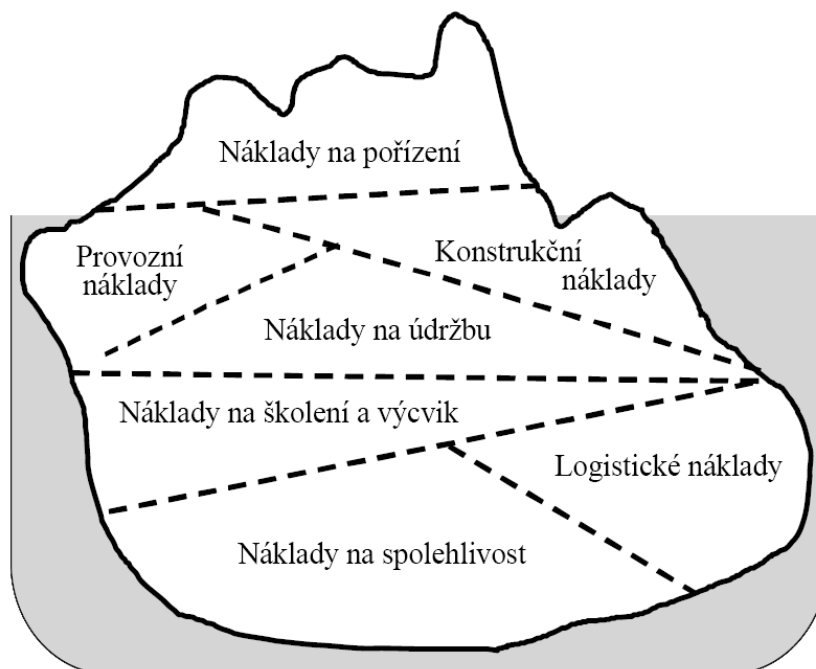
- Střední doba mezi poruchami MTBF (Mean Time Between Failures),
- Střední doba do poruchy MTTF (Mean Time to Failure),
- Střední doba do opravy MTTR (Mean Time to Repair),
- Střední doba logistického zpoždění MLDT (Mean Logistic Delay Time),
- Střední doba použitého stavu MUT (Mean Up Time Between Failures),
- Střední doba nepoužitého stavu MDT (Mean Down Time Between Failures), atd. [5]

Dle normy ČSN EN 15341:2010 je hodnocení zpracováno s pomocí i tzv. klíčových ukazatelů výkonnosti – KPIs (Key Performance Indicators). Metoda benchmarking, známá také jako MEE – Maintenance Efficiency Evaluation, tedy hodnocení efektivity údržby, je zaměřena na orientační porovnání procesu a výrobku s procesy a výrobky, jejichž hodnocení je považováno za nejlepší. Je vhodná jako nástroj pro zjištění příležitostí ke zlepšení a ke stanovení cílů úkolů a priorit při přípravě plánů. Metoda vyhodnocuje až 71 ukazatelů členěných do 3 skupin – ekonomické, technické a organizační. [9]

Fáze 7: Analýza nákladů na životní cyklus objektu

Analýza je provedena na základě aplikace metody LCCA, Life cycle Costs Analysis, v překladu analýza nákladů na životní cyklus. Metoda LCCA je definovaná jako systematický proces technickoekonomického zhodnocení, který je uplatňován při výběru a nahrazování výrobních systémů a který umožňuje současně zohlednit ekonomické a spolehlivostní aspekty s cílem kvantifikovat skutečný nákladový dopad v celém životním cyklu systému. Tímto způsobem tak lze vybrat položky, majetek, jenž má pro podnik největší přínos. [5]

Při odhadu skutečných nákladů na majetek/objekt společnosti je třeba zpracovávat velké množství různých proměnných, tedy různé nákladové aspekty, jež ovlivňují skutečný celkový výsledek. Častokrát nejsou při výpočtech nákladovosti k vidění veškeré položky jako např. náklady spojené s provozem, údržbou, testy, výcvikem a mnoho dalších. Při výpočtu tedy vzniká určitá nejistota výsledku. Obr. 6 ukazuje pomyslný ledovec znázorňující rozpětí všech nákladů počínaje jednodušší položkou, náklady na pořízení majetku a dále, různými hůře odhadnutelnými náklady. Z tohoto důvodu je vhodné při finanční a ekonomické optimalizaci, resp. výpočtu nákladů na objekt využít systematické metody LCCA. [5]



Obr. 6) Ilustrace nákladové neurčitosti

Závěr kapitoly

V relaci základních činností a procesů údržby s preventivní diagnostickou údržbou jak s předpovědí, tak i bez ní, lze nalézt řadu znaků, kterými tento systém údržby procesy ať už kladně či záporně ovlivňuje. Jestliže se vyjde ze závěru článku v kapitole 2.1 o údržbě na základě technického stavu a jejich pozitivních přínosech, tento správně zavedený a funkční systém údržby významně napomáhá k dosažení stanovených finančních, uživatelských i vnitropodnikových cílů a strategií. Zajišťuje vhodná opatření a snižuje kritičnost selhání klíčových výrobních zařízení v podniku. Podporuje proaktivní přístup ke slabým stránkám a přispívá k hledání kořenových příčin poruch. Diagnostická údržba vylepšuje preventivní údržbářské plánování s cílem udržovat položky organizace na základě jejich skutečného stavu a optimalizuje zdroje údržby za účelem efektivnějšího managementu lidských zdrojů a skladových zásob náhradní dílů nebo materiálu.

Mezi její nevyhody ve vztahu k procesům údržby patří především navýšení často těžko odhadnutelných nákladů na diagnostiku a její vyhodnocení a zvýšení výdajů spojených s obecně obtížnějším plánováním údržbářských zásahů, kdy je okamžik provedení údržby proměnný.

V konečném důsledku ale preventivní diagnostická údržba patří k podstatnému kroku na cestě k dosažení excelentnosti údržby. S jejím využitím lze v důsledku zkvalitňování spolehlivostních a dalších klíčových ukazatelů výkonnosti významně zvýšit efektivnost systému údržby a snížit její finanční a materiálovou náročnost.

Z popisů jednotlivých fází byla záměrně vynechána poslední fáze charakterizující neustálé zlepšování, popřípadě dosažení excelentnosti. Obecně je toto dosažení chápáno ve spojitosti se zavedenou a provozovanou koncepcí údržby TPM - Total productivity maintenance, v překladu komplexní produktivní údržba, která je více popsána v kapitole 2.4.

2.3 Vibrační diagnostika rotačních strojů

Jedním z nejpoužívanějších prostředků údržby na základě technického stavu je vibrodiagnostika. S touto skutečností je v rámci diplomové práce věnován prostor k popisu tohoto nástroje, jaký má význam a jaké jsou jeho výhody. V kapitole je proveden stručný popis vibrací, jak vznikají, jak se analyticky řeší a následně jakými prostředky mohou být zaznamenány. V závěru je následně vysvětlen postup a metoda zpracovávání měřených vibrací.

I zdánlivě malý problém v dynamice rotačního zařízení může při vysokých rychlostech způsobit velmi silné vibrace a otřesy prostupující do celé stavby stroje. Je také zřejmé, že v případě výskytu vibrací, kdy není provedena náprava, může dojít až k postupnému přenesení poruchy na další části. Vibrační diagnostika, jakožto nástroj údržby prediktivní a na základě skutečného technického stavu objektu, umožňuje včas a efektivně zachytit vznikající vadu způsobující vibrace, lokalizovat, identifikovat a dále podniknout veškerá opatření k její nápravě. Diagnostika na základě měření vibrací následně v systému řízení údržby napomáhá k optimalizaci plánování údržby, resp. ke zvýšení provozní spolehlivosti, životnosti a bezpečnosti strojního zařízení a tím výrazně zvýšit účinnost managementu údržby v užívání jak materiálních, tak i finančních prostředků. [10]

Obecně jsou rotační stroje složeny z rotoru (např. rotační hřídel nebo disk) a ložisek spojených s ložiskovou skříní. Mezi takového stroje lze ve strojírenství řadit např. parní a plynové turbíny, generátory, tryskové motory, kompresory, čerpadla, ventilátory, elektrické motory, převodovky nebo vřetena. Více specifickěji v sobě komponenty a součásti dále obsahují lopatky, trysky, spojovací elementy, těsnění, cívky a ozubená kola. Každá část z celkové stavby při svém provozu podléhá různým namáháním a silovým zatížením, díky kterým rotor nelze nikdy dokonale zbavit možnosti generovat vibrace. [10]

Rotorové vibrace způsobují v rotačních zařízení celou řadu problémů. Zvyšuje se cyklické, únavové zatížení, roste pravděpodobnost kolize rotorové a statorové části, vzniká možnost přenesení vibračních sil a následný defekt na dalších částech – ložiska, stacionární části. [10] Redukce možnosti vzniku vibrací začíná již v období návrhu a vývoje strojního zařízení, přičemž problematika vibrací prostupuje dále až do etapy provozu a údržby stroje, kterou se diplomová práce zabývá.

2.3.1 Klasifikace vibrací

Jednoduchý příklad vzniku vibrací lze znázornit na systému netlumených volných vibrací o jednom stupni volnosti. Ten je složen z hmotnosti m [kg] kmitajícího bodu a pružiny o tuhosti k [N/m]. Charakterizován je úhlovou (kruhovou) frekvencí ω_n [rad/s] (rovnice (2)), která může být převedena na frekvenci f_n [Hz] dle rovnice (3). [10]

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

$$f_n = \frac{\omega_n}{(2 \cdot \pi)} \quad (3)$$

Systém je znázorněn na obr. 7 a s využitím 2. Newtonova pohybového zákona je popsán diferenciální rovnicí (4), přičemž tzv. poměr tlumení charakterizující množství ztráty energie kmitů je $\zeta = 0$ [-]. Mimo frekvenci jsou vibrace ve schématu charakterizovány svou periodou T [s], tedy dobou trvání jednoho kmitu. V případě kmitání tlumeného, které je popsáno rovnicí (5), kdy poměr tlumení je vypočten dle rovnice (6), tedy $\zeta \neq 0$ [-], přichází tzv. koeficient tlumení $c \neq 0$ [N·s/m] charakterizující útlum vibrací. Takto popsané tlumené kmitání je ke zhlédnutí na obr. 8, kdy se ve schématu mimo pružiny a hmotného bodu nachází i tlumič o koeficientu tlumení c [N·s/m]. [10]

$$m\ddot{x} + kx = 0 \rightarrow \ddot{x} + \omega_n^2 x = 0 \quad (4)$$

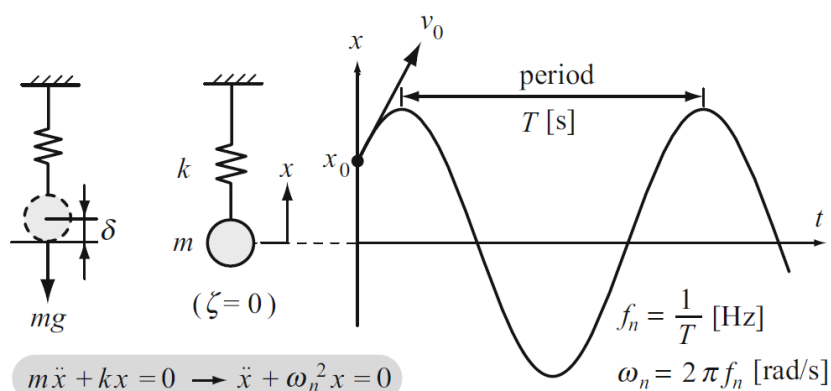
$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \rightarrow \ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2 x = 0 \quad (5)$$

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}} = \frac{c}{2m\omega_n} \quad (6)$$

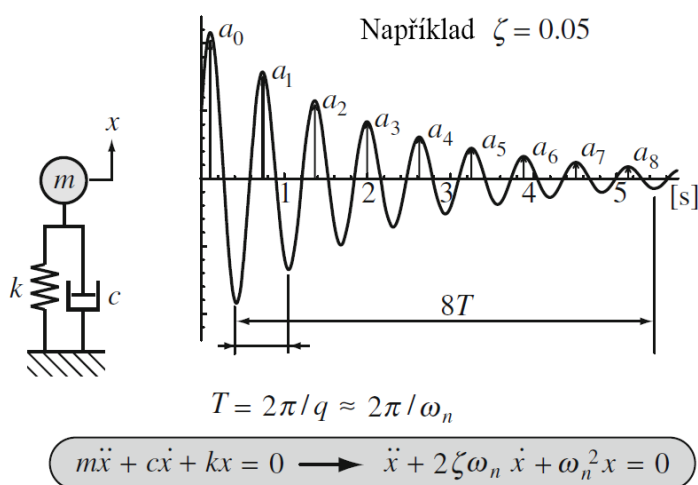
V inženýrství, a hlavně v etapě návrhu a vývoje objektu se vibrace řeší v oblasti dynamiky vázaných těles, kdy je většina strojů a strojních zařízení považována za soustavu různých těles. Základem pro jejich řešení je sestavení odpovídajícího dynamického modelu popisujícího právě mechanickou soustavu. V souvislosti s kmitáním a vibracemi se nejčastěji využívá simulačního modelování, nebo v případě početních úloh, obecné rovnice dynamiky (rovnice 7) a metody aplikace Lagrangeových rovnic 2. druhu. Hlavní výhodou metody a při řešení kmitání soustavy je, že metoda je založena na energetickém principu, tj. není potřeba řešit směr pohybu jednotlivých těles soustavy. [11]

V případě rovnice (7), jsou proměnné M , C a K totožné s předchozím popisem. V rovnici se dále vyskytuje proměnná $Q(t)$ popisující sílu buzení vibrací, a to vlivem samotného tělesa (např. nevyváženost) o síle U [N] generovaná o frekvenci otáčení Ω [s^{-1}] nebo vlivem vnějšího působení o síle F [N] a frekvenci ν [s^{-1}]. Jestliže vnější působící síla nebo síla např. od nevyváženosti objektu působí o frekvenci přibližující se přirozené frekvenci otáček objektu, tedy $\Omega \approx \omega_n$ nebo $\nu \approx \omega_n$, vzniká rezonance. Jev je doprovázen vznikem maximálních amplitud vibrací a hrozí vysoké riziko poškození součástí, potažmo celého strojního zařízení. [10]

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = Q(t) \quad (7)$$



Obr. 7) Systém netlumených volných vibrací [10]



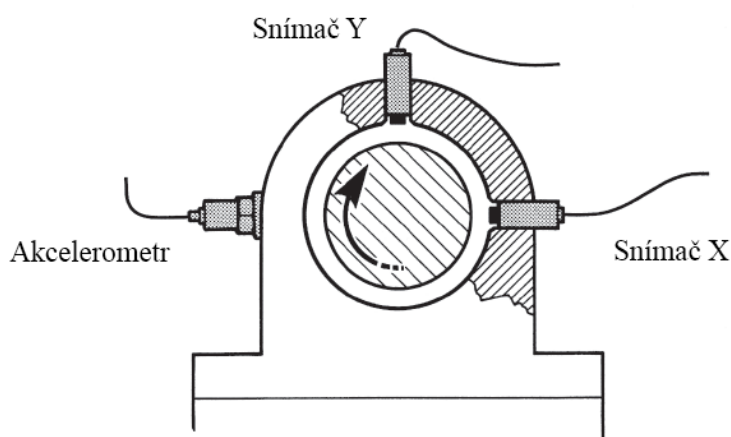
Obr. 8) Systém tlumených vibrací [10]

2.3.2 Měření vibrací

K měření vibrací, resp. signálu od vibrací, je využíváno tří typů snímačů – snímač výchylky, velometr a akcelerometr. Každý snímač měří jinou fyzikální veličinu charakterizující vibrační signál:

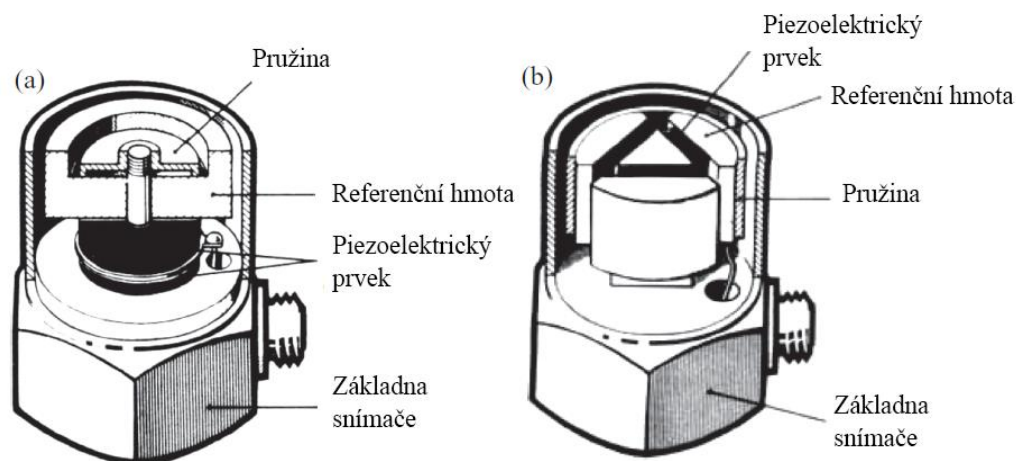
- výchylka vibrací $x(t)$ [μm],
- rychlost vibrací $v(t)$ [mm/s],
- zrychlení vibrací $a(t)$ [m/s^2].

Jediným praktickým využitím snímače výchylky vibrací je při měření relativní výchylky posunutí. Rozeznáváme tedy měření absolutních a relativních vibrací, kdy jsou velometry a akcelerometry využívány při absolutním měření rychlosti a zrychlení, resp. absolutního pohybu. Obě varianty jsou znázorněny na obr. 9. V obrázku se nachází otáčející se hřídel vůči pevnému statoru a radiální zapojení tří snímačů - první, vodorovně zapojený akcelerometr a dva snímače výchylky. Snímače výchylky zde měří relativní pohyb mezi hřídelí a skříní nebo ložiskovým domem, zatímco akcelerometr měří vibrace absolutní vůči nehybné soustavě. Je důležité si uvědomit, že výsledky obou typů měření jsou vůči sobě velmi odlišné. Zatímco relativní pohyb má smysl měřit obzvlášť v souvislosti s posuzováním vůlí mezi rotorovou a statorovou částí, absolutní vibrace se měří za účelem zjistit působící namáhání dynamickými silami od hřídele vůči ložisku, resp. struktuře stroje. [12]



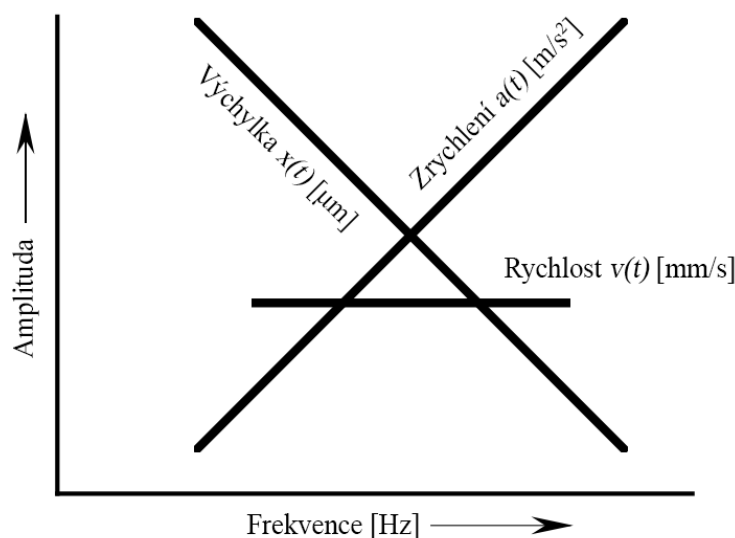
Obr. 9) Ilustrace absolutního a relativního měření hřídelových vibrací [12]

Z důvodu využívání akcelerometrů v praktické části diplomové práce je následně popsána stavba těchto senzorů. Akcelerometry jsou převodníky, které produkují signál úměrný zrychlení vibrací. Zdaleka nejběžnějšími typy snímačů v rámci monitorování technického stavu stroje jsou tzv. piezoelektrické akcelerometry využívající piezoelektrické vlastnosti určitých krystalů a keramik. Piezoelektrické prvky zde vlivem napětí a deformace vytváří úměrný elektrický náboj. Na obr. 10 jsou znázorněny dvě typické stavby snímačů tohoto typu. V případě tlakových snímačů je piezoelektrický prvek umístěn mezi referenční hmotou a základnou – tedy jeho deformace vzniká vlivem tlaku. U smykového snímače, jehož piezoelektrický prvek je uložen kolmo kolem středového sloupku, elektrický náboj vzniká vlivem smykové deformace. [12]



Obr. 10) Typické stavby snímačů: a) tlakový; b) smykový [12]

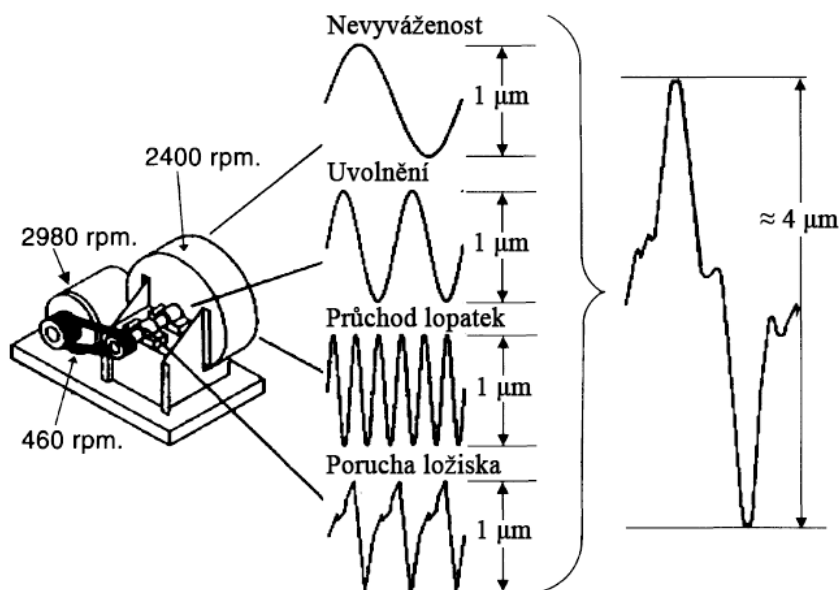
Obr. 11 ve zjednodušené formě ukazuje typické měřicí frekvenční rozsahy hlavních tří typů snímačů, resp. měřených veličin. Je zřejmé, že měřený frekvenční rozsah rozhoduje o správné volbě snímače, resp. měřené veličiny. Vibrace vykazující vysokou výchylku, tedy vibrace nacházející se v nízkém frekvenčním spektru (do cca. 10 Hz) mají daleko nižší zrychlení nežli vibrace vysokofrekvenční s vysokou hodnotou zrychlení. Jestliže tedy měření zahrnuje vysoké frekvence vibrací (nad cca. 1000 Hz), je nasnadě využít akcelerometr. Naopak při měření kolem otáčkové frekvence rotujícího objektu přibližně v rozsahu 10 až 1000 Hz je vhodné k záznamu vibrací využít snímač rychlosti. [13]



Obr. 11) Typické měřicí frekvenční rozsahy hlavních tří typů snímačů, resp. měřených veličin vibrací [13]

2.3.3 Fourierova analýza

Základním konceptem Fourierovy analýzy je vyjádření vibračního signálu množinou sinusových složek. Příklad signálu a jeho složek lze vidět na obr. 12, kdy jednotlivé složky představují signály různých poruch ve strojní sestavě o různých frekvencích. Snímaný vibrační signál je z těchto složek sestaven a následně detekován snímačem. Fourierova transformace je aplikovaná za účelem rozložení snímaného signálu na jednotlivé složky do frekvenčního spektra. Z pohledu analýzy je účelem rozlišit složky o daných frekvencích a velikostech a přiřadit je správnému druhu poruchy. Až na několik výjimek je tímto způsobem možné rozložit prakticky veškeré signály.



Obr. 12) Vibrační signál složený z řady složek o různých frekvencích představujících jednotlivé druhy poruch strojní soustavy [14]

Při analýze vibrací stroje jsou využity především periodické signály produkované součástmi strojního zařízení. Každý takový periodický signál $g(t)$ o své periodě T lze vyjádřit dle rovnice (8). [12]

$$g(t) = g(t + nT) \quad (8)$$

, kde n je libovolné celé číslo. Funkce $g(t)$ tedy může být vyjádřena jako:

$$g(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega_0 t) \quad (9)$$

, kde ω_0 [rad/s] je základní úhlová frekvence ($= 2\pi/T$) a Fourierovy (spektrální) koeficienty a_n a b_n mohou být vyjádřeny dle vztahu (10), resp. (11). [12]

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} g(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (10)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} g(t) \sin(n\omega_0 t) dt \quad (11)$$

Současné využívané analyzátory nepracují se spojitou, ale s diskrétní časovou vlnou, kdy je signál zaznamenán jako posloupnost N diskrétních hodnot s pravidelnými časovými rozestupy o intervalu T , tedy o jednotlivých časových úsecích t_n ($n = 1, N$). Fourierovy koeficienty jsou často také zobrazovány ve formě amplitudy $c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ a fáze $\phi_n = \tan^{-1}(b_n/a_n)$. Výslednou Fourierovu řadu lze konečně zapsat jako vztah (12). [13]

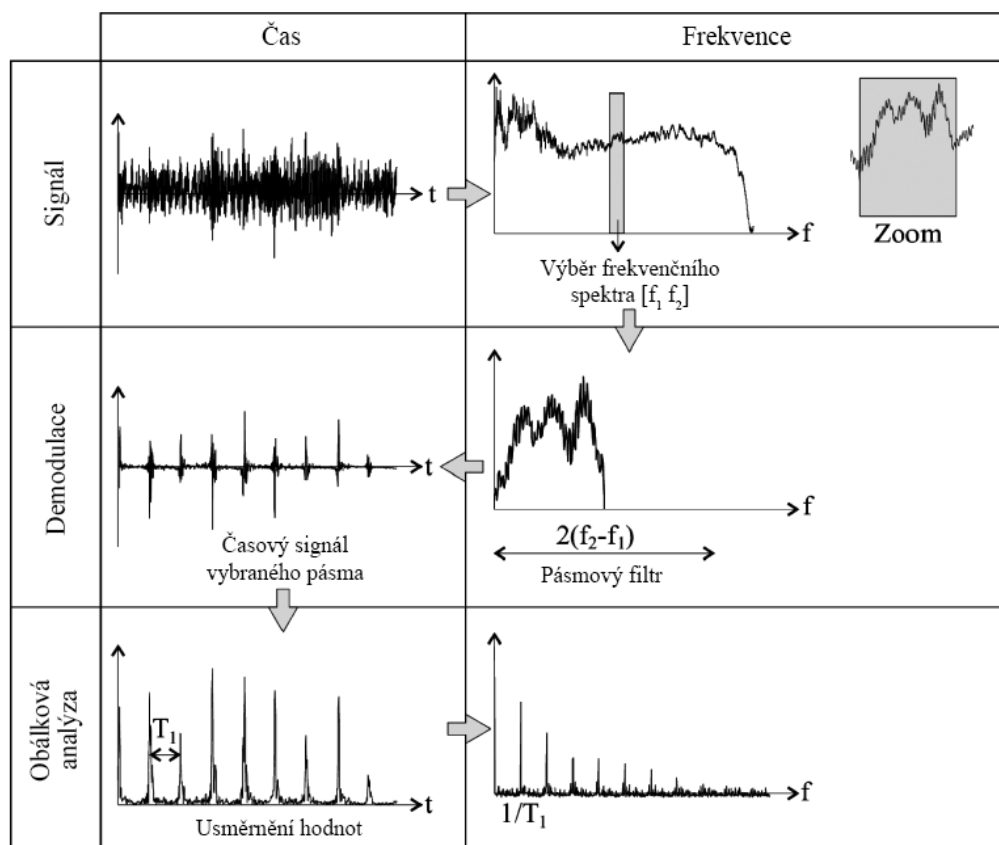
$$g(t_n) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N/2} (c_n \cos(n\omega_0 t_n + \phi_n)) \quad (12)$$

Postup a ukázka analýzy výsledného frekvenčního spektra je znázorněno v praktické části diplomové práce.

Obálková analýza

Co se týče diagnostiky ložisek ve strojírenské praxi, je velmi důležitým faktem, že frekvenční spektrum změřeného vibračního signálu častokrát obsahuje i velmi málo diagnostických informací o jejich poruchách. Za tímto účelem je tak při diagnostice ložisek využívána již řadu let tzv. obálková analýza, resp. obálka zrychlení. Zrychlení proto, protože pouze u parametru zrychlení vibrací lze s dostatečným předstihem indikovat závadu. [12]

Princip a postup obálkové analýzy je k vidění v obr. 13. Surový signál je pásmovým filtrem omezen na vysokofrekvenční pásmo v rozsahu $[f_1 f_2]$, v kterém se nacházejí impulsy nastávajících ložiskových poruch. Signál je za účelem obálkové analýzy následně demodulován, aby tvořil obalový signál, jehož frekvenční spektrum obsahuje požadovanou diagnostickou informaci o případných poruchách. [12]

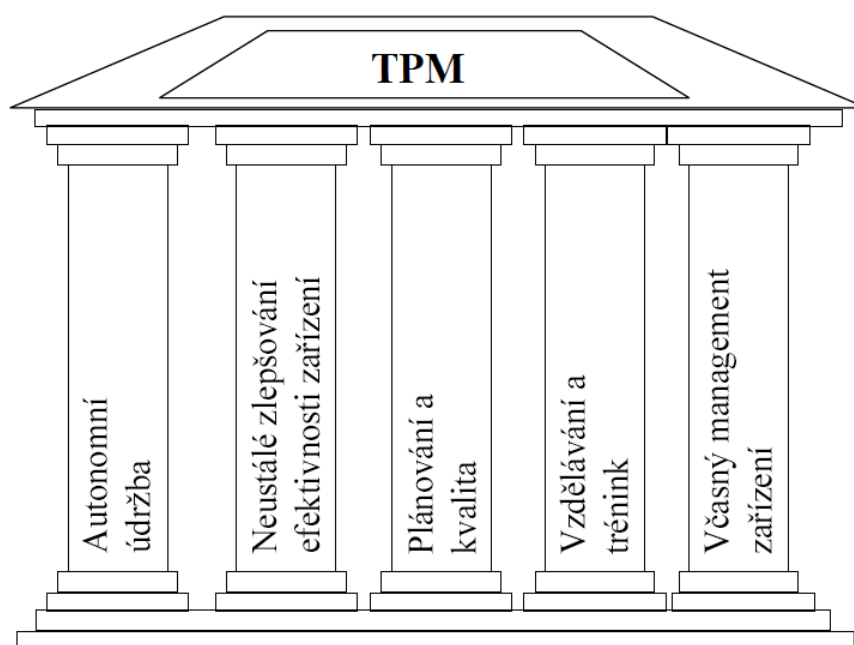


Obr. 13) Princip a postup obálkové analýzy [12]

2.4 Komplexní produktivní údržba

V rámci neustálého zlepšování a aplikací nových technik a postupů k řízení a zajištění údržby je v dnešní době zaváděna koncepce komplexní produktivní údržby často také nazývaná jako totálně produktivní údržba (zkratka TPM). Údržba je v moderních výrobních organizacích pojímána jako jedna z nejzákladnějších výrobních činností, kdy se k dosažení „provozní excelence“ do údržby, potažmo provozní spolehlivosti, zapojují zaměstnanci všech podnikových úseků a všech úrovních. Provozní excelence je v kontextu TPM chápána jako maximalizace celkové efektivity výrobních zařízení. K dosažení této efektivity je využíváno mnoha metod, konceptů a přístupů. [5]

Existuje pět základních pilířů (obr. 14) tvořící rámec TPM, které by měly být pro dosažení excelence zavedeny:



Obr. 14) Základní pilíře metodiky TPM [5]

1. Autonomní údržba. V rámci autonomní údržby se obsluze výrobních zařízení dává zodpovědnost za některé úkony údržby. Zatímco pracovníci údržby vyvíjející preventivní údržbu jsou zodpovědní za komplexnější údržbářské úkoly, popřípadě údržbu po poruše, personál provozu přebírá „vlastnictví“ za jednotlivé objekty a za jejich obecnou péči. Pracovníci úseku údržby tak obvykle vykonávají podpůrnou roli obsluze strojů ve formě školení, diagnostiky a hodnocení.
2. Neustálé zlepšování efektivnosti zařízení. Jedná se o funkci, kdy koncepce TPM zapojuje veškeré zaměstnance v identifikaci a zkoumání všech ztrát vznikajících na výrobních zařízeních – prostoje, ztráty rychlosti a ztráty vlivem neshodných výrobků.
3. Plánování a kvalita. Při veškerých údržbářských procesech a činnostech je důležitý systematický přístup. Tento aspekt zahrnuje stanovení plánu preventivní údržby pro každou vhodnou součást daného zařízení, vytvoření údržbářských standardů (např. postupové plány, databáze znalostí a zkušeností) a nastavení příslušných odpovědností jak pro pracovníky v provozu, tak i pro pracovníky údržby.

4. Vzdělávání a trénink. Nové povinnosti provozních a údržbářských pracovníků vyžaduje osvojení řady nových a nezbytných dovedností. TPM tedy klade velký důraz na vhodné a kontinuální školení a výcvik.
5. Včasný management zařízení. Jako součást životního cyklu objektu se TPM snaží sledovat veškeré potenciální příčiny poruch strojů tak, aby jejich vzniku zamezilo již v etapách návrhu a vývoje, výroby nebo instalace. [5]

V souvislosti s diplomovou prací jsou následně popsány ty body, u kterých vlivem zavedení prediktivní údržby s využitím vibrační diagnostiky dojde k jejich ovlivnění.

2.4.1 Sledování celkové organizační efektivnosti

Je třeba, aby každá pracovník a zaměstnanec na všech podnikových úrovních byl zapojen do neustálého zlepšování využívání výrobních strojů. Aby tohoto bylo dosaženo, je nezbytné identifikovat a následně omezit nástup všech potenciálních druhů ztrát vytvořené vlivem řízení pracovníků, strojních zařízení, materiálového toku nebo vlivem energií potřebných pro provoz. V souvislosti s údržbou na základě skutečného technického stavu výrobních zařízení tak jde především o ovlivnění ztrát z technického hlediska na konkrétních strojích. Možné ztráty jsou zobrazeny na obr. 15. [5]

Efektivnost strojů a zařízení se zjišťuje na základě tzv. OEE [%], Overall Equipment Effectiveness v překladu koeficient celkové efektivnosti zařízení vypočítaný dle vztahu (13), přičemž koeficienty pohotovosti (A, Availability), výkonnosti (E, Efficiency) a kvality (Q, Quality) jsou určeny dle rovnice (14), (15) a (16). [15]

V organizacích, kde management údržby není patřičně vyvinut a včleněn do řízení výroby, dosahují hodnoty OEE průměrně 50–60%. V celosvětovém měřítku je v případě zavedení TPM možné dosáhnout hodnoty až 85%. [5]

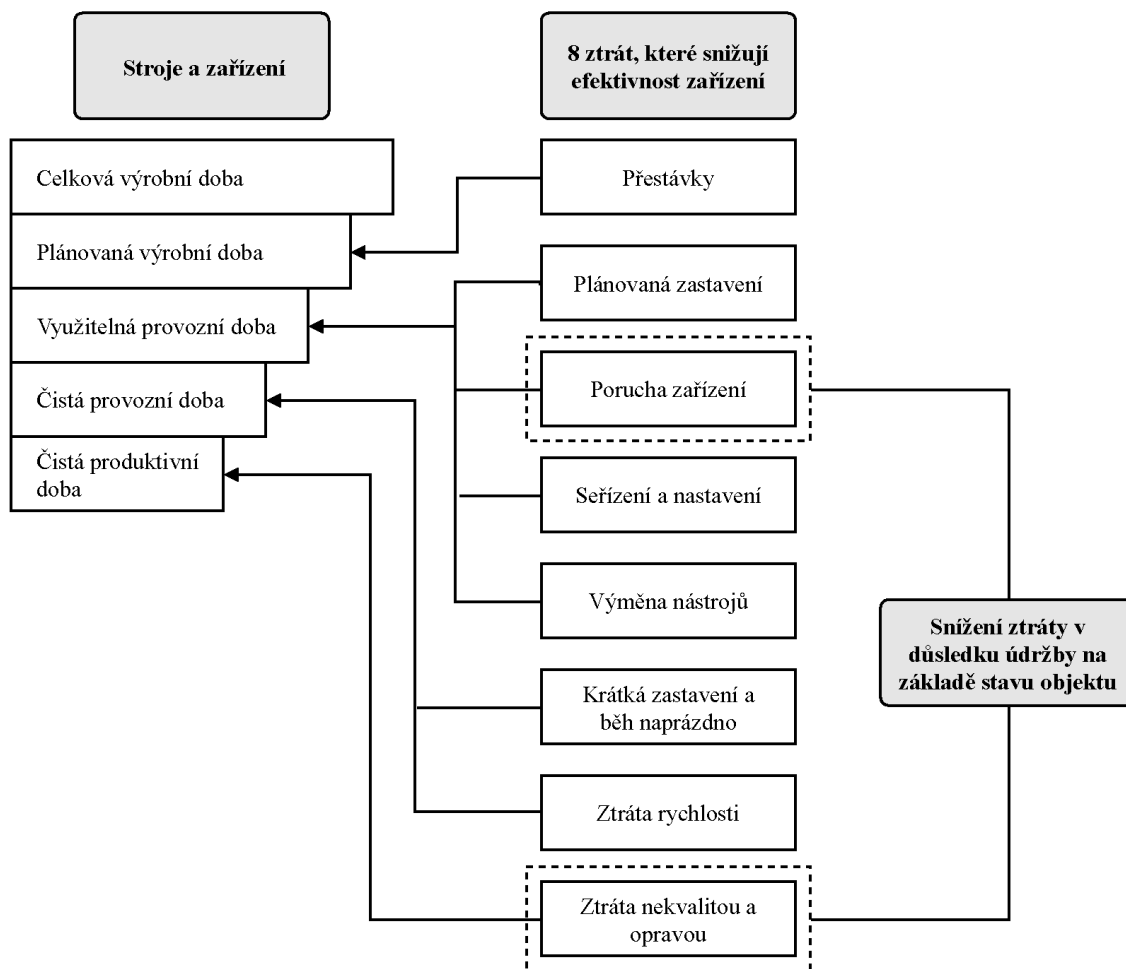
$$OEE = \text{Pohotovost (A)} \cdot \text{Výkonnost (E)} \cdot \text{Kvalita (Q)} \quad (13)$$

$$A = \frac{\text{plánovaný čas provozu} - \text{čas přerušení}}{\text{plánovaný čas provozu}} \cdot 100\% \quad (14)$$

$$E = \frac{\text{normovaný čas na kus} \cdot \text{počet vyrobených kusů}}{\text{skutečný operační čas}} \cdot 100\% \quad (15)$$

, kde $\text{skutečný operační čas} = \text{plánovaný čas provozu} - \text{čas přerušení}$
 $\text{čas přerušení} = \text{údržba po poruše} + \text{seřízení}$

$$Q = \frac{\text{počet vyrobených kusů} - \text{počet vadných kusů}}{\text{počet vyrobených kusů}} \cdot 100\% \quad (16)$$



Obr. 15) 8 ztrát snižující efektivnost zařízení [5]

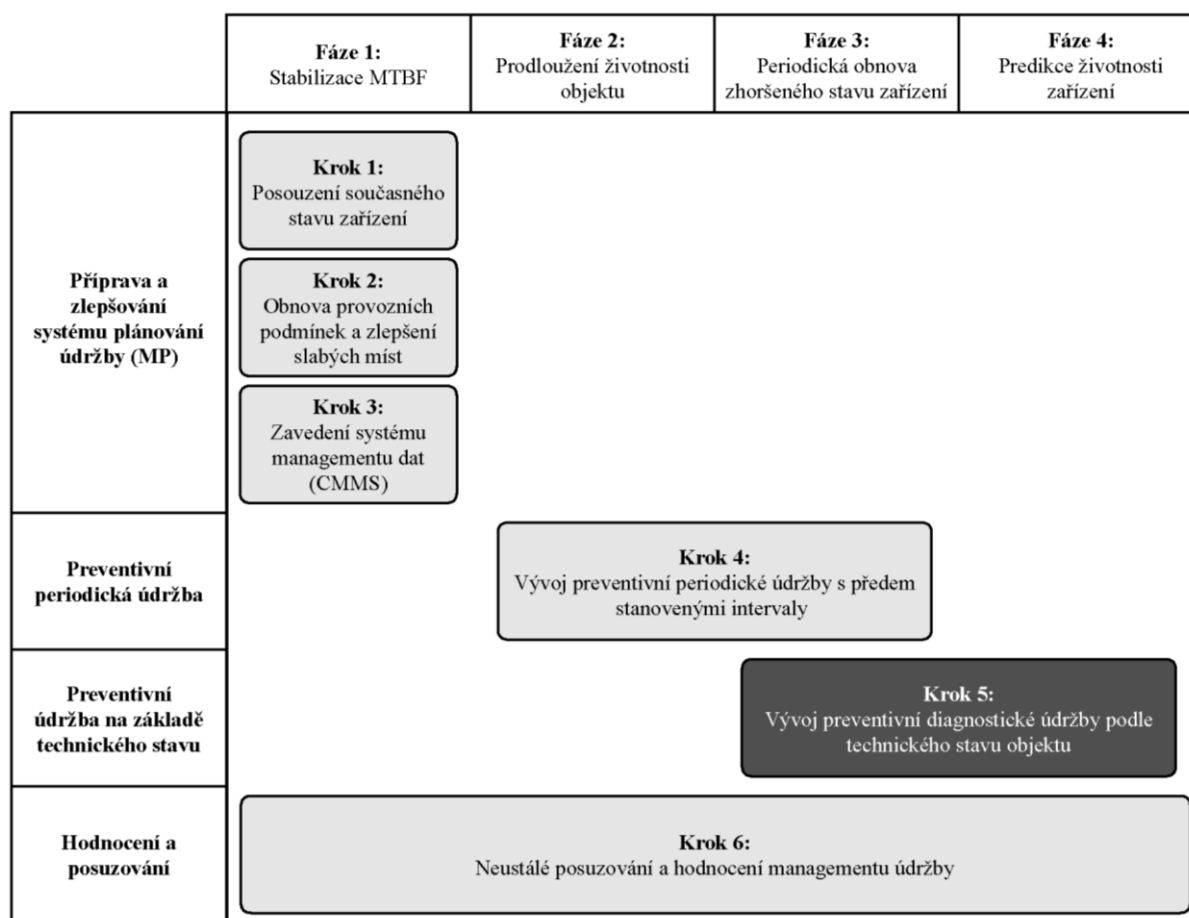
2.4.2 Plánování a kvalita v údržbě

Pro komplexní produktivní údržbu TPM je vývoj a implementace dobrého programu systému údržby – a jeho odpovídajícího systému řízení – kritickými činnostmi. Je proto důležité tyto aktivity řádně řídit a plánovat. Na obr. 16 je uveden podrobný plán, proces vývoje systému řízení údržby v nadnárodní společnosti, v které je již u řady výrobních zařízení zavedena funkční autonomní údržba. Organizace rozdělila vývoj systému údržby do čtyř fází:

1. Snížení a redukce střední doby mezi poruchami (MTBF);
2. Prodloužení životnosti strojních zařízení;
3. Periodická oprava zhoršeného stavu zařízení;
4. Predikce životnosti zařízení. [5]

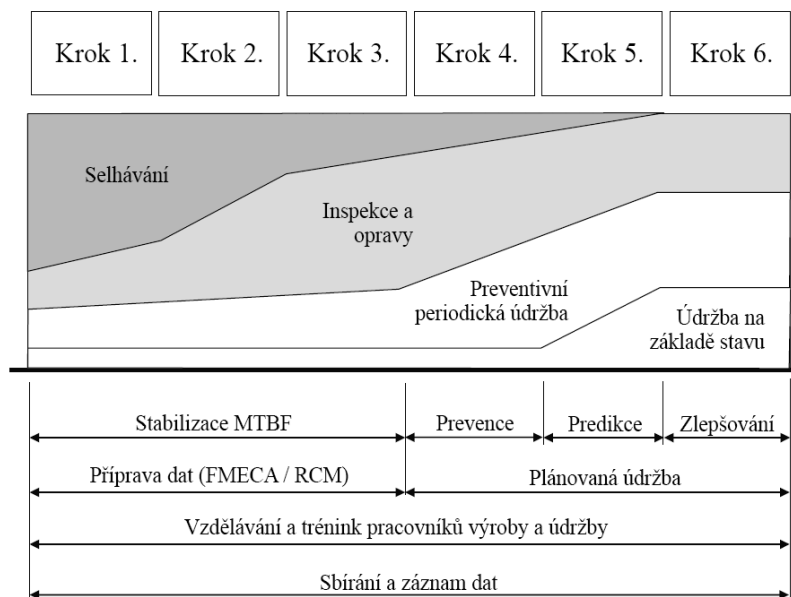
Ve schématu si lze všimnout zvýrazněného 5. kroku vztahujícího se k vývoji preventivní diagnostické údržby dle technického stavu objektu, který napovídá o vhodném časovém období zavádění této koncepce. Zavedení diagnostické údržby je tak doporučeno provádět až v dostatečně pokročilém vývoji preventivní periodické údržby po tom, co jsou vyřešeny aspekty a problém týkající se 1. a 2. fáze.

První fáze je v zásadě věnovaná přípravným činnostem, které jsou ke skutečnému zlepšení provozní spolehlivosti skrze plánování údržby zapotřebí. Účelem je eliminace slabých stránek zařízení, jež mají potenciál snížit ukazatel MTBF. Tento krok je na počátku procesu obzvláště důležitý z důvodu zabezpečení správné provozní spolehlivosti daného zařízení. [5] Druhá a třetí fáze se týká hlavně vývoje preventivní periodické údržby, kdy organizace usiluje vhodným plánováním údržby s různými stupni o prodloužení celkového užitečného života objektu. Třetí, a především čtvrtá fáze se, jak již bylo řečeno, týká vývoje preventivní diagnostické údržby, a to jak s předpovědí, tedy prediktivní nebo bez ní. Dále je z obrázku zřejmé, že zatímco každá fáze obsahuje různé kroky, dohromady mají jeden společný krok a tím je posuzování a přezkum bodů, které byly při jednotlivých fázích do celkového systému zavedeny. Téma sledování a hodnocení procesů údržby bylo popsáno v kapitole 2.2.



Obr. 16) Příklad procesu systému řízení plánování údržby [5]

Předpokládaný vývoj všech šesti kroků v průběhu času je znázorněn na obr. 17. Je možné pozorovat postupný pokles systému údržby po poruše, resp. selhávání, které na počátku vývoje zahrnoval majoritní podíl způsobů selhávání. S postupnými kroky tento systém ztrácí na váze a jeho výskyt se s pokročilejšími systémy údržby stává zanedbatelným. Schéma také zahrnuje základní činnosti konané během vývoje. Zatímco školení pracovníků, sběr a analýza dat prostupuje všemi kroky, stabilizace ukazatele MTBF objektu je hlavní činností pouze po 3.krok. [3]



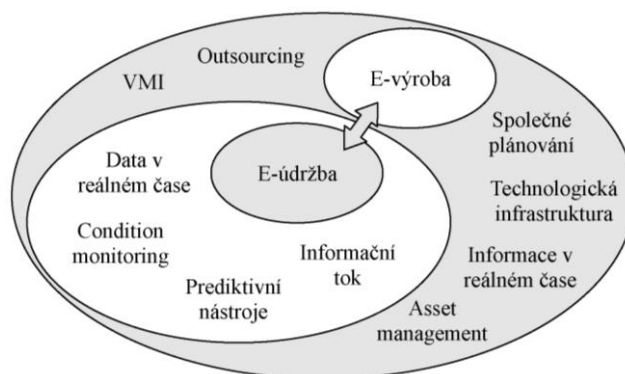
Obr. 17) Harmonogram vývoje kroků systému řízení plánování údržby [5]

2.5 Prediktivní údržba v integraci s informačním systémem firmy

Závěrem teoretické části diplomové práce je popis v současné době často aplikovaného informačního systému údržby a jeho integrace ve firemním managementu. Jeho rozmach je zaznamenán především v souvislosti s vývojem informačních a komunikačních technologií a digitalizací.

Nedílnou součástí provozů současných výrobních společností je informační systém uplatňovaný pro řízení a záznam celé řady firemních činností a procesů. V souvislosti s tím se od počátku roku 2000 používá termín e-maintenance, neboli e-údržba, koncept existující jako doplňkový modul celofiremního informačního systému. Koncept je uplatňován jako podpůrný nástroj údržby sloužící k proaktivnímu procesu rozhodování a řízení. [5]

Integrace informačního systému údržby v systému výroby, potažmo celého podniku je ilustrováno na obr. 18. Zatímco v rámci výrobního informačního systému dochází např. ke koordinaci aktivit jak společných, tak i jednotlivých firemních útvarů, řízení majetku a řízení outsourcingu, tak v rámci systému údržby, resp. e-údržby, jsou využívány např. pokročilé nástroje preventivní diagnostické údržby.



Obr. 18) Integrace e-údržby v rámci podnikového informačního systému⁵

⁵ VMI, zkratkou Vendor-managed inventory, v překladu dodavatelem řízené zásoby. Dodavatelé v rámci programu průběžného doplňování jsou zodpovědní za automatické doplňování zásob zákazníka. [42]

Z hlediska monitoringu a sledování technického stavu výrobních zařízení ve firmě koncept e-maintenance umožňuje pracovníkovi údržby vzdálený přístup ke strojům, a to v reálném čase, tedy s využitím tzv. condition monitoringu. Spolu s programovatelnými alarmy tak monitoring poskytuje možnost údržbě včas a na jakoukoliv situaci reagovat a optimálně připravit plán údržbářského zásahu. [5]

Z hlediska politiky a strategie údržby koncept přináší prostředky potřebné k expertnímu odhadu období selhání zařízení založenou právě na aktuálním technickém stavu a dále na odhadovaném využití nebo předpokládané zbývající životnosti daného zařízení. [5] Využíván je zde bohatý informační tok a pokročilé prediktivní nástroje složené z expertních systémů, bází dat, strojového učení a umělé inteligence. Potenciál takového použití je veliký. Systém je schopen kromě např. vizualizace technických parametrů v reálném čase také s určitou pravděpodobností předvídat selhávání, lokalizovat a identifikovat vadu nebo poruchu a omezit chyby v důsledku lidského faktoru.

3 PRAKTICKÁ ČÁST

Cílem praktické části diplomové práce je s využitím vibrační diagnostiky, potažmo zavedeného systému prediktivní údržby, předcházet a včas zamezit náhlým poruchám, předvídat a sledovat zhoršující se technický stav strojních zařízení a ve výsledku především ušetřit finanční kapitál a zlepšovat kulturu celého podniku.

Pilotní projekt prediktivní údržby s využitím vibrodiagnostiky je tvořen ve firmě Siemens, s. r. o. v Brně v rámci současného vývoje v oblasti systému údržby. Společnost si je vědoma současného trendu rozvoje v odvětví řízení údržby a je tedy seznámena se všemi kladů a záporů prediktivní údržby. Projekt si tak klade za cíl zjistit úroveň využitelnosti této koncepce a prakticky ji otestovat ve svém provozu.

V první části se nachází stručné seznámení se společností Siemens AG a jejím odštěpným závodem Industrial Turbomachinery v Brně. Následně je proveden popis a vyhodnocení současného stavu údržby, kdy je úmyslem především zhodnotit možný přínos koncepce prediktivní údržby v daném podniku.

V další části jsou vybrána vhodná konkrétní strojní zařízení pro prediktivní údržbu. Na základě systémové analýzy těchto strojů je první řadě zvažována využitelnost vibrační diagnostiky jakožto nástroje prediktivní údržby a dále vytvořena odpovídající metodika popisující proces měření, zaznamenávání a vyhodnocování vibrací.

V konečné části je vypracována analýza v otázce ekonomického přínosu a následně jsou v oblasti udržitelnosti navržena další opatření pro zlepšení.

3.1 Siemens, s. r. o., odštěpný závod Industrial Turbomachinery

Společnost Siemens AG je německá konglomerátní společnost založená v říjnu roku 1847 s ústředím v Berlíně a Mnichově a také největší průmyslovou výrobní společností v Evropě. [16]

Společnost Siemens, s. r. o., odštěpný závod Industrial Turbomachinery spadá pod divizi Power and Gas (oblast energetiky) a je dceřinou společností mateřské společnosti Siemens AG. Závod nabízí široké spektrum průmyslových parních turbín s výkonem do 150 MW pro všechny typy aplikací. [17]

Tradice výroby turbín v místě závodu potažmo zahájení provozu ve strojírenském závodě na Olomoucké ulici je datován již od roku 1930 podnikem První brněnská strojírna. Závod následně změnil od roku 1993 majitele, konkrétně společností ABB a Alstom Power. Od roku 2004 však v tradici výroby brněnských turbín nadále pokračuje společnost Siemens Industrial Turbomachinery s. r. o. Brno. [17]



Obr. 19) Logo společnosti Siemens⁶ [18]

⁶ Slogan Ingenuity for live je společností Siemens používán od roku 2016 tedy od příležitosti 200.výročí narození zakladatele Wernera von Siemens. „Ingenuity“ je zde chápáno jako slovo definující inženýrské dovednosti a inovace. „For life“ značí dlouhotrvající tradici ve vytváření hodnot pro celou společnost. [45]

Závod v Brně je také držitelem certifikátů dle:

- ISO 9001:2008⁷
- ISO 14001:2008⁸
- BS OHSAS 18001:2007⁹



Obr. 20) Siemens, s. r. o., odštěpný závod Industrial Turbomachinery [19]

3.2 Současný stav údržby v Siemens, s. r. o., odštěpný závod Industrial Turbomachinery

Nynější stav údržby technických zařízení ve výrobním závodě Siemens, s. r. o. v Brně je především preventivního a plánovaného charakteru, kdy se veškeré ošetrovací, inspekční a údržbové práce a činnosti podléhající státnímu odbornému dozoru vykonávají v plánovaných, předem daných termínech. Termíny těchto úkonů jsou dány interním plánováním nebo zákonným požadavkem.

Organizace údržby je centralizovaná a sladěná s výrobou, kdy jsou plány údržby realizovány na základě konzultace s vedoucími výroby a mistry a dále případně zharmonizovány se zhotovitelem plánovaného údržbářského zásahu. S přesnými termíny výkonů jsou dále seznámeny oddělení technologie a plánování výroby.

V případě nenadálé poruchy strojního zařízení je oprava provedena takřka okamžitě. Oprava této havárie je řešena externími zdroji, ať už externí servisní organizací, autorizovaným servisem nebo přes výrobce, popřípadě dodavatele strojního zařízení. Záznamy o poruchách jsou vedeny. Organizační postup při řešení výpadku je popsán vývojovým diagramem (tab. 2).

⁷ Certifikát vydaný nezávislým akreditovaným certifikačním orgánem potvrzuje, že zavedený systém managementu kvality splňuje požadavky na systém managementu kvality obsažené v normě ISO 9001:2008 [43]

⁸ Certifikace se třetí stranou uděluje na základě splnění požadavků dle normy ISO 14001:2008 v managementu životního prostředí a na koordinaci s ostatními systémy řízení. [15]

⁹ Norma ČSN OHSAS 18001:2008 je v současnosti nejčastěji zaváděný přístup v oblasti BOZP v České republice. Norma stanovuje požadavky na BOZP, resp. na systém managementu bezpečnosti a ochrany zdraví při práci. Certifikace tak potvrzuje splnění těchto požadavků. [44]

Tab 2) Vývojový diagram procesu – Oprava / havárie [20]

1. Vznik poruchy	• Obsluha stroje vzniklou poruchu nahlašuje mistrovi daného výrobního střediska společně s informací o charakteru závady.
2. Vystavení objednávky opravy a nahlášení opravy	• Objednávka opravy je provedena elektronicky skrze terminál, který je k dispozici na jednotlivých stanovištích výroby.
3. Stanovení rozsahu prací oprav	• Celý proces opravy musí být dokumentován .
4. Sledování opravy	• Pověřená osoba odpovědná za údržbu sleduje průběh opravy na stroji, kontroluje a koordinuje postup prací.
5. Převzetí opraveného zařízení	• Je vyzkoušen chod opraveného zařízení a ukončení opravy je stvrzeno na montážním listu. Montážní list kromě popisu závady a postupu opravy dále obsahuje správnou vykázanou částku a úplnost použitých dílů.
6. Evidence oprav a fakturace	• Obsah montážního listu je přenesen do databáze oprav strojů

Výrobní stroje a zařízení jsou dle interní směrnice členěna do kategorií z hlediska celkové složitosti daného strojního zařízení nebo z hlediska vyhrazených technických zařízení (tab. 3). Dle kategorizace jsou dále zavedeny časové intervaly v rámci plánovaných prohlídek (tab. 4). Termíny revizí a inspekcí dle zákonných požadavků jsou zharmonizovány spolu s termíny pravidelných preventivních prohlídek.

Tab 3) Kategorizace strojů a zařízení [20]:

- Kategorie I – NC a CNC stroje
- Kategorie II – konvenční stroje, výrobní zařízení pro obrábění a ostatní zařízení
- Kategorie III – jednoduché stroje a zařízení
- Kategorie J – jeřáby
- Kategorie PL – plynová zařízení
- Kategorie TL – tlaková zařízení
- Kategorie CHI – chladicí zařízení
- Kategorie VV – vysokozdvizná zařízení
- Kategorie MV – motorové vozíky (s výjimkou vysokozdvizných)
- Kategorie PP – pracovní a mobilní plošiny
- Kategorie MC – mycí stroje
- Kategorie VY – vysavače
- Kategorie M – měřicí zařízení

Pravidelné preventivní prohlídky jsou prováděny dle ročního plánu, kdy jsou klíčové výrobní stroje v rámci této prohlídky rovnoměrně rozděleny tak, aby dopad na činnost výroby byl co nejmenší a na základě zkušeností s provozem daného zařízení. Obsahem těchto prací jsou jak zmíněné preventivní prohlídky, tak i prohlídky revizní, jež mají charakter hloubkového hodnocení technického stavu strojního zařízení a jsou obohaceny o další úkony údržby. Preventivní prohlídka strojních zařízení je prováděna v intervalu každých 6 měsíců a revizní prohlídka každých 18 měsíců. Při vykonávání údržbářského úkonu je za účelem snížení rizika nebezpečí úrazu pracovníka využíván tzv. LOTO¹⁰ systém.

Autonomní údržba prováděna obsluhou výrobních zařízení je zaměřená na oblast vizuální kontroly stavu stroje a udržování čistoty stroje a pracoviště, na nichž má vytvořené standardy. Operátor v rámci svých povinností vyplňuje list denní prevence, v němž svým podpisem ztvrzuje provedení jednotlivých úkonů. Dále jsou definovány kontroly provedení, a to pracovníky údržby a mistry daného výrobního střediska.

Tab 4) Časové intervaly plánovaných prohlídek [20]

Typ prohlídky	Kategorie I	Kategorie II	Kategorie III
Preventivní	1x za 6 měsíců	1x za 6 měsíců	1x za 6 měsíců
Revizní	1x za 18 měsíců	1x za 18 měsíců	1x za 18 měsíců
Operátorská	denně	denně	denně

V rámci technické diagnostiky je nepravidelně vykonávána tribodiagnostika, jež je zajištěna externí firmou. Dále jsou prováděny testy odchylky kruhové interpolace CNC strojních zařízení, resp. jejich vřeten. V případě zjištění nestandardního stavu je zabezpečena náprava. Data získaná z těchto měření nejsou dále zaznamenávána.

Obecně je odborná znalost pracovníků údržby hodnocena na vysoké úrovni, přičemž se klade důraz na jejich pravidelná školení a vzdělávání. K plánování systém údržby využívá systému SAP¹¹, do kterého jsou dále stručně zaznamenávány příčiny vybraných odstávek.

¹⁰ LOTO (celým názvem Lockout Tagout) je systém, který po zavedení dává pracovníkovi údržby povinnost vykonat stanovené úkony, jež výrazně snižují riziko nebezpečí úrazu při provádění údržby. Snížení rizika je dosaženo např. použitím zámku a klíče pro zablokování hlavního vypínače daného strojního zařízení.

¹¹ SAP je produkt z oblasti ERP (Enterprise Resource Planning, česky plánování podnikových zdrojů) a představuje podnikový informační systém. Oddělení údržby zde využívá především modulu PM (Plant maintenance), určeného pro řízení systému údržby.

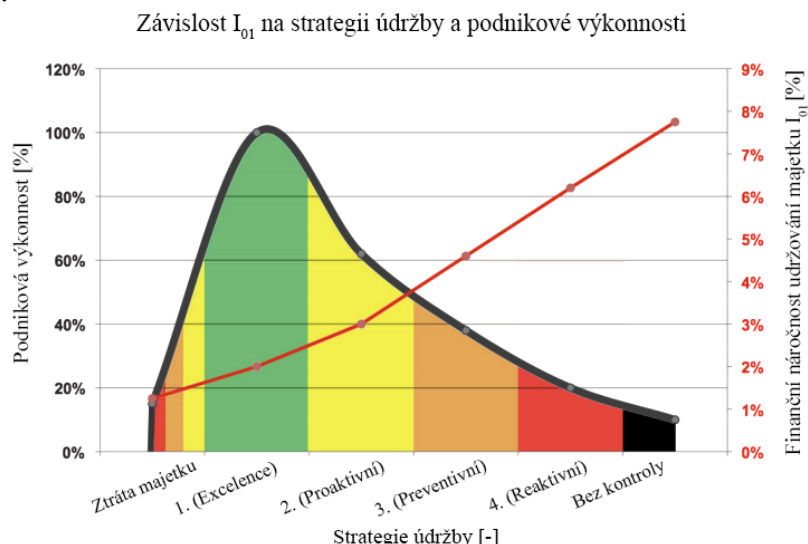
3.2.1 Finanční náročnost udržování majetku

K posouzení současného stavu údržby je dále využít benchmarking, tedy metoda popsaná v kapitole 2.2, která vyhodnocuje efektivitu jednotlivých pracovišť údržby a útvaru údržby jako celku. Vyhodnocení je provedeno na základě benchmarkového údaje I_{01} , který charakterizuje finanční náročnost udržování majetku a jeho výpočet je znázorněn dle vztahu (17). [9]

$$I_{01} = \frac{\text{Celkové náklady na údržbu}}{\text{Reprodukční hodnota hmotného i nehmotného majetku}} \cdot 100 = 3,28 \% \quad (17)$$

K posouzení hodnoty I_{01} lze využít graf závislosti finanční náročnosti (hodnota údaje I_{01}), strategie údržby a výkonnosti podniku (obr. 21). Jsou zde definovány běžně se vyskytující pět typů strategií k údržbě – od přístupu bez strategie, resp. bez kontroly až po dosažení tzv. excelentnosti¹². Pouze při úrovni excelentnosti je podnik schopen efektivně využívat veškeré materiální a finanční zdroje, což má za následek mnohem menší potřebu zdrojů pro zachování stabilního systému údržby. Při nižší úrovni strategie se následně snižuje efektivita využívání zdrojů a vzrůstá tak i jejich potřeba. Opačná strana grafu následně ukazuje stav, kdy při vynaložení velmi nízkých nákladů účinnost využívání zdrojů rapidně klesá. Situace má za následek jednak organizační stav „bez kontroly“ a pak i postupnou ztrátu aktiv podniku. [21]

Ačkoli je hodnota $I_{01} = 3,28 \%$ v porovnání s praxí dobrý výsledek [22], je výsledná hodnota finanční náročnosti I_{01} vhodná pouze v případě, kdy by celkový systém spolehlivosti, potažmo údržby byl na excelentní nebo alespoň proaktivní úrovni. Jelikož je ale celkový systém provozní spolehlivosti, potažmo údržby spíše reaktivního, potažmo preventivního charakteru, vytváří se nebezpečí ztráty kontroly nad řízením. Tento jev by tak vedl k vysokým a neočekávaným výdajům, které by následně pokrývaly možný vzniklý dopad (zvýšená četnost prostojů, nárůst dob do obnovy, zvýšený počet neshodných výrobků, snížená kapacita výroby). Vzniká tak vysoké riziko vzniku stavu, při kterém dochází ke ztrátě aktiv podniku (levá část grafu – obr. 21).



Obr. 21) Přibližné znázornění souvislosti nákladů údržby jako I_{01} , strategie údržby a výkonnosti podniku [21]

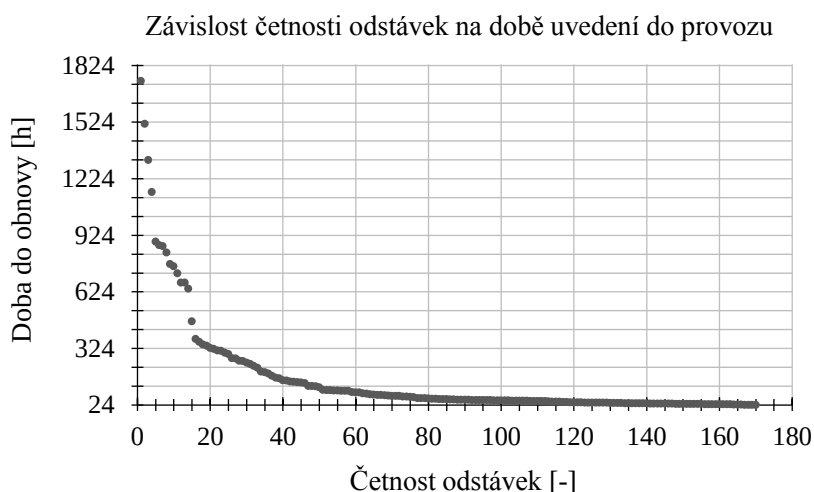
¹² Úroveň „Excelence“ lze dosáhnout např. zavedením systému údržby dle koncepce TPM – totálně produktivní údržby. Jedná se o stav, kdy je strategie údržby (kultura údržby) nastavena na proces neustálého zlepšování. [22]

3.2.2 Četnost odstávek klíčových strojních zařízení

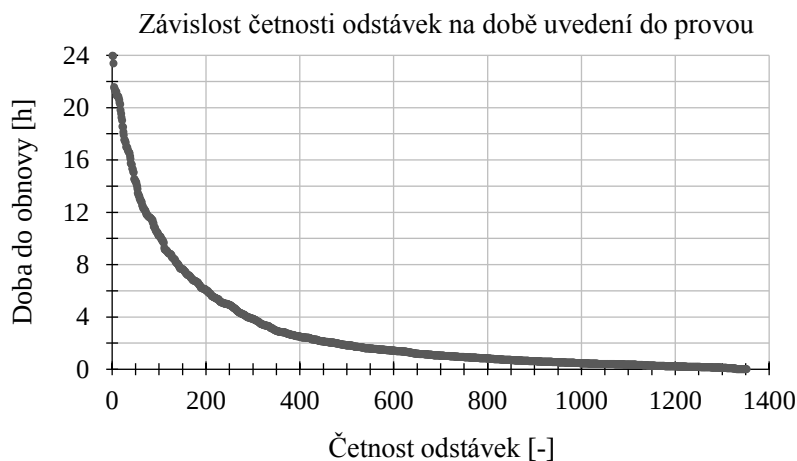
Jsou sledovány počty hlášení objednávek pro údržbu, délka následných odstávek (obr. 22, 23) a dále náklady na údržbu. Data jsou zaznamenána především s vypovídající hodnotou pro výrobu a top management závodu. Nejsou dále analyzována ve vztahu ke spolehlivosti a dostupnosti strojních zařízení.

Ze zaznamenaných dat v období fiskálního roku 2016/2017 lze zjistit stav a závislost četnosti odstávek klíčových strojních zařízení na době trvání těchto odstávek. Je zaznamenáno až 1522 odstávek. Z obr. 22 a 23 lze vyčíst, že celková doba do opětovného uvedení do provozu je 27640,63 hodin u 170 odstávek, jež mají dobu obnovení do provozu nad 24 hodin a dále, že celková doba do opětovného uvedení do provozu u zbylých odstávek činí pouze 3864,75 hodin (odstávky s charakterem doby obnovení do 24 hodin). V posledních třech letech je průměrný měsíční počet odstávek a průměrná doba do obnovení celkem stabilní. Lze předpokládat, že vyřešením přibližně 10 % odstávek z celkového počtu odstávek, tedy odstávek s charakterem doby do obnovy nad 24 hodin, může dojít k významnému zkrácení celkové doby do obnovy přibližně o 80 %.

Z celkového počtu všech strojů je jich přibližně 40 % považováno za udržovatelné a bezproblémové na stabilní úrovni. Problémových strojních zařízení je cca. 30 % a dalších asi 34 % je považováno za již opotřebované.



Obr. 22) Počet hlášení objednávek pro údržbu v závislosti na délce následných odstávek nad dobu 24 hodin za fiskální rok 16/17



Obr. 23) Počet hlášení objednávek pro údržbu v závislosti na délce následných odstávek do doby 24 hodin za fiskální rok 16/17

3.2.3 Současný vývoj systému údržby v Siemens, s. r. o., odštěpný závod Industrial Turbomachinery

V současné době probíhá vývoj a postupné začleňování systému údržby dle koncepce TPM. Koordinace tohoto projektu se k období tvorby diplomové práce nacházela v počátečních fázích rozvoje. Cílem začlenění této koncepce řízení do úseku údržby a výroby je především zvýšit provozní spolehlivost jako celku potažmo záležitosti s tím spjaté, jako např. snížení času na udržování strojů v chodu, snížit, či úplně vyloučit ztráty vznikající na základě nevhodného způsobu výroby, udržování a lidských chyb a zvýšit produktivitu, efektivitu a zajištěnost údržby, resp. výrobních strojů.

Protože je vývoj systému TPM také chápána jako celopodnikový program, spadá jeho zavádění do všech oddělení a do svých činností zapojuje veškeré pracovníky na všech organizačních úrovních. Úmyslem takového přístupu je zejména zlepšit a přispět k vybudování a upevnění zdravé podnikové kultury.

Oba výše pospané cíle jsou sledovány a vyhodnocovány na základě ukazatelů celkové efektivnosti zařízení OEE¹³ a klíčových ukazatelů KPI¹⁴ týkajících se jednotlivých aktivit firemních úseků nebo na základě KPI společných pro všechny zaměstnance¹⁵.

Jednotlivé oblasti řešení TPM v organizaci v prvních krocích jsou definovány jako:

- technické kompetence,
- technické ztráty,
- náklady na údržbu,
- náhradní díly a skladové zásoby,
- generální opravy,
- autonomní, preventivní a prediktivní údržba a
- know-how management¹⁶.

Ve vztahu ke strategii údržby je také zájem na vývoji v oblasti řízení spolehlivosti. Jedná se o zavedení nebo zlepšení systematického procesu hledání kořenových příčin poruch, analýza a řízení rizik ve vztahu k bezpečnosti a spolehlivosti zařízení, sledování a řešení ztrát ve výrobě a abnormální vynaložené náklady na údržbu zařízení, udržovat a analyzovat veškerá data a historické záznamy o zařízení pro predikování potřeb údržby a eliminovat opakované výskyty poruch. [23]

¹³ OEE – Overall equipment effectiveness v překladu celková efektivnost zařízení (česká zkratka CEZ) je nástroj k měření efektivnosti využití výrobní kapacity. Výpočet v sobě zahrnuje aspekty pohotovosti a výkonnosti strojního zařízení a aspekt kvality, resp. její míru – počet shodných výrobků vůči všem vyrobeným. [22]

¹⁴ Zkratka KPI neboli Key Performance Indicator v překladu klíčový ukazatel výkonnosti se nejčastěji vyskytuje ve spojitosti s údržbou, na jehož základu se hodnotí ekonomické, technické a organizační aspekty údržby. Zabývá se jimi norma ČSN EN 15341:2010. [9]

¹⁵ V rámci zavádění TPM je také úmyslem vytvořit KPI hodnotící kromě úseku údržby rovněž další oddělení a dále klasifikuje úroveň výkonnosti organizačních úseků jako celku. KPI by v sobě mimo jiné hlavně obsahovalo faktory provozní produktivity a udržování strojů v chodu. Veškerá oddělení by tak měla zájem na zvyšování OEE jednotlivých výrobních zařízení.

¹⁶ Oblast zahrnuje veškeré organizační a řídicí aktivity, koordinaci týmu určeného pro zavádění TPM a správu klíčových ukazatelů výkonnosti.

3.2.4 Vyhodnocení stávajícího stavu systému údržby

Po analýze stávajícího systému údržby včetně četnosti odstávek klíčových strojů a dalšího vývoje systému údržby lze dojít k jeho zhodnocení a zvážit využitelnost vibrační diagnostiky, resp. začlenění koncepce prediktivní údržby.

Jak bylo zmíněno v kapitole hodnotící finanční náročnost ve vztahu ke strategii údržby a výkonnosti podniku, potažmo oddělení údržby, došlo se k závěru, že ačkoli je výsledná hodnota $I_{01} = 3,28 \%$ v porovnání se světovými výsledky dobrá, při současném systému údržby fungujícím na preventivním, potažmo reaktivním charakteru se jedná o stav s výrazným požadavkem na zlepšení. Je proto doporučeno, aby se financování údržby, resp. tedy finanční náročnost buďto pohybovala na hodnotě přibližně $I_{01} = 5 \%$ nebo se zavedla a dál udržovala strategie údržby na alespoň proaktivní úrovni. Z důvodu lepší využitelnosti dostupných zdrojů by se tak snižoval požadavek systému údržby na tyto zdroje.

Dále byla vyhodnocena abnormální četnost odstávek a nadprůměrná doba do obnovy u přibližně 10 % odstávek. Výsledky opět poukazují na vysoký potenciál ke zlepšení. Především v možnosti včasné detekce nadcházející poruchy a v proaktivním přístupu k poruchám – v hledání kořenových příčin těchto poruch.

Z výše popsaného a v rámci současného vývoje systému údržby je proto zavedení strategie prediktivní údržby s využitím např. vibrační diagnostiky vhodná. S využitím této koncepce dochází k rozvoji systému údržby o novou strategii. V návaznosti na to dále dochází ke zvýšení výkonnosti oddělení údržby, a tedy ke zvýšené účinnosti ve využívání dostupných zdrojů. Z pohledu četností odstávek a vyšších dob do obnovy by bylo možné v rámci určitých možností klíčové výrobní stroje a jejich aktuální technický stav sledovat a predikovat jejich zhoršující se stav. Protože by případnou rozvíjející se poruchu bylo možné včas detekovat a mohla by tak být včas zavedena vhodná opatření, nemuselo by dojít k rozvoji takové poruchy, která by následně vyžadoval nadměrnou dobu pro obnovení. Včasný odhad termínu se stavem, kdy by komponenty výrobního stroje již nebyly ve stavu schopném plnit požadovanou funkci, se také nabízí možnost zlepšení plánování činností údržby a výrobní kapacity podniku. Využitím vibrační diagnostiky lze následně přispět k procesu hledání kořenové příčiny poruchy, a tedy k proaktivnímu přístupu.

3.3 Využití vibrační diagnostiky u obráběcích strojů

V návaznosti na vyhodnocení současného stavu údržby a aktuálního vývoje koncepce systému údržby TPM je zájem na aplikaci a využívání vibrační diagnostiky jako nástroje především prediktivního, potažmo i proaktivního přístupu k posuzování provozuschopnosti strojů a následné možnosti plánování údržbářských zásahů na základě technického stavu. Cílem tohoto projektu je v rámci zvyšování provozní spolehlivosti umožnit managementu údržby operativní plánování údržby, minimalizovat zbytečné preventivní opravy a předcházet havarijním odstávkám. Aplikace této diagnostiky je plánovaná hlavně na klíčových obráběcích strojích, jejichž případná náhlá porucha má za následek vysoké finanční náklady na celkovou opravu a přerušení výroby.

V Brněnském podniku Siemens je v současné době až 38 obráběcích strojů, které jsou považované za tzv. klíčové stroje a jejichž náhlé vyřazení z provozu má za následek nejvyšší náklady na obnovu a nejvyšší ekonomické náklady vzniklé prostojem a přerušením výroby. Pro aplikaci vibrační diagnostiky jsou vybrány v první řadě stroje švýcarské značky Liechti, jejichž počet je sedm. Jejich výběr je vyhotoven na základě analýzy historie poruch těchto strojů.

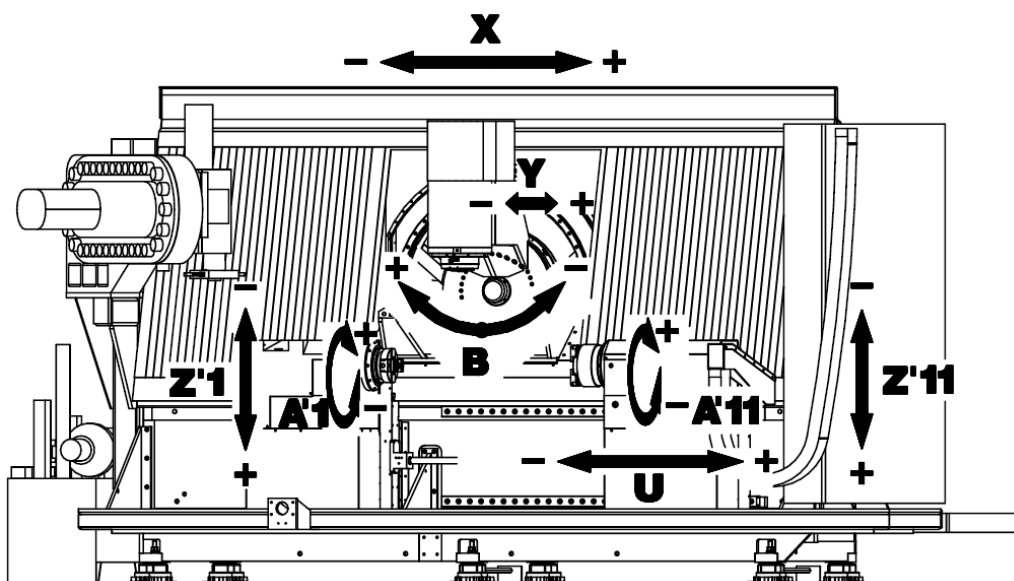
Stroje značky Liechti, výrobním označením Turbomill jsou pětiosá obráběcí centra určená pro obrábění s vysokou přesností a velkými rychlostmi. Obráběcí centra jsou používána jak pro hrubování, tak i pro jemné obrábění i velmi složitých tvarů. V závodu Siemens jsou proto využívána pro přesné zhotovení lopatek parních turbín. Je používáno šest strojů typu 800g a jeden typu 1400g. Jejich rozdíl se nachází v celkovém počtu vřeten, kdy ve stroji typu 800g se nachází celkově tři vřetena (jedno frézovací, dvě upínací) a u 1400g je vřeten šest (dvě frézovací, čtyři upínací). Pro další vývoj vibrační diagnostiky v údržbě se diplomová práce nadále bude věnovat konkrétní aplikaci vibrodiagnostiky u stroje typu 800g. Rozpracovaný postup bude dále předkládán jako vzor pro rozšíření diagnostiky v údržbě, resp. metodiky měření s menšími obměnami pro další klíčové stroje.



Obr. 24) Obráběcí centrum Liechti Turbomill 800g

Tab 5) Parametry obráběcího centra Liechti Turbomill 800g [24]

Technické parametry Liechti Turbomill 800g			
	Rozsah obrábění [mm]	Rychlost os	Síly / momenty
Osa X	-528 / +850	0 - 50 m/min	21,5 kN
Osa Y	-225 / +225	0 - 50 m/min	35 kN
Osa Z (Z1 a Z11)	+75 / +475	0 - 50 m/min	18 kN
Osa A	360°	0 - 200 rpm	970 Nm
Osa B	100° (-50° / +50°)	0 - 50 rpm	4 990 Nm
Rozlišení lineárního měřicího systému		0,00001	mm
Rozlišení rotačního měřicího systému		0,00001	°
Váha stroje		18 900	kg
Frézovací vřeteno	Rychlost vřetena	0 - 15 770	rpm
	Výkon	28	kW
	Síla upínacího systému nástroje	18	kN
Automatický výměník nástrojů	Počet nástrojů	32	kus
	Čas výměny	4	s

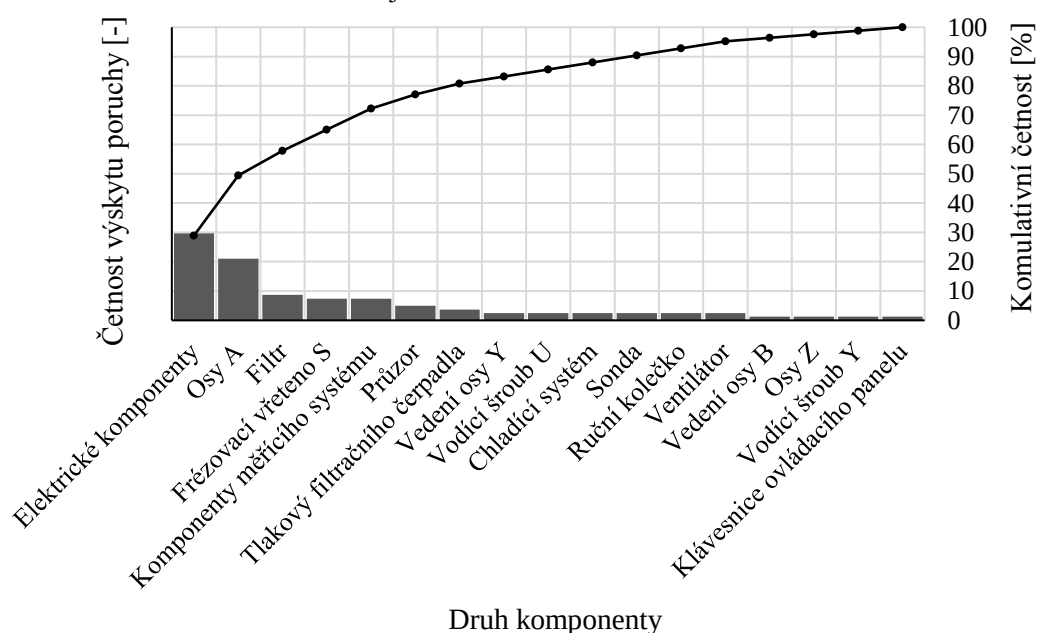


Obr. 25) Znáznornění os stroje Liechti Turbomill 800g [24]

3.3.1 Analýza historie poruch strojů Liechti

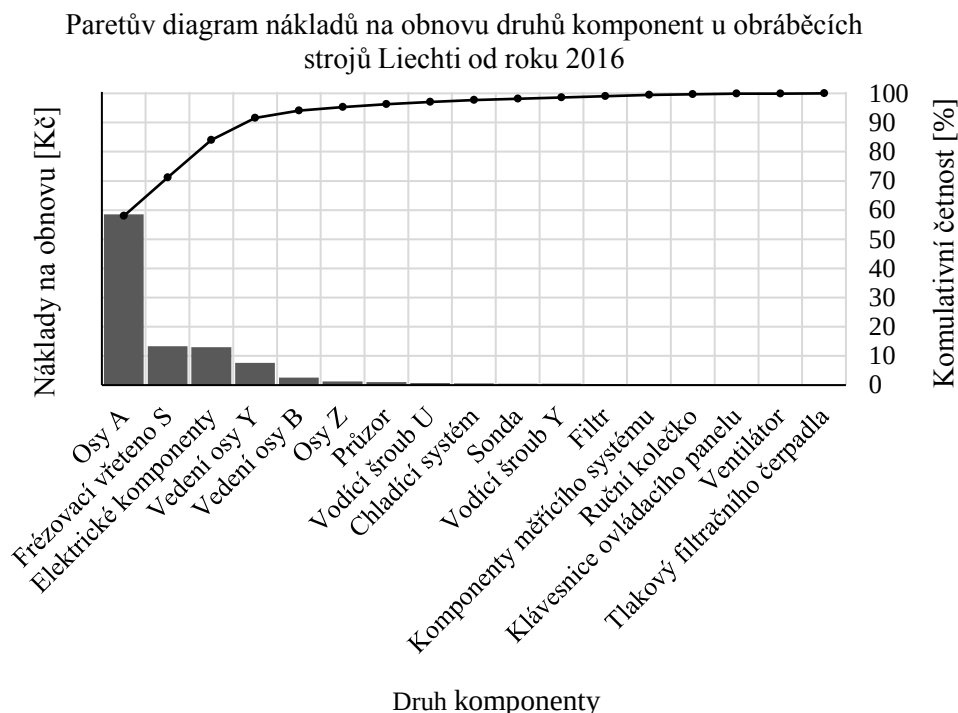
Analýza historie poruch je založena na vyhodnocení četností poruch jednotlivých součástí stroje a nákladů spjatých s opravou těchto poruch nebo s obnovou zařízení do provozuschopného stavu. Do analýzy jsou zapojeny jak stroje Liechti typu 800g, tak i stroje 1400g z důvodu jejich skoro totožné konstrukce. Paretův diagram četností poruch druhů komponent (obr. 26) znázorňuje, že přibližně 65 % výskytů poruch nebo ztráty životnosti se týká pouze 24 % komponent stroje. Konkrétněji se to týká elektrických komponent, os A, frézovacího vřetena a filtrů. Splnil se tak předpoklad nejvyšší četnosti poruch u elektrických subsystémů a částí konajících hlavní přenosy pohybu. [25]

Paretův diagram četnosti poruch druhů komponent u obráběcích strojů Liechti od roku 2016



Obr. 26) Paretův diagram četnosti poruch druhů komponent u obráběcích strojů Liechti od roku 2016

Z Paretova diagramu nákladů na obnovu druhů komponent při jejich poruše (obr. 27) je zřejmé, že až 70 % všech nákladů na opravu strojů Liechti se týká pouze 12 % částí, a to osy A a frézovací vřeteno, tedy částí konajících hlavní přenosy pohybu. Osy A při tom spotřebují téměř 60 % nákladů spojených s obnovou stroje do provozu.



Obr. 27) Paretův diagram nákladů na obnovu druhů komponent u obráběcích strojů Liechti od roku 2016

Analýza historie poruch strojů Liechti poukazuje na kritické části stroje, a to na mechanické upínací osy A, frézovací vřeteno a elektrické prvky systému. Tyto části se se svými poruchami podílí na nejvyšších četnostech výskytů a nejvýše vynaložených nákladech při obnově provozuschopnosti zařízení. Při zvážení nálezu vysoké finanční náročnosti při obnově osy A, lze dojít k závěru vhodnosti aplikace vibrační diagnostiky v rámci koncepce prediktivní údržby.

Ačkoli elektrické a elektronické prvky systému nejsou pro vibrační diagnostiku dostatečně relevantní, je jejich řešení v útvaru údržby dále doporučeno.

Závěry z analýzy jsou následně použity v dalších kapitolách diplomové práce, zejména při systémové analýze, konkrétně při analýze způsobů, důsledků a kritičnosti poruch FMEA/FMECA¹⁷, kde jsou tyto výsledky brány při vyhodnocování kritického čísla RPN¹⁸ v úvahu.

¹⁷ Zkratka FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) v překladu znamená analýza způsobů a důsledků poruch, což představuje „Systematický postup analýzy systému za účelem zjištění potenciálních způsobů poruch, jejich příčin a důsledků.“ Písmeno C ve zkratce FMECA značí, že do analýzy je na víc přidána analýza kritičnosti. [27]

¹⁸ RPN, Risk Priority Number, neboli číslo priority rizika nám udává kvantitativní stanovení kritičnosti daného způsobu poruchy. [27]

3.3.2 Systémová analýza Liechti Turbomill 800g

Cílem systémové analýzy je poznat předmět zájmu, v tomto případě pětiosé obráběcí centrum Liechti Turbomill 800g za účelem dalšího zvážení využitelnosti aplikace vibrační diagnostiky v rámci prediktivní údržby a případně jeho následného správného zavedení. Analýza je také vypracována pro další budoucí vývoj systému údržby spjatý se stroji Liechti. Např. pro vyhodnocení konkrétních kritických míst stroje, určení součástí vhodných pro držení ve skladových zásobách a další aplikaci nástrojů prediktivní údržby.

Systémová analýza se v první řadě skládá z blokového diagramu stroje (obr. 29) na vhodné rozlišovací úrovni, v nichž jsou znázorněny veškeré podstatné interakce jeho jednotlivých prvků. Diagram poskytuje prvotní seznámení se strojem, jeho stavbou a veškeré důležité vzájemné působení jako např. síly nebo přenos vibrací.

Ve druhém kroku systémová analýza obsahuje analýzu způsobů, důsledků a kritičnosti poruch FMECA, která má za cíl určit ty části stroje, s jejichž hodnotou kritického čísla RPN spadají do kritických částí s vysokým požadavkem na zavedení opatření. Analýza je prováděna dle normy ČSN EN 60812:2007 a dle zdroje [26]¹⁹. FMECA se skládá z modelu (obr. 30 a 31), který je vypracován pro vymezení hranic a stanovení stupně rozčlenění systému. Stroj, tedy systém je zde rozdělen na své subsystémy, součásti a prvky, přičemž je zvolen takový nejnížší stupeň členění, aby byla dosažena podmínka efektivní analýzy ve vztahu k zamyšlenému určení [27] a případnému stupni opravy v případě poruchy části. Dále jsou vypracována grafická schémata komponent stroje za účelem znázornění jeho stavby a pro lepší orientaci umístění jednotlivých částí. Čísla odkazující ve schématech na součásti v seznamech jsou ve shodě s indexy dané součásti v modelu a dále v tabulkách analýzy FMECA.

Stěžejní analýza FMECA je vypracována do pracovních listů, ve kterých jsou zapsány způsoby poruch, jejich nepříznivé důsledky, možné příčiny a příležitosti k detekci těchto příčin. Ukázka je znázorněna v tab. 11. K vyhodnocení čísla priority rizika je použit postup z [26]¹⁹, který na rozdíl od normy předepisuje vyhodnocovat číslo RPN ne ke způsobu poruchy, ale ke každé jednotlivé příčině poruchy. Očekává se tak od analýzy její přesnější zhodnocení.

Ukazatele pravděpodobnosti výskytu O, závažnosti příčiny poruchy S a možnosti detekce D jsou stanoveny následovně:

- ukazatel O dle zaznamenané historie poruch a jejich četností (viz. kap. 3.3.1),
- ukazatel S dle úrovně ohrožení obsluhy a dle finanční náročnosti na obnovu (tab. 6),
- ukazatel D dle současného nastavení systému údržby se svými úkonu v rámci preventivní údržby,

přičemž podpora k vyhodnocování je nalezena ve zdrojích [26]¹⁹, [28]²⁰ a [27]²¹.

Pro prvotní zavádění opatření jsou z analýzy vybrány ty příčiny poruch, jejichž hodnoty RPN dle Paretova diagramu (obr. 28) zahrnují prvních přibližně 14 % z celkového počtu RPN všech příčin poruch. Tyto příčiny jsou blíže znázorněny v tab. 12 společně s navrženými opatřeními včetně užití vibrační diagnostiky. Jak lze v tabulce vidět, využitelnost vibrační diagnostiky jako nástroje prediktivní a proaktivní údržby je vyhodnocena kladně.

¹⁹ BERTSCHE, B. Reliability in automotive and mechanical engineering: determination of component and system reliability

²⁰ MYKISKA, Antonín. Bezpečnost a spolehlivost technických systémů

²¹ ČSN EN 60812:2007. Techniky analýzy bezporuchovosti systémů – Postup analýzy způsobů a důsledků poruch (FMEA)

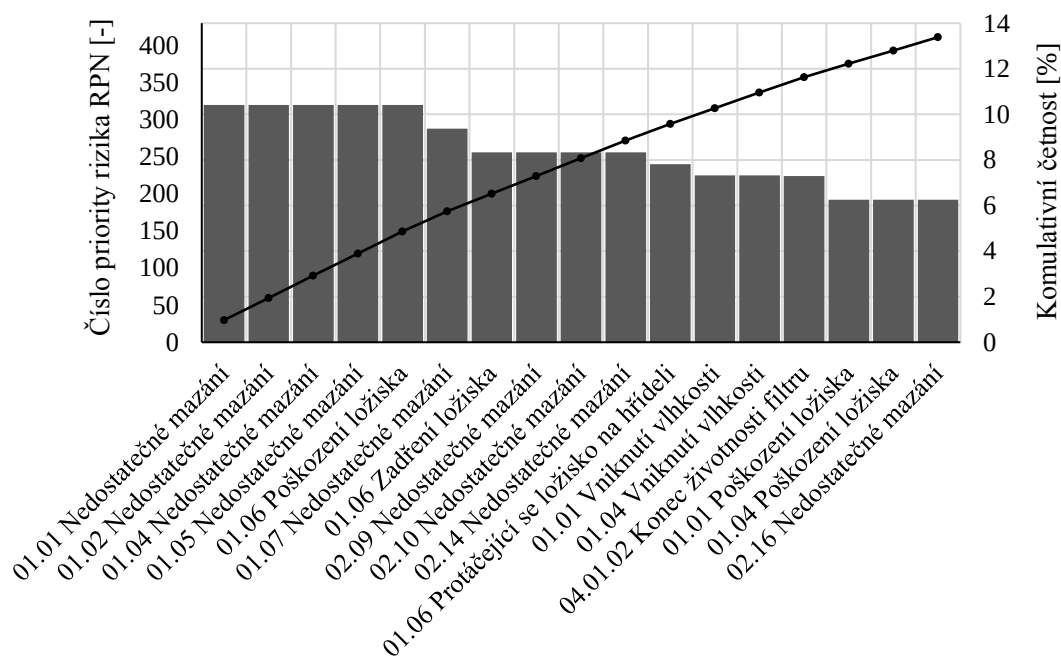
Tab 6) Kritérium pro klasifikaci závažnosti poruchy S ve vztahu k finanční náročnosti na obnovu při dané příčině poruchy

Kritérium klasifikace závažnosti poruchy S	Finanční náročnost na obnovu [Kč]
nízké	< 50 000
středí	50 000 – 200 000
vysoké	> 200 000

V dalším vývoji systému údržby se se zhotovenou analýzou FMECA doporučují tyto úkony:

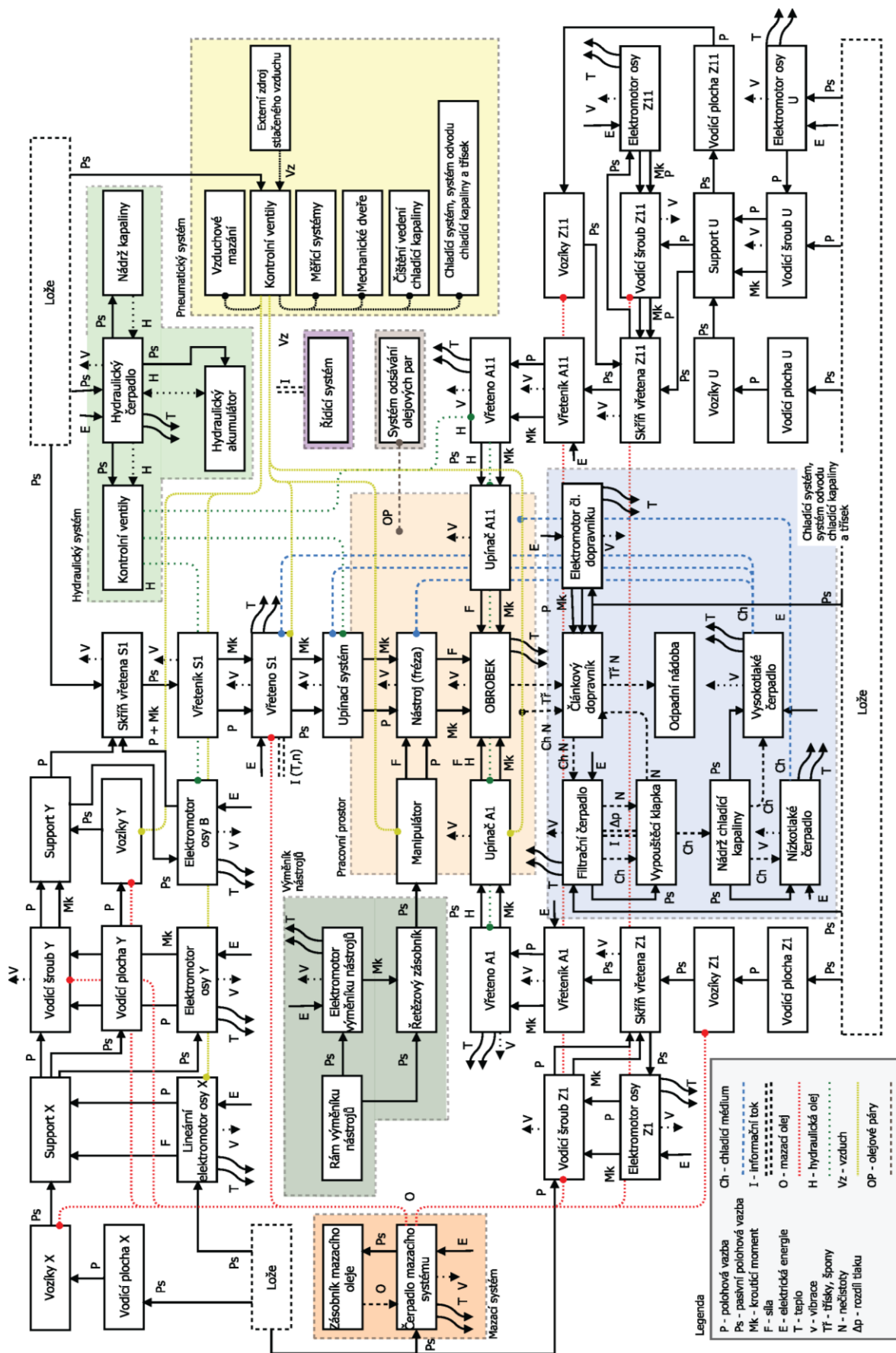
- zabývat se a případně zavést vhodná opatření pro příčiny poruch, jejichž hodnoty RPN se dle Paretova principu nacházejí na hranici 20 až 30 % z celkového počtu hodnot RPN,
- zabývat se a případně zavést vhodná opatření pro příčiny poruch, u kterých alespoň jeden ukazatel O, S nebo D dosahuje hodnoty 8 a výše. [26]

Paretův diagram hodnot priority rizika RPN příčin způsobu poruch daných součástí

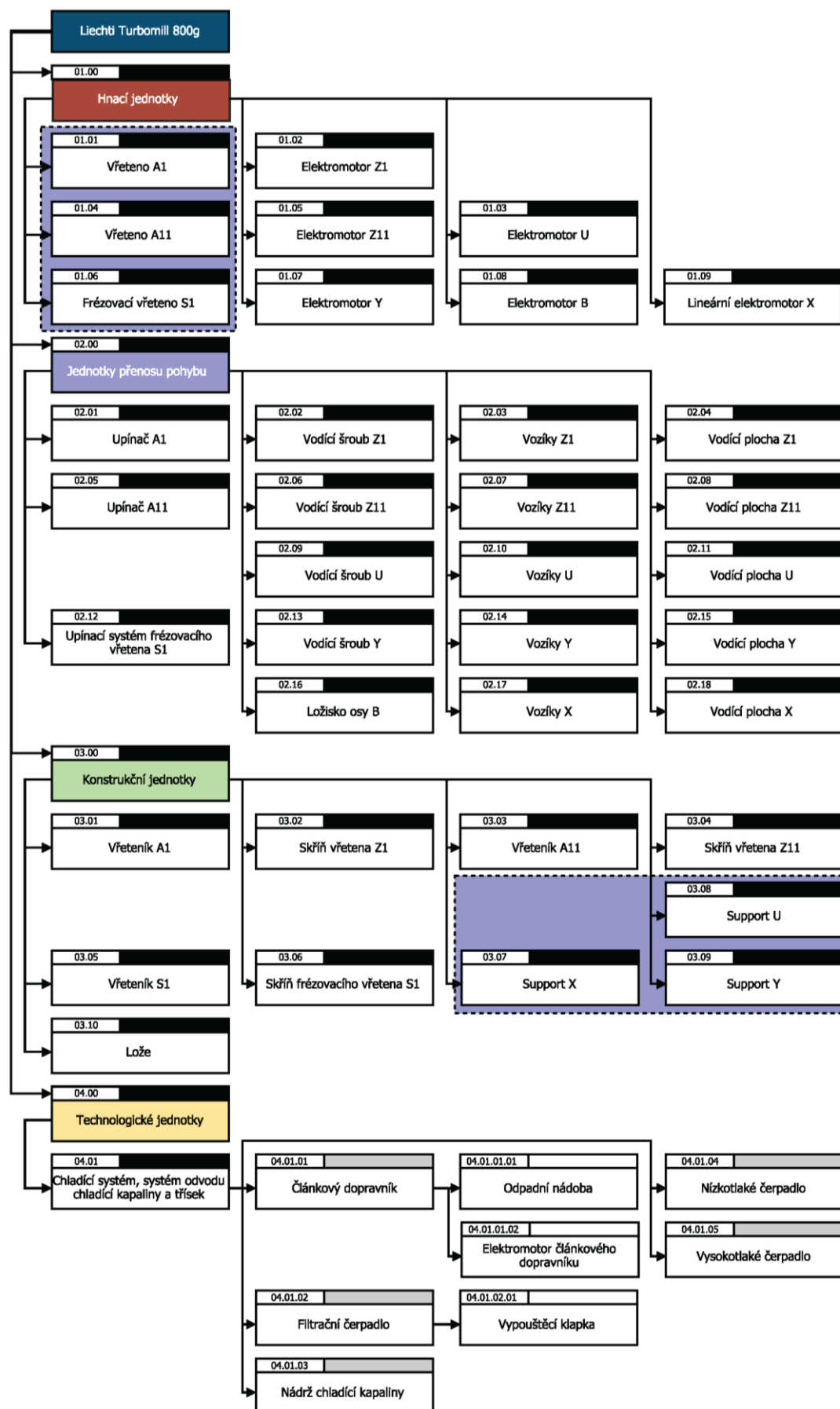


Příčina způsobu poruchy dané součástí

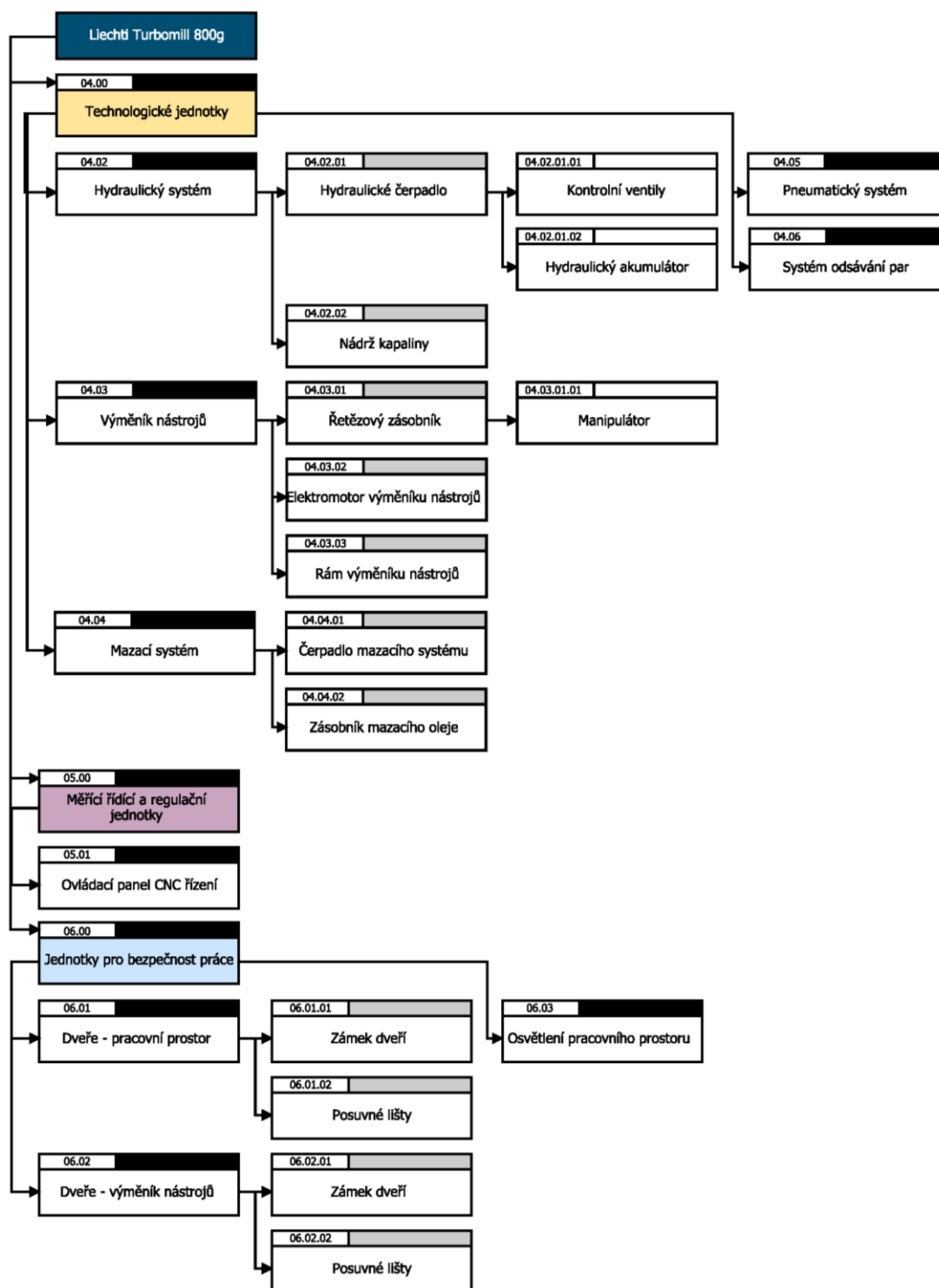
Obr. 28) Paretův diagram hodnot priority rizika RPN příčin způsobu poruch daných součástí



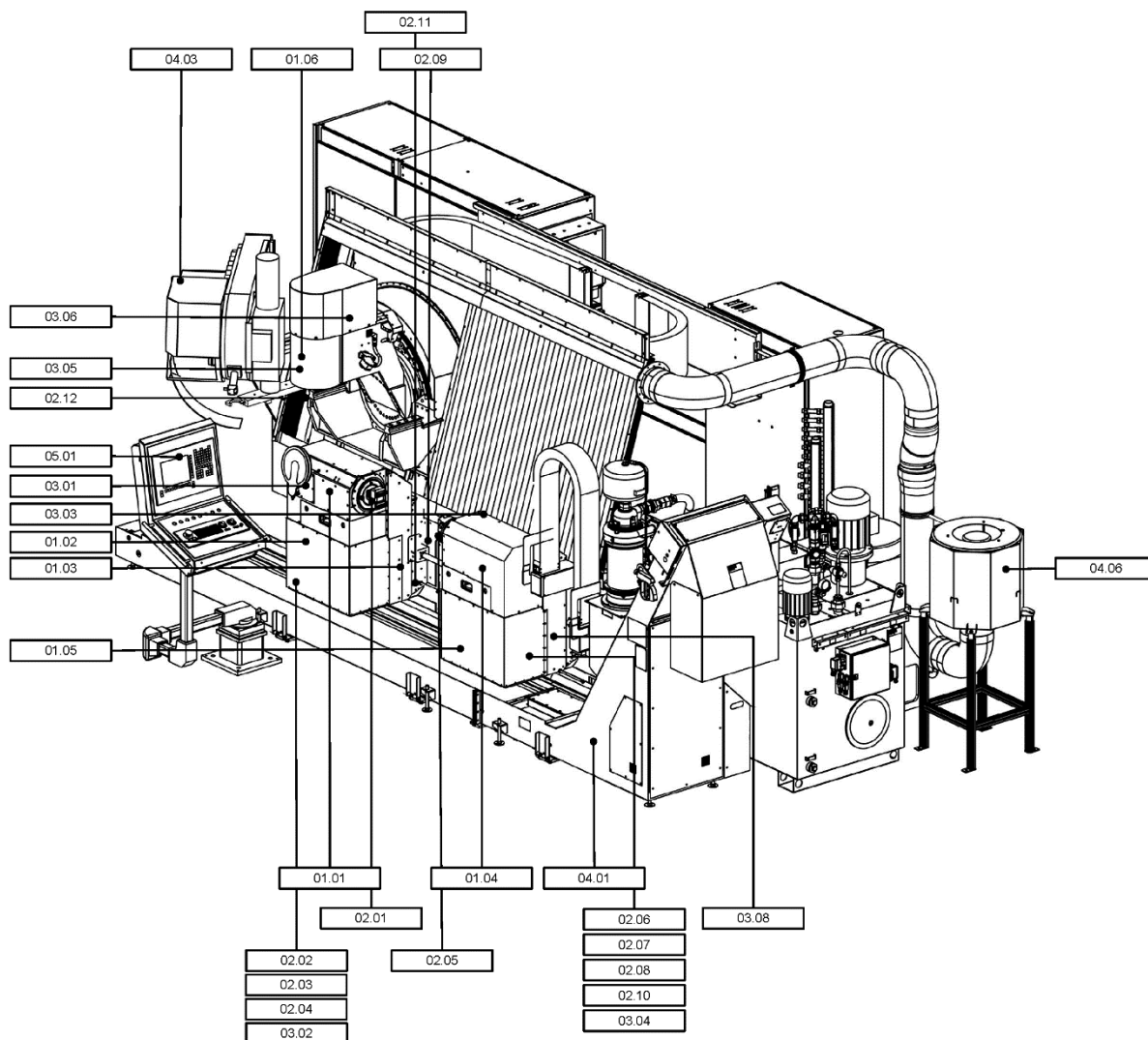
Obr. 29) Blokový diagram stroje Liechti Turbomill 800g



Obr. 30) Model systému stroje Liechti Turbomill 800g



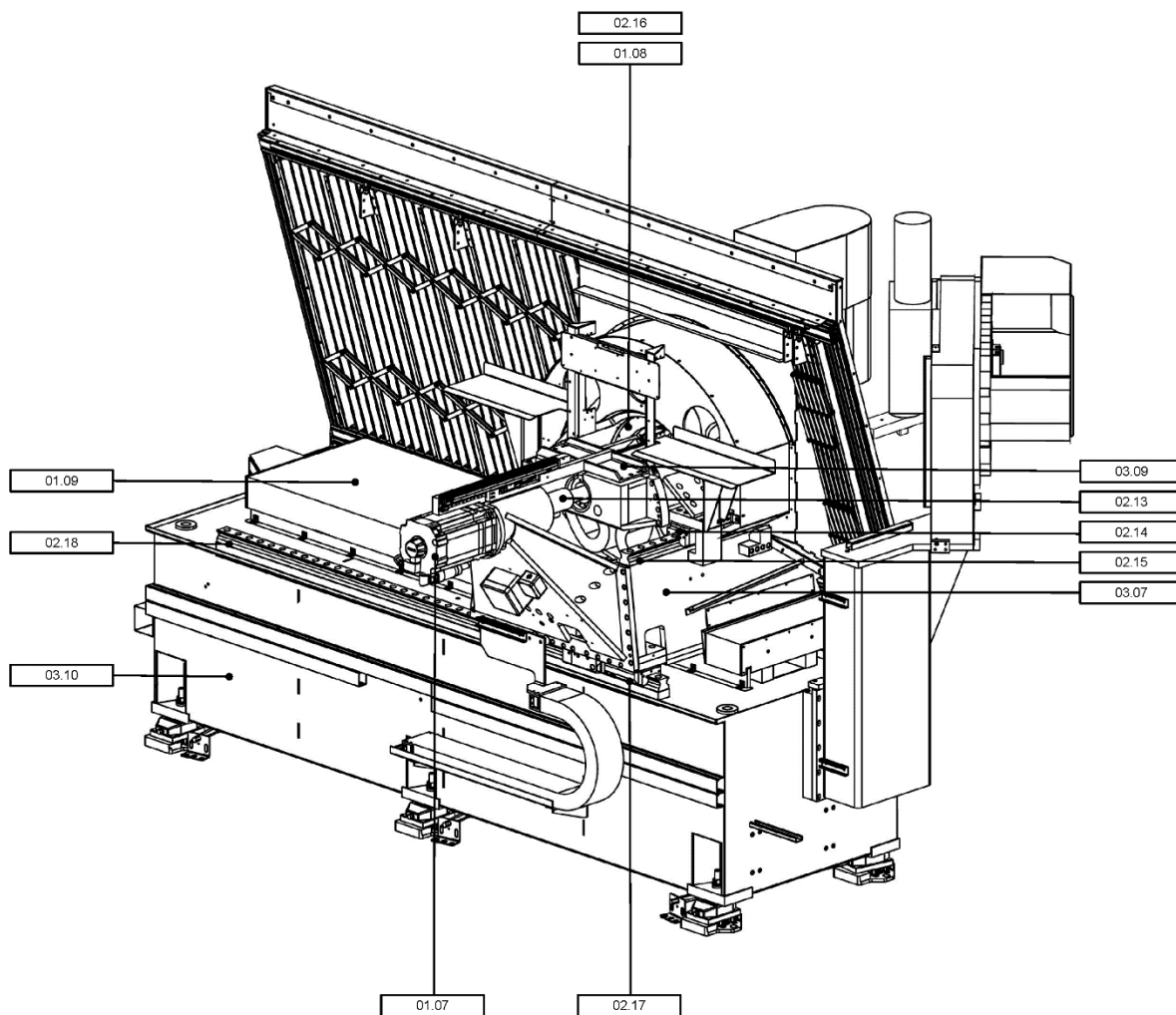
Obr. 31) Model systému stroje Liechti Turbomill 800g



Obr. 32) Schéma komponent stroje Liechti Turbomill 800g [24]

Tab 7) Seznam součástí schématu komponent stroje Liechti Turbomill 800g

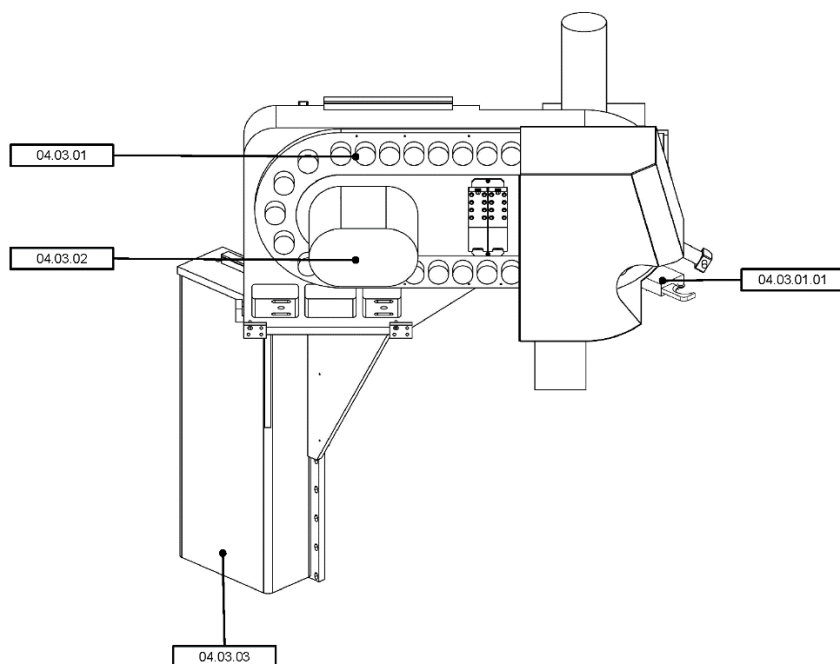
01.01	Vřeteno A1	02.10	Vozíky U
01.02	Elektromotor Z1	02.11	Vodící plocha U
01.03	Elektromotor U	02.12	Upínací systém vřetena S1
01.04	Vřeteno A11	03.01	Vřeteník A1
01.05	Elektromotor Z11	03.02	Skříň vřetena Z1
01.06	Frézovací vřeteno	03.03	Vřeteník A11
02.01	Upínač A1	03.04	Skříň vřetena Z11
02.02	Vodící šroub Z1	03.05	Vřeteník frézovacího vřetena S1
02.03	Vozíky Z1	03.06	Skříň frézovacího vřetena S1
02.04	Vodící plocha Z1	03.08	Support U
02.05	Upínač A11	04.01	Systém odvodu chladicí kapaliny a třísek
02.06	Vodící šroub Z11	04.03	Výměník nástrojů
02.07	Vozíky Z11	04.06	Systém odsávání par
02.08	Vodící plocha Z11	05.01	Ovládací panel CNC řízení
02.09	Vodící šroub U		



Obr. 33) Schéma komponent stroje Liechti Turbomill 800g [24]

Tab 8) Seznam součástí schématu komponent stroje Liechti Turbomill 800g

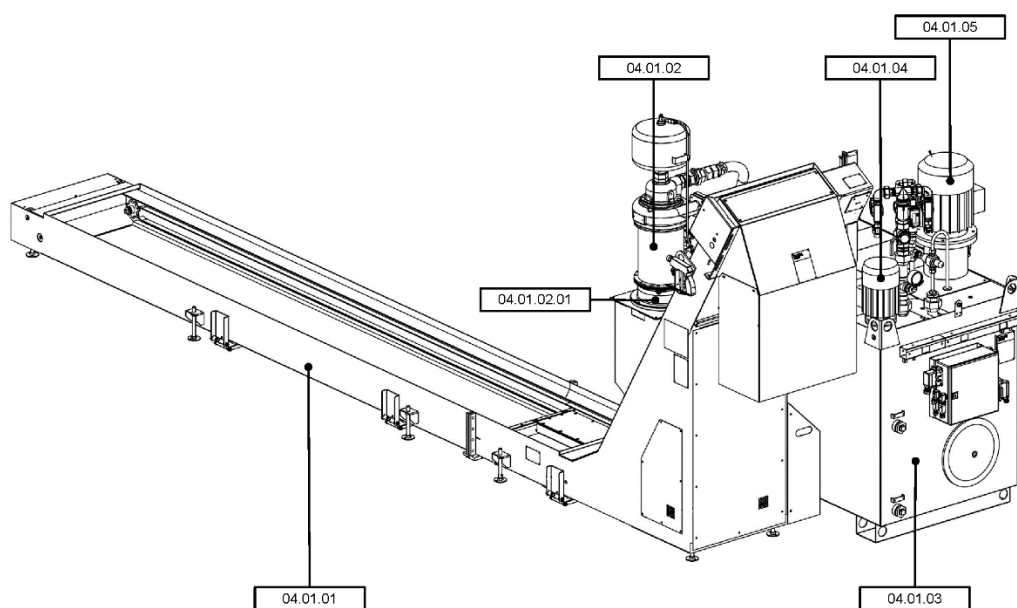
01.07	Elektromotor Y	02.16	Ložisko osy B
01.08	Elektromotor B	02.17	Vozíky X
01.09	Lineární elektromotor X	02.18	Vodící plocha X
02.13	Vodící šroub Y	03.07	Support X
02.14	Vozíky Y	03.09	Support Y
02.15	Vodící plocha Y	03.10	Lože



Obr. 34) Schéma komponent výměníku a zásobníku nástrojů [24]

Tab 9) Seznam součástí schématu komponent výměníku a zásobníku nástrojů

04.03.01	Řetězový zásobník	04.03.02	Elektromotor výměníku nástrojů
04.03.01.01	Manipulátor	04.03.03	Rám výměníku nástrojů



Obr. 35) Schéma komponent chladicího systému a systému odvodu chladicí kapaliny a třísek [24]

Tab 10) Seznam součástí schématu komponent chladicího systému a systému odvodu chladicí kapaliny a třísek

04.01.01	Článkový dopravník	04.01.03	Nádrž chladicí kapaliny
04.01.02	Filtrační čerpadlo	04.01.04	Nízkotlaké čerpadlo
04.01.02.01	Vypouštěcí klapka	04.01.05	Vysokotlaké čerpadlo

Tab 11) Ukázka vyplněného pracovního listu analýzy FMECA

Index	Název	Popis a funkce objektu	Způsob poruchy	Důsledky způsobu poruchy	Možné příčiny poruchy	Metoda detekce	O	S	D	RPN
01.09	Lineární elektromotor X	Změna polohy frézovacího vřetena v ose X	Nedojde k posuvu frézovacího vřetena S1 v ose X	Lineární elektromotor X se nespustí	Přerušený přívod, porucha elektrického zapojení	Vizuální kontrola	3	7	2	42
					Nedojde k odbrždění osy X (porucha upínací brzdové palky - chyba tlakového spínače, dodáváného vzduchu)	Alarm 600100, 600101	2	7	2	28
					Nedostatečné mazání	Vizuální kontrola	3	7	6	126
					Přetížení (Překročen jmenovitý provozní režim)		2	6	8	96
					Přilís vysoká okolní teplota		3	5	4	60
					Pohon je blokován		3	6	7	126
					Adhezivní opotřebení	Vizuální kontrola	6	2	9	108
					Abrazivní opotřebení		6	2	9	108
02.01	Upínáč A1	Upnutí obráběné součásti	Kleština neupne obráběnou součást	Součást nelze obrábět, hrozí nebezpečí špatného upnutí obrobku a ohrožení obsluhy	Přerušený přívod hydraulického vedení	Alarm 600400, Alarm 700324 + Alarmy hydraulického systému	4	9	3	108
					Vadný tlakový spínač	Alarm 600400	4	9	3	108
					Poškozený signální kabel		4	6	4	96
					Porucha relé kleštiny	Alarm 700330, 700331	4	8	3	96
					Nízký stav hladiny oleje systému Unilock	Vizuální kontrola	4	8	4	128
					Porucha tlakového spínače	Alarm 600401, Alarm 700325	4	5	3	60
					Poškozený signální kabel		4	5	4	80
					Hydraulický problém (ztráta tlaku, porucha hydraulického agregátu)	Alarmy hydraulického systému	4	5	4	80
					Porucha relé kleštiny	Alarm 700330, 700331	4	5	3	60
					Přerušený přívod hydraulického vedení	Alarm 700325	4	10	3	120
					Přítomnost nečistot a špon na stykových plochách kleštiny a součásti	Vizuální pohled	9	7	2	126
					Nízký stav hladiny oleje systému Unilock	Vizuální kontrola	4	8	4	128

Tab 12) Kritické příčiny způsobů poruch s návrhem opatření

FMEA - Kritické prvky										Koncový objekt a označení: Verze FMEA:				Liechti Turbomill 800g / BRQ10004 v 1.0				List: 01/01	
Index	Název	Způsob poruchy	Možné příčiny poruchy	O	S	D	RPN	Opatření	O	S	D	RPN							
01.01	Vřeteno A1	Vibrační opotřebení	Vniknutí vlhkosti	5	5	9	225	Pravidelná výměna těsnění dle doporučení výrobce	2	5	7	70							
				5	8	8	320	Pravidelné ruční mazání osy za pomoci maznice skrze mazací hlavice dle doporučení výrobce	2	8	6	96							
				3	8	8	192	Pravidelná vibrační diagnostika - záznam RMS, trendování	3	8	3	72							
01.02	Elektromotor Z1	Motor se zahřívá	Nedostatečné mazání	5	8	8	320	Pravidelné ruční mazání osy za pomoci maznice skrze mazací hlavice dle doporučení výrobce	2	8	6	96							
01.04	Vřeteno A11	Vibrační opotřebení	Vniknutí vlhkosti	5	5	9	225	Pravidelná výměna těsnění dle doporučení výrobce	2	5	7	70							
01.05	Elektromotor Z11	Motor se zahřívá	Nedostatečné mazání	5	8	8	320	Pravidelné ruční mazání osy za pomoci maznice skrze mazací hlavice dle doporučení výrobce	2	8	6	96							
				3	8	8	192	Pravidelná vibrační diagnostika - záznam RMS, trendování	3	8	3	72							
				5	8	8	320	Pravidelné ruční mazání osy za pomoci maznice skrze mazací hlavice dle doporučení výrobce	2	8	6	96							
01.06	Frézovací vřeteno S1	Vibrační opotřebení	Smykání ložiska s rotorovou nebo statorovou částí, zadření ložiska	4	8	8	256	Pravidelná vibrační diagnostika - záznam RMS, trendování	4	8	3	96							
01.07	Elektromotor Y	Motor se zahřívá	Poškození ložiska (Poškození vnějšího kroužku ložiska, vnitřního kroužku, klece nebo valivého tělesa ložiska)	5	8	8	320		5	8	2	80							
				5	6	8	240		5	6	4	120							
				4	8	9	288	Pravidelné ruční mazání osy za pomoci maznice skrze mazací hlavice dle doporučení výrobce	2	8	7	112							
02.09	Vodící šroub U	Porucha kuličkové matice	Nedostatečné mazání	4	8	8	256	Pravidelné ruční mazání kuličkové matice za pomoci maznice skrze mazací hlavice dle doporučení výrobce	2	8	6	96							
02.10	Vozíky U	Opotřebení valivých elementů	Nedostatečné mazání	4	8	8	256	Pravidelné ruční mazání vozíků za pomoci maznice skrze mazací hlavice dle doporučení výrobce	2	8	6	96							
02.14	Vozíky Y	Opotřebení valivých elementů	Nedostatečné mazání	4	8	8	256	Pravidelné ruční mazání vozíků za pomoci maznice skrze mazací hlavice dle doporučení výrobce	2	8	6	96							
02.16	Ložisko osy B	Vibrační opotřebení	Nedostatečné mazání	3	8	8	192	Pravidelné ruční mazání ložiska za pomoci maznice skrze mazací hlavice dle doporučení výrobce	2	8	6	96							
04.01.02	Filtrační čerpadlo	Nedostatečný nebo žádný průtok	Konec životnosti filtru	4	8	7	224	Pravidelná výměna filtru čerpadla v intervalech dle doporučení výrobce	2	8	5	80							

3.3.3 Specifikace měření

Na základě analýzy způsobu, důsledků a kritičnosti poruch FMECA je stanoveno rozhodnutí pro aplikaci vibrační diagnostiky jakožto nástroje prediktivní údržby na tyto součásti strojního zařízení Liechti Turbomill 800g:

- Frézovací vřeteno osy S1;
- Upínací vřeteno osy A1;
- Upínací vřeteno osy A11.

K měření vibrací je využit vibrometr značky a označením Fluke 810. Jedná se o jednokanálový vibrační analyzátor určený především pro zjištění a záznam širokopásmové hodnoty vibrací, např. hodnot RMS²² a pro základní a přibližné diagnostické vyhodnocení s pomocí frekvenčního spektra vibrací. Ukázka zařízení se nachází na obr. 36.

Zařízení je schopné zaznamenat vibrace ve frekvenčním rozsahu od 2 Hz do 20 kHz, přičemž je také vybaven možností připojení laserového tachometru pro zjištění hodnoty rychlosti *rpm*²³ v rozmezí od $n = 6 - 99\,999\text{ rpm}$. Snímač vibrometru je tříosý akcelerometr s citlivostí 100 mV/g ($\pm 5\%$, 25 °C). [29]



Obr. 36) Vibrometr Fluke 810 při měření frézovacího vřetena osy S1 stroje Leichti Turbomill 800g s tříosým akcelerometrem ve směru X

²² Zkratka RMS – root mean square value neboli efektivní hodnota měřené veličiny vyjádřena jako druhá odmocnina čtverců okamžitých hodnot. RMS hodnota je významná tím, že obsahuje informaci o výkonu kmitání. [35]

²³ RPM (zkratka revolutions per minute) v překladu otáčky za minutu, jednotka *ot/min*

Další postup v rámci systémové analýzy tedy spočívá v přímém zavádění vibrační diagnostiky do systému údržby. První a hlavní krok se zakládá na výběru takových měřicích míst, které jsou relevantními zdroji vibrační odezvy a jsou tak vhodné k další analýze. Jedná se tedy o taková místa, jejichž charakter působení umožňuje použít vibrace jako zdroj informací pro stanovení konkrétního technického a provozního stavu a dále včas rozlišit a případně zamezit rozvíjející se poruše. Obecně se tato místa nacházejí a dle normy ČSN ISO 20816-1:2017²⁴ je také doporučeno, aby v případě měření vibrací na nerotujících částech vibrace byly měřeny co nejblíže ložiskům nebo na takových „konstrukčních částech, které významně reagují na dynamické síly přenášené z rotujících elementů v místech ložisek a charakterizující celkové vibrace stroje“. [30]

Umístění snímačů na jednotlivých osách je značeno zkratkami, přičemž u os A1 a A11 je dodržena tzv. konvence MIMOSA²⁵, kdy se jednotlivé pozice snímačů číslovají postupně. [31]

Zkratky znamenají:

- X – Umístění snímače na frézovacím vřetenu osy S1 ve směru X;
- Y – Umístění snímače na frézovacím vřetenu osy S1 ve směru Y;
- RH – Umístění snímače na ose A1 nebo A11 na horizontální straně vřeteníku v radiálním směru;
- RB – Umístění snímače na ose A1 nebo A11 na vertikální, boční straně vřeteníku v radiálním směru;
- A – Umístění snímače na ose A1 nebo A11 na čele vřeteníku v axiálním směru.

Osa S1

Výrobce osy S1 je švýcarská společnost Fischer AG. Pozice snímačů na tomto frézovacím vřetenu jsou určeny z důvodu chybějícího technického výkresu na základě dostupného grafického znázornění stavby vřetená (obr. 37) a konzultace s výrobcem obráběcího centra Liechti.

Měření je stanoveno na ložiscích blíže nástroji, přičemž horní ložiska nacházející se nad elektromotorem vřetená jsou zanedbána z důvodu neschopnosti umístění kontaktního snímače na vřeteníku, potažmo na skřini vřetená. Pozice jsou určeny ve dvou radiálních směrech X a Y tak, jak je znázorněno na obr. 38, přičemž rychlost *rpm* vřetená je při měření nastavena na konstantní hodnotu $n = 5000 \text{ ot./min.}$ ($f = 83,33 \text{ Hz}$) v zahřátém stavu. Hodnota byla určena dle v CNC programech využívaných hodnot rychlostí. V budoucnu se také nevylučuje změna těchto měřicích otáček z důvodu velmi širokého rozpětí používaných otáček při obrábění.

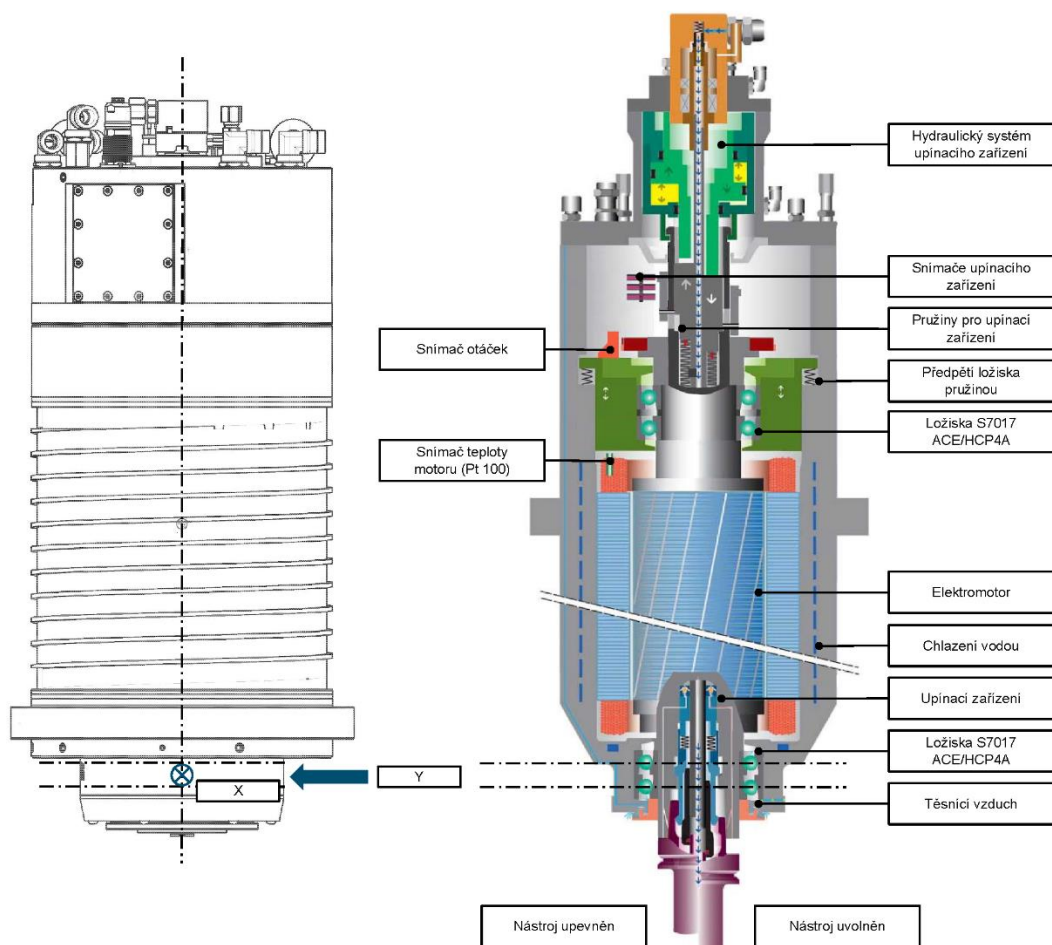
Výrobce Fischer AG dále nedeklaruje hodnoty tzv. vlastních frekvencí, tedy hodnot otáček *rpm*, při jejichž dosažení dochází k vzniku rezonance a následně vysokých vibrací. Tento bod je dále rozebírán v kap. 3.7.

Na základě konzultace s autorizovaným servisem jsou ložiska ve vřetenu určeny jako kuličková ložiska s kosoúhlým stykem od výrobce SKF typu S7017 ACE/HCP4A.

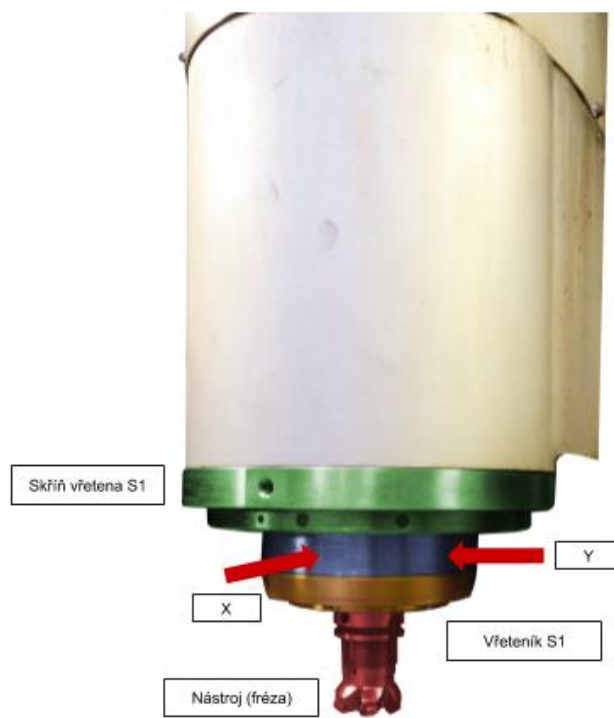
Je doporučeno při měření využívat nástroje řady s označením R63. Jedná se o nejrozšířenější řadu nástrojů ve strojích Liechti, ve výrobě. Při používání stejného nástroje jsou tak více zachovány stejné podmínky měření v průběhu času.

²⁴ Vibrace – Měření a hodnocení vibrací strojů – Část 1: Obecné pokyny

²⁵ Zkratka Machinery Information Management Open Systems Alliance, v překladu Aliance otevřených systémů pro řízení informací o strojích



Obr. 37) Grafické znázornění stavby frézovacího vřetena osy S1 s umístěním snímačů [24]



Obr. 38) Umístění snímačů na frézovacím vřetenu osy S1

Osa A1 a A11

Výrobce os A1:A11 je přímo dodavatel strojního zařízení, společnost Liechti. Osy slouží pro uchycení obrobku, resp. pro manipulaci s obráběnou turbínovou lopatkou, a to ve vertikálním směru, v ose Z1:Z11 a v rotačním směru v ose A.

Stanovení pozic pro snímače je provedeno na základě technické dokumentace os A1:A11, na místech nejbližších ložiskům tak, jak je určeno na obrázcích 40, 41 a 42. Pro každou osu se jedná o měření ve třech pozicích v radiálním směru a v jedné pozici na čele vřeteníku, v axiálním směru. Případné umístění označením 1RB je zanedbáno z důvodu neschopnosti umístění kontaktního snímače na dané místo. Dále dle dokumentace byla určena využívaná ložiska a to:

- Vřetenové ložisko B7015C TPA P4 UL;
- Axiální – radiální ložisko YRT 150 pro osu A1;
- Axiální – radiální ložisko RTC 150 pro osu A11, švýcarského výrobce Wälzlager.

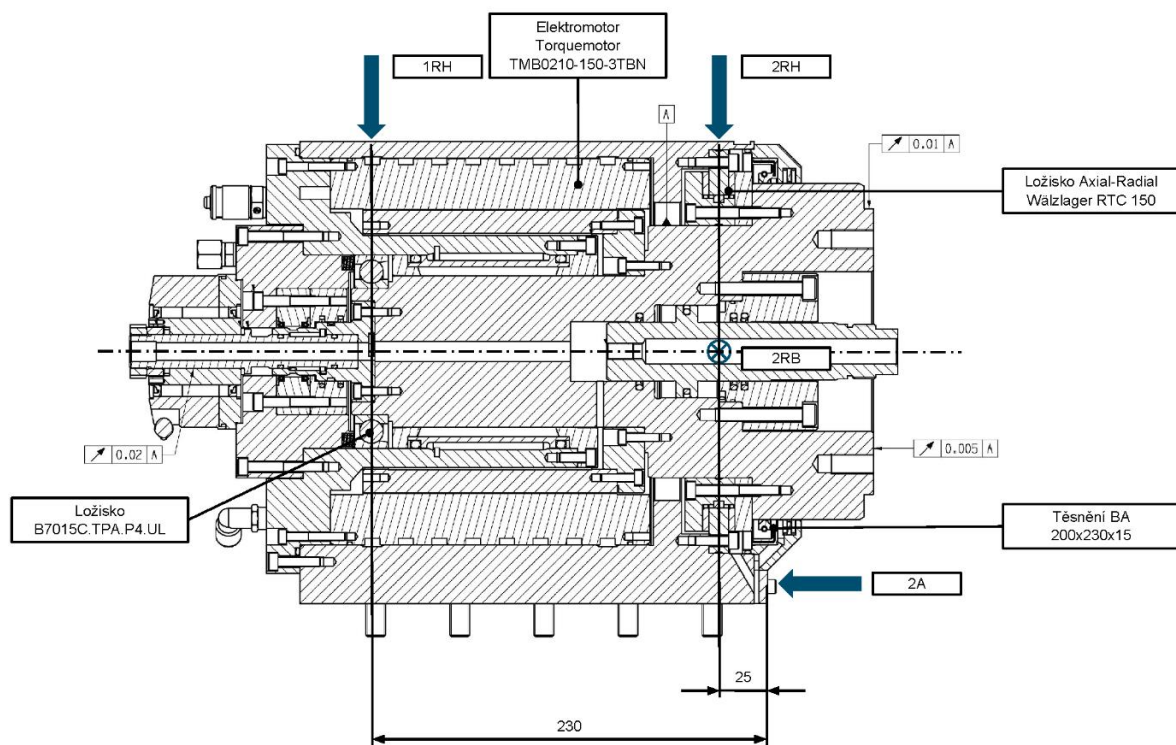
Osy jsou vybavené momentovým elektromotorem výrobce Etel, typu TMB0210-150-3TBN. Motor je schopen dosáhnout otáček až $n = 350 \text{ rpm}$ o momentu $M = 140 \text{ Nm}$. Výrobce dále nedeklaruje hodnoty rezonančních frekvencí. Vzhledem k charakteru a funkci vřeten os A1:A11 je možné riziko rezonance vlivem otáček zanedbat. Vřetena těchto os se nacházejí v rotačním pohybu během obrábění pouze v jednotkách otáček rpm . Osy své maximální rotační rychlosti dosahují pouze při úkonu navrtávání obrobku. Měřením je dokázáno, že při této rychlosti rezonance nenastává.

Vlivem použitého ložiska v ose A1 je otáčková rychlost os výrobcem Liechti dále omezena na maximální hodnotu $n = 200 \text{ rpm}$. Konstrukce a stavba ložiska YRT 150 totiž dovoluje maximální rychlost otáček pouze při hodnotě $n = 210 \text{ rpm}$. Měření vibrací tedy probíhá právě při maximální rychlosti vřeten, $n = 200 \text{ rpm}$ ($f = 3,33 \text{ Hz}$).

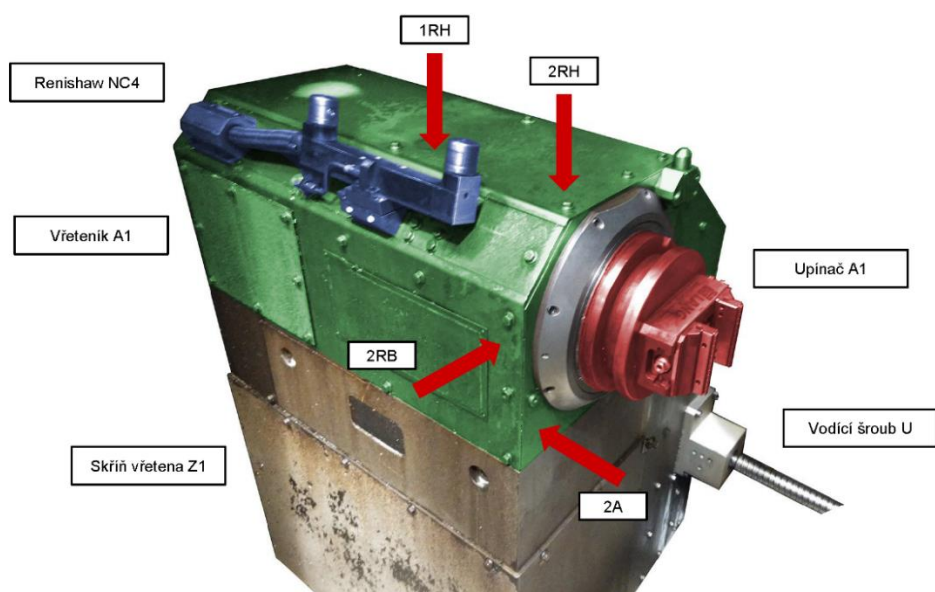
Z důvodu, že řídicí systém obráběcího stroje poskytuje informaci pouze o poloze os A1:A11 ve stupních, a ne informaci o jejich rychlosti, je měřicí rychlost $n = 200 \text{ rpm}$ ověřena laserovým tachometrem připojeným k vibračnímu analyzátoru Fluke 810. Měření je zobrazeno na obr. 39.



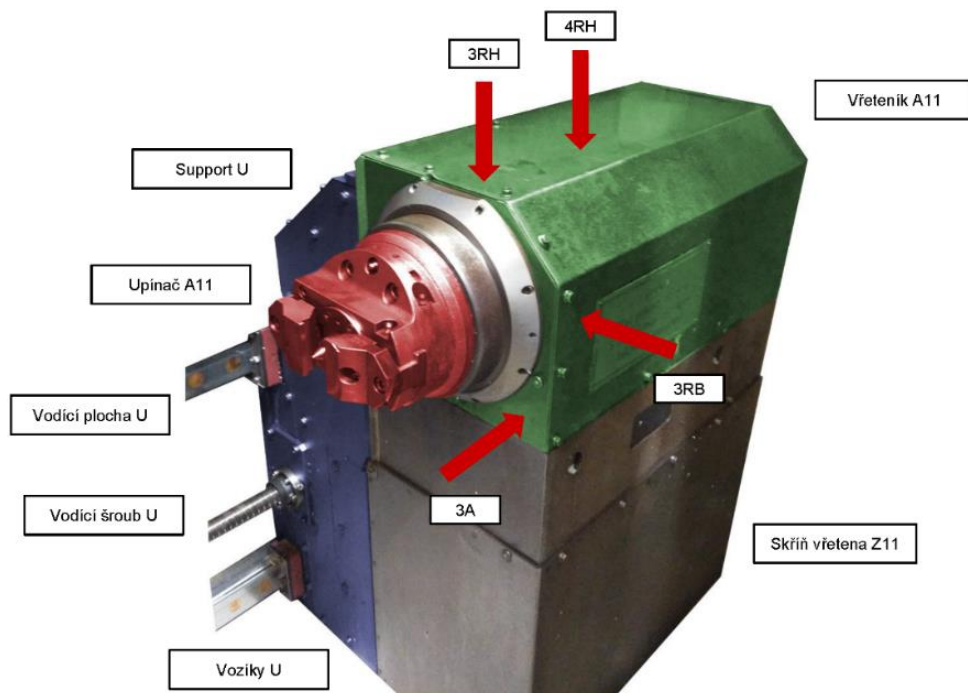
Obr. 39) Měření otáčkové rychlosti os A1:A11 s využitím laserového otáčkoměru a nalepeného odrazného povrchu na vřetenu



Obr. 40) Technický výkres osy A1 a A11 se znázorněním důležitých prvků a umístění snímačů [32]



Obr. 41) Umístění snímačů na ose A1



Obr. 42) Umístění snímačů na ose A11

3.3.4 Analýza a posouzení rizik při měření

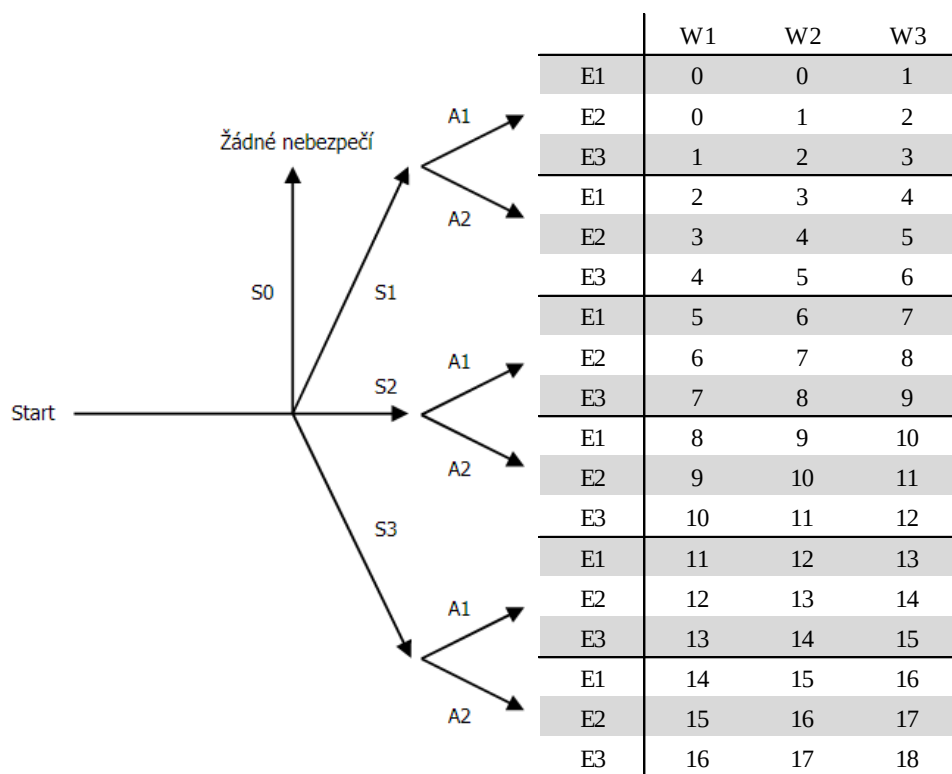
V rámci managementu BOZP a vysoko nastavené priority firmy Siemens v oblasti bezpečnosti práce je značný zájem před zavedením jakékoliv jiné technologie, systému nebo pracovního postupu, vyhledávat rizika s tím spjatá a předcházet jim tvorbou preventivních opatření. Je proto vytvořena analýza a posouzení všech rizik spojených s prováděním vibrační diagnostiky, konkrétně u strojů Liechti 800g.

V analýze je předpokládáno, že obráběcí stroje splňují veškeré bezpečnostní náležitosti, které výrobce deklaroval prohlášením o shodě v době uvedení na trh. Konkrétně, že stavba a funkce těchto zařízení byla při uvedení na trh v souladu s normami:

- ČSN EN ISO 12100-1+A1:2009 Bezpečnost strojních zařízení – Základní pojmy, všeobecné zásady pro konstrukci – Část 1: Základní terminologie, metodologie,
- ČSN EN ISO 12100-2+A1:2009 Bezpečnost strojních zařízení – Základní pojmy, všeobecné zásady pro konstrukci – Část 2: Technické zásady,
- ČSN EN ISO 14121-1:2007 Bezpečnost strojních zařízení – Posouzení rizika – Část 1: Zásady,
- ČSN EN 60204-1+A1:2009 Bezpečnost strojních zařízení – Elektrická zařízení strojů – Část 1: Všeobecné požadavky,
- ČSN EN 12417:2001 Bezpečnost obráběcích a tvářecích strojů – Obráběcí centra.

Analýza rizik se tak vztahuje pouze na úkony a celkový proces měření vibrací a je vypracována dle aktuálně platné normy ČSN EN 12417+A2:2009 Bezpečnost obráběcích a tvářecích strojů – Obráběcí centra a dle zdroje [33], Management technických rizik u výrobních strojů.

V první fázi je vytvořen seznam významných nebezpečí (tab. 15 a 16) s popisy možných nebezpečných situací, přičemž je využit blokový diagram stroje (obr. 29). Pro každé nalezené nebezpečí je následně vypracován formulář pro odhad rizika, kde je číselný odhad rizika uskutečněn pro takové případy, kdy nejsou použita žádná preventivní opatření. Odhad je vyčíslen dle normy ČSN EN ISO 12100:2011²⁶ s využitím tabulky se stupnicí (tab. 13), grafu (obr. 43) pro odhad velikosti rizika s maticí rizik a legendou stupnice závažnosti a pravděpodobnosti výskytu škody (tab. 14). V dalších fázích jsou ve formuláři navržena opatření snižující tuto velikost rizika s konečným zhodnocením o akceptovatelnosti rizika. Příklad formuláře je uveden v tab. 17.



Obr. 43) Graf pro odhad velikosti rizika [33]

Tab 13) Matice rizik [33]

0 - 4	přijatelné riziko
5 - 6	riziko přijatelné po prověření
7 - 18	nepřijatelné riziko

²⁶ Bezpečnost strojních zařízení – Všeobecné zásady pro konstrukci – Posouzení rizika a snižování rizika

Tab 14) Legenda – stupnice závažnosti a pravděpodobnosti výskytu škody [33]

Legenda - stupnice závažnosti a pravděpodobnosti výskytu škody	
S0	nehrozí žádné nebezpečí
S1	lehké zranění
S2	těžké zranění
S3	smrtelné zranění
A1	dobu pobytu v nebezpečné oblasti zřídka až častěji
A2	dobu pobytu v nebezpečné oblasti často až trvale
E1	rozpoznání a vyhnutí se nebezpečí je možné
E2	rozpoznání a vyhnutí se nebezpečí je možné za určitých okolností
E3	rozpoznání a vyhnutí se nebezpečí je sotva možné
W1	pravděpodobnost vzniku nebezpečné události je malá
W2	pravděpodobnost vzniku nebezpečné události je střední
W3	pravděpodobnost vzniku nebezpečné události je velká

Obecně se veškerá opatření snižující velikost rizika vztahují na:

- povinnost nosit po celou dobu přítomnosti u strojního zařízení schválenou²⁷ bezpečnostní obuv a schválené ochranné bezpečnostní brýle, vhodný pracovní oděv (ne volné oblečení) a platí přísný zákaz nošení veškerých šperků, hodinek a vázanek,
- povinnost nosit schválené bezpečnostní rukavice při čištění součástí v pracovním prostoru a manipulaci s nástroji,
- jestliže existuje nebezpečí zachycení vlasů obsluhy je nutné využít ochrannou čepici,
- při prvním kontaktu se strojem je nutné pozorně ověřit prostor kolem stroje pro případ rozlitého oleje nebo chladicí kapaliny a následně pracovní prostor pro případ v něm zapomenutého nářadí,
- v případě, že obsluhou nedochází k jakékoliv manipulaci s osami je nutné mít na ovládacím panelu stroje zablokované veškeré posuvy součástí v pracovním prostoru,
- v případě jakékoliv manipulace, ovládání se strojním zařízením, posuvu nebo rotace os je nutné mít uzavřené bezpečnostní mechanické dveře, v době měření mít uzavřené dveře alespoň na velikost drátu snímače a posuv součástí v pracovním prostoru je omezen na 50 % možné posuvové rychlost – platí zákaz používání rychloposuvu,
- po celou dobu měření mít na ovládacím panelu stroje zablokován průtok chladicí kapaliny,
- během měření je nutné mít vibrační analyzátor v takové pozici, aby v případě chycení a vtažení snímače bylo možné bezpečného odpojení konektoru od měřicího přístroje,
- obecně lze k měření vibrací pověřit pouze zaškoleného pracovníka se základními znalostmi ovládání řídicího systému Sinumerik²⁸,
- během měření vibrací je nutné využívat pouze předdefinované a schválené automatické CNC programy vytvořené pro tento účel.

²⁷ Slovem schválené jsou myšleny takové pracovní pomůcky a předměty BOZP, které jsou schválené a interní směrnici nařízené managementem bezpečnosti v Siemens s. r. o., Brno.

²⁸ „Sinumerik je označení řídicích systémů pro obráběcí stroje, jejichž výrobcem je firma Siemens AG.“

Tab 15) Seznam významných nebezpečí během procesu měření vibrací

List	SEZNAM VÝZNAMNÝCH NEBEZPEČÍ	Typ stroje: Obráběcí centrum	Zpracoval: Petr Semotam	Počet nebezpečí
01/02	dle normy ČSN EN 12417+A2:2009	Model: Liechti Turbomill 800g	Datum: 02.04.18	
id. číslo	NEBEZPEČÍ	NEBEZPEČNÁ SITUACE		
1	Mechanická nebezpečí			
1.1	Stlačení (rozdrčení)			
1.1 - 1	Stlačení (rozdrčení) od pohybujících se součástí v souřadných osách (Osy A1, A11 a S1)	Nebezpečí stlačení (rozdrčení) obsluhy vlivem pohybujících se součástí v souřadných osách. Situace může nastat při automatické výměně nástroje, při automatickém nebo manuálním seřizování poloh os, při čištění součástí nebo při umísťování snímače vibrací.	1	
1.4	Zachycení			
1.4 - 1	Zachycení pohybujícími se částmi v souřadných osách (Osy A1, A11 a S1)	Hrozí nebezpečí zachycení oděvu nebo samotné obsluhy při pohybech součástí v pracovním prostoru. Situace hrozí při automatické výměně nástroje nebo při automatickém nebo manuálním seřizování poloh os.		
1.4 - 2	Zachycení pohybujícími se částmi článkového dopravníku	Nebezpečí zachycení obsluhy během pohybu aktivního článkového dopravníku pro odvod třísek a chladicí kapaliny		
1.4 - 3	Zachycení rotujícími částmi (Nástroj, upínače os A1 a A11)	Hrozí nebezpečí zachycení oděvu, snímače nebo samotné obsluhy při rotačním pohybu nástroje nebo upínačů os A1 a A11 v pracovním prostoru. Situace hrozí v průběhu měření vibrací při spuštěném rotačním pohybu.	3	
1.5	Vtažení nebo chycení			
1.5 - 1	Vtažení nebo chycení od pohybujících se součástí v souřadných osách (Osy A1, A11 a S1)	Hrozí nebezpečí vtažení nebo chycení oděvu nebo samotné obsluhy v situaci automatické výměny nástroje nebo při automatickém nebo manuálním seřizování os.		
1.5 - 2	Vtažení nebo chycení pohybujícími se částmi článkového dopravníku	Nebezpečí vtažení nebo chycení obsluhy při aktivním článkovém dopravníku v pohybu.		
1.5 - 3	Vtažení nebo chycení rotujícími částmi (Nástroj, upínače A1 a A11)	Hrozí nebezpečí vtažení nebo chycení oděvu, snímače nebo samotné obsluhy při rotačním pohybu nástroje nebo upínačů os A1 a A11. Situace hrozí v průběhu měření vibrací při spuštěném rotačním pohybu.	3	
1.6	Náraz			
1.6 - 1	Náraz od pohybujících se součástí v souřadných osách (Osy A1, A11 a S1)	Nebezpečí nárazu do obsluhy vlivem pohybujících se součástí v souřadných osách. Situace může nastat při automatické výměně nástroje, při automatickém nebo manuálním seřizování poloh os, při čištění součástí nebo při umísťování snímače vibrací.		
1.6 - 2	Náraz od rotačního pohybu upínače osy A1 a A11	Při rotačním pohybu upínačů os A1 a A11 hrozí náraz do obsluhy. Situace hrozí především při umísťování snímače vibrací nebo v průběhu měření vibrací.	2	
1.7	Bodnutí nebo proražení			
1.7 - 1	Bodnutí od třísek	Při čištění součástí v pracovním prostoru hrozí bodnutí při manipulaci s třískami.		
1.7 - 2	Bodnutí od nástroje	Při manipulaci s nástrojem hrozí poranění obsluhy. Situace nastává při ruční výměně nebo naplňování zásobníku nástrojů.	2	

Tab 16) Seznam významných nebezpečí během procesu měření vibrací

List 02/02	SEZNAM VÝZNAMNÝCH NEBEZPEČÍ dle normy ČSN EN 12417+A2:2009	Typ stroje: Obráběcí centrum Model: Liechti Turbomill 800g	Zpracoval: Petr Semotam Datum: 02.04.18	Počet nebezpečí
id. číslo	NEBEZPEČÍ	NEBEZPEČNÁ SITUACE		
4	Nebezpečí způsobená hlukem			
4.2	Rušení při řečové komunikaci, zvukových signálech			
4.2 - 1	Rušení při řečové komunikaci, zvukových signálech od proudu vzduchu	V průběhu čištění za pomoci proudu vzduchu hrozí nebezpečí rušení komunikace obsluhy		1
8	Nebezpečí způsobená zanedbáním ergonomických principů při konstrukci stroje			
8.6	Lidské chyby, lidské chování			
8.6 - 1	Lidské chyby při manipulaci s částmi stroje	Během ovládání a manipulace s částmi stroje v pracovním prostoru může dojít k neúmyslně způsobenému pohybu s důsledkem nárazu do pevné části. Hrozí nebezpečí poškození majetku a úrazu obsluhy.		
8.6 - 2	Lidské chyby - zapomenuté nářadí v pracovním prostoru	Hrozí nebezpečí ponechání zapomenutého nářadí v pracovním prostoru - např. zapomenutá ráčna v upínací osy A1 a A11 po uvolnění obrobku.		
8.6 - 3	Lidské chyby při ovládání stroje	Nebezpečí neúmyslného aktivování průtoku chladicí kapaliny. Hrozí nebezpečí poškození zraku.		3
17	Nebezpečí způsobená upadnutím nebo vymrštěním předmětů nebo vystříknutím kapaliny			
17 - 1	Nebezpečí úrazu od vymrštěných třísek nebo kapek chladicí kapaliny	Nebezpečí vzniká při pohybu součástí v souřadných osách nebo při rotačním pohybu nástroje nebo upínáčů os A1 a A11. Situace nastává především při automatické výměně nástrojů, automatickém nebo manuálním seřizování poloh os a v průběhu měření vibrací.		
17 - 2	Nebezpečí úrazu od vymrštěného, chybně upnutého nástroje způsobené selháním upínacího zařízení	Nebezpečí vzniká při pohybu osy S1 v souřadných osách nebo při rotačním pohybu nástroje. Situace nastává především při automatické výměně nástrojů, automatickém nebo manuálním seřizování poloh os a v průběhu měření vibrací.		
17 - 3	Nebezpečí úrazu od vymrštěného upínáče os A1 a A11 způsobeného selháním připojovacích členů k vřetenu.	Nebezpečí vzniká při rotačním pohybu upínáčů os A1 a A11. Situace nastává v průběhu měření vibrací při spuštěném rotačním pohybu.		3
19	Nebezpečí uklouznutí, zakopnutí a upadnutí osob (v souvislosti se strojním zařízením)			
19 - 1	Nebezpečí uklouznutí obsluhy	Hrozí nebezpečí přítomnosti vylité chladicí kapaliny nebo oleje v blízkosti strojního zařízení s možným následkem uklouznutí obsluhy a náhlého úrazu.		1
Součet všech nebezpečí Σ				19

Tab 17) Formulář pro odhad rizika

FORMULÁŘ PRO ODHAD RIZIKA		stroj:	Liechti 800g
zpracoval: Petr Semotam		datum:	02.04.2018
Číslo nebezpečí (ČSN EN 12417+A2:2009)	Označení nebezpečí dle ČSN EN 12417+A2:2009: Nebezpečí způsobená upadnutím nebo vymrštěním předmětů nebo vystříknutím kapaliny		
17 - 1	Nebezpečí způsobená upadnutím nebo vymrštěním předmětů nebo vystříknutím kapaliny		
Životní etapa stroje:	Používání a provoz stroje	Nebezpečný prostor:	Oblast pracovního prostoru
Ohrožené osoby:	Obsluha stroje, údržba	Provozní stav stroje:	Provozní a seřizovací režim
Popis nebezpečné situace/události:	Nebezpečí vzniká při pohybu součástí v souřadných osách nebo při rotačním pohybu nástroje nebo upínačů os A1 a A11. Situace může nastat především při automatické výměně nástrojů, automatickém nebo manuálním seřizování poloh os a v průběhu měření vibrací, kdy hrozí vymrštění třísek nebo kapek chladicí kapaliny.		
Počáteční riziko	Závažnost možné škody na zdraví: S2 - těžké zranění Četnost a doba trvání ohrožení: A2 - často a trvale Možnost vyvarování se nebezpečí: E3 - sotva možné Pst. výskytu nebezpečné události: W3 - velká	Velikost rizika 12	
KROK 1: Opatření zabudovaná v konstrukci (dle ČSN EN 12417+A2:2009 a ČSN EN ISO 12100:2011)			
Popis opatření:	V rámci analýzy se předpokládá, že konstrukce strojního zařízení splňuje opatření v normách ČSN EN ISO 12100-1+A1:2009, ČSN EN ISO 12100-2+A1:2009, ČSN EN ISO 14121-1:2007 a ČSN EN 12417:2001. Předpokládá se proto ochrana vůči náhlému pohybu vlivem elektrické a elektronické chyby. Nepředpokládá se však tímto jakékoliv snížení rizika z důvodu nestandardního chování obsluhy v procesu měření vibrací.		
Snížené riziko po opatření	Závažnost možné škody na zdraví: S2 - těžké zranění Četnost a doba trvání ohrožení: A2 - často a trvale Možnost vyvarování se nebezpečí: E3 - sotva možné Pst. výskytu nebezpečné události: W2 - střední	Velikost rizika 11	
KROK 2: Bezpečnostní ochrana a doplňková ochranná opatření (dle ČSN EN 12417+A2:2009 a ČSN EN ISO 12100:2011)			
Popis opatření:	Předpis používání schválených osobních ochranných pracovních prostředků (pracovní obuv s vystuženou špičkou dle normy ČSN EN ISO 20347:2012, ochranné brýle, ochranné rukavice dle ČSN EN 420+A1:2010) a schváleného pracovního oděvu (ne volné oblečení).		
Snížené riziko po opatření	Závažnost možné škody na zdraví: S1 - lehké zranění Četnost a doba trvání ohrožení: A2 - často a trvale Možnost vyvarování se nebezpečí: E3 - sotva možné Pst. výskytu nebezpečné události: W2 - střední	Velikost rizika 5	
KROK 3: Informace pro používání (dle ČSN EN 12417+A2:2009 a ČSN EN ISO 12100:2011)			
Popis opatření:	Upozornění: "Provádění diagnostického měření včetně všech příbuzných činností může vykonávat pouze dostatečně zaškolený pracovník" "V případě, že obsluhou nedochází k jakékoliv manipulaci s osami je nutné mít na ovládacím panelu stroje zablokované veškeré pohyby součástí v pracovním prostoru." "V případě jakékoliv manipulace, ovládání se strojním zařízením, posuvu nebo rotace os je nutné mít uzavřené bezpečnostní mechanické dveře, v době měření mít uzavřené dveře alespoň na velikost drátu snímače a posuv součástí v pracovním prostoru je omezen na 50% možné posuvové rychlosti - platí zákaz používání rychloposuvu." "Po celou dobu měření je nutné mít na ovládacím panelu stroje zablokován průtok chladicí kapaliny" "Během měření vibrací je nutné využívat pouze předdefinované a schválené automatické CNC programy vytvořené pro tento účel." "Při provozu stroje je nutné mít managementem bezpečnosti schválené osobní ochranné pracovní prostředky (pracovní obuv s vystuženou špičkou dle normy ČSN EN ISO 20347:2012, ochranné brýle, ochranné rukavice dle ČSN EN 420+A1:2010) a schválený pracovní oděv (ne volné oblečení)." 		
Snížené riziko po opatření	Závažnost možné škody na zdraví: S1 - lehké zranění Četnost a doba trvání ohrožení: A2 - často a trvale Možnost vyvarování se nebezpečí: E2 - možné za určitých okolností Pst. výskytu nebezpečné události: W2 - střední	Velikost rizika 4	
VALIDACE:	Opatření jsou dostatečná, riziko je přijatelné: Petr Semotam		02.04.2018

3.3.5 Postup pro vibrační měření

Pro začlenění vibračního měření do současného systému údržby jako nový proces je třeba vytvořit postupový návod, jenž bude dále využíván pracovníky údržby. Postup je také vytvořen za účelem standardizace měření, v kterém je důležité zachovat stále stejný postup při sbírání dat. V tab. 19 a 20 lze zhlédnout vzorové listy tohoto postupového pracovního návodu a v tab. 18 je možné celý postup shrnout do vývojového diagramu procesu.

Grafické podklady a obecně podpora pro vypracování postupového návodu je nalezena ve zdroji [29], Uživatelský návod Fluke 810, přičemž bezpečnostní pokyny v pracovním postupu jsou vypsány na základě analýzy a posouzení rizik (kap. 3.3.4).

Tab 18) Vývojový diagram procesu měření vibrací



Tab 19) Pracovní postup pro měření vibrací na strojích Liechti

SIEMENS

Pracovní postup:

Liechti - Měření vibrací

Vypracoval: Petr Semotam

Verze: v1.0

List:

01/05

Bezpečnostní pokyny:

- Použij:** Schválené bezpečnostní brýle
 Schválené bezpečnostní rukavice
 - při čištění v pracovním prostoru
 Schválená bezpečnostní obuv
- Rizika:** Úraz od pohybů součástí v souřadných osách nebo při rotaci součástí v pracovním prostoru (náraz, vtažení, zachycení, stlačení)
 Úraz od zbytkového materiálu při čištění součástí nebo při manipulaci s nástroji (bodnutí, řznutí).
 Úraz vlivem zapomenutého pracovního nářadí v pracovním prostoru.
 Úraz při pohybech součástí v pracovním prostoru vlivem vymrštění zbytkového materiálu nebo vystříknutím chladicí kapaliny.
 Úraz vlivem uklouznutí obsluhy nebo pracovníka údržby na vylité chladicí nebo mazací kapaliny.



Popis kroku

Vizuální podpora

Krok 1: Stroj Liechti se nachází v seřizovacím a servisním režimu

Krok 2: Vibrační analyzátor Fluke je zapnut tlačítkem On/Off

Tlačítko On/Off:



Krok 3: Je zkontrolován ukazatel stavu baterie.

Indikátor stavu baterie:

Pozn.: Pro měření 1 stroje jsou nutné alespoň dvě čárky stavu baterie



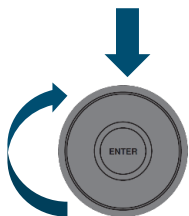
Krok 4: Je nastaven měřený stroj Liechti a jeho měřená část.

Proces:

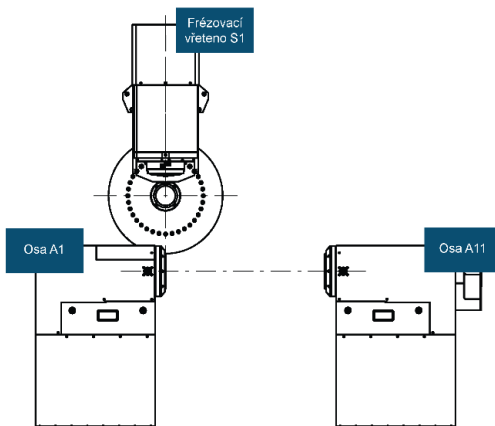
Pozn.: Liechti (1) - 100251
 Liechti (2) - 100237
 Liechti (3) - 100236
 Liechti (4) - 100250
 Liechti (5) - 100474
 Liechti (6) - 100475
 Liechti (Tw in) - 100004

MEASURE

Tlačítko "Measure"



Kolečkem je vybrána a tlačítkem "Enter" potvrzena měřená součást odpovídajícího stroje Liechti



Tab 20) Pracovní postup pro měření vibrací na strojích Liechti

SIEMENS

Pracovní postup:

Liechti - Měření vibrací

Vypracoval: Petr Semotam

Verze: v1.0

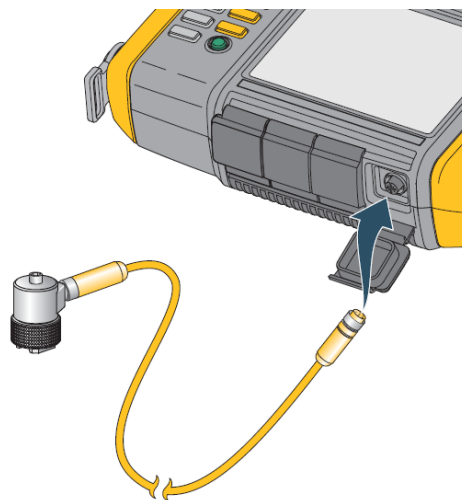
List:

02/05

Popis kroku

Vizuální podpora

Krok 5: Snímač je zapojen do analyzátoru.



Krok 6:

Je nastavena otáčková rychlost měřené součásti.

Proces:

Pozn.:	Součást	RPM	
	Osa A1	200	[ot.·min ⁻¹]
	Osa A11	200	[ot.·min ⁻¹]
	Osa S1	5000	[ot.·min ⁻¹]



Krok 7:

Je určena orientace a pozice snímače na měřené součásti.

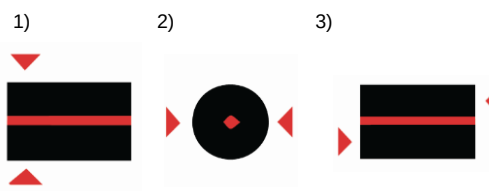
Pozn.: Měření probíhá vždy jen po dvou měřících místech

Dle ilustrací vpravo při každém měření v přístroji nastav odpovídající umístění snímače. K manipulaci použij koleček a tlačítka "Enter" a F4 - "Next Location".

Pozn.: 1) Umístění na nebo pod součástí

2) Umístění na boku součásti

3) Umístění na čele součásti



3.4 Záznam a vyhodnocení vibrací

Monitorování stavu vibrací zvolených částí stroje a jejich vyhodnocování je prováděno za účelem vykonávání údržby na základě aktuálního technického stavu stroje a dále pro prediktivní a proaktivní údržbu. Oba výkony jsou prováděny v souladu s normami:

- ČSN ISO 20816-1:2017 Vibrace – Měření a hodnocení vibrací strojů – Část 1: Obecné pokyny;
- ČSN ISO 13373-1:2003 Monitorování stavu a diagnostika strojů – Monitorování stavu vibrací – Část 1: Obecné postupy;
- ČSN ISO 13373-2:2017 Monitorování stavu a diagnostika strojů – Monitorování stavu vibrací – Část 2: Zpracování, analýza a prezentace vibračních dat;
- ČSN ISO 13373-3:2017 Monitorování stavu a diagnostika strojů – Monitorování stavu vibrací – Část 3: Návod pro vibrační diagnostiku.

Na základě uskutečněných měření dle postupu popsáném v kap. 3.3.3 a 3.3.5 jsou při ustálených provozních podmínkách pro prvotní charakterizování vibrační odezvy zaznamenány a použity tyto veličiny:

- efektivní hodnota výchylky vibrací x_{rms} [μm],
- efektivní hodnota rychlosti vibrací v_{rms} [mm/s],
- efektivní hodnota zrychlení vibrací a_{rms} [m/s^2].

Použití tzv. efektivních hodnot RMS je doporučeno normou ČSN ISO 20816-1:2017 z důvodu charakteru měření, tedy měření vibrací na nerotujících částech. Efektivní hodnoty měřených veličin poskytují okamžitou informaci o přibližném aktuálním technickém stavu měřeného objektu. [30] Při jejich záznamu a zpětném porovnání lze však také sledovat a zaznamenat změnu velikostí těchto hodnot v závislosti na termínech měření, resp. včas detekovat možné změny v dynamickém chování měřených součástí. Za tímto účelem jsou vytvořeny trendy s pásmy znázorňující správnost naměřených hodnot vibrací a s hranicemi pásem určující výstrahy pro zhoršující se provozní stav součástí.

Pro účely popsáného monitorování stavu vibrací je použita norma ČSN ISO 20816-1:2017, jež udává pokyny pro specifikaci rozsahů typických hodnot hranic pásem. Norma udává, že pro stanovení hranic pásem je nutné využít mimo v normě doporučených hodnot pásem také znalosti a zkušenosti výrobce a provozovatele o konstrukci a účelu použití sledovaného stroje. [30] S tímto cílem je v rámci praktické části diplomové práce také realizováno 20 měření, jejichž výsledky byly zaznamenány a zpracovány. Dále jsou zaznamenány hodnoty vibrací, při kterých již docházelo k výskytu neshodných obrobků (nevyhovující textura povrchu vyrobených obrobků). Společně s těmito vstupy jsou stanoveny hranice pásem o hodnotách vypsáných v tab. 21.

Protože jsou hranice pásem stanoveny v rámci počátečního zavádění pravidelné vibrační diagnostiky, lze v budoucnu předpokládat jejich hodnotové korekce na základě většího počtu měřených dat a zkušeností.

Ačkoli zmíněná norma ČSN ISO 20816-1:2017 doporučuje využívat celkově až čtyři pásma, pro úmysl aplikace sledování trendu vibrací v úseku údržby je pásmo A sloučeno s pásmem B. Vznikají tak pouze tři pásma se záměrem lepší prezentace pracovníkům jak údržby, tak i managementu. Dále je normou doporučeno hodnotit velikosti vibrací RMS s ohledem na frekvenci. Toto doporučení je při zavádění vibrodiagnostiky do praxe zanedbáno z důvodu dosud chybějících částí norem řady ISO 20816, v kterých dojde k přesným specifikacím frekvenčních hodnot. Tyto frekvenční hodnoty budou stanovovat frekvenční meze ve frekvenčním spektru pro oblast, v nichž budou amplitudy frekvencí hodnoceny při konstantní hodnotě RMS a oblasti, ve kterých budou amplitudy hodnoceny oproti hodnotě RMS jako funkcí frekvence. V těchto oblastech tak bude nastaven váhový filtr, který hodnotu amplitudy určité frekvence vyhodnotí jako rizikovou, ačkoli by ji při hodnocení dle konstantní hodnoty RMS vyhodnotil s výsledkem – v pořádku. S doporučením jsou technické úseky firmy seznámeny a doporučení je ponecháno pro další možný budoucí vývoj v oblasti vibrodiagnostiky.

Grafická znázornění trendů vibrací u jednotlivých strojů a jejich sledovaných součástí jsou vypracována dle normy ČSN ISO 13373-1:2003, přičemž se sledují jevy jako jsou velikost vibrací, jakákoliv významná změna vibrací a rychlost změny vibrací. Vzhledem ke stanoveným pozicím snímačů u šesti zpracovávaných strojů Liechti, u kterých se měří až tři veličiny vibrací, je sledováno celkově až 180 trendů. Příklady tohoto sledování a následné analýzy vibrací strojů Liechti jsou zpracovány v nadcházejících kapitolách.

Popis pásem a doporučení pro další činnost dle normy ČSN ISO 13373-1:2003:

- **ZÁKLADNÍ ÚROVEŇ (Pásmo A):**
 - Jestliže nedošlo k významné změně velikosti vibrací vůči předchozím termínům měření, není vyžadována žádná akce.
 - Jestliže se vibrace zvyšují, rychlost zvyšování je lineární a odhadovaná extrapolovaná velikost nepřekročí horní hranici pásma A před plánovaným termínem příštího měření, není vyžadována žádná akce. Jestliže však odhadovaná extrapolovaná hodnota naznačuje, že překročí horní hranici před příštím termínem měření, je třeba naplánovat další monitorování před odhadovaným termínem této události.
 - Jestliže je rychlost zvyšování nelineární nebo když se rychlost změny zvýší o 25 % vůči předchozímu měření v předem naplánovaném termínu, je vhodné zvýšit četnost monitorování.
- **VÝSTRAHA (Pásmo B):**
 - Hranice poskytuje varování, že byla dosažena určená hodnota vibrací nebo se vyskytla významná změna, při které může být nezbytná nápravná akce.
 - Jestliže nedochází ke změně velikosti vibrací, je možné zachovat stejné intervaly monitorování.
 - Jestliže se velikost vibrací zvyšuje lineární rychlostí a při extrapolování překročí velikost před termínem plánované údržby, nebo před další plánovanou kontrolou, nebo je rychlost zvětšování nelineární, je nutné zvýšit četnost monitorování tak, aby před plánovanou údržbou byly naměřeny tři datové body. Pokud bude pozorován pokles velikosti vibrací, je vhodné pokračovat v monitorování s dvoutýdenním cyklem.

- POPLACH (Pásmo C):
 - Pro velikost vibrací v tomto pásmu existuje riziko poškození dalších součástí stroje a značný výskyt neshodných výrobků. Je nutné okamžitě naplánovat údržbářský zásah na základě detailnější analýzy změřených vibrací. Je vhodné uvážit odstavení stroje do doby po opravě.

Tab 21) Hranice pásem pro prvotní vyhodnocení velikostí vibrací a grafické znázornění vývoje vibrací v závislosti na době provozu

Liechti - Hranice pásem vývoje vibrací				RMS					
Osa	Směr měření	Otáčky [rpm]	Otáčková frekvence [Hz]	Hranice A/B			Hranice B/C		
				[μm]	[$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]	[$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]	[μm]	[$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]	[$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]
S1	X	5000	83,33	1,50	1,80	2,00	2,50	3,00	3,40
	Y	5000	83,33	1,50	1,80	2,00	2,50	3,00	3,40
A1	1RH	200	3,33	1,20	1,50	3,00	2,20	3,30	5,00
	2RH	200	3,33	1,20	1,50	3,00	2,20	3,30	5,00
	2RB	200	3,33	1,00	1,30	2,50	2,00	3,10	4,70
	2A	200	3,33	1,00	1,00	2,20	1,80	1,80	4,50
A11	3A	200	3,33	1,00	1,00	2,20	1,80	1,80	4,50
	3RB	200	3,33	1,00	1,30	2,50	2,00	3,10	4,70
	3RH	200	3,33	1,20	1,50	3,00	2,20	3,30	5,00
	4RH	200	3,33	1,20	1,50	3,00	2,20	3,30	5,00

Z důvodu, že širokopásmové vibrace RMS neposkytují vždy dostatečné množství informací, je normou doporučeno v rámci porovnávání měření také zaznamenat a vyhodnotit vzniklé změny ve frekvenčních spektrech. V nich lze včas a konkrétně detekovat narůstající poruchu daného prvku nebo způsob poruchy měřené osy. Pro porovnávání spekter vzniklých měření v daných místech jsou určena tzv. referenční frekvenční spektra, která jsou následně porovnávána se spektry zaznamenanými při dalších měření. Spektra jsou určena referenčními po prvním měření vibrací na daném stroji.

Při porovnávání referenčních spekter se sleduje v první řadě nárůst amplitud harmonických násobků otáčkové frekvence a dále nárůst vibrací při frekvencích v oblastech násobcích otáčkové frekvence. Oblasti jsou přesněji specifikovány v kap. 3.4.1 a příklad analýz frekvenčních spekter je názorně ukázán v nadcházejících kapitolách s analýzami strojů Liechti.

3.4.1 Specifikace frekvenčních spekter vibrací

Pro účely porovnávání referenčních frekvenčních spekter v průběhu času a bližší analýzy technického stavu měřených součástí je provedena specifikace frekvenčních spekter. Kapitola si klade za cíl upřesnit využitelnost a případně usnadnit technickým pracovníkům práci se získanými frekvenčními spektry.

Podporu pro analýzu frekvenčních spekter je doporučeno nalézt ve zdrojích [34]²⁹, [35]³⁰, [36]³¹, [31]³² a [37]³³.

Obecně se očekává výskyt frekvencí v následujících oblastech:

- oblast pod $1X$ otáčkové frekvence – u kluzných ložisek je možný výskyt nestability oleje, popřípadě se zde objevují amplitudy frekvencí ve spojitosti s poruchami vyskytujícími se v další oblasti spektra,
- $1X - 10X$ otáčkové frekvence – možný výskyt základních mechanických závad jako např. mechanické uvolnění, nevyváženost, nesouosost, ohnutí hřídele,
- nad $10X$ otáčkové frekvence – možný výskyt závad valivých ložisek. [13]

Frekvenční analýza vibrací je značně omezena z důvodu schopnosti vibračního analyzátoru a dodávaného softwaru zobrazovat tato spektra pouze v závislosti rychlosti vibrací na jejich frekvenci $\nu(f)$. Toto omezení tak zabraňuje včasné detekci postupné technické degradace využívaných valivých ložisek, již je možné poznat s využitím frekvenčního spektra zrychlení vibrací. Detekovat tak lze až tzv. 3. etapu rozvoje poškození valivých ložisek, kterou je možné zjistit ze spekter rychlosti. Opotřebení je zde již na ložisku viditelné a často se týká jeho obvodu. V případě takové detekce je doporučeno, bez ohledu na amplitudu frekvencí ložiskových závad, ložisko neprodleně vyměnit. [34]

Frekvence ložiskových závad jsou vypočítány následovně, přičemž vzorce jsou získány ze zdroje [37]³⁴ a označení jsou:

- FTF – Poškození klece ložiska (rovnice 18 a 22),
- BSF – Poškození valivých elementů ložiska (rovnice 19 a 23),
- BPFO – Poškození vnějšího kroužku ložiska (rovnice 20 a 24),
- BPFI – Poškození vnitřního kroužku ložiska (rovnice 21 a 25).

Jednotlivé prvky použité v rovnicích jsou následující [37]:

- RPM – otáčky rotoru [ot/min],
- B_d – průměr valivého elementu [mm],
- P_d – roztečný průměr ložiska [mm],
- φ – kontaktní úhel [deg],
- n – počet valivých elementů [-].

²⁹ Berry. P. E., Ilustrovaná tabulka pro diagnostiku vibrací

³⁰ Helebrant, František a Jiří Ziegler, Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika

³¹ Mais, Jason, SKF Spectrum Analysis – The key features of analyzing spectra

³² ČSN ISO 13373-1:2003, Monitorování stavu a diagnostika strojů – Monitorování stavu vibrací – Část

1: Obecné postupy

³³ ČSN ISO 13373-3:2017, Monitorování stavu a diagnostika strojů – Monitorování stavu vibrací – Část

3: Návod pro vibrační diagnostiku

³⁴ ČSN ISO 13373-3:2017, Monitorování stavu a diagnostika strojů – Monitorování stavu vibrací – Část

3: Návod pro vibrační diagnostiku

Osa S1

Výpočet hodnot vibračních frekvencí, které odpovídají prvkům ložiska S7017 ACE/HCP4A, přičemž parametry jsou získány z katalogu výrobce, zdroj [38]³⁵:

$$FTF = \frac{1}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi\right) = \frac{1}{2} \cdot \frac{5000}{60} \cdot \left(1 - \frac{14,288}{107,5} \cdot \cos 25^\circ\right) \doteq 36,65 \text{ Hz} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} BSF &= \frac{P_d}{2 \cdot B_d} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 - \left(\frac{B_d}{P_d}\right)^2 \cdot \cos^2 \varphi\right) \\ &= \frac{107,5}{2 \cdot 14,288} \cdot \frac{5000}{60} \cdot \left(1 - \left(\frac{14,288}{107,5}\right)^2 \cdot \cos^2 25^\circ\right) \doteq 308,93 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} BPFO &= \frac{n}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi\right) = \frac{21}{2} \cdot \frac{5000}{60} \cdot \left(1 - \frac{14,288}{107,5} \cdot \cos 25^\circ\right) \\ &\doteq 769,57 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} BPFI &= \frac{n}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi\right) = \frac{21}{2} \cdot \frac{5000}{60} \cdot \left(1 + \frac{14,288}{107,5} \cdot \cos 25^\circ\right) \\ &\doteq 980,36 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (21)$$

Osa A1 a A11

Výpočet hodnot vibračních frekvencí ložiskových závad, které odpovídají prvkům ložiska B7015C TPA P4 UL, přičemž parametry jsou získány z katalogu výrobce, zdroj [39]³⁶:

$$FTF = \frac{1}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi\right) = \frac{1}{2} \cdot \frac{200}{60} \cdot \left(1 - \frac{11,9}{95} \cdot \cos 15^\circ\right) \doteq 1,46 \text{ Hz} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} BSF &= \frac{P_d}{2 \cdot B_d} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 - \left(\frac{B_d}{P_d}\right)^2 \cdot \cos^2 \varphi\right) \\ &= \frac{95}{2 \cdot 11,9} \cdot \frac{200}{60} \cdot \left(1 - \left(\frac{11,9}{95}\right)^2 \cdot \cos^2 15^\circ\right) \doteq 13,10 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (23)$$

$$BPFO = \frac{n}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi\right) = \frac{21}{2} \cdot \frac{200}{60} \cdot \left(1 - \frac{11,9}{95} \cdot \cos 15^\circ\right) \doteq 30,73 \text{ Hz} \quad (24)$$

$$BPFI = \frac{n}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi\right) = \frac{21}{2} \cdot \frac{200}{60} \cdot \left(1 + \frac{11,9}{95} \cdot \cos 15^\circ\right) \doteq 39,20 \text{ Hz} \quad (25)$$

Ložiskové závady prvků axiálních – radiálních ložisek RTC a YRT 150 v osách A1:A11 nelze přesně specifikovat z důvodů, že výrobce neposkytuje potřebné číselné údaje pro výpočet a obecně, používané vzorce pro výpočet těchto závad již pro tento druh ložisek neplatí. Na základě ale odhadnutých parametrů ložisek (počet valivých elementů, průměr elementů, průměr ložiska) a uskutečněných experimentálních měření je stanoveno frekvenční pásmo, ve kterém je možné ložiskové závady detekovat a sledovat.

Frekvenční pásmo závad ložisek RTC, YRT 150: $f = 140 - 360 \text{ Hz}$; $40X - 100X$
násobek otáčkové frekvence osy A1:A11

³⁵ SKF Group, Super-precision bearings

³⁶ Schaeffler Technologies, Rolling Bearings

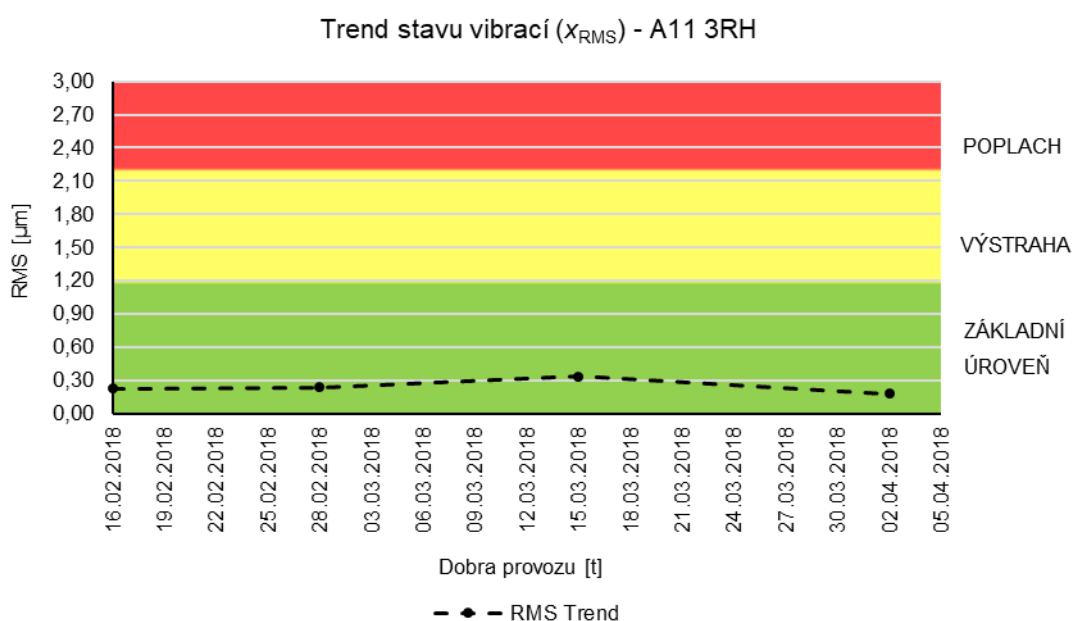
3.4.2 Analýza stroje Liechti BRQ100250 (4)

Stroj Liechti (4) je na základě změřených dat vyhodnocen jako v pořádku po celý časový horizont sledování. První měření je uskutečněno dne 16.02.2018 po výměně veškerých měřených os – osy A1, A11 a frézovacího vřetena osy S1. Významná událost nastala dne 28.02.2018, kdy vlivem chybného programu došlo k nárazu vertikální osy S1 do horizontální osy A11. Jak lze vidět z trendů osy S1 (obr. 46) a osy A11, (obr. 44 a 45), pravděpodobně nedošlo k výraznému poškození vnitřních částí těchto os. Stanovuje se proto předpoklad snížení životnosti částí a při plánování termínu dalších měření je předpoklad brán v úvahu. V tab. 22 jsou uvedeny poslední změřené RMS hodnoty vibrací ze dne 02.04.2018.

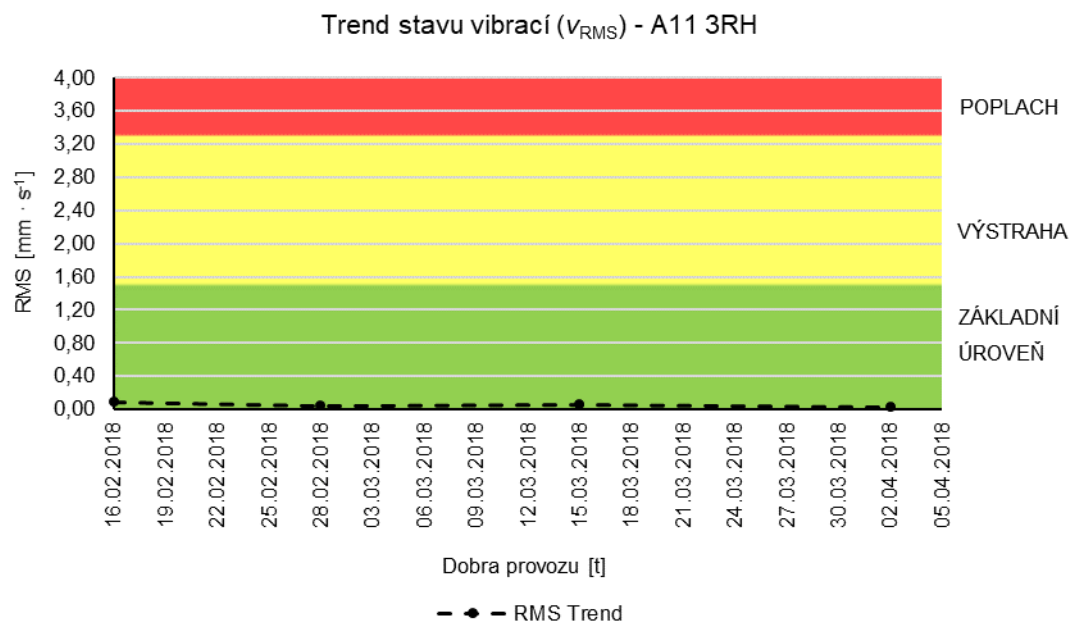
Tab 22) Výsledky posledního měření vibrací na stroji Liechti BRQ100250 (4)

Liechti BRQ100250 (4)					Vibrace měřeny dle: ISO 20816-1			Hodnocení dle stanovených pásem
Datum	Osa	Směr měření	Otáčky [rpm]	Otáčková frekvence [Hz]	RMS			
					[μm]	[mm · s ⁻¹]	[m · s ⁻²]	
02.04.2018	S1	X	5000	83,33	0,49	0,24	0,29	A
		Y	5000	83,33	0,49	0,16	0,20	A
	A1	1RH	200	3,33	0,18	0,03	0,02	A
		2RH	200	3,33	0,15	0,02	0,02	A
		2RB	200	3,33	0,15	0,03	0,03	A
		2A	200	3,33	0,12	0,02	0,03	A
	A11	3A	200	3,33	0,29	0,04	0,02	A
		3RB	200	3,33	0,22	0,02	0,02	A
		3RH	200	3,33	0,18	0,03	0,02	A
		4RH	200	3,33	0,19	0,02	0,02	A

Jak lze vidět z obr. 44 a 45, trendy RMS hodnot výchylky a rychlosti vibrací osy A11 v pozici snímače 3RH, je stav vibrací celkově stabilní a udržuje se v nižší hladině pásma A.

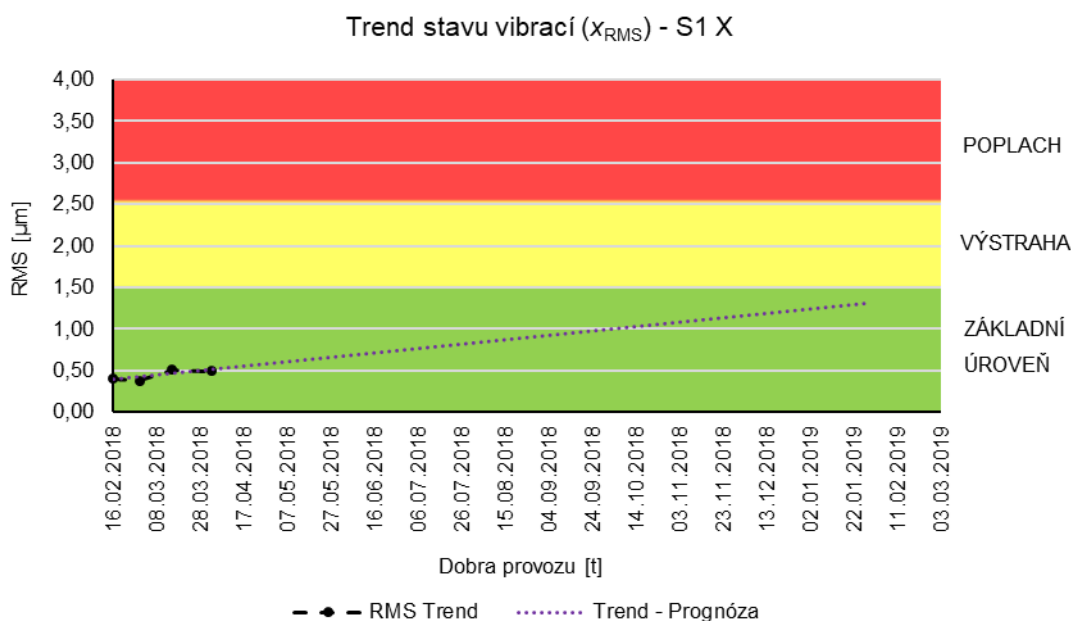


Obr. 44) Trend stavu odchylky vibrací x_{RMS} osy A11 v místě umístění snímače 3RH



Obr. 45) Trend stavu rychlosti vibrací v_{RMS} osy A11 v místě umístění snímače 3RH

Jediný mírně vzrůstající trend, jehož hodnoty se blíží k polovině A pásma, byl zaznamenán u frézovacího vřetena osy S1, ve směru měření X při záznamu veličiny odchylky x_{RMS} (obr. 46). Prognóza byla vytvořena na základě extrapolace mimo interval známých hodnot. Extrapolovaná lineární přímka překračuje hranici A/B přibližně v období únor 2019. Další měření, zjišťování technického stavu os u Liechti (4), je stanoveno na nejbližší preventivní prohlídku stroje, na období listopad 2018.



Obr. 46) Trend stavu odchylky vibrací x_{RMS} osy S1 v místě umístění snímače X s prognózou ve formě extrapolované přímky mimo známý interval hodnot

K obdobnému, kladnému výsledku analýzy vibrací se došlo i u strojů Liechti BRQ100251 (1) BRQ100237 (2) BRQ100474 (5) a BRQ100475 (6). Další měření je u nich stanoveno na nejbližší pravidelnou, plánovanou preventivní prohlídku.

3.4.3 Analýza stroje Liechti BRQ100236 (3)

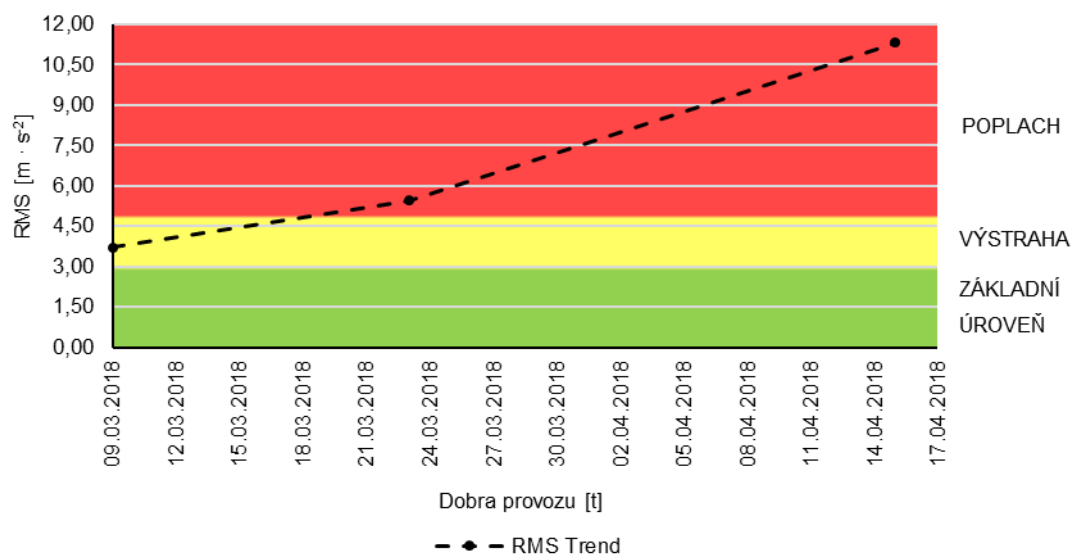
První měření stroje Liechti (3) dne 09.03.2018 bylo provedeno již v období výrazně zvýšených vibrací, kdy hodnoty veličin výchylky, rychlosti a zrychlení u osy A1, v pozici snímače 1RH se již vyskytovaly v pásmu B, tedy v pásmu VÝSTRAHA. Úsek výroby v tomto období již registroval počáteční zvýšenou četnost neshodných výrobků (nebyl dodržen požadavek na texturu povrchu turbínových lopatek). Poslední měření bylo uskutečněno dne 15.04.2018 (hodnoty, viz. tab. 23), přičemž byl stroj již ode dne 07.04.2018 mimo provoz – neobráběl.

Tab 23) Výsledky posledního měření vibrací na stroji Liechti BRQ100236 (3)

Liechti BRQ100236 (3)					Vibrace měřeny dle: ISO 20816-1			Hodnocení dle stanovených pásem
Datum	Osa	Směr měření	Otáčky [rpm]	Otáčková frekvence [Hz]	RMS			
					[μm]	[mm · s ⁻¹]	[m · s ⁻²]	
15.04.2018	S1	X	5000	83,33	0,89	0,87	0,91	A
		Y	5000	83,33	0,73	0,62	0,63	A
	A1	1RH	200	3,33	11,18	8,73	11,31	C
		2RH	200	3,33	9,83	6,98	8,68	C
		2RB	200	3,33	8,53	5,41	6,07	C
		2A	200	3,33	8,11	4,75	4,50	C
	A11	3A	200	3,33	1,26	0,67	0,44	B
		3RB	200	3,33	1,52	0,82	0,52	B
		3RH	200	3,33	1,92	1,05	0,68	B
		4RH	200	3,33	1,81	1,03	0,72	B

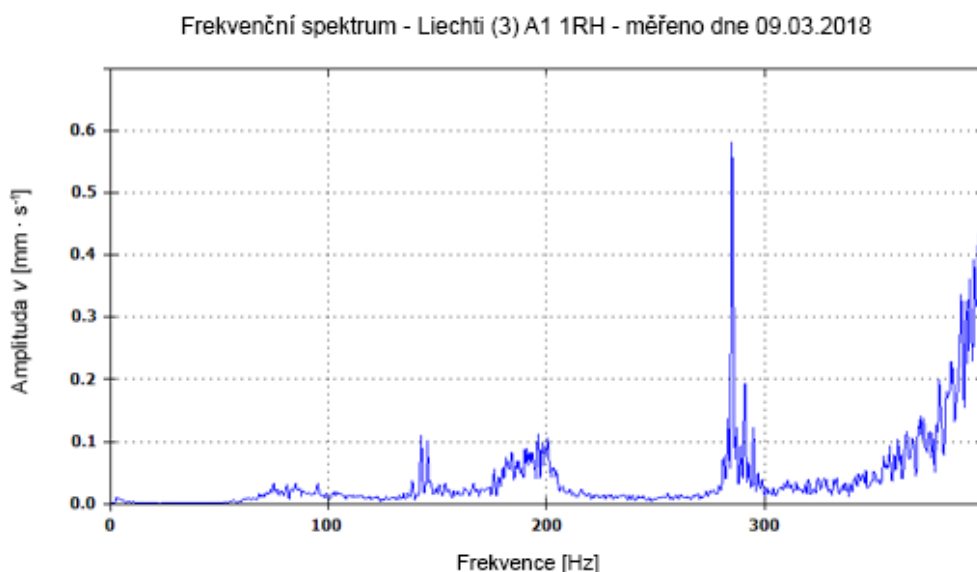
Jak lze vyhodnotit, na obr. 47 došlo k předpokládanému překročení hranice vibrací B/C již po deseti dnech (19.03.2018) a následnému, prudkému zhoršení z hodnoty zrychlení vibrací a_{RMS} $5,45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ na $11,31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, tedy o přibližně 107 %, za 19 dní (ke dni termínu odstávky). Je tedy zřejmé, že v případě zjištění vibrací vyskytujících se v pásmu B, je třeba interval měření významně zkrátit.

Trend stavu vibrací (a_{RMS}) - A1 1RH

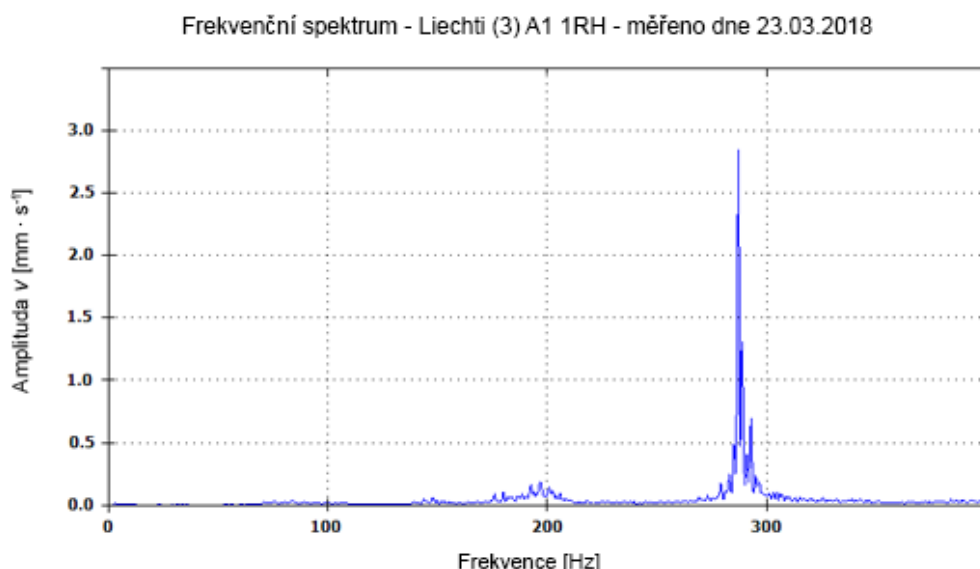


Obr. 47) Trend stavu zrychlení vibrací a_{RMS} osy A1 v místě umístění snímače 1RH

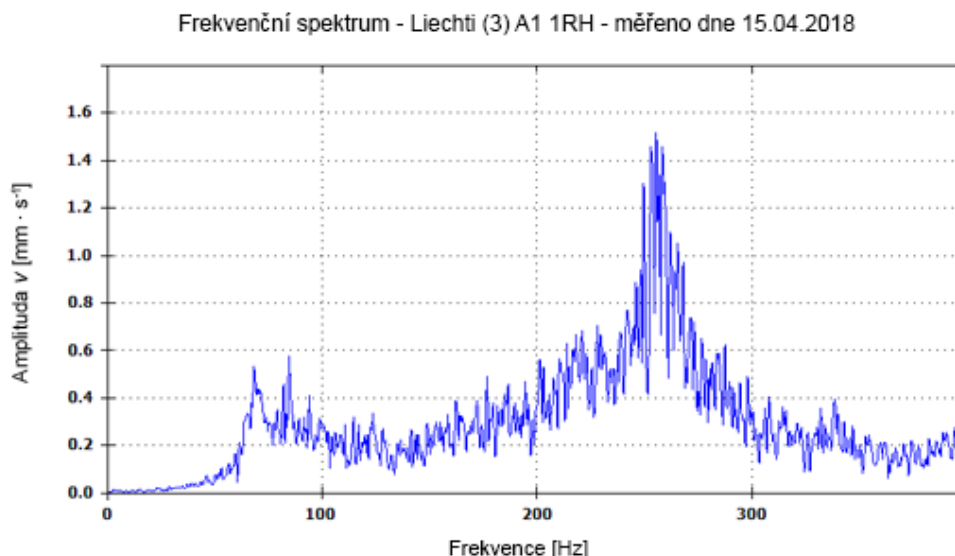
Při ose A1 lze aplikovat metodu porovnávání frekvenčních spekter vibrací s následným odhadnutím porušené části osy. Z obr. 48, 49 a 50 lze poznat postupný vývoj poruchy osy A1 ve sledovaném čase. V obr. 48 a 49, resp. z termínu měření dne 09. a 23.03.2018 lze vidět významně a postupně zvýšenou amplitudu rychlosti vibrací při frekvenci $f = 285 \text{ Hz}$. V souvislosti s nízkou otáčkovou frekvencí $f = 3,33 \text{ Hz}$ se již jedná o amplitudu vyskytující se ve vysokofrekvenčním pásmu – při 83X násobku otáčkové frekvence. V obr. 50 se dále vyskytuje tzv. náhodný širokopásmový vysokofrekvenční prahový šum. Na základě předchozího lze dojít k závěru poškození axiálního – radiálního ložiska YRT 150, přičemž dne 09. a 23.03.2018 se závada ložiska vyskytovala v tzv. 3.etapě poškození, kdy je doporučeno provést výměnu a dne 15.04.2018, resp. v termínu odstávky 07.04.2018, se závada vyskytovala v tzv. 4. a poslední etapě životnosti ložiska.



Obr. 48) Frekvenční spektrum stroje Liechti (3) osy A1 v místě 1RH – měřeno dne 09.03.2018

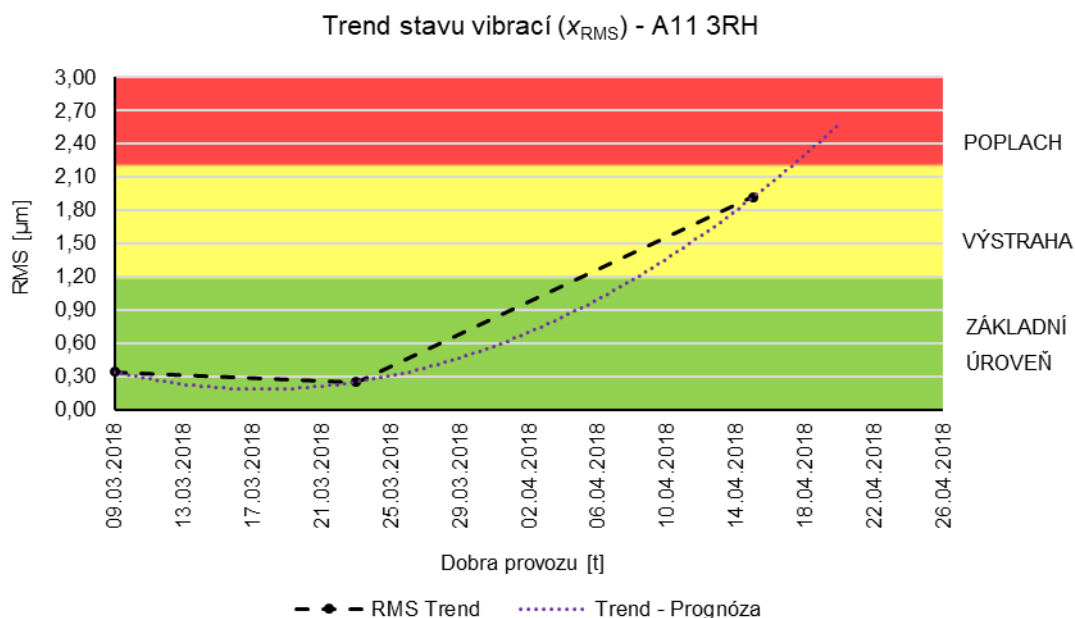


Obr. 49) Frekvenční spektrum stroje Liechti (3) osy A1 v místě 1RH – měřeno dne 23.03.2018



Obr. 50) Frekvenční spektrum stroje Liechti (3) osy A1 v místě 1RH – měřeno dne 15.04.2018

V období prvního měření nebyla ještě stanovena pásma pro vyhodnocení hodnot vibrací. Z tohoto důvodu nebylo provedeno doporučení pro včasnou objednávku náhradních dílů a přeměrování a úpravu kapacity výroby. Protože dále byla detekována významně vyšší hodnota vibrací i při ose A11 (obr. 51) je rozhodnuto při opravě stroje vyměnit jak osu A1, tak i osu A11. Předpokládá se totiž, že osa A11 se nachází ve stavu těsně před termínem, kdy již nebude schopna konat požadovanou funkci. Strojní zařízení tak nebude muset jít do odstávky z důvodu poruchy osy A11 brzy po případné opravě osy A1.

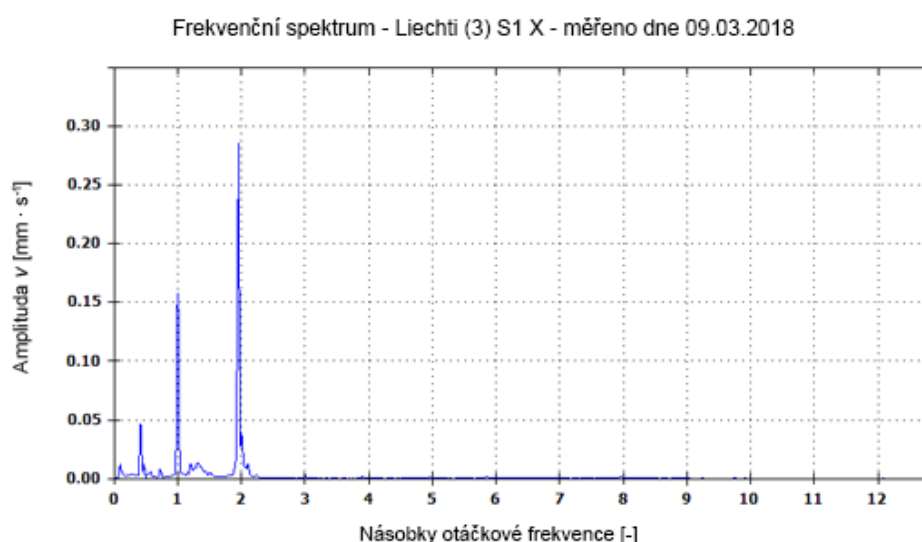


Obr. 51) Trend stavu odchylky vibrací x_{RMS} osy A11 v místě umístění snímače 3RH s prognózou ve formě extrapolované křivky mimo známý interval hodnot

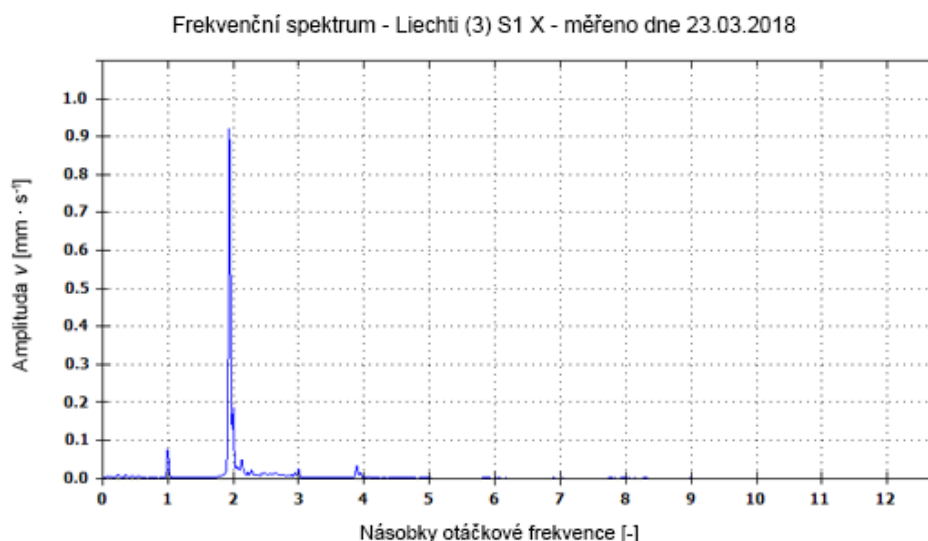
Porovnání frekvenčních spekter osy S1 v průběhu doby sledování lze pozorovat na obr. 52, 53 a 54. Měření dne 09.03.2018 ukázalo zvýšené amplitudy rychlosti vibrací při násobcích otáčkových frekvencí: $0,5X$, $1X$ a $2X$, přičemž při dalších měření došlo k významnému zvýšení násobku $2X$. Na základě těchto získaných frekvenčních spekter lze dojít k závěru, resp. podezření na závadu v důsledku mechanického uvolnění, jež se projevuje zvýšenými amplitudami právě při zmíněných násobcích otáčkové frekvence. Příčina může být následující:

- osa S1 se uvolnila z ukotvení k supportu, resp. k loži stroje,
- ukotvení nebo konstrukce rámu osy S1 obsahuje trhliny,
- došlo k uvolnění vnitřního prvku v ose S1.

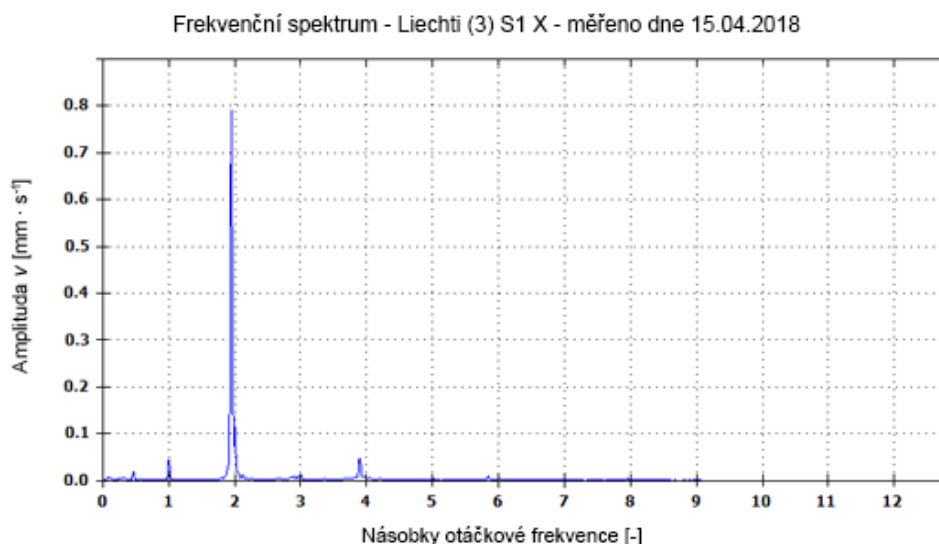
Po druhém měření dne 23.03.2018 došlo k pokusu o nápravu, kdy byly prověřeny spojovací členy ukotvení osy S1. Nebylo nalezeno žádné uvolnění, přičemž spojovací členy byly řádně utáhnuty. Následující měření bohužel i přes tuto činnost nepřineslo zlepšení. Je proto doporučeno stav frézovacího vřetena nadále sledovat.



Obr. 52) Frekvenční spektrum stroje Liechti (3) osy S1 v místě X – měřeno dne 09.03.2018

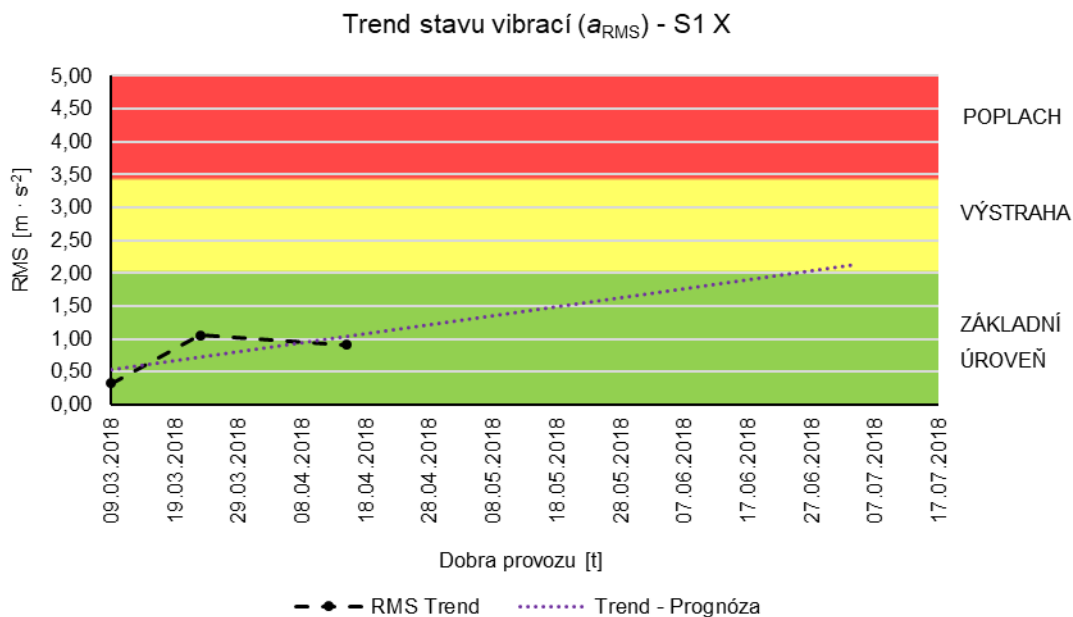


Obr. 53) Frekvenční spektrum stroje Liechti (3) osy S1 v místě X – měřeno dne 23.03.2018



Obr. 54) Frekvenční spektrum stroje Liechti (3) osy S1 v místě X – měřeno dne 15.04.2018

Vibrace osy S1 se nacházejí v základní úrovni, přičemž odhadovaný vývoj vibrací poukazuje na možnost překročení hranice A/B v období měsíce června 2018 (obr. 55). Ačkoli se osa nachází v provozuschopném stavu, je doporučeno, aby vřeteno bylo podrobeno měření vibrací přibližně měsíc po opětovném uvedení stroje Liechti (3) do provozu.



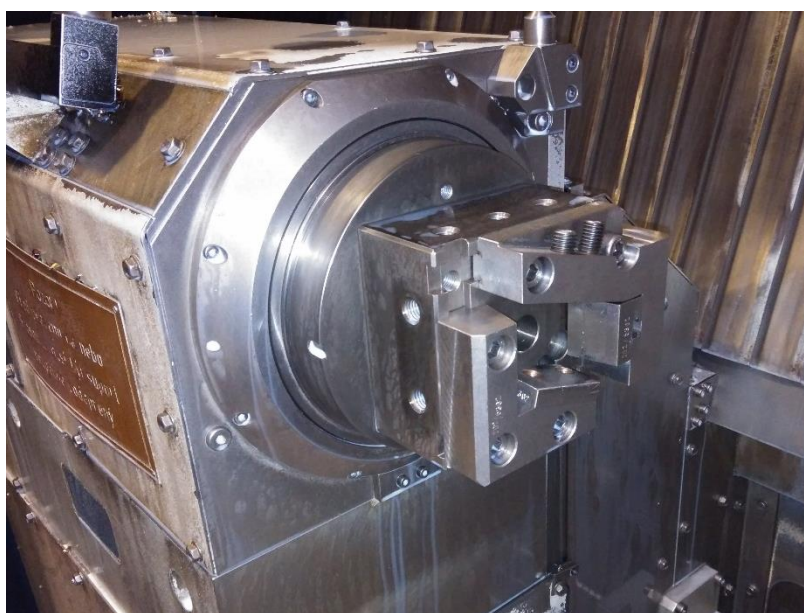
Obr. 55) Trend stavu zrychlení vibrací a_{RMS} osy S1 v místě umístění snímače X s prognózou ve formě extrapolované přímky mimo známý interval hodnot

3.4.4 Analýza stroje Liechti BRQ100251 (1)

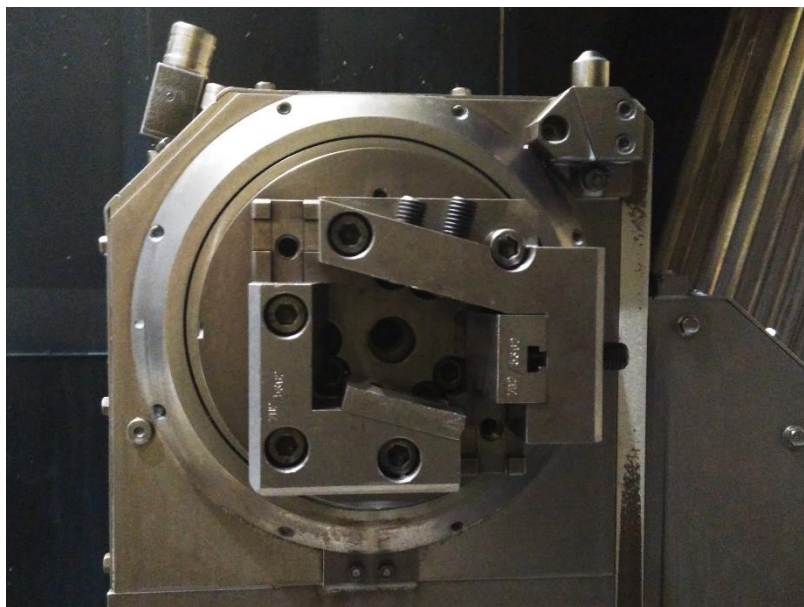
Ačkoli současný stav vibrací u stroje Liechti (1) ukazuje stabilní a významně nerostoucí trend, dne 28.02.2018 je zaznamenána vysoká anomálie odchylky vibrací osy vřetena A1 v radiálním směru při pozici 2 tak jak je uvedeno v tab. 24. Obdobné výsledky byly zaznamenány i při opakovaném měření. Podezření leží na používaném nesymetrickém přípravku pro upínání obrobku (obr. 56 a 57). Vlivem těchto vibrací hrozí riziko jednak poškození vnitřních částí osy A1 a následně výskyt neshodných výrobků v důsledku např. nevyhovující textury povrchu či nedodržení dovolených rozměrových odchylek. Podnět ke zlepšení byl předán oddělení technologie.

Tab 24) Výsledky posledního měření vibrací na stroji Liechti BRQ100251 (1)

Liechti BRQ100251 (1)					Vibrace měřeny dle: ISO 20816-1			Hodnocení dle stanovených pásem
Datum	Osa	Směr měření	Otáčky [rpm]	Otáčková frekvence [Hz]	RMS			
					[μm]	[mm · s ⁻¹]	[m · s ⁻²]	
28.02.2018	S1	X	5000	83,33	0,57	0,42	0,60	A
		Y	5000	83,33	0,43	0,17	0,35	A
	A1	1RH	200	3,33	0,17	0,03	0,03	A
		2RH	200	3,33	6,05	0,50	0,16	C
		2RB	200	3,33	4,17	0,41	0,15	C
		2A	200	3,33	0,19	0,04	0,03	A
	A11	3A	200	3,33	0,16	0,02	0,02	A
		3RB	200	3,33	0,15	0,02	0,03	A
		3RH	200	3,33	0,19	0,03	0,03	A
		4RH	200	3,33	0,17	0,04	0,04	A



Obr. 56) Nesymetrický přípravek při měření stroje Liechti (1) dne 28.02.2018

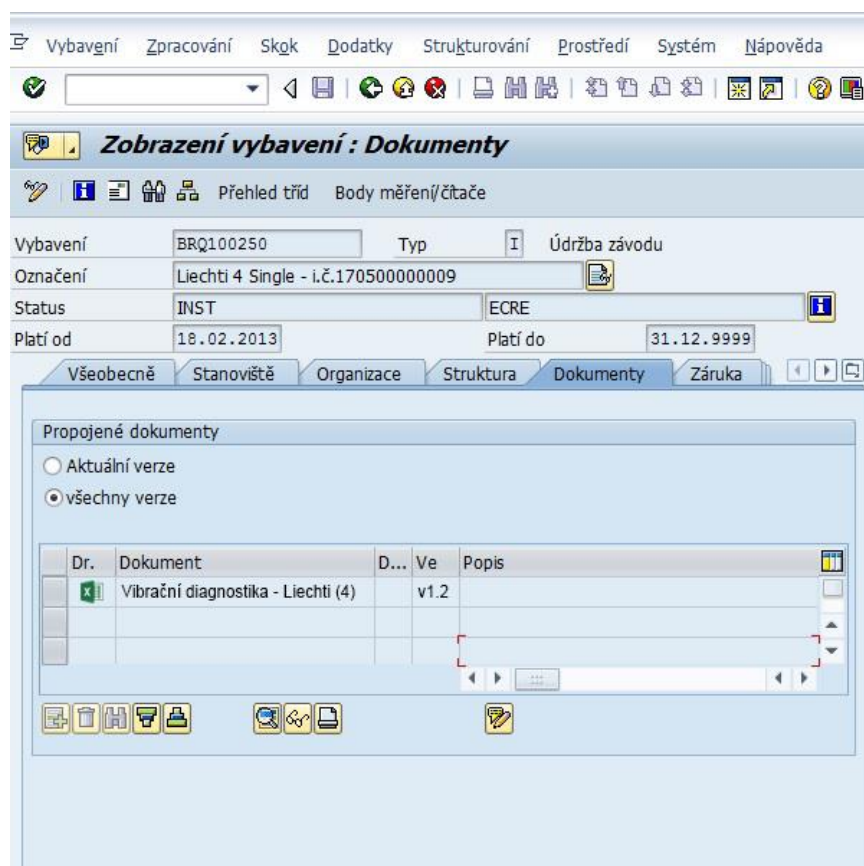


Obr. 57) Nesymetrický přípravek při měření stroje Liechti (1) dne 28.02.2018

3.5 Integrace do podnikového informačního systému

Brněnský závod Siemens s. r. o. využívá při své činnosti podnikový informační systém SAP. Systém se svými funkcemi, možnostmi a uživatelským rozhraním ale není pro účel záznamu a analýzy vibrací v aktuální verzi vhodný a dostačující. V rámci integrace vibrační diagnostiky je tedy navržen postup zachovat pro každé jednotlivé sledované strojní zařízení záznamy vibrací se svými trendy v tabulkovém dokumentu softwaru Excel. Daný dokument je následně ukládán do karty daného strojního zařízení, přičemž je po každé úpravě nahrána nová verze tohoto dokumentu. Příklad karty zařízení a nahraného dokumentu v odpovídající sekci je možné zhlédnout na obr. 58.

Popsaný způsob tak zachovává jak potřebný široký prostor pro analýzu získaných dat, tedy v rámci možností, které poskytuje tabulkový editor Excel, tak i požadovanou možnost náhledu na aktuální technický stav stroje všemi pracovníky s autorizací nahlížet či upravovat. Ochrana proti neodbornému zásahu je řešena automatickým ukládáním a ponecháním starších verzí zápisů na serveru systému, které mohou sloužit pro případné zpětné obnovení dat.



Obr. 58) Uživatelské rozhraní systému SAP s ukázkou karty strojního zařízení a vloženého souboru Excel se záznamem vibrací

3.6 Ekonomické zhodnocení

Při správně začleněném systému prediktivní údržby s využitím vibrační diagnostiky se předpokládá schopnost včas detekovat zhoršující se stav monitorovaných součástí a následně přibližně stanovit období degradace součásti do stavu poruchy. Předpokládají se tři stavy, které mohou v souvislosti s provozem strojů Liechti, resp. jejich sledovaných součástí nastat:

- náhlá porucha bez známé příčiny a bez možnosti včasné detekce,
- porucha součásti před plánovanou dobou životnosti s možností včasné detekce,
- provoz stroje, resp. sledovaných součástí přes plánovanou dobu životnosti – do odhadované doby životnosti.

V následující tabulce (tab. 25) je provedeno ekonomické vyhodnocení se závěrem celkových ušetřených nákladů při využití vibrační diagnostiky jakožto nástroje prediktivní údržby, kdy závěr předpokládá ideální případ s průběhem provozu dle nastavených četností možných stavů. Je tedy pravděpodobné, že se vypočítaná ušetřená částka bude v následujících letech měnit. Četnosti, resp. intenzity nástupů jednotlivých stavů jsou stanoveny na základě analýzy historie poruch, která je probrána v kap. 3.3.1 a zkušeností pracovníků úseku údržby s provozem těchto výrobních strojů.

V ekonomickém zhodnocení nejsou započítány hodinové náklady na pracovníky vykonávající měření vibrací a následně správu výsledků z důvodu, že personální náklady jsou obsaženy již v režijních a mzdových nákladech interní údržby.

Součást A1 a A11 jsou vzaty jako jeden celek. Předpokládá se a ze zkušenosti vyplývá, že v situaci poruchy jedné z těchto os zpravidla dochází k významnému narušení osy druhé, kdy je časově a ekonomicky výhodnější vyměnit či opravit obě osy zároveň.

Plánovaná doba životnosti je natavená doba pro preventivní výměnu součásti bez ohledu na její skutečný technický stav. Jelikož se předpokládá, že by sledované součásti byly schopny dosáhnout vyšší životnosti při pravidelném sledování jejich technického stavu, je navržena odhadovaná doba životnosti. Na rozdíl od předchozího stavu, kdy se daná osa měnila nebo opravovala preventivně, nový stav umožňuje součást vyměnit či opravit až na základě jejího skutečného technického stavu.

Na základě zhodnocení lze dospět k závěru, že s využitím vibrační diagnostiky a v diplomové práci popsaného systému prediktivní údržby lze při 6 strojích Liechti Turbomill 800g ročně ušetřit přibližně 836 tis. Kč, přičemž se předpokládá, že by se výše ušetřených nákladů zvyšovala při:

- rozvoji prediktivní údržby s využitím vibrační diagnostiky na další klíčové výrobní stroje v závodu,
- využití vibrační diagnostiky jako nástroje proaktivního přístupu k poruchám – hledání kořenových příčin poruch.

Pro své vysoké náklady na obnovu os A1 a A11 je dále doporučeno věnovat se jejich snížením a to např. zkrácením doby do obnovy v případě náhlé poruchy – změna dodavatele servisních prací nebo zavedením opravy/obnovy vlastními zdroji.

Tab 25) Ekonomické vyhodnocení celkových ušetřených nákladů při využití vibrační diagnostiky

Položka	Parametr	Výsledek	Jednotka	Výpočet	Výpočet [-]
Vstupní parametry					
Počet strojů Liechti Turbomill 800g	$n_{Liechti}$	6	-	-	-
Odstávka 1 stroje Liechti Turbomill 800g (dále jen Liechti)	$P_{ods.}$	1000	Kč / hod.	-	-
Výtíženost 1 stroje Liechti	T_{rok}	6000	hod. / rok	-	-
Náklady na vibrační diagnostiku					
Roční odpisy - Vibrační analyzátor Fluke 810	P_{810}	56000	Kč / rok	-	-
Doba 1 měření (odstávka 1 stroje Liechti)	$T_{vibr.}$	45	min.	-	-
Plánovaná četnost měření 1 stroje Liechti	$n_{plán}$	2	/ rok	-	-
Odhadovaná četnost neplánovaných měření 1 stroje Liechti	$n_{neplán}$	8	/ rok	-	-
Odhadovaná celková četnost měření 1 stroje Liechti	$n_{celk.}$	10	/ rok	$10 = 2 + 8$	$n_{celk.} = n_{plán} + n_{neplán}$
Odhadovaný celkový čas prostroje 1 stroje Liechti	$T_{vibr.celk.}$	7,5	hod. / rok	$7,5 = (10 \cdot 45) / 60$	$T_{vibr.celk.} = (n_{celk.} \cdot T_{vibr.}) / 60$
Odhadované náklady 1 stroje Liechti na měření	$P_{lměř.}$	16833	Kč / rok	$16833 = 7,5 \cdot 1000 + 56000 / 6$	$P_{lměř.} = T_{vibr.celk.} \cdot P_{ods.} + P_{810} / 6$ strojů
Odhadované náklady vřeten S1 na měření (1 stroj Liechti)	$P_{lměř. S1}$	5611	Kč / rok	$5611 = (1/3) \cdot 16833$	$P_{lměř. S1} = 1/3 \cdot P_{lměř.}$
Odhadované náklady sady os A1:A11 na měření (1 stroj Liechti)	$P_{lměř. A}$	11222	Kč / rok	$11222 = (2/3) \cdot 16833$	$P_{lměř. A} = 2/3 \cdot P_{lměř.}$
Odhadované náklady na měření 6 strojů Liechti	$P_{6měř.}$	101000	Kč / rok / $n_{Liechti}$	$101000 = 16833 \cdot 6$	$P_{6měř.} = P_{lměř.} \cdot n_{Liechti}$
Odhadované náklady na měření vřeten S1 (6 strojů Liechti)	$P_{6měř. S1}$	33667	Kč / rok / $n_{Liechti}$	$33667 = (1/3) \cdot 101000$	$P_{6měř. S1} = 1/3 \cdot P_{6měř.}$
Odhadované náklady na měření sady os A1:A11 (6 strojů Liechti)	$P_{6měř. A}$	67333	Kč / rok / $n_{Liechti}$	$67333 = (2/3) \cdot 101000$	$P_{6měř. A} = 2/3 \cdot P_{6měř.}$
Náhlá porucha vřeten S1 (nelze vibrační diagnostikou predikovat)					
Cena opravy vřeten S1	P_{S1}	500000	Kč	-	-
Intenzita náhlých poruch vřeten S1	$\lambda_{S1 now}$	0,5	/ rok / $n_{Liechti}$	-	-
Doba do obnovy vřeten S1 při náhlé poruše	$T_{S1 now}$	32	hod.	-	-
Náklady na obnovu vřeten S1 (náhlá obnova)	$P_{S1 now}$	266000	Kč / rok / $n_{Liechti}$	$266000 = (32 \cdot 1000 + 500000) \cdot 0,5$	$P_{S1 now} = (T_{S1 now} \cdot P_{ods.} + P_{S1}) \cdot \lambda_{S1 now}$
Porucha vřeten S1 před koncem životnosti					
Cena opravy vřeten S1	P_{S1}	500000	Kč	-	-
Intenzita poruch vřeten S1 před koncem životnosti	λ_{S1}	1	/ rok / $n_{Liechti}$	-	-
Doba do obnovy vřeten S1 na konci životnosti (plánovaná obnova)	T_{S1}	16	hod.	-	-
Doba do obnovy vřeten S1 před koncem životnosti (náhlá obnova)	$T_{S1 neplán}$	32	hod.	-	-
Náklady na obnovu vřeten S1 (plánovaná obnova)	$P_{S1 plán}$	516000	Kč	$516000 = 16 \cdot 1000 + 500000$	$P_{S1 plán} = T_{S1} \cdot P_{ods.} + P_{S1}$
Náklady na obnovu vřeten S1 (náhlá obnova)	$P_{S1 neplán}$	532000	Kč	$532000 = 32 \cdot 1000 + 500000$	$P_{S1 neplán} = T_{S1 neplán} \cdot P_{ods.} + P_{S1}$
Ušetřené náklady (včasný záznam degradace vřeten S1)	$P_{S1 save}$	16000	Kč / rok / $n_{Liechti}$	$16000 = 532000 - 516000$	$P_{S1 save} = P_{S1 neplán} - P_{S1 plán}$

Položka	Parametr	Výsledek	Jednotka	Výpočet	Výpočet [-]
Provoz vřetena S1 do plánované životnosti					
Cena opravy vřetena S1	P _{S1}	500000	Kč	-	-
Plánovaná životnost vřetena S1	T _{S1 plán}	9000	hod.	-	-
Odhadovaná životnost vřetena S1	T _{S1 odhad}	12000	hod.	-	-
Počet obnovení vřetena S1 při plánované životnosti (9000 hod.)	n _{S1 plán}	4	/ 6 let / 1 stroj	-	-
Počet obnovení vřetena S1 při odhadované životnosti (12000 hod.)	n _{S1 odhad}	3	/ 6 let / 1 stroj	-	-
Náklady (obnova vřetena S1 4x / 6 let / 1 stroj)	P _{S1 4}	2064000	Kč / 6 let / 1 stroj	2064000 = 4 · 500000 + 4 · 16 · 1000	P _{S1 4} = n _{S1 plán} · P _{S1} + n _{S1 plán} · T _{S1} · P _{ods.}
Náklady (obnova vřetena S1 3x / 6 let / 1 stroj)	P _{S1 3}	1548000	Kč / 6 let / 1 stroj	1548000 = 3 · 500000 + 3 · 16 · 1000	P _{S1 3} = n _{S1 odhad} · P _{S1} + n _{S1 odhad} · T _{S1} · P _{ods.}
Ušetřené náklady (provoz vřetena S1 do odhadované životnosti)	P _{S1 save 3 6 let}	516000	Kč / 6 let / 1 stroj	516000 = 2064000 - 1548000	P _{S1 3} save 3 6 let = P _{S1 4} - P _{S1 3}
	P _{S1 save 3}	86000	Kč / rok / 1 stroj	86000 = 516000 / 6	P _{S1 save 3} = P _{S1 save 3 6 let} / 6 let
	P _{S1 save 3 n}	387000	Kč / rok / n _{1 lecht}	387000 = 86000 · 4,5	P _{S1 save 3 n} = P _{S1 save 3} · 4,5
Náhlá porucha sady os A1:A11 (nelze vibrační diagnostikou predikovat)					
Cena opravy sady os A1:A11	P _A	1000000	Kč	-	-
Intenzita náhlých poruch sad os A1:A11	λ _{A now}	0,33	/ rok / n _{1 lecht}	-	-
Doba do obnovy sady os A1:A11 při náhlé poruše	T _{A now}	540	hod.	-	-
Náklady na obnovu sady os A1:A11 (náhlá obnova)					
Náklady na obnovu sady os A1:A11 (náhlá obnova)	P _{A now}	508200	Kč / rok / n _{1 lecht}	508200 = (540 · 1000 + 1000000) · 0,33	P _{A now} = (T _{A now} · P _{ods.} + P _A) · λ _{A now}
Porucha sady os A1:A11 před koncem životnosti					
Cena opravy sady os A1:A11	P _A	1000000	Kč	-	-
Intenzita poruch sady os A1:A11 před koncem životnosti	λ _A	1	/ rok / n _{1 lecht}	-	-
Doba do obnovy sady os A1:A11 na konci životnosti (plánovaná obnova)	T _A	46	hod.	-	-
Doba do obnovy sady os A1:A11 před koncem životnosti (náhlá obnova)	T _{A neplán}	540	hod.	-	-
Náklady na obnovu sady os A1:A11 (plánovaná obnova)	P _{A plán}	1046000	Kč	1046000 = 46 · 1000 + 1000000	P _{A plán} = T _A · P _{ods.} + P _A
Náklady na obnovu sady os A1:A11 (náhlá obnova)	P _{A neplán}	1540000	Kč	1540000 = 540 · 1000 + 1000000	P _{A neplán} = T _{A neplán} · P _{ods.} + P _A
Ušetřené náklady (včasný záznam degradace sady os A1:A11)					
Ušetřené náklady (včasný záznam degradace sady os A1:A11)	P _{A save}	494000	Kč / rok / n _{1 lecht}	494000 = 1540000 - 1046000	P _{A save} = P _{A neplán} - P _{A plán}
Provoz sady os A1:A11 do plánované životnosti					
Cena opravy sady os A1:A11	P _A	1000000	Kč	-	-
Plánovaná životnost sady os A1:A11	T _{A plán}	12000	hod.	-	-
Odhadovaná životnost sady os A1:A11	T _{A odhad}	18000	hod.	-	-
Počet obnovení sady os A1:A11 při plánované životnosti (12000 hod.)	n _{A plán}	3	/ 6 let / 1 stroj	-	-

Položka	Parametr	Výsledek	Jednotka	Výpočet	Výpočet [-]
Počet obnovení sady os A1:A11 při odhadované životnosti (18000 hod.)	$n_{A \text{ odhad}}$	2	/ 6 let / 1 stroj	-	-
Náklady (obnova sady os A1:A11 3x / 6 let / 1 stroj)	$p_{A \ 3}$	3138000	Kč / 6 let / 1 stroj	$3138000 = 3 \cdot 1000000 + 3 \cdot 46 \cdot 1000$	$p_{A \ 3} = n_{A \text{ plán}} \cdot p_A + n_{A \text{ plán}} \cdot T_A \cdot p_{\text{ods}}$
Náklady (obnova sady os A1:A11 2x / 6 let / 1 stroj)	$p_{A \ 2}$	2092000	Kč / 6 let / 1 stroj	$2092000 = 2 \cdot 1000000 + 2 \cdot 46 \cdot 1000$	$p_{A \ 2} = n_{A \text{ odhad}} \cdot p_A + n_{A \text{ odhad}} \cdot T_A \cdot p_{\text{ods}}$
Ušetřené náklady (provoz včetně S1 do odhadované životnosti)	$p_{A \text{ save } 2 \text{ 6 let}}$	1046000	Kč / 6 let / 1 stroj	$1046000 = 3138000 - 2092000$	$p_{A \text{ save } 2 \text{ 6 let}} = p_{A \ 3} - p_{A \ 2}$
	$p_{A \text{ save } 2}$	174333	Kč / rok / 1 stroj	$174333 = 1046000 / 6$	$p_{A \text{ save } 2} = p_{A \text{ save } 2 \text{ 6 let}} / 6 \text{ let}$
	$p_{A \text{ save } 2 \text{ n}}$	814137	Kč / rok / n_{lechni}	$814137 = 174333 \cdot 4,67$	$p_{A \text{ save } 2 \text{ n}} = p_{A \text{ save } 2} \cdot 4,67$
Celkové ušetřené náklady s využitím vibrační diagnostiky	p_{save}	835 937 Kč	/ rok / n_{lechni}	-	-

3.7 Další doporučení

V rámci kapitoly se předkládají návrhy a další doporučení ke zlepšení současného stavu údržby v podniku.

Na základě vypracované analýzy způsobu, důsledků a kritičnosti poruch v kap. 3.3.2 a výsledků v podobě kritických komponent je vhodné se nadále věnovat zavádění opatření snižující výsledná RPN čísla. Z důvodů nepravidelně probíhající tribodiagnostiky bez hlubší analýzy se doporučuje provádět tuto diagnostiku pravidelně, s komplexní analýzou stávajícího technického stavu daného stroje a následným záznamem v informačním systému firmy.

Konkrétně pro vibrační diagnostiku se dále doporučuje zlepšení v souvislosti s přímým kontaktním měřením. Odstranění barevné vrstvy na měřených součástech v místech umístění snímačů má potenciál ke zlepšení kvality měření a zavedením pevných a trvalých měřících podložek lze docílit měření na stále stejných pozicích – zlepšení měření za stejných podmínek. Dále se doporučuje za použití pokročilého vibračního analyzátoru zjistit rezonanční frekvenci osy S1 zmíněnou v kap. 3.3.3, resp. hodnotu otáček, při kterých tato frekvence nastává. Se znalostí této hodnoty otáček se tak lze po úpravě CNC programů proaktivně vyhýbat extrémnímu navýšení vibrací při procesu obrábění, resp. opotřebením součástí a případně zvýšené četnosti výskytů neshodných obrobků.

Další návrhy jsou popsány dále v kap. 3.7.1 a 3.7.2.

3.7.1 Silové zatížení řezných nástrojů při frézování

V období ledna 2018 bylo na žádost oddělení údržby výzkumným střediskem TCM International se sídlem ve městě Stainz v Rakousku provedeno silové měření řezných nástrojů při frézování. Cílem měření byl úmysl nalézt vhodnější vyměnitelné břitové destičky frézovací hlavy při čelním obrábění turbínových lopatek z hlediska snížení namáhání strojních součástí a obrobku při frézování.

Měření zatížení proběhlo s využitím řezných destiček, frézy, materiálu obrobku a CNC programu firmy Siemens s. r. o. Brno s cílem zvýšit kvalitu měření (opakovatelnost, reprodukovatelnost). Řezná síla nástroje byla měřena při nástrojích používaných při procesu hrubování s břitovými destičkami s a bez utvářeče třísky a v porovnávání s destičkami novými, opotřebovanými a destičkami s odlišnou geometrií tvaru.

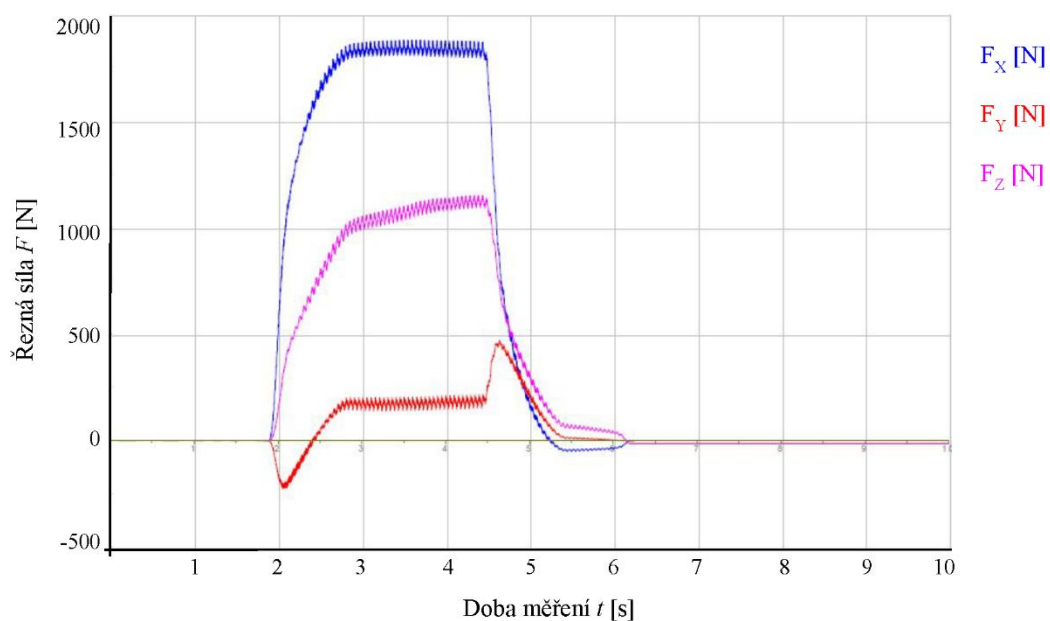
Hlavní pozornost byla věnována řezné síle F_Z ve směru Z (frézovací vřeten) z důvodu lokálního kritického bodu, který danou řeznou sílu se správnými břitovými destičkami ovlivňuje či snižuje. Výsledky měření se nacházejí v tab. 26 dále a v obr. 59 a 60, kde jsou k zhlédnutí výsledky řezných sil měření aktuálních a nově navržených břitových destiček ve třech směrech X, Y a Z. V závěru jsou porovnány tři odlišné břitové destičky se svou změřenou hodnotou řezné síly při obrábění. Břitová destička využívající utvářeč třísek ve srovnání se současně používanými destičkami způsobuje až o 67 % menší řezné silové zatížení. Z pohledu řešení vibrací v rámci diplomové práce se tak jedná o značné snížení budící síly vibrací, a tedy snížení vibračního opotřebování všech komponent strojního zařízení. Je proto doporučeno ve svém provozu testovat změnu řezných destiček dle doporučení vykonavatele měření. [40]

Lepší výsledky při obrábění vlivem změny břitových destiček jsou také patrné z obr. 61, tedy rozdílného tvaru a objemu třísek řezného procesu současně používaných a nově navržených břitových destiček. Obecně by tříska v souvislosti s jejím odstraněním z pracovního prostoru měla zaujímat co nejmenší objem a z hlediska jejího tvaru by se mělo dosáhnout dělení na jednotlivé elementy za účelem efektivního využití nástroje a dosažení požadované kvality obrobku, kdy „plynulá tříska zhoršuje strukturu obrobeného povrchu“. [41]

Tab 26) Změřená řezná síla F_Z využitých břitových destiček při procesu hrubování [40]

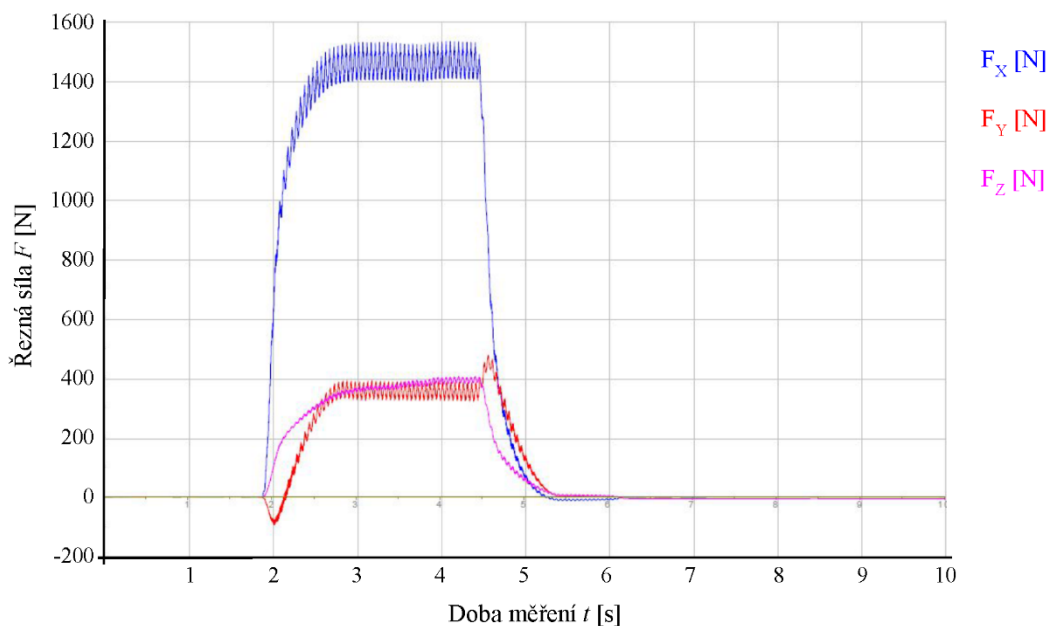
i	Druh břitové destičky	Řezné zatížení F_Z [N]	Porovnání
1	Břítová destička - současná - neopotřebovaná	1113	100%
2	Břítová destička - současná - opotřebovaná	1453	nárůst 30%
3	Nová břitová destička - s využitím utvářeče třísek	372	snížení -67%
4	Nová břitová destička - bez využití utvářeče třísek	786	snížení -30%

Břítová destička - současná - Závislost řezné síly F na době měření t při procesu hrubování



Obr. 59) Změřené řezné síly současně využívaných břitových destiček [40]

Břítová destička - nová - Závislost řezné síly F na době měření t při procesu hrubování



Obr. 60) Změřené řezné síly nově navržených břitových destiček [40]



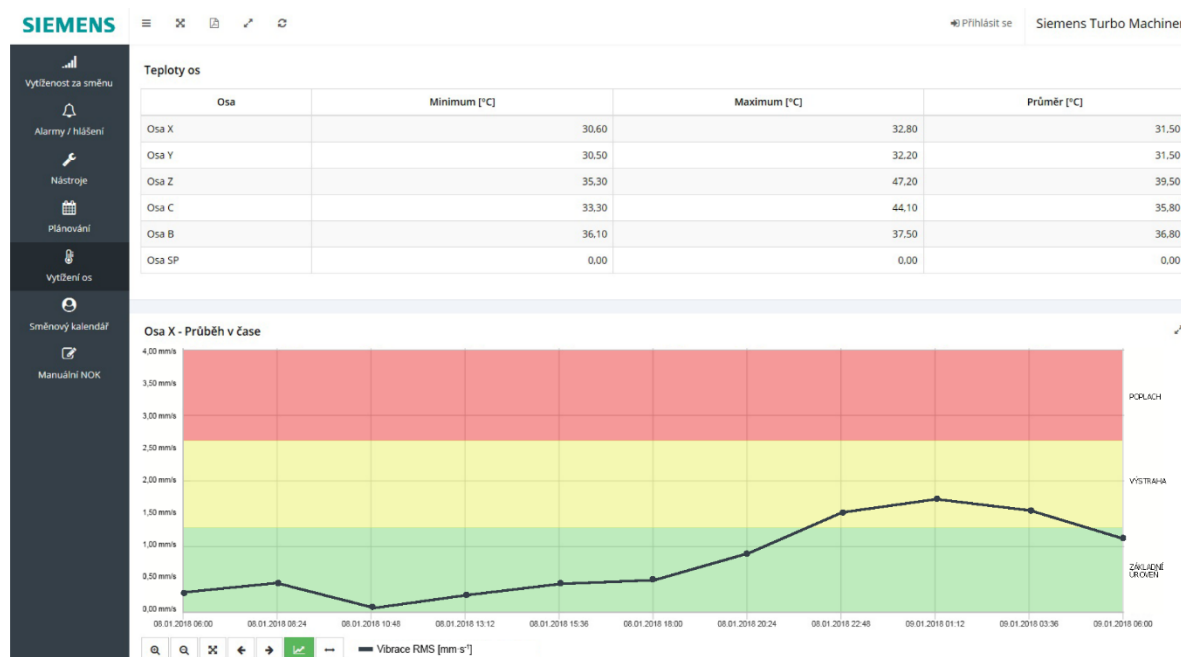
Obr. 61) Rozdílný tvar a objem třísek řezného procesu vytvořených současně používanými (vlevo) a nově navrženými (vpravo) břitovými destičkami

3.7.2 Monitoring vibrací v reálném čase

V rámci současného vývoje koncepce údržby TPM a s tím spjaté náležitosti optimalizace výrobních procesů se postupně zavádí tzv. Condition Monitoring neboli sběr a analýza dat z výrobních strojů, přičemž se jedná o základní verzi sběru dat z řídicího systému stroje, měření energií a ve spojitosti s logováním obsluhy i záznam shodných a neshodných kusů. V souvislosti s řešeným tématem diplomové práce je dán návrh na rozšíření této technologie o snímání vibrací vybraných komponent stroje v reálném čase.

Rozšířením tak lze zajistit nepřetržité snímání vibrací s vypuštěním od pochůzkové činnosti pracovníků údržby a s tím navazující omezení chyb v důsledku lidského faktoru při procesu měření vibrací. S takto nastaveným on-line monitoringem lze dále s větším předstihem zaznamenat zhoršující se technický stav strojního zařízení a detekovat případné neúmyslné havarijní stavy vlivem kolize součástí v pracovním prostoru.

Ukázka takto navrženého snímání vibrací v uživatelském rozhraní Condition Monitoringu je ilustračně ke zhlédnutí na obr. 62. V levém panelu lze vidět část možných uživatelských voleb, přičemž se software nachází v okně „Vytížení os“ sloužící pro sledování technických parametrů, a tedy celkového technického stavu stroje. V dolní části se nachází ilustrační znázornění případného vzhledu trendu snímání vibrací.



Obr. 62) Ukázka uživatelského rozhraní Condition Monitoring s ilustračním znázorněním snímání vibrací v reálném čase.

4 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

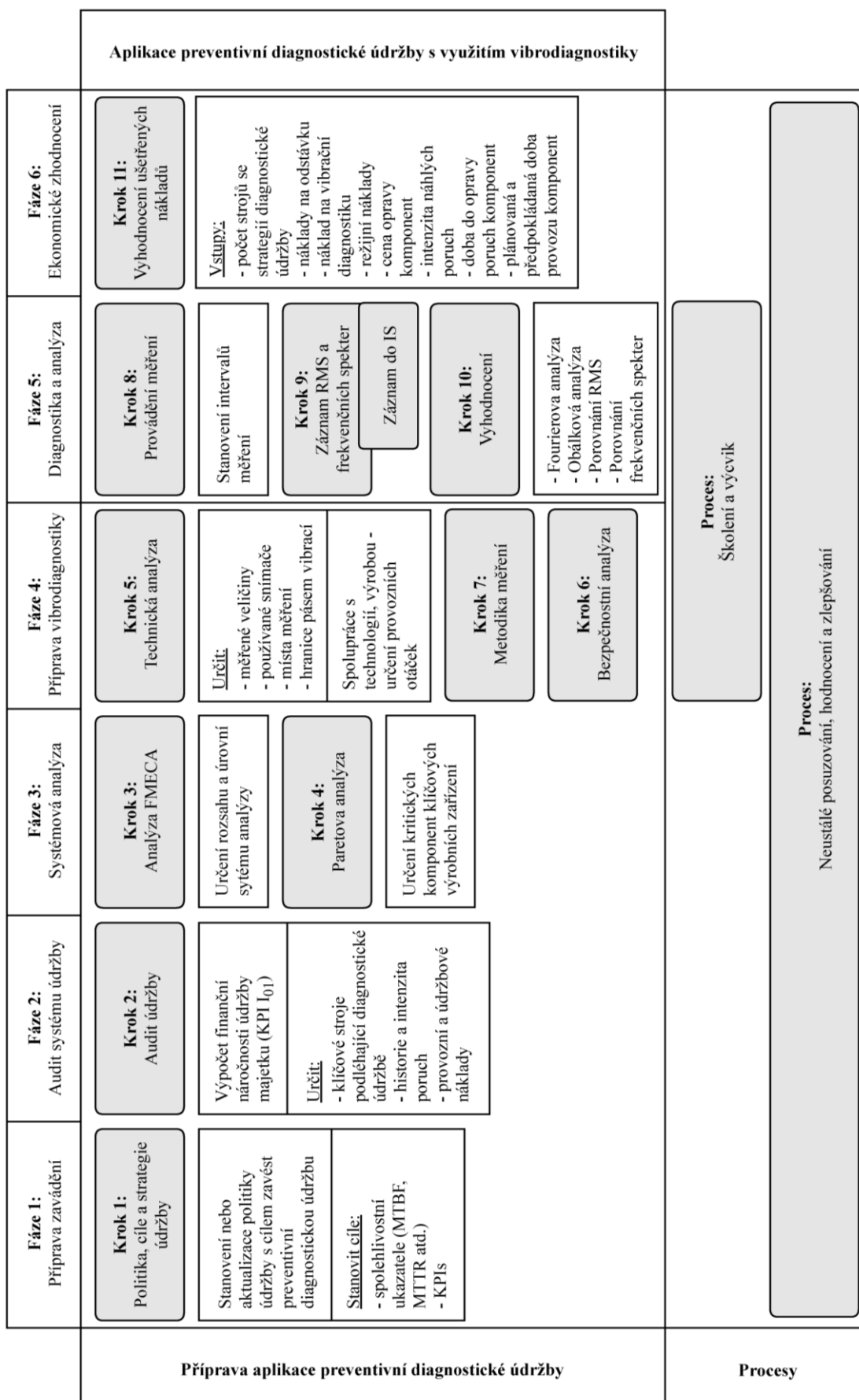
Závěrem diplomové práce, na základě praktické části a za pomoci znalostí získaných v části teoretické, je sestaven model (viz. obr. 63) Obr. 63) vývoje a zavádění prediktivního systému údržby do praxe.

Schéma je rozděleno do 6 fází po 11 krocích, přičemž se rozlišuje příprava, aplikace a neustálé procesy a činnosti při zavádění systému. Jsou zahrnuty stručné základní popisy některých kroků a lze pozorovat výraznou analogii s aplikovaným postupem při praktické části diplomové práce. Je začleněno:

- Příprava zavádění – Je třeba rozhodnutí managementu o vývoji a podpoře systému údržby. Je důležité stanovit cíle, které má vývoj odrážet (spolehlivostní ukazatele, KPIs) a strategii, jak bude cílů dosaženo.
- Audit systému údržby – S pomocí auditu je zapotřebí poznat stávající stav systému provozu a údržby, nalézt silné a slabé stránky a potenciální místa ke zlepšení. O celkovém poměru útvaru údržby mnohé také řekne ukazatel KPI I_{01} – Výpočet finanční náročnosti údržby majetku. Se získanými znalostmi je možné určit vhodné klíčové výrobní stroje, které vývoji údržby následně budou podléhat. Je nutné shromáždit a analyzovat veškerou technickou dokumentaci, historii poruch a záznamy o nákladech na provoz a údržbu těchto zařízení.
- Systémová analýza objektů – Na základě analýz kritičností subsystémů a prvků jednotlivých objektů a s pomocí Paretovy analýzy se rozpoznávají kritické položky vyžadující uplatnění vhodných opatření.
- Technická analýza – U jednotlivých vybraných strojních soustav se vymezují vhodná měřicí místa, determinují měřené veličiny, ve vztahu k tomu využívané snímače a určují se náležitá hraniční pásma pro sledování trendů získaných hodnot vibrací.
 - V rámci technické analýzy se zhotovuje analýza a snižování rizik ohrožujících pracovníky údržby při procesu měření.
 - Je doporučeno vytvořit metodický návod popisující proces měření za účelem sjednocení postupu a minimalizace úrazů a chyb vlivem lidského faktoru.
- Diagnostika a analýza – Provádějí se diagnostická měření, optimalizují se hraniční pásma, dělá se záznam dosažených hodnot vibrací a jejich odpovídajících frekvenčních spekter. V rámci vyhodnocování se provádí srovnávání spekter s referenčními spektry a nových hodnot vibrací s jejich již získanými trendy.
- Ekonomické zhodnocení – S jednotlivými výpočtovými vstupy jako např. náklady na odstávku, náklady na opravu sledovaných položek atd. se z dlouhodobého hlediska, (cca. rok) určují ušetřené náklady při vynaloženém úsilí pro vykonávání diagnostické údržby.
- Po celý průběh zavádění probíhá školení, výcvik a osvěta zainteresovaných útvarů a pracovníků podniku a koná se neustálé posuzování, hodnocení a zlepšování procesů tohoto systému údržby.

Model si klade za cíl zjednodušeně shrnout sled činností při vývoji systému údržby a navrhuje potenciální univerzální postup zavádění systému diagnostické údržby ve firmě. Jeho uspořádání a samotný obsah je možné dále vyvíjet a upravovat až už v obecné rovině pro potřeby teoretického vývoje či v případě přizpůsobení v rámci organizací.

Obr. 63) Model vývoje prediktivního systému údržby



5 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala preventivní a prediktivní diagnostickou údržbou na základě skutečného technického a provozního stavu udržovaného objektu za účelem jejího teoretického rozboru a následné praktické aplikace.

V teoretické části diplomové práce byl zmíněný systém údržby popsán, zařazen do souvislosti s rozdělením a vývojem využívaných politik údržby. Byly analyzovány jeho vlivy napříč základními procesy a činnostmi systému údržby v organizacích, přičemž se došlo k závěru kladného přínosu v sérii fází a procesů vývoje systému údržby. Diagnostická údržba napomáhá při dosahování a zlepšování řady strategických cílů, spolehlivostních ukazatelů a klíčových ukazatelů výkonnosti. Je vhodným prostředkem k podpoře provozní spolehlivosti klíčových a kritických výrobních strojů, přičemž přispívá k proaktivnímu přístupu zajištění kořenových příčin poruch. Díky prováděným servisním zásahům až na základě skutečného provozního stavu zařízení optimalizuje zdroje a plány zajištění údržby čímž významně zvyšuje efektivitu údržby ve využívání materiálních a finančních zdrojů. Podílí se tedy na cestě managementu údržby k dosažení excelence. V kontextu excelence byla ve spojitosti s prediktivní údržbou také vylíčena koncepce totálně produktivní údržby a současný trend v oblasti vývoje a integrace informačních systémů do struktury firem.

Byla popsána vibrační diagnostika jakožto jeden z hlavních nástrojů údržby na základě technického stavu objektu. V souvislosti s výrobními stroji byl charakterizován význam této diagnostiky, jakými prostředky se vibrace měří, jak se vibrace klasifikují a způsob zpracování a analýzy změřených dat.

Praktická část diplomové práce spočívala ve vypracování studie proveditelnosti prediktivního systému údržby v rámci současného vývoje údržby ve firmě Siemens, s. r. o. v Brně. Byl proveden rozbor současného stavu managementu údržby spočívající v analýze jejího řízení, záznamů odstávek klíčových strojů a způsobu financování, resp. finanční náročnosti udržování majetku. Závěr rozboru poskytl stanovisko o příhodnosti uplatňovat prediktivní systém údržby strojů.

Na základě hlediska o dalším vývoji byly k dalšímu postupu vybrány klíčové výrobní stroje značky Liechti s označením Turbomill 800g. Proběhla analýza poruch jednotlivých subsystémů a prvků zařízení, přičemž bylo následným posouzením rozhodnuto o využití vibrační diagnostiky jakožto prostředek k vývoji systému údržby. Následující systémová analýza složena z analýzy způsobů, důsledků a kritičnosti poruch – FMECA podepřela rozhodnutí o využití vibrodiagnostiky a poskytla další náměty ke zlepšení z hlediska možného budoucího vývoje údržby v organizaci.

Za účelem aplikace vibrační diagnostiky byla uskutečněna specifikace měření, která zahrnovala výběr vibračního analyzátoru, jeho snímače a vhodných měřicích míst sloužících k dosažení správných výsledků vibrací. Z důvodu možných nebezpečí při procesu měření byla vykonána analýza a posouzení možných rizik, přičemž byla ustanovena vhodná opatření a pokyny snižující jednotlivá rizika zjištěných nebezpečí. Byl také navržen a vypracován postupový model procesu měření s cílem zaznamenat a sjednotit tento proces a zredukovat chyby vlivem lidského faktoru.

S cílem záznamu a vyhodnocení změřených vibrací byla vytvořena a stanovena řada náležitostí zajišťujících tyto kroky. Na základě norem ISO a dostupné další literatury byly určeny vhodné měřicí parametry vibrací poskytující dostatečnou informaci o stavu strojních zařízení a hraniční pásma sloužící pro záznam trendu změřených parametrů včetně jejich posuzování z pohledu časového vývoje. Pro pracovníky údržby byla specifikována frekvenční spektra z důvodu podrobnějšího vyhodnocování změřených vibračních signálů, kdy těžiště této specifikace leželo v odhadu a výpočtu frekvencí ložiskových závad. Byla navržena podoba a postup integrace vibrodiagnostiky do systému údržby a informačního systému firmy.

Byla realizována série měření, na jejichž základě bylo provedeno posouzení a vyhodnocení aktuálního technického a provozního stavu vybraných klíčových výrobních zařízení. Výsledky byly v práci řádně se svými závěry interpretovány.

Cíl pilotního projektu, tedy realizovatelnost systému diagnostické údržby, byl v závěru praktické části ověřen za pomoci podrobného ekonomického zhodnocení, při němž byly posouzeny možné roční ušetřené náklady. Z ekonomického posouzení plyne závěr ročně ušetřených finančních prostředků v hodnotě cca. 836 tis. Kč. Systém preventivní a prediktivní diagnostické údržby je proto firmě Siemens, s. r. o. v Brně doporučen, a to jak z hlediska vývoje managementu údržby a zajištění údržby, tak i z pohledu ušetřených finančních prostředků.

V poslední řadě se praktická část, resp. jako součást závěrečného zhodnocení, zabývala mimo navržení dalších vylepšení také sestavením obecného modelu vývoje prediktivního systému údržby s využitím vibrační diagnostiky. Cílem modelu je poskytnout stručný popis a sled fází a kroků k dosažení správného a funkčního systému diagnostické údržby v praxi.

Dalším možným vývojem v této oblasti se nabízí průzkum využitelnosti vibrační diagnostiky z pohledu proaktivního přístupu k poruchám. Nabízí se otázka, jakými způsoby nástroje diagnostické údržby podporují hledání kořenových příčin poruch a jak vysoké finanční a materiální zdroje lze tímto přístupem v organizaci ušetřit. Dále je vhodné posoudit jakým způsobem a kterým směrem je třeba optimalizovat veškeré procesy a činnosti údržby při plně funkčním systému prediktivní údržby.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HAMMER, Miloš. *Management údržby a kvalita [Přednáška]*. Brno: Management spolehlivosti a kvality v údržbě, 2018.
- [2] ČSN EN 13306. *Údržba - Terminologie údržby*. 2/11. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [3] PRAJAPATI, Ashok, James BECHTEL a Subramaniam GANESAN. Condition based maintenance: a survey. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* [online]. 2012, **18**(4), 384-400 [cit. 2018-05-03]. DOI: 10.1108/13552511211281552. ISSN 1355-2511. Dostupné z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/13552511211281552>
- [4] LEI, Telli, Paulien HERDER a Ype. WIJNIA. *Asset Management: The State of the Art in Europe from a Life Cycle Perspective*. 1. Dordrecht: Springer, 2012. ISBN 978-94-007-2723-6.
- [5] CRESPO MÁRQUEZ, Adolfo. *The maintenance management framework: models and methods for complex systems maintenance*. 1. Londond: Springer, 2007. ISBN 978-1-84628-820-3.
- [6] ČSN EN 60300-3-11. *Management spolehlivosti - Část 3-11: Pokyn k použití - Údržba zaměřená na bezporuchovost*. 6/10. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [7] HAMMER, Miloš. *Hodnocení spolehlivosti systémů [Přednáška]*. Brno: Spolehlivost I. FSI VUT, 2016.
- [8] HAMMER, Miloš. *Výkonnost údržby a její hodnocení pomocí provozní spolehlivosti [Přednáška]*. Brno: Management spolehlivosti a kvality v údržbě FSI VUT, 2018.
- [9] ČSN EN 15341. *Údržba - Klíčové indikátory výkonnosti údržby*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [10] *Vibrations of rotating machinery*. 1. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN 978-4-431-55455-4.
- [11] HADAŠ, Zdeněk. *Dynamika soustav tuhých těles řešená metodami analytické mechaniky [Přednáška]*. Brno: Technická mechanika FSI VUT, 2016.
- [12] RANDALL, Robert. *Vibration-based condition monitoring: industrial, aerospace, and automotive applications*. 1. Hoboken, N.J.: Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-74785-8.
- [13] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. *Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a vývojářů: studijní opora* [online]. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012 [cit. 2018-04-18]. ISBN 978-80-248-2755-1. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2755-1.pdf>
- [14] NEIL, Davis. *Handbook of Condition Monitoring: Techniques and Methodology*. 1. Cardiff - United Kingdom: Springer Netherlands, 1998. ISBN 978-940-1060-653.

- [15] LEGÁT, Václav. *Management a inženýrství údržby*. 1. vyd. Praha: Professional Publishing, 2013. ISBN 978-80-7431-119-2.
- [16] SIEMENS AG. *The Company*. Berlin: SIEMENS AG, 2018. Dostupné také z: <https://www.siemens.com/press/pool/de/homepage/Siemens-company-presentation.pdf>
- [17] SIEMENS INDUSTRIAL TURBOMACHINERY S.R.O. *Parní turbíny v Brně: Historie a současnost* [online]. 3. rozšířené a doplněné vydání. Brno: Trilabit, 2010 [cit. 2018-03-17]. ISBN 978-80-902681-3-5. Dostupné z: http://w5.siemens.com/web/cz/cz/corporate/portal/home/produkty_a_sluzby/Industrial_turbomachinery/Documents/Kniha_CZ.pdf
- [18] *Tiskové centrum: Siemens Česká republika* [online]. Praha: Siemens, s.r.o., 2016 [cit. 2018-03-23]. Dostupné z: <http://www.siemens.cz/press/>
- [19] Fotografie. *Siemens Česká republika: Tiskové centrum* [online]. Praha: Siemens, s.r.o., 2016 [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: <http://www.siemens.cz/press/fotografie>
- [20] PERNICA, Vladimír. SIEMENS, S.R.O., ODŠTĚPNÝ ZÁVOD INDUSTRIAL TURBOMACHINERY. *Provoz a údržba strojů a zařízení*. 06. Olomoucká 7/9, Brno, 2014, 24 s. Směrnice S 8/04.
- [21] MCNAIR, Sam. LIFE CYCLE ENGINEERING. *Budgeting for Maintenance: A Behavior-Based Approach*. 2011. Dostupné také z: https://www.plantservices.com/assets/wp_downloads/pdf/110912-Life-Cycle-Engineering-budgeting-maintenance.pdf
- [22] BEN-DAYA, M. *Handbook of maintenance management and engineering*. 1. New York: Springer, 2009. ISBN 978-1-84882-471-3.
- [23] DC VISION, S.R.O. *Zpráva z auditu údržby v Siemens s. r. o.: odštěpný závod Industrial Turbomachinery*. Olomoucká 7/9, Brno, 2017.
- [24] LIECHTI ENGINEERING AG. *Documentation Turbomill 800g*. Langnau, Switzerland, 2011.
- [25] SEMOTAM, Petr. *Proaktivní systém údržby strojů*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.
- [26] BERTSCHE, B. *Reliability in automotive and mechanical engineering: determination of component and system reliability*. 1. Berlin: Springer, 2008. ISBN 978-3-540-33969-4.
- [27] ČSN EN 60812. *Techniky analýzy bezporuchovosti systémů – Postup analýzy způsobů a důsledků poruch (FMEA)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2007.
- [28] MYKISKA, Antonín. *Bezpečnost a spolehlivost technických systémů*. Vyd. 2. přeprac. V Praze: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-2868-2.

- [29] FLUKE CORPORATION. *Users Manual: Fluke 810 Vibration Tester*. Rev.1. Everett, WA U.S.A., 2010.
- [30] ČSN ISO 20816-1. *Vibrace - Měření a hodnocení vibrací strojů - Část 1: Obecné pokyny*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [31] ČSN ISO 13373-1. *Monitorování stavu a diagnostika strojů - Monitorování stavu vibrací - Část 1: Obecné postupy*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003.
- [32] *Výkresová dokumentace: Gruppe A-Achse Slave*. Switzerland, Langnau, 2011. TM801G. 100-07.2.
- [33] BLECHA, Petr. *Management technických rizik u výrobních strojů: Technical risk management in production machines : teze habilitační práce*. 1. vyd. Brno: VUTUM, 2010. ISBN 978-80-214-4062-3.
- [34] HEINZ P. BLOCH, a FRED K. GEITNER. *Machinery Failure Analysis and Troubleshooting Practical Machinery Management for Process Plants*. 4th ed. Oxford: Elsevier Science, 2012. ISBN 978-012-3860-460.
- [35] HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER. *Technická diagnostika a spolehlivost. II.: Vibrodiagnostika*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0650-9. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:0b990bf0-6432-11e5-90b1-005056827e52>
- [36] MAIS, Jason. SKF USA INC. *Spectrum Analysis: The key features of analyzing spectra* [online]. 1. San Diego, California 92123 USA, 2002 [cit. 2018-04-18]. Dostupné z: <http://www.skf.com/binary/tcm:12-113997/CM5118%20EN%20Spectrum%20Analysis.pdf>
- [37] ČSN ISO 13373-3. *Monitorování stavu a diagnostika strojů - Monitorování stavu vibrací - Část 3: Návod pro vibrační diagnostiku*. 1/17. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [38] SKF GROUP. *SKF: Super-precision bearings*. PUB BU/P1 13383/2 EN. Gothenburg, Sweden, 2016. Dostupné také z: http://www.skf.com/binary/21-129877/Super-precision-bearings-catalogue---13383_2-EN.pdf
- [39] SCHAEFFLER TECHNOLOGIES AG & CO. KG. *Rolling Bearings*. Vyd. 1. Herzogenaurach, Germany, 2014, 1644 s.
- [40] TCM INTERNATIONAL. *Final Project Report: (Cuttingforce Milling test by turbine blade)*. Austria, Stainz, 2018, 15 s. TCM-AEC_2018 - 001.
- [41] HUMÁR, Anton. *Technologie I.: Technologie obrábění - 1. část*. 1. vyd. Brno: FSI VUT, 2003.
- [42] KOTLER, Philip a Kevin Lane KELLER. *Marketing management*. [4. vyd.]. Praha: Grada, 2013. ISBN 978-80-247-4150-5.

- [43] HUTYRA, Milan. *Management jakosti* [online]. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008 [cit. 2018-01-18]. ISBN 978-80-248-1484-1. Dostupné z: http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FMMI/MJ/Hutyra_management_jakosti.pdf
- [44] ŠAJDLEROVÁ, Ivana a Miloslav KONEČNÝ. *Základy managementu* [online]. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008 [cit. 2018-01-18]. ISBN 978-80-248-1520-6. Dostupné z: http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/ZMag/data/zaklady_managementu.pdf
- [45] Siemens představil nový slogan: Ingenuity for life. In: *Tiskové centrum: Siemens Česká republika* [online]. Praha: Siemens, s. r. o., 2016 [cit. 2018-03-23]. Dostupné z: <http://www.siemens.cz/press/siemens-predstavil-novy-slogan-ingenuity-for-life>
- [46] Sinumerik. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2018-04-04]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Sinumerik>

7 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

7.1 Seznam symbolů

P	 počáteční, nedetekovatelný výskyt poruchy
P_n	 potenciální okamžiky k detekci nadcházející poruchy
R	 pravděpodobnostní/rizikové číslo
$P O$	 pravděpodobnost vzniku nežádoucí události
$C S$	 závažnost nežádoucí události
D	 parametr představující schopnost detekovat nežádoucí událost
I_{01}	 finanční náročnost udržování majetku [%]
A	 koeficient pohotovosti [%]
E	 koeficient výkonnosti [%]
A	 koeficient kvality [%]
$m M$	 hmotnost [kg]
$k K$	 tuhost pružiny [N/m]
ω	 úhlová frekvence [rad/s]
f	 frekvence [Hz]
ζ	 poměr tlumení [-]
T	 perioda [s]
$c C$	 koeficient tlumení [N·s/m]
$x x(t)$	 výchylka [m]
$\dot{x} v(t)$	 rychlost [m·s ⁻¹]
$\ddot{x} a(t)$	 zrychlení [m·s ⁻²]
$Q(t)$	 harmonická síla v průběhu času [N]
U	 působení rotujícího tělesa [N]
F	 síla vnějšího působení [N]
Ωv	 frekvence působení sil [s ⁻¹]
RPM n	 počet otáček [ot./min.]
M	 moment [Nm]
$g(t)$	 periodický signál
$a_n b_n$	 Fourierovy (spektrální) koeficienty
N	 počet diskrétních hodnot
c_n	 amplituda
ϕ_n	 fáze
x_{rms}	 efektivní hodnota výchylky vibrací [μ m]
v_{rms}	 efektivní hodnota rychlosti vibrací [mm/s]
a_{rms}	 efektivní hodnota zrychlení vibrací [m/s ²]
B_d	 průměr valivého elementu [mm]
P_d	 roztečný průměr ložiska [mm]
φ	 kontaktní úhel [deg]
n	 počet valivých elementů [-]
$F_{X,Y,Z}$	 řezné zatížení [N]
t	 čas [s]

7.2 Seznam zkratek

FMEA	Failure Mode and Effects Analysis v překladu „Analýza způsobů a důsledků poruch“. [27]
FMECA	Failure Mode, Effects and Criticality Analysis v překladu „Analýza způsobů, důsledků a kritičnosti poruch“. Jedná se o logické rozšíření metody FMEA o odhad kritičnosti důsledků poruch a pravděpodobnosti jejich výskytu. [27]
ISO	International Organization for Standardization v překladu „Mezinárodní organizace pro normalizaci“.
EN	Evropská norma.
ČSN	ČSN je chráněné označení českých technických norem.
CNC	Z anglického Computer Numeric Control, tedy obráběcí stroje počítačově číslicově řízené.
RPN	Zkratka RPN – Risk Priority Number, v překladu hodnota priority rizika. [27]
TPM	Total Productive Maintenance (TPM) v překladu „Komplexní produktivní údržba“. Je využíván i překlad „Totálně produktivní údržba“. [15]
RCM	Reliability Centered Maintenance (RCM), v oficiálním překladu podle normy „Údržba zaměřená na bezporuchovost“. [6]
CEZ/OEE	Overall Equipment Effectiveness (OEE) v překladu „Celková efektivnost zařízení“ (CEZ) je funkcí ztrát, které jsou způsobeny poruchami, ztrátami výkonu vlivem redukované rychlosti a seřizovacími časy a také nízkou kvalitou vyráběných výrobků. [15]
FFT	Rychlá Fourierova transformace [10]
CBM	Zkratka CBM – Condition Based Maintenance v překladu údržba založená na technickém stavu objektu. [3]
BSC	Zkratka BSC – Balanced Scorecard, v překladu systém vyvážených ukazatelů výkonnosti podniku. [5]
KPI	Zkratka KPI – Key Performance Indicator, v překladu klíčové ukazatele výkonnosti. [9]
MTBF	Spolehlivostní ukazatel Mean Time Between Failures, v překladu střední doba provozu mezi poruchami- [15]
MTTF	Spolehlivostní ukazatel Mean Time to Failure, v překladu střední doba do poruchy. [15]
MTTR	Spolehlivostní ukazatel Mean Time to Repair, v překladu střední doba do opravy. [5]
MLDT	Spolehlivostní ukazatel Mean Logistic Delay Time, v překladu střední doba logistického zpoždění. [5]
MUT	Spolehlivostní ukazatel Mean Up Time Between Failures, v překladu střední doba použitého stavu. [5]
MDT	Spolehlivostní ukazatel Mean Down Time Between Failures, v překladu střední doba nepoužitého stavu. [5]

RCFA	Metoda Root-cause failure analysis, v překladu analýza kořenových příčin poruch. [5]
MEE	Maintenance Efficiency Evalution, v překladu hodnocení efektivity údržby, známá také jako metoda benchmarking. [9]
LCCA	Life cycle Costs Analysis, v překladu analýza nákladů na životní cyklus sloužící jako systematická proces technickoekonomického zhodnocení objektu.
CMMS	Systémy informačního řízení údržby (Computerized Maintenance Management Systems) [15]
VMI	VMI, zkratkou Vendor-managed inventory, v překladu dodavatelem řízené zásoby. Dodavatelé v rámci programu průběžného doplňování jsou zodpovědní za automatické doplňování zásob zákazníka. [42]
AG	Německé označení akciové společnosti (Aktiengesellschaft, AG)
BOZP	Bezpečnost a ochrana zdraví při práci
OHSAS	Occupational Health and Safety Assessment Series, v překladu série hodnocení bezpečnosti a ochrany zdraví při práci – u nás využívaná zkratka BOZP.
LOTO	Celým názvem Lockout Tagout systém využívaný pro snižování rizika nebezpečí úrazu pracovníka při provádění servisního zásahu.
SAP	Zkratka Systems - Applications - Products in data processing představuje produkt podnikového informačního systému.
ERP	Enterprise Resource Planning, česky plánování podnikových zdrojů.
PM	Plant maintenance, v českém překladu údržba závodu. Zkratka a název se nejčastěji využívá ve spojitosti s názvem modulu systému SAP.
RMS	Zkratka RMS – root mean square value neboli efektivní hodnota měřené veličiny vyjádřena jako druhá odmocnina čtverců okamžitých hodnot. RMS hodnota je významná tím, že obsahuje informaci o výkonu kmitání. [35]
MIMOSA	Zkratka Machinery Information Management Open Systems Alliance, v překladu Aliance otevřených systémů pro řízení informací o strojích.
RPM	RPM (zkratka revolutions per minute) v překladu otáčky za minutu, jednotka [ot/min].
FTF	Poškození klece ložiska
BSF	Poškození valivých elementů ložiska
BPFO	Poškození vnějšího kroužku ložiska
BPFI	Poškození vnitřního kroužku ložiska
RTC, YRT	Axial/radial bearings – Axiální/radiální ložisko
IS	Informační systém

7.3 Seznam tabulek

Tab 1)	Příklad modelu BSC pro údržbu [5].....	20
Tab 2)	Vývojový diagram procesu – Oprava / havárie [20]	39
Tab 3)	Kategorizace strojů a zařízení [20]:.....	39
Tab 4)	Časové intervaly plánovaných prohlídek [20].....	40
Tab 5)	Parametry obráběcího centra Liechti Turbomill 800g [24]	45
Tab 6)	Kritérium pro klasifikaci závažnosti poruchy S ve vztahu k finanční náročnosti na obnovu při dané příčině poruchy.....	49
Tab 7)	Seznam součástí schématu komponent stroje Liechti Turbomill 800g	53
Tab 8)	Seznam součástí schématu komponent stroje Liechti Turbomill 800g	54
Tab 9)	Seznam součástí schématu komponent výměníku a zásobníku nástrojů.....	55
Tab 10)	Seznam součástí schématu komponent chladicího systému a systému odvodu chladicí kapaliny a třísek	55
Tab 11)	Ukázka vyplněného pracovního listu analýzy FMECA	56
Tab 12)	Kritické příčiny způsobu poruch s návrhem opatření.....	57
Tab 13)	Matice rizik [33].....	64
Tab 14)	Legenda – stupnice závažnosti a pravděpodobnosti výskytu škody [33]	65
Tab 15)	Seznam významných nebezpečí během procesu měření vibrací.....	66
Tab 16)	Seznam významných nebezpečí během procesu měření vibrací.....	67
Tab 17)	Formulář pro odhad rizika.....	68
Tab 18)	Vývojový diagram procesu měření vibrací	69
Tab 19)	Pracovní postup pro měření vibrací na strojích Liechti.....	70
Tab 20)	Pracovní postup pro měření vibrací na strojích Liechti.....	71
Tab 21)	Hranice pásem pro prvotní vyhodnocení velikostí vibrací a grafické znázornění vývoje vibrací v závislosti na době provozu	74
Tab 22)	Výsledky posledního měření vibrací na stroji Liechti BRQ100250 (4).....	77
Tab 23)	Výsledky posledního měření vibrací na stroji Liechti BRQ100236 (3).....	79
Tab 24)	Výsledky posledního měření vibrací na stroji Liechti BRQ100251 (1).....	84
Tab 25)	Ekonomické vyhodnocení celkových ušetřených nákladů při využití vibrační diagnostiky	88
Tab 26)	Změřená řezná síla <i>FZ</i> využitých břitových destiček při procesu hrubování [40]	92

7.4 Seznam obrázků

Obr. 1)	Základní systémy údržby dle ČSN EN 13306:2011 [2]	17
Obr. 2)	Průběh selhávání objektu v průběhu času (P – F křivka) [3].....	18
Obr. 3)	Model managementu údržby [5]	19
Obr. 4)	Příklad nástrojů využívaných ve stavebních blocích managementu údržby [5].....	20
Obr. 5)	Indikátory zlepšující výkonnost RCM programu (viz. fáze 4) [5]	21
Obr. 6)	Ilustrace nákladové neurčitosti	23
Obr. 7)	Systém netlumených volných vibrací [10]	26
Obr. 8)	Systém tlumených vibrací [10].....	26
Obr. 9)	Ilustrace absolutního a relativního měření hřídelových vibrací [12]	27
Obr. 10)	Typické stavby snímačů: a) tlakový; b) smykový [12]	28
Obr. 11)	Typické měřicí frekvenční rozsahy hlavních tří typů snímačů, resp. měřených veličin vibrací [13]	28
Obr. 12)	Vibrační signál složen z řady složek o různých frekvencích představujících jednotlivé druhy poruch strojní soustavy [14]	29
Obr. 13)	Princip a postup obálkové analýzy [12]	30
Obr. 14)	Základní pilíře metodiky TPM [5].....	31
Obr. 15)	8 ztrát snižující efektivnost zařízení [5]	33
Obr. 16)	Příklad procesu systému řízení plánování údržby [5]	34
Obr. 17)	Harmonogram vývoje kroků systému řízení plánování údržby [5]	35
Obr. 18)	Integrace e-údržby v rámci podnikového informačního systému.....	35
Obr. 19)	Logo společnosti Siemens [18]	37
Obr. 20)	Siemens, s. r. o., odštěpný závod Industrial Turbomachinery [19]	38
Obr. 21)	Přibližné znázornění souvislosti nákladů údržby jako I01, strategie údržby a výkonnosti podniku [21]	41
Obr. 22)	Počet hlášení objednávek pro údržbu v závislosti na délce následných odstávek nad dobu 24 hodin za fiskální rok 16/17	42
Obr. 23)	Počet hlášení objednávek pro údržbu v závislosti na délce následných odstávek do doby 24 hodin za fiskální rok 16/17.....	42
Obr. 24)	Obráběcí centrum Liechti Turbomill 800g.....	45
Obr. 25)	Znázornění os stroje Liechti Turbomill 800g [24]	46
Obr. 26)	Paretův diagram četnosti poruch druhů komponent u obráběcích strojů Liechti od roku 2016.....	46
Obr. 27)	Paretův diagram nákladů na obnovu druhů komponent u obráběcích strojů Liechti od roku 2016.....	47
Obr. 28)	Paretův diagram hodnot priority rizika RPN příčin způsobu poruch daných součástí.....	49
Obr. 29)	Blokový diagram stroje Liechti Turbomill 800g	50
Obr. 30)	Model systému stroje Liechti Turbomill 800g	51
Obr. 31)	Model systému stroje Liechti Turbomill 800g	52
Obr. 32)	Schéma komponent stroje Liechti Turbomill 800g [24]	53
Obr. 33)	Schéma komponent stroje Liechti Turbomill 800g [24]	54
Obr. 34)	Schéma komponent výměníku a zásobníku nástrojů [24]	55

Obr. 35)	Schéma komponent chladicího systému a systému odvodu chladicí kapaliny a třísek [24]	55
Obr. 36)	Vibrometr Fluke 810 při měření frézovacího vřetena osy S1 stroje Leichti Turbomill 800g s tříosým akcelerometrem ve směru X.....	58
Obr. 37)	Grafické znázornění stavby frézovacího vřetena osy S1 s umístěním snímačů [24]	60
Obr. 38)	Umístění snímačů na frézovacím vřetenu osy S1	60
Obr. 39)	Měření otáčkové rychlosti os A1:A11 s využitím laserového otáčkoměru a nalepeného odrazného povrchu na vřetenu	61
Obr. 40)	Technický výkres osy A1 a A11 se znázorněním důležitých prvků a umístění snímačů [32].....	62
Obr. 41)	Umístění snímačů na ose A1	62
Obr. 42)	Umístění snímačů na ose A11	63
Obr. 43)	Graf pro odhad velikosti rizika [33].....	64
Obr. 44)	Trend stavu odchylky vibrací x_{RMS} osy A11 v místě umístění snímače 3RH	77
Obr. 45)	Trend stavu rychlosti vibrací v_{RMS} osy A11 v místě umístění snímače 3RH.....	78
Obr. 46)	Trend stavu odchylky vibrací x_{RMS} osy S1 v místě umístění snímače X s prognózou ve formě extrapolované přímky mimo známý interval hodnot	78
Obr. 47)	Trend stavu zrychlení vibrací a_{RMS} osy A1 v místě umístění snímače 1RH	79
Obr. 48)	Frekvenční spektrum stroje Liechti (3) osy A1 v místě 1RH – měřeno dne 09.03.2018....	80
Obr. 49)	Frekvenční spektrum stroje Liechti (3) osy A1 v místě 1RH – měřeno dne 23.03.2018....	80
Obr. 50)	Frekvenční spektrum stroje Liechti (3) osy A1 v místě 1RH – měřeno dne 15.04.2018....	81
Obr. 51)	Trend stavu odchylky vibrací x_{RMS} osy A11 v místě umístění snímače 3RH s prognózou ve formě extrapolované křivky mimo známý interval hodnot	81
Obr. 52)	Frekvenční spektrum stroje Liechti (3) osy S1 v místě X – měřeno dne 09.03.2018	82
Obr. 53)	Frekvenční spektrum stroje Liechti (3) osy S1 v místě X – měřeno dne 23.03.2018	82
Obr. 54)	Frekvenční spektrum stroje Liechti (3) osy S1 v místě X – měřeno dne 15.04.2018	83
Obr. 55)	Trend stavu zrychlení vibrací a_{RMS} osy S1 v místě umístění snímače X s prognózou ve formě extrapolované přímky mimo známý interval hodnot	83
Obr. 56)	Nesymetrický přípravek při měření stroje Liechti (1) dne 28.02.2018	84
Obr. 57)	Nesymetrický přípravek při měření stroje Liechti (1) dne 28.02.2018	85
Obr. 58)	Uživatelské rozhraní systému SAP s ukázkou karty strojního zařízení a vloženého souboru Excel se záznamem vibrací	86
Obr. 59)	Změřené řezné síly současně využívaných břitových destiček [40]	92
Obr. 60)	Změřené řezné síly nově navržených břitových destiček [40]	92
Obr. 61)	Rozdílný tvar a objem třísek řezného procesu vytvořených současně používanými (vlevo) a nově navrženými (vpravo) břitovými destičkami	93
Obr. 62)	Ukázka uživatelského rozhraní Condition Monitoring s ilustračním znázorněním snímání vibrací v reálném čase.	93
Obr. 63)	Model vývoje prediktivního systému údržby	95

8 SEZNAM PŘÍLOH

- Tabulka - Konstrukční FMEA stroje Liechti Turbomill 800g / BRQ10004
- Pracovní postup – Liechti – Měření vibrací
- Formuláře pro odhad rizika v rámci analýzy a posouzení rizik při měření vibrací