



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

NÁVRH PROVOZNÍCH MEZÍ PRO DIAGNOSTICKÝ SYSTÉM OBRÁBĚCÍHO STROJE

DESIGN OF OPERATIONAL LIMITS FOR MACHINE TOOL DIAGNOSTIC SYSTEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vlastimil Hrbáček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Bc. Vlastimil Hrbáček**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce: **doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.**
Akademický rok: 2019/20

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:

Návrh provozních mezí pro diagnostický systém obráběcího stroje

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ve spolupracující firmě je zaveden systém online vibrační diagnostiky na zvoleném stroji. Úkolem je provést podrobnou analýzu dlouhodobě shromažďovaných vibračních signálů s cílem stanovit zdůvodněné provozní meze vibrací. Hlavním výsledkem bude vytvoření systému pro změnu provozních mezí v závislosti na výrobním programu.

Cíle diplomové práce:

Popis současného stavu on-line diagnostiky zvoleného stroje.

Systémový rozbor problému hodnocení stavu stroje pomocí online vibrační diagnostiky.

Návrh a zdůvodnění zvoleného způsobu řešení problému stanovení provozních mezí.

Statistické zpracování naměřených vibračních signálů při aktuálním výrobním programu.

Vlastní závěry a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER. Technická diagnostika a spolehlivost. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0650-9.

LEGÁT, Václav. Management a inženýrství údržby. Druhé doplněné vydání. Praha: Kamil Mařík - Professional Publishing, 2016. ISBN 978-807431-163-5.

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

MONTGOMERY, Douglas C. Introduction to statistical quality control. 5th ed. Hoboken: John Wiley, 2005. ISBN 0-471-66122-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá online vibrační diagnostikou frézovacího centra Datron M8Cube. Obsahuje metodiky stanovení provozních mezí vibrací ke zjišťování stavu stroje. Součástí práce je i všeobecný popis údržby a technické diagnostiky se zaměřením na vibrační diagnostiku. Hlavní částí práce je vlastní řešení problému stanovení provozních mezí vibrací vřetene stroje v závislosti na výrobním programu. Podstatou vlastního řešení je stanovení vibračních mezí pro jednotlivé frézovací nástroje.

ABSTRACT

The Master's thesis deals with online vibration diagnostics of a milling center. It contains a methodology to determine the vibration operating limits and to detect machine of condition monitoring. The thesis also contains a general description of maintenance and technical diagnostics with a focus on vibrodiagnostics. The main part of the thesis is to solve the problem of determining the operating limits of spindle vibration depending on the production program. The essence of the solution is to determine vibration limits for individual milling tools.

KLÍČOVÁ SLOVA

Frézovací stroj, vibrační diagnostika, diagnostický systém, provozní meze vibrací

KEY WORDS

Milling machine, vibration diagnostics, diagnostic systém, operation vibration levels

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HRBÁČEK, Vlastimil. *Návrh provozních mezí pro diagnostický systém obráběcího stroje*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124492>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Róbert Jankových.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Róbertu Jankových, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat firmám DATRON - TECHNOLOGY CZ s.r.o. a firmě EMKO Case a.s. za vstřícnost a ochotu při tvorbě diplomové práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 26.6.2020

.....

Vlastimil Hrbáček

OBSAH

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | ÚVOD | 15 |
| 2 | MOTIVACE | 17 |
| 3 | SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ PRO TVORBU PROVOZNÍCH MEZÍ V DIAGNOSTICKÉM SYSTÉMU | 19 |
| 3.1 | Monitorování a diagnostika k provádění testů na dálku | 19 |
| 3.2 | Údržba..... | 19 |
| 3.3 | Signál v technické diagnostice..... | 21 |
| 3.3.1 | Rozdělení signálu | 21 |
| 3.3.2 | Zpracování signálů | 22 |
| 3.4 | Technická diagnostika | 23 |
| 3.4.1 | Diagnostický systém..... | 25 |
| 3.5 | Vibrodiagnostika..... | 25 |
| 3.5.1 | Vibrace..... | 25 |
| 3.5.2 | Charakteristika vibrací..... | 26 |
| 3.5.3 | Snímače vibrací | 27 |
| 3.5.4 | Instalace snímačů vibrací..... | 29 |
| 3.5.5 | Typické příčiny zvýšení vibrací na rotačních strojích..... | 32 |
| 3.5.6 | Použití snímání vibrací k vyhodnocení opotřebení strojů (ČSN ISO 10816-1)..... | 33 |
| 4 | POZOROVÁNÍ A ZMAPOVÁNÍ VÝROBNÍHO PROCESU FIRMY EMKO CASE | 37 |
| 4.1 | O firmě | 37 |
| 4.2 | CNC frézovací centra Datron ve firmě EMKO Case | 37 |
| 4.2.1 | Nástrojové vybavení frézovacích center ve firmě | 38 |
| 4.3 | Výrobní program vhodný pro stanovení mezí vibrací | 38 |
| 4.4 | Vyhodnocení stanoveného výrobního programu | 39 |
| 5 | POPIS SOUČASNÉHO STAVU ON-LINE VIBRAČNÍ DIAGNOSTIKY STROJE | 41 |
| 5.1 | SKF Multilog online systém IMx-8..... | 41 |
| 5.2 | Snímače vibrací CMAC244 - 1D..... | 42 |
| 5.3 | SKF @ptitude Observer..... | 43 |
| 6 | NAPLÁNOVÁNÍ A PROVEDENÍ EXPERIMENTÁLNÍ VÝROBNÍ SÉRIE | 45 |
| 6.1 | Stanovení výrobku a nástrojů | 45 |
| 6.1.1 | Nastavení řezných podmínek..... | 46 |
| 7 | VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ VÝROBNÍ SÉRIE | 49 |
| 7.1 | Zpracování naměřených vibrací pro nástroj 0068808K | 49 |
| 7.2 | Stanovení doporučených mezí vibrací | 53 |
| 7.3 | Vyhodnocení zbylých nástrojů na stroji 1 a 2..... | 56 |
| 7.4 | Vyhodnocení pomocí interferometru Taylor Hobson Talysurf CCI Lite | 56 |
| 7.4.1 | Stav opotřebení nástroje | 57 |
| 7.4.2 | Hodnocení textury povrchu vzorku | 58 |
| 8 | DOPORUČENÍ PRO PRAXI | 61 |
| 8.1 | Opakovatelnost podmínek | 61 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 8.2 | Dostatečné množství naměřených dat a způsob získání dat | 61 |
| 8.3 | Zálohování a přístup k datům | 62 |
| 9 | ZÁVĚR..... | 63 |
| 10 | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 65 |
| 11 | SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK..... | 67 |
| 11.1 | Seznam tabulek..... | 67 |
| 11.2 | Seznam obrázků..... | 67 |

1 ÚVOD

Strojírenství jistě není jediným druhem lidské činnosti, kde se přistupuje k monitorování různých úkonů. Monitorovány mohou být jak úkony lidské, tak úkony stroje. V této práci byl monitorován stroj a následně i operátor.

Monitorování v této diplomové práci je prováděno za účelem smysluplného stanovení provozních mezí pro diagnostický systém obráběcího stroje. Diagnostický systém má několik způsobů použití. Může sloužit jako pomocný nástroj technologa pro vhodné nastavení různých podmínek, tak aby bylo dosaženo požadovaných rozměrů, geometrických tvarů a parametrů textury povrchu výrobku. Zároveň je nutno nástroj, kterým se obrábí zatěžovat, tak aby se nemusel příliš brzy měnit za nový, ale také není dobré frézovat příliš „jemně“, což se rovněž ekonomicky nevyplácí z důvodu malé produktivity stroje. Smysluplně stanovené provozní meze by mohly eliminovat škody, které jsou zaviněny chybou programátora při tvorbě programu nebo chybou obsluhy při upínání. Případné kolize a škody by pak byly záležitostí pouze nástroje a obrobku bez většího poškození stroje. [9]

Předložená diplomová práce se zabývá monitorováním vibrací při různých výrobních operacích a následně je navržen a vytvořen zkušební vzorek. V diplomové práci jsou analyzovány změny hodnot vibrací a změny parametrů frézování jako jsou typ a velikost nástroje či typ vřetene. V diplomové práci jsou stanoveny vibrační meze nástroje 0068808K.

Při tvorbě diplomové práce byly k dispozici dva stroje Datron M8Cube (viz. obr.1) ve firmě EMKO Case a.s. Spolupráci při tvorbě diplomové práce poskytoval i český distributor těchto strojů firma DATRON-TECHNOLOGY CZ s.r.o. Na strojích byly nainstalovány systémy ke sledování vibrací. Konkrétně se jednalo o osmi kanálové měřicí systémy od firmy SKF Multilog IMx-8. Pro přístup k naměřeným vibračním signálům sloužil software @ptitude Observer.



Obr. 1) Frézovací centrum Datron M8Cube [10]

Diplomová práce je rozdělena do osmi kapitol a závěru. Po kapitole 1 (Úvod) a kapitole 2 (Motivace) je v práci zařazena kapitola 3 (Současný stav poznání pro tvorbu provozních mezí v diagnostickém systému). Kapitola 3 je zakončena použitím vibrační diagnostiky vibrací k vyhodnocení technického stavu strojů.

Kapitola 4 (Pozorování a zmapování výrobního procesu firmy EMKO Case) je věnována zvolení vhodného výrobního programu ke stanovení provozních mezí vibrací.

Kapitola 5 (Popis současného stavu on-line vibrační diagnostiky stroje) popisuje současný stav on-line vibrační diagnostiky ve firmě EMKO Case.

V kapitole 6 (Naplánování a provedení experimentální výrobní série) je navržen zkušební vzorek s maximálním dovoleným zatížením nástroje s cílem stanovit provozní meze vibrací vzhledem k nástroji.

V kapitole 7 (Vyhodnocení experimentální výrobní série) jsou vyhodnocena data a stanoveny provozní vibrační meze pro nástroj 0068808K. Kapitola obsahuje i vyhodnocení textury povrchu

V kapitole 8 (Doporučení pro praxi) jsou doporučení, která umožňují provozní meze vibrací zavést do praxe.

V přílohách jsou vyobrazena data z měření vibrací vybraných vzorků a fotografie těchto vzorků.

2 MOTIVACE

Jedním z prvotních impulzů pro vypracování této diplomové práce byl projekt NOVÉ PŘÍSTUPY V MULTIPARAMETRICKÉ DIAGNOSTICE VYSOKORYCHLOSTNÍCH VŘETEN STROJŮ DATRON, který byl spolufinancován Evropskou unií. Účelem projektu bylo:

1. spolehlivé online sledování stavu vřeten strojů DATRON,
2. zachycení potenciálně nebezpečných událostí s možností následné analýzy,
3. hodnocení přesnosti obrábění pomocí parametrů geometrické přesnosti kontrolního obrobku.

Tato diplomová práce pokračuje v řešení uvedených úkolů a zabývá se především bodem 2 a to zachycením a následnou eliminací nebezpečných událostí. Tyto události byly zachyceny a byly stanoveny provozní meze vibrací pro nástroj 0068808K. Zavedení těchto mezí do diagnostického systému minimalizuje vznik a následky škod.

V zadání diplomové práce bylo uvedeno pět cílů této diplomové práce.

Prvním z cílů diplomové práce bylo popsat současný stav on-line diagnostiky na stroji. Tento cíl byl splněn díky konzultaci ve firmě Datron a jako cenná pomůcka pro vypracování byla vedoucím diplomové práce doporučena literatura *Metodika I: Metodika pro on-line diagnostiku* [25].

Druhým z cílů byl systémový rozbor problému hodnocení stavu stroje pomocí online vibrační diagnostiky. Pro splnění tohoto cíle bylo použito normy ČSN ISO 10816-1 [23] a studijní opory Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část vibrační diagnostika. [15]

Pro řešení třetího cíle návrhu a zdůvodnění zvoleného způsobu řešení problému stanovení provozních mezí vibrací byla zohledněna literatura *Metodika I: Metodika pro on-line diagnostiku* [25]. Po konzultaci s vedoucím diplomové práce byl proveden vlastní postup inspirován touto literaturou.

Čtvrtý cíl byl statistické zpracování naměřených signálů při aktuálním výrobním programu. Pro statistické zpracování dat byly vybrány data z vlastního měření. Vedoucím diplomové práce byla doporučena speciální statistická metoda 30MAX.

Pátým a posledním cílem této diplomové práce byla tvorba vlastních závěrů a doporučení pro praxi. Tyto závěry a doporučení vplynuly při tvorbě diplomové práce a zajistí správnou funkci stanovených provozních mezí.

3 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ PRO TVORBU PROVOZNÍCH MEZÍ V DIAGNOSTICKÉM SYSTÉMU

V této kapitole je věnována pozornost uvedení do problematiky stanovení provozních mezí vibrací. Tato kapitola obsahuje 5 podkapitol. První podkapitola je věnována monitorování a diagnostice k provádění testů na dálku. Druhá podkapitola je věnována vývoji a důležitosti údržby strojního vybavení firmy. Třetí podkapitola se věnuje rozdělení signálu a jeho zpracování. Čtvrtá podkapitola se zabývá technickou diagnostikou a jejím členěním. Pátá podkapitola je věnována jedné z těchto technických diagnostik. Tato podkapitola pojednává o diagnostice vibrační. Hlavní částí této podkapitoly je kmitavý pohyb a snímače vibrací.

3.1 Monitorování a diagnostika k provádění testů na dálku

Dálkový přístup a jistou míru dálkové diagnostiky obráběcích strojů už v rámci koncepce Průmyslu 4.0 nebo Smart strojů nabízí většina výrobců (včetně strojů Datron M8Cube). Většinou se však jedná pouze a jen o základní koncept, který spočívá v zaznamenávání průběhu vybraných veličin (proudu pohonů, teplota vybraných částí strojů a okolí, atp.). Dále může být umožněno zjistit změny v pracovním vytížení stroje pomocí řídicích systémů. Připojení strojů na internet umožňuje použití různých pomocných systémů. Je také možné pro data z testování využívat cloudových úložišť a služeb. [6,7]

Dálková diagnostika je dnes používána jako ekonomické řešení nejjednodušších problémů u zákazníka. Ekonomičnost spočívá především v absenci nutnosti osobní přítomnosti diagnostika a okamžitého řešení různých problémů, převážně těch nejjednodušších. V situaci, kdy je problém zásadnějšího charakteru může diagnostik pracovat v součinnosti s obsluhou stroje. Při výskytu zásadních problémů je už osobní přítomnost specialisty nezbytná. [7]

Tyto systémy umožňují odstranění různých závad, jenž je schopen vyřešit specialista bez osobní přítomnosti. V nesprávných (či nedostatečně) kvalifikovaných rukou mohou systémy být sami původcem vzniku i závažnějších problémů než ty které měly řešit. Je tedy nutno zajistit dostatečné proškolení diagnostických specialistů. [7]

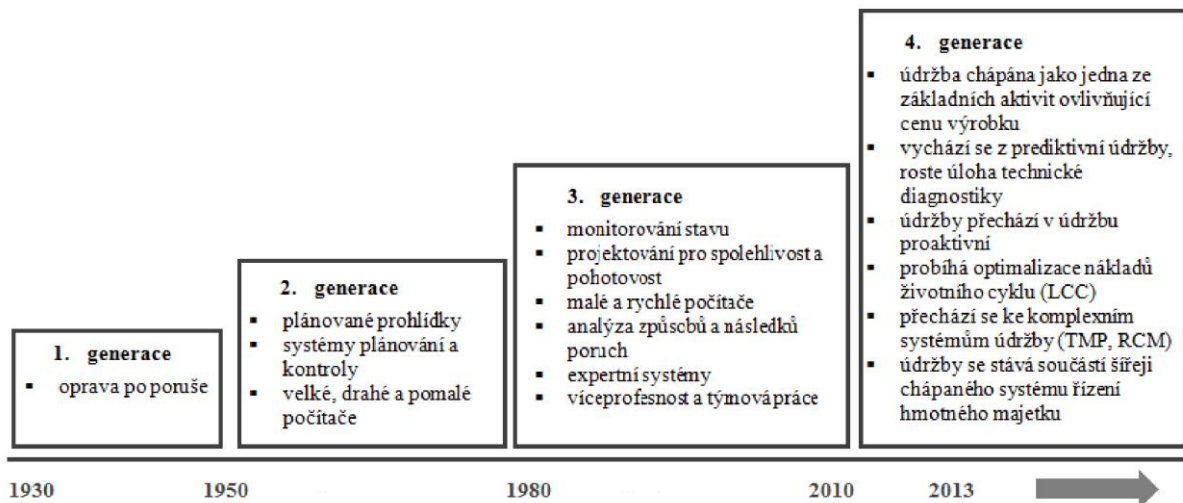
Při zavádění dálkové diagnostiky a dálkového přístupu je nutná vzájemná dohoda mezi majitelem stroje a správcem dálkového přístupu (prodejce stroje, nebo dálkové diagnostiky). Je nutné jasně vymezit pravomoci pro přístup do firemní databáze. Jednotlivé uživatele pojmenovat a vymezit jim práva. Zároveň je nutno zajistit, aby nikdo jiný než oprávnění uživatelé neměli dálkový přístup ke stroji.

3.2 Údržba

K efektivnímu řízení výroby je nezbytné použít také efektivního nástroje řízení údržby. Péči o technologické a strojní vybavení firmy samozřejmě nelze opomíjet ani podceňovat. Při opomenuté pravidelné kontrole, přehlédnutému opotřebením důležité součástky nebo není-li reakce provedena v odpovídajícím časovém úseku, jsou možné velké ztráty, které se nemusí

týkat pouze dočasných ztrát výrobních kapacit. Pro potřeby údržby se v dnešní době vyskytuje celá řada softwarových řešení.[5]

Vývojem moderní údržby se během svého života zabýval pan John Moubray, který popsal tři generace údržby v různých oblastech činností. V současnosti již pracuje velké množství firem ve 4. generaci typů a nástrojů údržby. Čtyři generace údržby jsou zobrazeny na obrázku 2.[3]



Obr. 2) Vývoj typů a nástrojů údržby [8]

První generace byla založena na přesvědčení majitele, že jsou jeho pracovníci připraveni a schopni opravit zařízení v co nejkratším čase. Tuto opravu bylo požadováno provést bez nadbytečných výdajů. Typickým zástupcem této generace údržby je údržba po poruše.[3]

Ve druhé generaci je zaváděn systém plánování údržby a poté kontrola provedených činností. Tato generace je charakteristická údržbou preventivní.

Ve třetí generaci se začalo využívat výpočetní techniky, která umožňuje rozšíření nástrojů a typů údržby. Při konstrukci zařízení se začal brát ohled na bezpečnost a ochranu zdraví lidí, spolehlivost a na zamezení škodlivosti vůči životnímu prostředí. Tato generace je charakteristická údržbou prediktivní.[3]

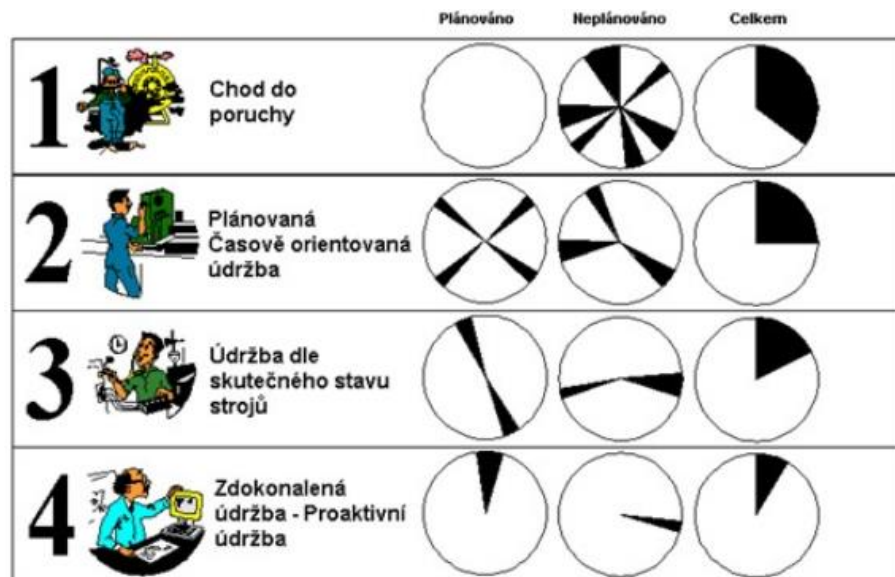
Významem slova predikce je předpověď. Principem prediktivní údržby je předpovídat vývoj stavu výrobního zařízení a včas odhalit potencionální problém nebo poruchu. Cílem toho typu organizace údržby je získávat o udržovaném zařízení co nejvíce informací, a to postupně tak, aby byl jasný vývoj změny vlastností, parametrů atd. v probíhajícím čase. Pak je možné opravu dané části zařízení provést dříve, než dojde k jeho poškození či havárii, ve zvoleném okamžiku a s již předem objednanými díly. Odstavení výroby je tak plánované, je možné provést výrobu na sklad a její výpadek má minimální dopady na následující logistiku zboží a prodeje.[4]

Čtvrtá generace vývoje, kterou již nepopsal pan Moubray je zatím poslední zaznamenanou generací. V této generaci velmi významnou roli zaujímá technická diagnostika

a její procesy jsou automatizovány. Představitel této generace je údržba proaktivní. V hojnosti je pak využíváno komplexních systémů údržby jako třeba TPM.

Za proaktivní systém údržby je považován systém, který se vyznačuje vyšší úrovní údržby, než je úroveň údržby prediktivní. Proaktivní varianta údržby vychází z prediktivní verze, kterou dále zdokonaluje. Základem proaktivní varianty údržby je využití komplexních systémů diagnostiky. Generační porovnání časového zásahu do provozu stroje jednotlivých typů údržby je hezky ilustrováno na obrázku 3. [11]

Komplexní systém údržby TPM, což lze volně přeložit jako totálně produktivní údržba. Tento systém, který z hlediska údržby strojů nepočítá pouze s profesionálními údržbáři, ale využívá schopností a dovedností všech pracovníků podniku s cílem výrazně snížit prostoje strojů a ztráty v jejich využívání po celou dobu životního cyklu zařízení. Systém je založený ve velké míře na prevenci a kromě operátorů strojů se do systému TPM zapojují i další profese v podniku, například pracovníci technické přípravy výroby či konstrukce. [12]



Obr. 3) Znázornění doby a četnosti údržby [20]

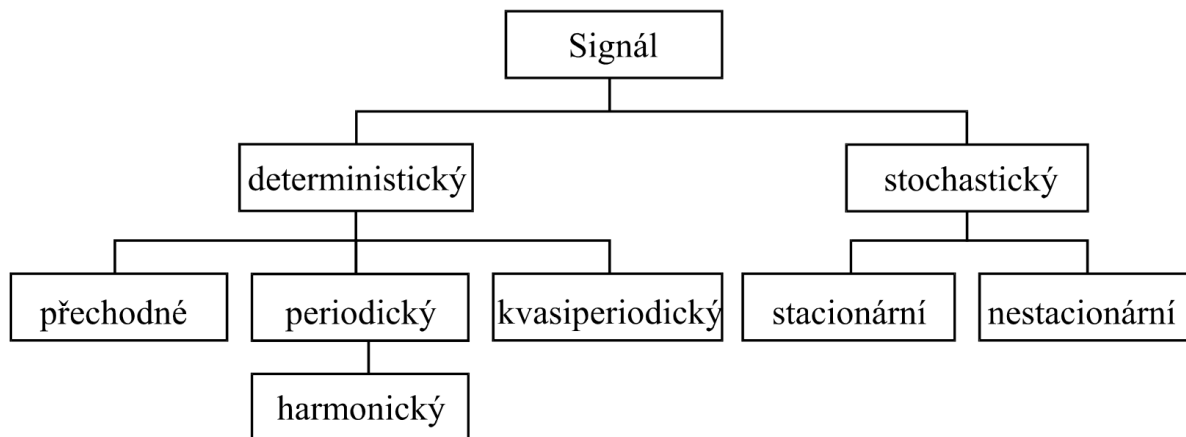
3.3 Signál v technické diagnostice

Význam abstraktního slova „signál“ je obvykle prezentován jako pojem označující určité časové funkce, které reprezentují časové průběhy různých fyzikálních veličin. Signál na rozdíl od šumu obsahuje pouze smysluplné informace. Tyto data, lze popsat pomocí různých modelů. [1]

3.3.1 Rozdělení signálu

Rozdělení signálu lze na nevyšší úrovni rozdělit na deterministický a stochastický signál. Deterministický signál je signál, který má svůj časový průběh determinován. Determinace znamená, že signál je předepsán nějakým funkčním předpisem. U takového typu signálu, lze předpovídat jeho budoucí průběh. Naproti tomu stochastický signál není určen žádným

funkčním předpisem a jeho průběh je nepředvídatelný. Některé typy deterministických signálů se mohou jevit, jako náhodné je to dáno především složitostí daného funkčního předpisu. Rozdělení signálů dle náhodnosti jejich průběhu a další členění je zobrazeno na obrázku 4. [1]



Obr. 4) Rozdělení signálů dle náhodnosti jejich průběhu [20]

Oblast deterministických signálů se dělí na tři podoblasti. U přechodných signálů je přítomno časové ohraničení. Zbylé dva druhy z těchto signálů (periodické a kvasiperiodické) trvají nekonečnou dobu. Mezi přechodné signály se například řadí hluk při přejezdu letadla. Z nulové úrovně nebo ustáleného stavu jsou tyto signály vybudeny do nulové úrovně nebo ustáleného stavu. Periodické signály mají jednu důležitou podoblast, a to signály harmonické. [1]

Stochastické signály se dělí na stacionární a nestacionární. Stacionární průběh signálu znamená, že průběh signálu má ustálený charakter. Charakter průběhu signálu se může jevit za delší časové období za ustálený, zatímco za krátký časový interval jako neustálený. Jako příklad lze uvést jednotlivá slova a plynulou řeč. [1]

Dělení signálů jako je na obrázku 4, není jediným způsobem, jak lze signály dělit. Jinými způsoby dělení mohou být, podle toho o kolika rozměrný typ signálu se jedná. Většina signálů je jednorozměrných. Jako příklad lze uvést velikost síly působící v daném směru v průběhu času. Určité typy signálů mohou být dány i dvěma souřadnicemi. To jsou signály, které jsou v každém okamžiku popsány pomocí dvou údajů. Pracují s komplexními čísly. Jedna ze souřadnic je popsána pomocí reálné části komplexního čísla. Druhá ze souřadnic je vyjádřena pomocí imaginární části komplexního čísla. Tyto typy signálů se používají v diagnostice velkých rotorových soustav, jako jsou turbíny, kompresory apod. [1]

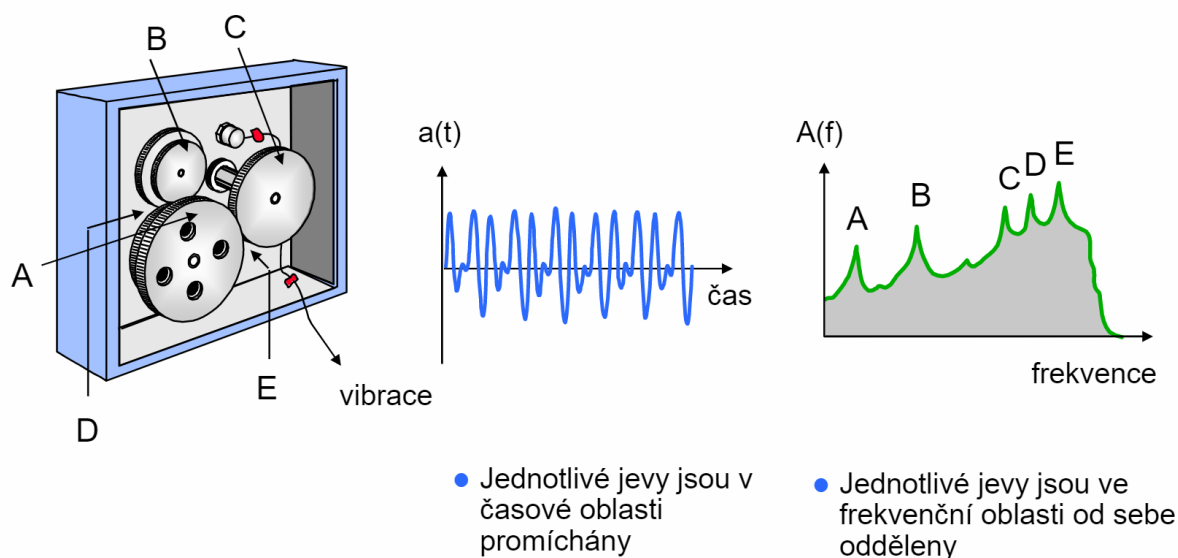
3.3.2 Zpracování signálů

Účinným nástrojem pro zpracování různých typů signálů je použití rychlé Fourierovy transformace (FFT – Fast Fourier Transform). Umožňuje dobře charakterizovat dynamické

vlastnosti soustav. Tato metoda umožňuje provádět frekvenční filtraci, tedy odstranění ze signálu části z odlišných frekvencí, což může snížit úroveň šumu v signálu. [1]

Nutnost signál správně zpracovat je dobře vidět na obrázku 5. V časové oblasti jsou jednotlivé jevy promíchány a nelze určit velikost fyzikální veličiny (na obrázku zrychlení vibrací) v jednotlivých místech (A až E). Jednotlivé jevy jsou pak pěkně viditelné ve frekvenční oblasti. Obrázek ukazuje měření vibrací u ozubeného soukolí je připevněn snímač pro měření vibrací.

Proč se frekvenční analýza provádí:



Obr. 5) Ilustrace zpracování signálu [27]

3.4 Technická diagnostika

Pojem diagnostika vznikl spojením dvou řeckých slov „Dia“ a „Gnosis“ čili „skrze“ a „poznání“. V počátcích měl pojem diagnostika spojitost pouze s lékařstvím. Postupně se však podstata diagnostiky rozšířila prakticky do všech odvětví průmyslu [2,5]

Technická diagnostika poskytuje nový přístup k údržbě technického objektu přesným systematickým přístupem založeným na využití všech informací, které lze získat bez rozebrání objektu a detailního zkoumání jeho jednotlivých součástí. Zavedená technická diagnostika zvyšuje spolehlivost a bezpečnost systému. [13]

Zavedený diagnostický systém může mít různou složitost. Ty jednodušší systémy mohou zobrazit přítomnost poruchy objektu ohrožující jeho provoz. Pokročilejší systémy technické diagnostiky mají zpravidla schopnost klasifikovat i stupeň nebezpečnosti poruchy, její příčinu a v případě hrozící havárie zastavují automaticky provoz sledovaného objektu.[13]

Důležitým úkolem při zavádění technické diagnostiky je stanovit kritické místa posuzovaného objektu ve sledovaném provozu. V těchto místech, kde je možno umístit vhodný snímač s elektrickým výstupem schopným přenášet signál. Snímač pak měří změnu

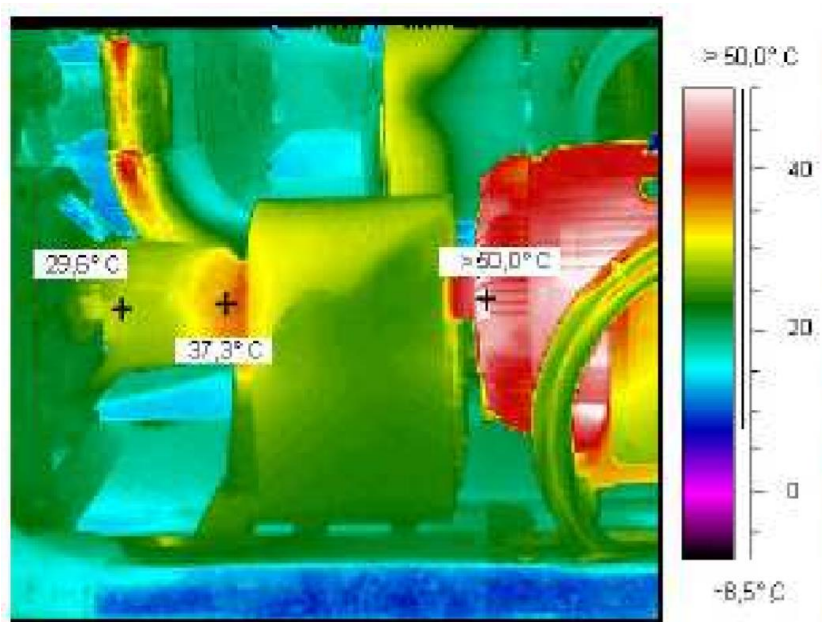
fyzikální veličiny charakterizující poruchu. V pokročilejších diagnostických systémech zkoumají veličinu i z hlediska vývoje a závažnosti poruchy. Podle měřené změny jedné nebo více fyzikálních veličin, lze stanovit mezní stavy těchto veličin. Dojde-li pak k jejich překročení, hrozí havárie. Okamžité stavy těchto veličin jsou schopny určit dobu, po kterou lze provoz objektu provozovat bez opravy nebo výměny součástí. Vznik, vývoj poruchy a vzniklá havárie jsou zpravidla v diagnostickém zařízení doprovázeny výstražným akustickým či světelným signálem, který bezprostředně obdrží obsluha sledovaného objektu. [13]

Rychlým rozvojem elektroniky a informační techniky stoupá i účinnost technické diagnostiky. Ta je běžně vybavovaná výpočetní technikou se softwarem zaměřený na rychlost, spolehlivost a přehlednost funkce diagnostické činnosti. Při vhodných časových intervalech je nutné tyto snímače kalibrovat, aby nedošlo k poklesu jejich přesnosti.[13]

Nejčastěji jsou ve strojírenství využívány systémy pro trvalé sledování vibrací v ustálených i proměnných provozních režimech. V řadě případů je výhodné a postačí problém řešit ve zvolených časových intervalech pomocí přenosného měřicího přístroje, který disponuje potřebnými funkcemi.

Další druhy diagnostik (kromě vibrodiagnostiky) mohou být založeny na vyhodnocení vlastní frekvence mechanické konstrukce sledovaného objektu a jejich tlumení (diagnostika modální analýzou). Hluková frekvence je založena na měření intenzity hluku a jeho frekvenčního spektra v kritických místech objektu. Ve strojírenství je používáno i elektrodiagnostiky, termodiagnostiky, tribodiagnostiky a dalších. [13]

O typu a rozsahu použití jednotlivých diagnostických řešení se vedou rozsáhlé úvahy, které se mnohdy podkládají i různými výpočty. Výsledky těchto úvah zvažují náklady a přínosy daných řešení. Výsledný diagnostický systém by měl být ten nejhodnější. Pokud dojde k použití více druhů diagnostik najednou, hovoří se pak o multiparametrické diagnostice.



Obr. 6) Grafický výstup z termovizního měření [15]

3.4.1 Diagnostický systém

Proces detekování nebo lokalizování poruch se nazývá diagnostikování. Diagnostikování je prováděno s používáním určitých technických a programových prostředků (případně i za přispění obsluhy). Právě diagnostikované zařízení a tyto prostředky tvoří diagnostický systém. [14]

Diagnostické prostředky mohou být buď vnitřní (začleněné do diagnostického objektu tak, že jsou jeho neoddelitelnou součástí) anebo vnější. Jako vnější diagnostické prostředky jsou vhodné různé univerzální měřicí přístroje, které jsou využitelné jak pro diagnostiku, tak pro provozní měření nebo vývojové práce. [14]

Dalším způsobem jak se dělí diagnostické prostředky, je dle toho, zda jsou použity v provozu nebo mimo provoz. V zahraniční a i v některé české literatuře je používáno označování „ON-LINE“ a „OFF-LINE“.

Pokud je měřicí systém k diagnostikovanému objektu připojen trvale nebo diagnostika probíhá periodicky, můžeme hovořit o monitorování diagnostického objektu. Monitorování je tedy nepřetržité sledování stavu objektu průběžným vyhodnocováním mezních stavů objektu, při kterých je nutné objekt odstavit. Pohled na diagnostické prostředky OFF-LINE může být různý podle konkrétní aplikace. Obvykle se pod pojmem OFF-LINE rozumí diagnostikování objektu, které je mimo provoz. Na druhé straně může být OFF-LINE diagnostikování takové, které probíhá za provozu diagnostického objektu, ale pořízená data jsou zaznamenávána a analýza zajištěných dat se provádí se zpožděním. Zejména u diagnostiky strojních zařízení se nejprve za provozu malým přenosným záznamníkem pořídí data, uloží se do paměti a teprve s odstupem času jsou zpravovány (obvykle na PC). [14]

3.5 Vibrodiagnostika

Vibrodignostické měření slouží k monitorování dynamických stavů rotujících strojů a strojních zařízení. Jedná se většinou o diagnostiku bezdemontážní bez nutnosti odvážet strojní zařízení a většího zastavení výroby. Její vhodné použití snižuje náklady a prodlužuje životnost.[6]

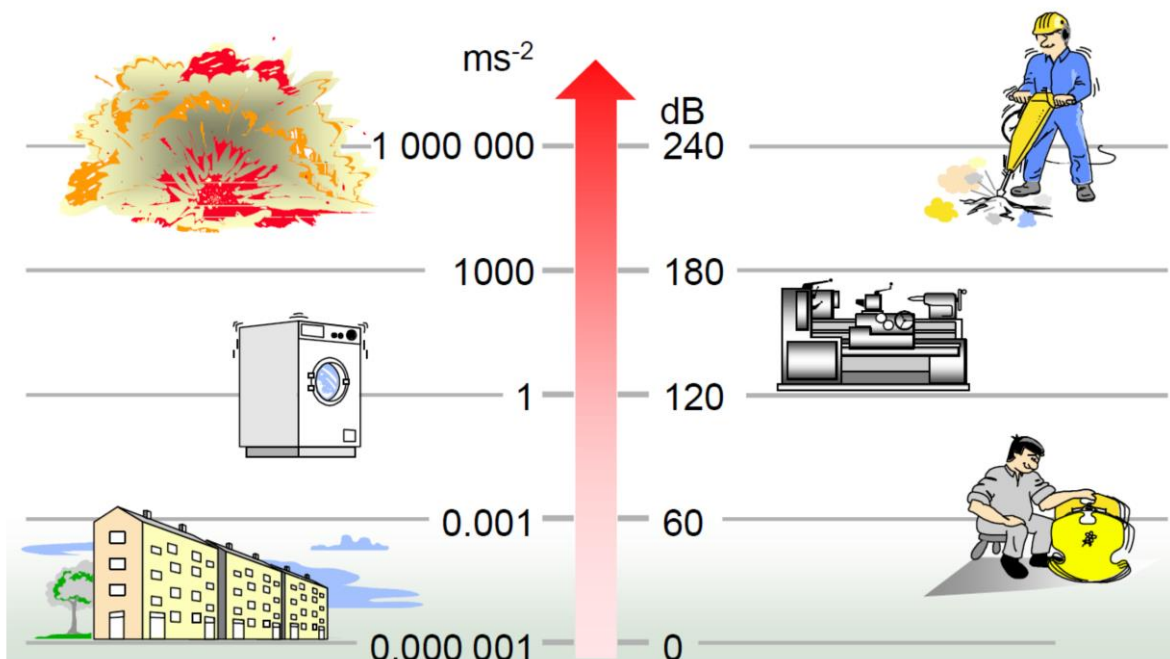
3.5.1 Vibrace

Pojmem vibrace se jednoduše rozumí kmitavý pohyb, kde se směr pohybu mění dvakrát v každém cyklu. Pohyb, který se opakuje ve stejných časových intervalech, je nazýván periodickým kmitáním. Periodické kmitání, které lze popsat jednoduchou sinusovou funkcí tělesa, které se pohybuje v jednoduchém harmonickém pohybu.[28]

V normě ČSN ISO 2041 [30]: Vibrace, rázy a monitorování stavu – Slovník jsou definovány vibrace jako „mechanické kmitání kolem rovnovážné polohy; kmitání může být periodické nebo náhodné“. Kmitání poté je v normě definováno jako „kolísání velikosti veličiny, obvykle v čase, vzhledem ke stanovené referenci, je-li velikost veličiny střídavě větší a menší než stanovená reference“.[9]

Nedílnou součástí vibrací je i doprovázející akustická odezva. Intenzita zvuku je závislá na velikosti vibrací. Závislost zrychlení vibrací na hladině intenzity zvuku je ilustrována na obrázku 7.

- Úroveň reálných vibrací



Obr. 7) Hodnoty zrychlení a hlučnosti reálných vibrací [28]

3.5.2 Charakteristika vibrací

Vibrace lze popsat pomocí kmitavého pohybu. Mechanické kmitání určují vedle frekvence společně výchylka, rychlost a zrychlení, které jsou navzájem závislé (viz. obrázek 8). V ideálním případě pro tento pohyb platí rovnice 1. [12]

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + ky = F_b = M\dot{x} \quad (1)$$

Pro hodnocení vibrací se používá těchto veličin:

- **Výchylka vibrací**

Určuje změnu vzdálenosti nebo polohy objektu vzhledem k referenční poloze. Je popsána pomocí vztahu:

$$y(t) = X * \sin(\omega * t) \quad (2)$$

- **Rychlost vibrací**

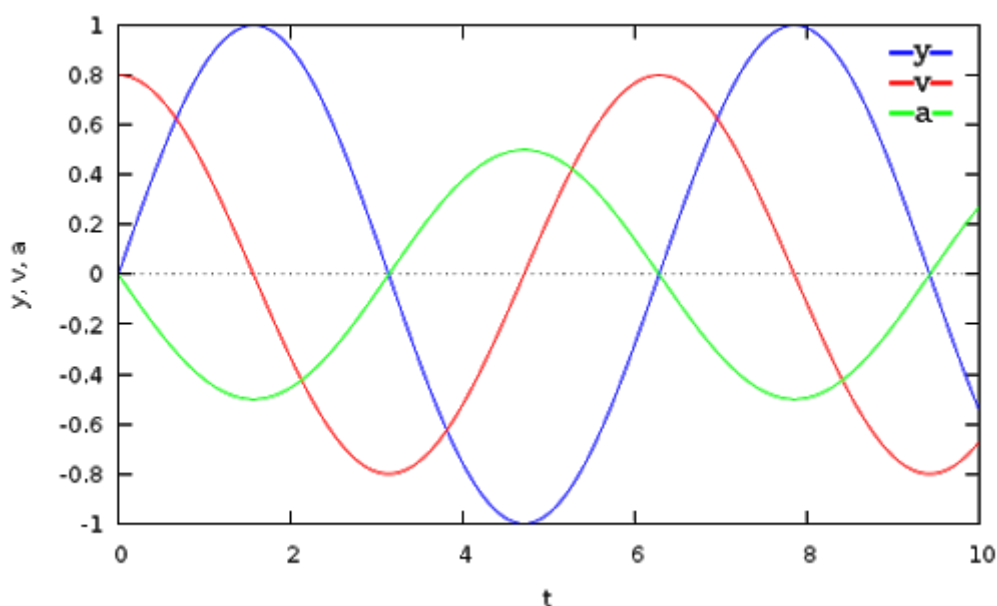
Jedná se o rychlost změny výchylky vibračního signálu. Je popsána pomocí vztahu:

$$v(t) = \dot{y}(t) = \frac{dx}{dt} = X * \omega * \cos(\omega * t) \quad (3)$$

- **Zrychlení vibrací**

Veličina udává zrychlení vibrací v daném čase. Ve vibrodiagnostice je tato veličina udávána v násobcích gravitačního zrychlení Země. Tedy v násobcích $9,81 \text{ m/s}^2$ a jednotkou tohoto násobku je g. Je popsána pomocí vztahu:

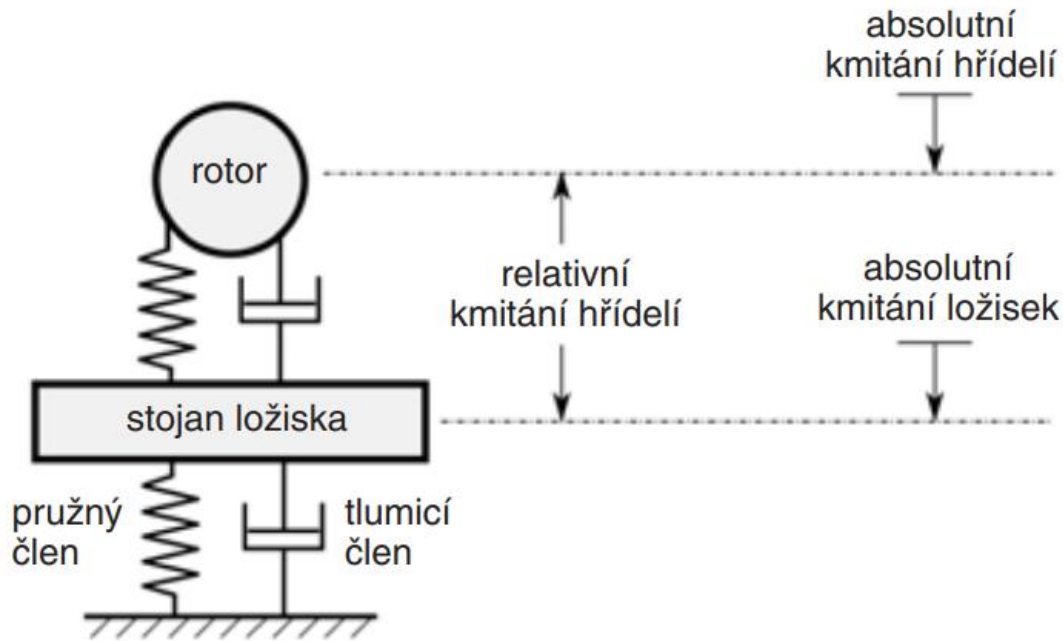
$$a(t) = \ddot{y}(t) = \frac{dv}{dt} = -X * \omega^2 * \sin(\omega * t) \quad (4)$$



Obr. 8) Vzájemná provázanost veličin vibrací [17]

3.5.3 Snímače vibrací

Prvotním rozhodnutím, které je nutné udělat, je zda se budou posuzovat vibrace relativní nebo absolutní. Toto rozhodnutí vede ke zvolení příslušného typu snímače. Absolutní vibrace popisují pohyb sledovaného objektu (části stroje nebo zařízení) nejčastěji vzhledem k Zemi. U relativních vibrací je důležité zvolit nějakou umělou základnu. Základna se často volí jako rám stroje, který ovšem také kmitá vzhledem k Zemi. Tyto dva druhy kmitání jsou znázorněny na obrázku 9. [12]

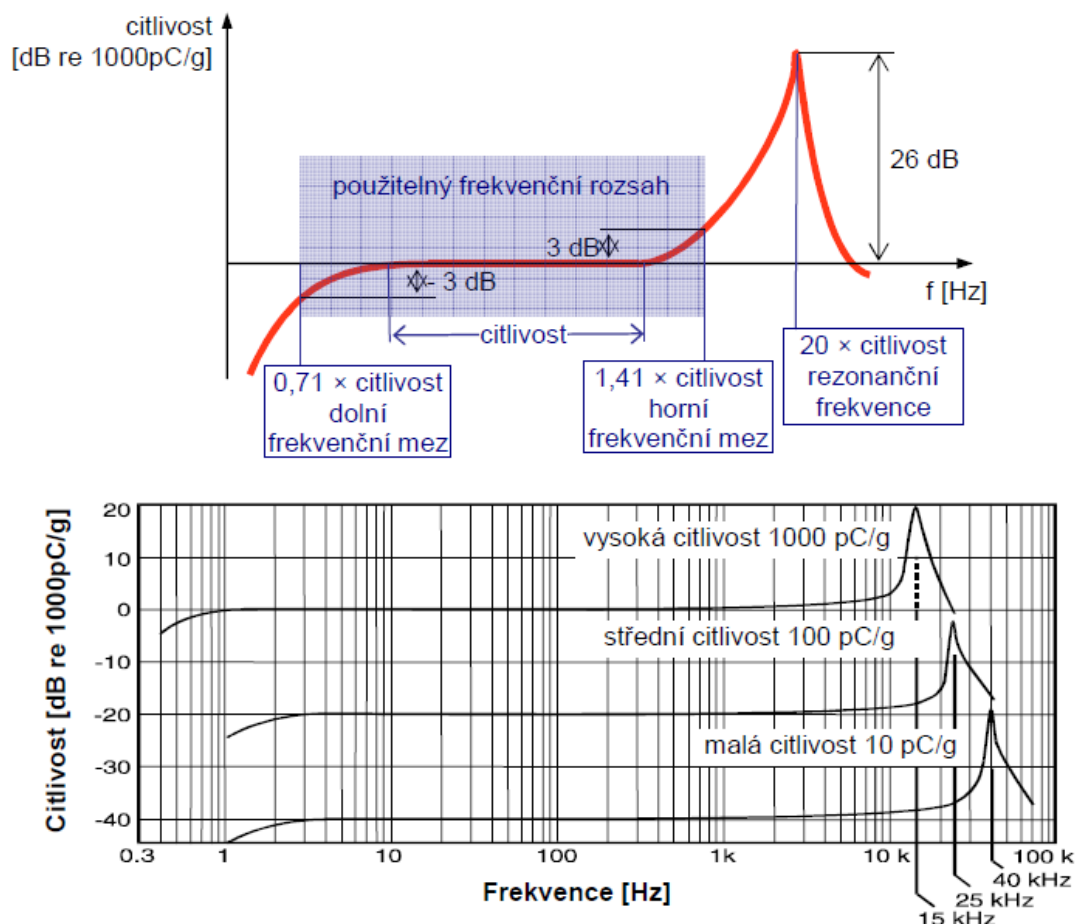


Obr. 9) Relativní a absolutní kmitání [12]

Snímače výchylky (polohy, posunutí) pro kmitající tělesa lze obecně sestavovat na principech indukčních, indukčnostních, kapacitních, magnetických nebo optických. Ve vibrodiagnostice největší uplatnění mají snímače indukčnostní. Indukčnostní snímače využívají indukčnosti cívky na proudové hustotě vířivých proudů. [12]

Snímače rychlosti pracují na principu elektromagnetické indukce. Při pohybu cívky v elektromagnetickém poli se vytváří napětí na vývodech cívky. Snímače jsou konstruovány tak, aby relativní rychlost mezi cívkou a magnetickým polem odpovídala rychlosti vibrací měřeného stroje. Výhody snímačů rychlosti jsou ty, že jsou levné a poměrně citlivé, nevýhodou je, že v důsledku své křehké konstrukce jsou náchylné na otřesy. Používají se pouze trvale namontované na stroji pomocí šroubu. Moderní variantou snímačů rychlosti jsou laserové snímače, které fungují na principu Dopplerova jevu. Kvůli své vysoké ceně, ale v diagnostice nenachází uplatnění. [15]

Snímače zrychlení (akcelerometry) jsou používány v diagnostice nejvíce. Hodnoty výchylek a rychlosti se dají získat pomocí integrace signálu z tohoto snímače. Princip funkce akcelerometru je ten, že při deformaci destičky z piezoelektrického keramického materiálu vzniká elektrický náboj, jehož velikost je přímo úměrná této deformaci. Důležitou součástí každého akcelerometru je kalibrační křivka, která je pro ilustraci zobrazena na obrázku 10. Ta udává citlivost snímače a frekvenční rozsah jeho použití. Citlivost akcelerometru je udávána jako hodnota v pikocoulomech na jednotku zrychlení tedy v pC/ms^{-2} . Snímače zrychlení pracují s veličinou elektrického náboje. Elektrický náboj je veličina, kterou není možno přenášet na delší vzdálenosti. U starších typů akcelerometrů se tato zařízení dovybavovala nábojovým předzesilovačem. Nábojový předzesilovač převáděl elektrický náboj na elektrické napětí. U modernějších akcelerometrů je tento předzesilovač již integrován do pouzdra akcelerometru. Potom je citlivost akcelerometru udávána v mV/ms^{-2} . [15]



Obr. 10) Kalibrační křivka snímače zrychlení [15]

3.5.4 Instalace snímačů vibrací

Jednou z významných oblastí při sledování vibrací pomocí snímačů je jejich samotná instalace.

Při výběru snímače je nutné pochopit jeho princip, aby nedošlo ke zkreslení měření. Například snímače rychlosti určené pro montáž ve vertikálním směru musí mít jinou konstrukci než snímače rychlosti určené pro montáž v horizontálním směru. U snímačů vibrací, které obsahují piezoelektrický prvek, je nutné, aby tento prvek nebyl namáhán žádným jiným způsobem než od vibrací. Proto je místo pro upevnění snímače hladké a ploché, aby se nedoformovala základna snímače. Deformaci základny tohoto snímače mohou způsobit také teplotní změny nebo příliš velký utahovací moment pokud je snímač upevněn pomocí šroubu. [15,12]

V současné době se ze snímačů vibrací používá nejvíce akcelerometrů. Jedním z důvodů je, že akcelerometry neobsahují žádné pohyblivé části, proto jsou trvanlivé a spolehlivé a nevyžadují častou kontrolní kalibraci. [12]

Nedílnou součástí montáže snímačů je i zapojení kabeláže. Nevhodná kabeláž jako prostředek pro přenos signálu ze snímače do analyzátoru může znehodnotit naměřená data. V průmyslovém prostředí jsou poměrně silná elektromagnetická pole, proto musí být kabeláž

tvořena speciálními stíněnými kabely, nebo používat izolované šrouby a slídové podložky při montáži snímačů. [15,12]

Souběžně se zvolením typu snímače vibrací musí dojít ke zvolení vhodných měřících míst. V těchto místech se vibrace budou měřit pravidelně. Nejčastěji se jedná o místa, kde se nacházejí ložiska. Na těchto místech se vibrace měří v jednom až ve třech směrech. Rovněž je vhodné tyto místa zvolit tak aby kabeláž byla co nejkratší. Umístění těchto snímačů by měl určovat a kontrolovat odborník. Ten by měl umístit snímače na místo, kde jsou nejpravděpodobněji očekávány maximální hodnoty vibrací. [16,15,12]

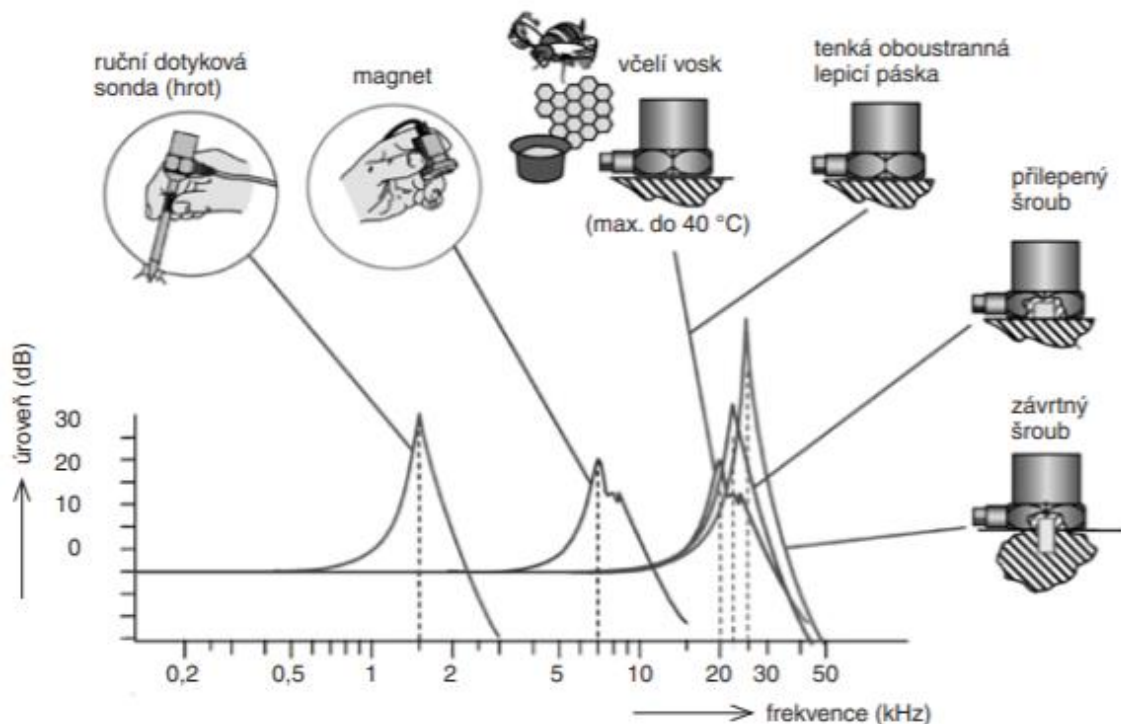
Zvýšenou pozornost je také třeba věnovat typu připevnění snímače na měřící místo. Vhodné upevnění snímače zajišťuje, aby vibrace působící na snímač, nebyly ovlivněny nekvalitním a nevhodně zvoleným upevněním. Upevnění akcelerometrů, které se ze snímačů vibrací používají nejvíce, je věnována norma ČSN ISO 5348 (Vibrace a rázy – Mechanické připevnění akcelerometrů) [17]. Tato norma obsahuje postupy pro upevnění jednotlivých typů snímačů. V normě je také obsažena tabulka kritérií, které ovlivňují výběr metod připevnění. [15]

Mezi nejběžnější metody upevnění akcelerometrů patří:

- **Upevnění šroubem**

Toto upevnění vykazuje jedno z nejmenších ovlivnění frekvenční charakteristiky. Jedná se o nejspolehlivější způsob uchycení. Je nutné dbát na dostatečnou čistotu a rovnost dosedací plochy. Důležité je i provedení díry pro šroub. Závitová díra musí být kolmá a s vysokou kvalitou povrchu. Maximálního využití frekvenční charakteristiky akcelerometrů, lze dosáhnout upevněním snímačů závrtnými šrouby, popř. lze vylepšit tenkou vrstvou silikonu mezi styčnými plochami. [15,12]

Porovnání vlivu způsobu uchycení snímačů na jeho amplitudovou frekvenční charakteristiku v porovnání s upevněním šroubem (na obrázku závrtný šroub), lze vidět na obrázku 11. [15,12]



Obr. 11) Vliv způsobu uchycení na frekvenční charakteristiku akcelerometru [12]

- **Upevnění lepidlem**

Při upevnění akcelerometru pomocí lepidel dochází k různému omezení horní hranice použitelnosti do různých hodnot frekvencí vibrací. Tuhá lepidla snižují tuto hranici méně než lepidla, která záměrně obsahují měkkou složku. Tato složka slouží k vyrovnání nerovností styčných ploch. Tento typ upevnění je limitován teplotou. Obvykle se nelepí na stroj samotný snímač, protože by v případě demontáže mohlo dojít k poškození. Jsou lepeny podložky se závitem pro šroub. [15,9]

- **Upevnění tenkou oboustrannou lepicí páskou**

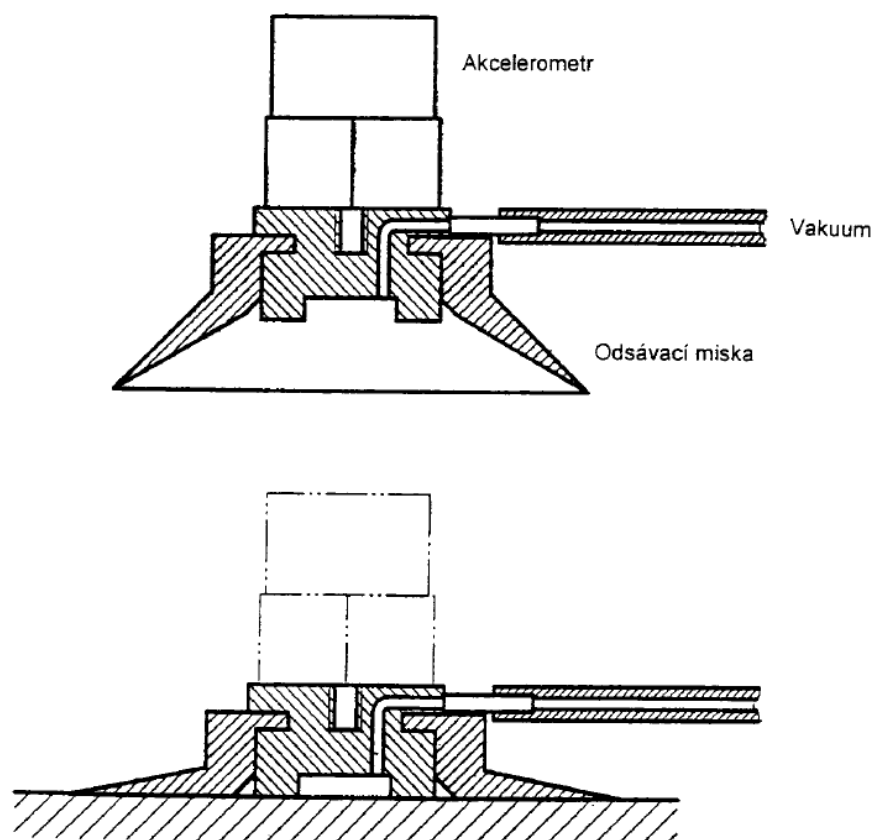
Jedná se o velmi rychlý, méně spolehlivý a ne příliš běžný způsob upevnění. Odezva je ovlivněna velikostí stykové plochy a tloušťkou lepicí pásky. Její používání je rovněž ovlivněno teplotou. [17,15]

- **Upevnění magnetem**

Upevnění snímače pomocí magnetu je častým a rychlým způsobem uchycení. Nejčastěji však slouží k orientačnímu měření a nalezení místa vhodná pro měření. Podobně jako měření pomocí dotykové jehly. [17,15]

- Upevnění pomocí zvláštních přípravků

Pokud je nalezeno měřicí místo, pro které není z různých důvodů vhodné použít některý z předchozích způsobů upevnění, je možné použít různých speciálních přípravků. Pro tyto přípravky se, ale musí experimentálně stanovit horní frekvenční mez a maximální amplituda, která jde měřit, aniž by došlo ke zkreslení signálu. [17]



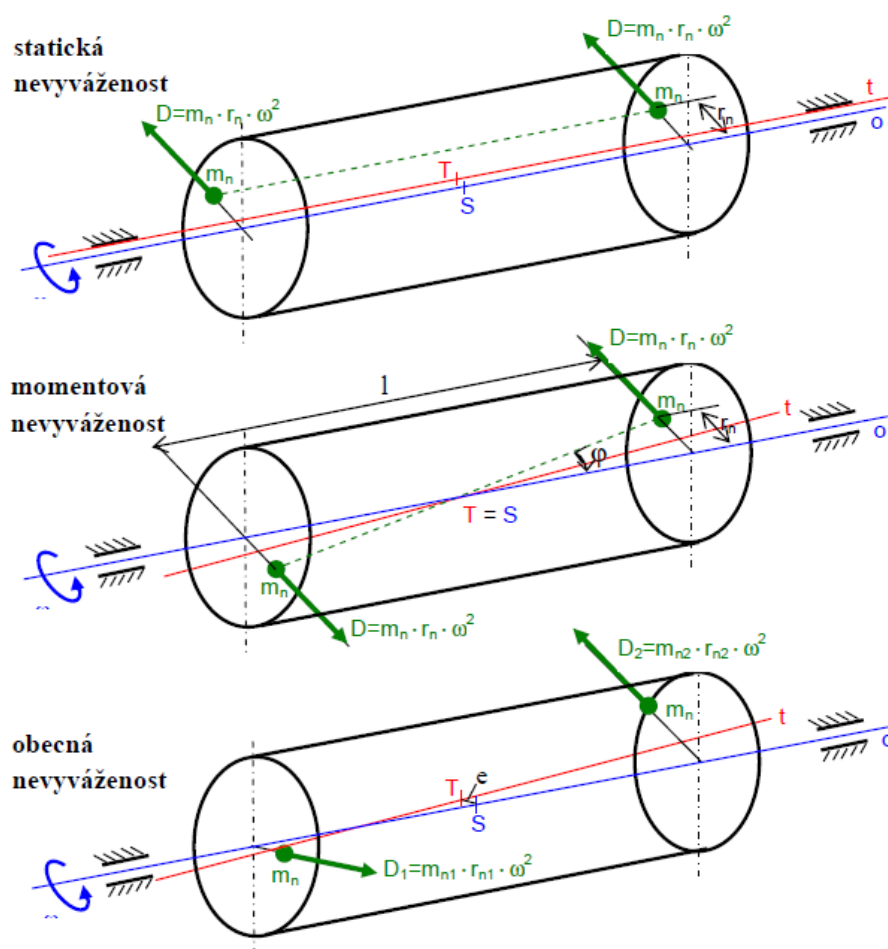
Obr. 12) Vakuové upevnění akcelerometru [17]

3.5.5 Typické příčiny zvýšení vibrací na rotačních strojích

Vibrační diagnostika je schopna odhalit celou řadu závad nejen na rotačních strojích. Mezi ty nejčastější závady na rotačních strojích patří nevyváženost a nesouosost.

Podle toho v jakém počtu vyvažovacích rovin (v jedné až třech), lze nevyváženost odstranit je dělena na statickou (silovou), momentovou a obecnou (dynamickou). Typy nevyváženosti jsou vyobrazeny níže na obrázku. Odstranění nevyváženosti je prováděno na vyvažovačkách tento proces se nazývá vyvažování. [15]

Nesouosost jako jedna z dalších běžných závad rotačních strojů se může vyskytnout jako paralelní nebo úhlová nesouosost.



Obr. 13) Statistická, momentová a obecná nevyváženost [15]

3.5.6 Použití snímání vibrací k vyhodnocení opotřebení strojů (ČSN ISO 10816-1)

Norma ČSN ISO 10816-1[23] hodnotí stroje z hlediska jejich opotřebení. Obsahuje metodiku ke stanovení provozních mezí na základě dvou kritérií velikosti vibrací a změny velikosti vibrací. Kritéria hodnocení jsou vztažena jak na provozní monitorování, tak zkoušky prováděné při přejímce stroje.

- **Kritérium 1: Velikost vibrací**

Měření vibrací se musí provádět širokopásmově, aby bylo dostatečně pokryto frekvenční spektrum stroje [15]

Měření se provádějí na více místech ve dvou nebo třech měřících směrech, což vede k vygenerování souboru rozdílných hodnot velikosti vibrací. Nejvyšší hodnota z měření na různých místech stroje je nazývána mohutnost vibrací. Hodnoty mohutnosti vibrací lze zařadit

do čtyř pásem, které jsou sestaveny na základě mezinárodních zkušeností s daným typem stroje. [17]

- **Pásmo A:** V tomto pásmu mají být za obvyklých podmínek vibrace nově přejímaných strojů.
- **Pásmo B:** Stroje, jejichž vibrace leží v tomto pásmu, mohou být zpravidla provozovány po neomezeně dlouhou dobu.
- **Pásmo C:** Stroje, jejichž vibrace leží v tomto pásmu, jsou za normálních okolností považovány za neuspokojivé pro dlouhodobý a trvalý provoz. Obecně mohou být stroje za takovýchto podmínek provozovány do té doby, než se nalezne možnost nápravy.
- **Pásmo D:** Hodnoty vibrací v rámci tohoto pásma jsou za normálních okolností považovány za natolik nebezpečné, že mohou vyvolat poškození stroje.

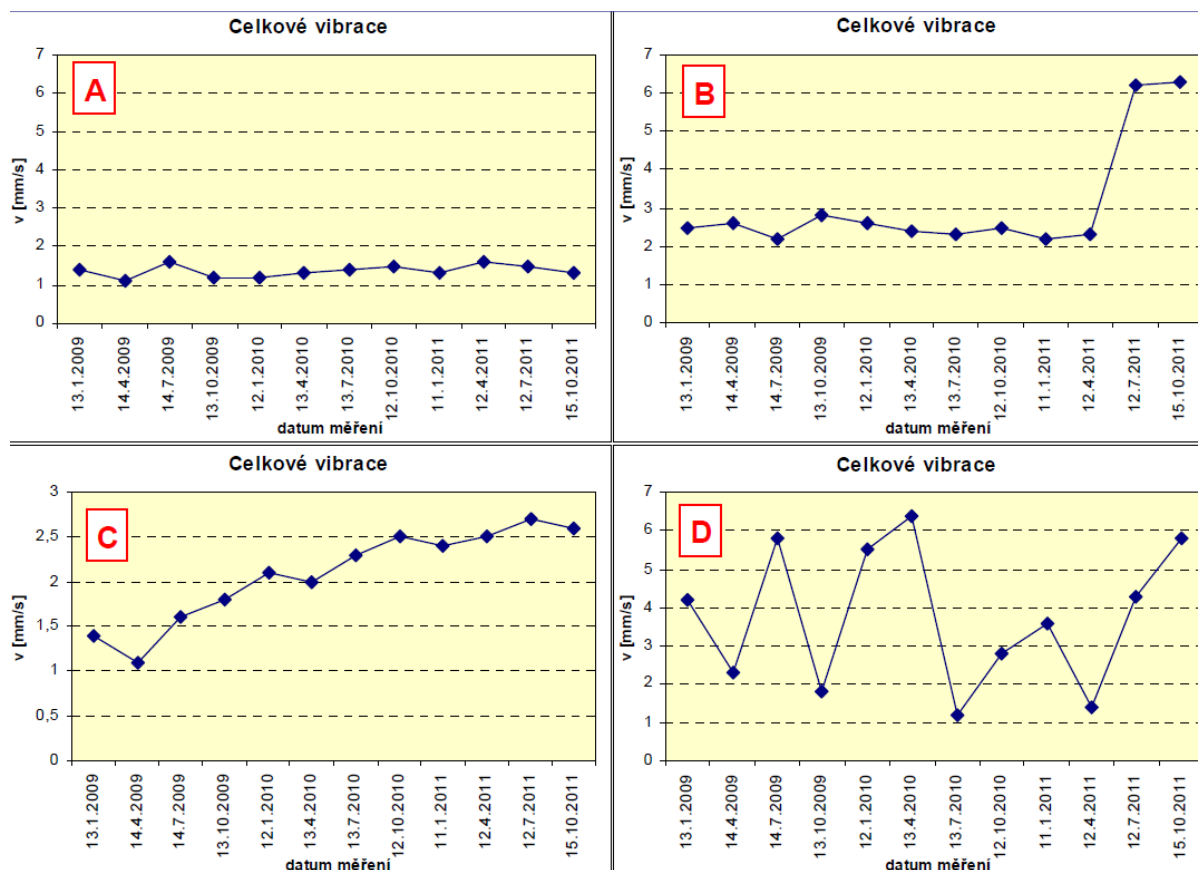
Správná kategorizace stroje do pásem A až D vede ke zjištění technického stavu stroje. Technický stav stroje určuje jeho hodnotu a životnost. Pokud se stroj nachází mimo požadované pásmo, může být rozhodnuto o přijetí nápravných opatření. V krajním případě může dojít i okamžitému odstavení stroje. [17]

- **Kritérium 2: Změna velikosti vibrací**

Toto kritérium posuzuje změny velikosti vibrací vzhledem k předem stanovené referenční hodnotě. Na stroji může dojít ke skokovým změnám vibrací. Vibrace se mohou jak skokově snížit, tak skokově zvýšit. Tyto skokové změny vibrací se mohou pohybovat pouze v pásmu A a B dle prvního kritéria. Druhé kritérium ovšem napoví, že je třeba zvýšit pozornost, protože se může blížit selhání stroje [17]

Jeden z důležitých nástrojů pro monitorování jsou trendy hodnot sledovaných veličin, tedy to jak se sledovaná veličina vyvíjí v čase. Lze členit na čtyři možné trendy (viz. obrázek 14). [15]

- **Trend A:** Bez přítomnosti závady
- **Trend B:** Skoková změna. Příkladem je odlomení části zařízení. Při odlomení může dojít i ke snížení vibrací, tedy k vyvážení stroje. Je dobré myslet na to, že odlomený kus může způsobit značné škody na stroji.
- **Trend C:** Postupné opotřebení stroje
- **Trend D:** Nesmyslný trend. Nutno prozkoumat měřící místo.



Obr. 14) Možné trendy celkových hodnot vibrací [15]

- **Provozní meze vibrací**

V praxi se pro dlouhodobý provoz strojů stanovují dvě provozní meze vibrací. Tyto meze mají formu výstrahy a přerušení provozu. [17]

Provozní mez výstrahy slouží k upozornění na možnou blížící se závadu. Mělo by se začít hledat vhodné nápravné opatření, ale stroj může dále pokračovat v provozu. [17]

Provozní mez přerušení provozu představuje hodnotu vibrací, při jejímž překročení po delší dobu může dojít k poškození stroje. Když je tato hodnota překročena je vhodné stroj odstavit a najít nápravné opatření.[17]

Pro různá měřicí místa mohou být provozní meze odlišné. [18]

4 POZOROVÁNÍ A ZMAPOVÁNÍ VÝROBNÍHO PROCESU FIRMY EMKO CASE

Tato kapitola diplomové práce je zaměřena na představení firmy EMKO Case se zaměřením na její strojní vybavení obráběcích strojů Datron M8Cube. Je zjištěn počet aktivně používaných frézovacích nástrojů ve firmě a typy upínání těchto nástrojů.

4.1 O firmě

Firma EMKO Case se zabývá především zpracováním tenkých plechů. Vyrábí a vyvíjí vlastní produkty, zejména pro odvětví IT (speciální počítačové skříně). Nabízí i možnost výroby na zakázku.

4.2 CNC frézovací centra Datron ve firmě EMKO Case

Firma EMKO Case je vybavena dvěma frézovacími centry firmy Datron. Jedná se o typ frézovacího centra M8Cube. Tyto stroje mají dvě odlišnosti, které mohou mít vliv na hodnotu vibrací při zdánlivě stejných výrobních podmínkách. První z odlišností je různý výkon vřetene. Jedno vřeteno má výkon 4kW (dále v práci stroj 1) a druhé vřeteno má výkon 2kW (dále v práci stroj 2)



Obr. 15) CNC frézovací centrum M8 Cube ve firmě EMKO Case [29]

4.2.1 Nástrojové vybavení frézovacích center ve firmě

Nástrojové vybavení obou strojů obsahuje 9 aktivně používaných typů nástrojů. V upínání nástrojů se objevuje druhá odlišnost strojů. Každý ze strojů má jiný typ upínání nástrojů.

Stroj 2 má přímý upínací systém, kde je na nástroj nalisován dorazový kroužek a za tento kroužek je nástroj upínán do kleštiny. Nevýhodou tohoto typu upínání z hlediska přenosu vibrací je menší tuhost frézovacího nástroje než u upínání pomocí kleštin HSK. Pro potvrzení je v práci zařazena kapitola 7.3 (vyhodnocení zbylých nástrojů na stroji 1 a 2).

Stroj 1 má upínací systém HSK. Tento systém umožňuje větší opakovatelnost upínání. Jedná se o typ upínání využívající polygonální upínací techniky.

4.3 Výrobní program vhodný pro stanovení mezí vibrací

Cílem konzultace s technickým oddělením firmy bylo najít odpovídající výrobní program pro stanovení provozních mezí vibrací.

Jako vhodný pro měření se po debatě zvolil přední díl skříňky pro základní desku Raspberry PI, model 2/3 (obrázek 16). Tento díl je vyroben na tři upnutí a výrobní doba jednoho dílu nepřesahuje deset minut.

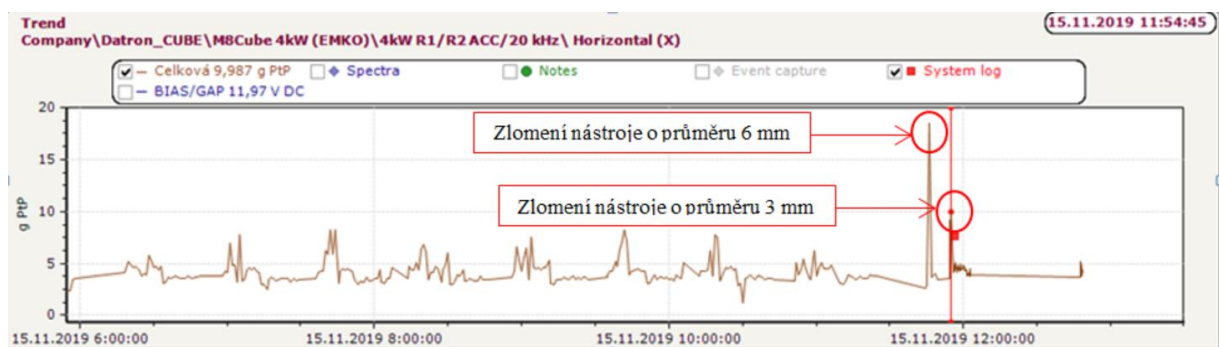


Obr. 16) Skříňka pro základní desku Raspberry PI, model 2/3 [29]

4.4 Vyhodnocení stanoveného výrobního programu

V průběhu října a listopadu bylo prováděno měření vibrací nástroje pro díl Raspberry (snímače byly nastaveny, aby zaznamenávaly maximální hodnotu v úseku 10 minut). Z naměřených dat byly viditelné extrémní případy vibrací, které byly po telefonickém kontaktu identifikovány jako chyby upnutí či zlomení nástroje. Typický příklad dat z tohoto typu měření je ze dne 15.11.2019 (obrázek 17), kdy byla zvolená výrobní série frézována bez větších hodnot vibrací na vřetení stroje. Krátce před dvanáctou hodinou se vyskytly dvě výrazně větší hodnoty. Právě ty hodnoty, které by měli vyvolat odpovídající reakci diagnostického systému. První došlo ke zlomení nástroje o průměru šest milimetrů. Pak se zlomil nástroj o průměru tři milimetry. Toto zlomení vyvolalo menší vibrace na vřetenu než zlomení šesti milimetrového nástroje.

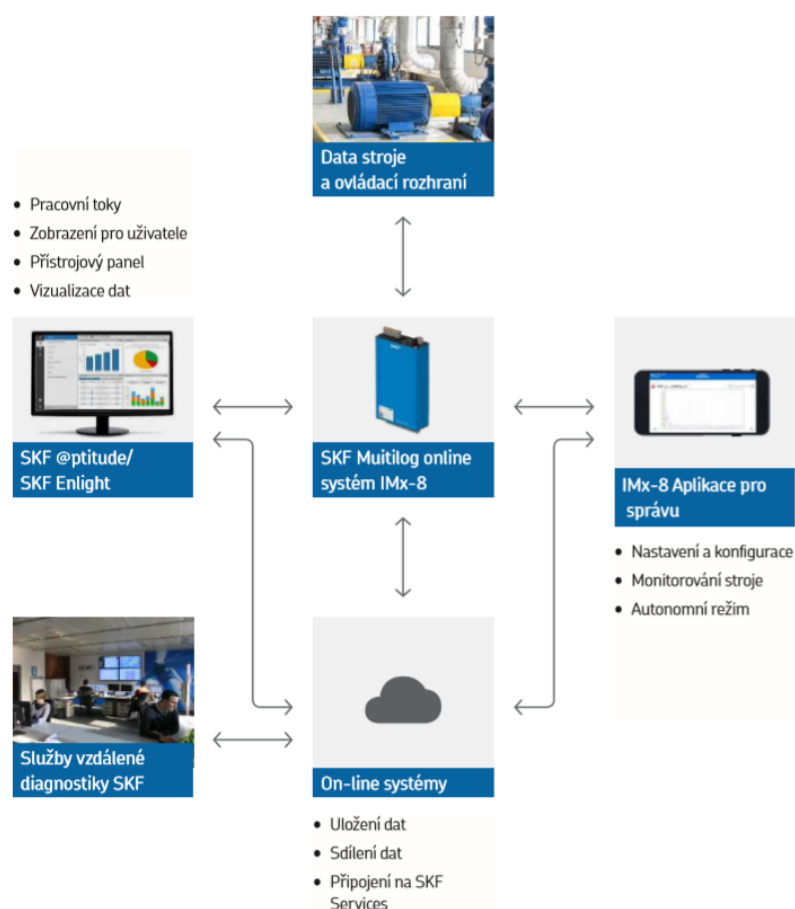
Na záznamu byly patrné i změny opotřebeného nástroje za nový. Tyto změny vyvolaly snížení hodnot vibrací. Kromě těchto změn v hodnotách vibrací, však záznam nevykazoval větší množství použitelných dat. Data byla ovlivněna především používáním více nástrojů v úseku 10 minut, proto bylo rozhodnuto o použití podrobnějšího snímání (každých 6 sekund) a osobní přítomnosti ve firmě. Firma EMKO Case svolila s provedením experimentální výrobní série s cílem stanovit provozní meze vibrací pro každý frézovací nástroj zvlášť. Podrobnější snímání sebou nese nevýhodu většího množství dat. Nevýhoda pak spočívá ve větším požadavku na prostor pro jejich skladování. Výhodou je zajištění dodržení podmínek experimentu (míra opotřebenosti nástroje, frézování s největším zatížením dle doporučení výrobce strojů Datron, optimální délka vyložení nástroje, atd.). Detailněji je experiment popsán v kapitole 6.



Obr. 17) Měření vibrací ve firmě

5 POPIS SOUČASNÉHO STAVU ON-LINE VIBRAČNÍ DIAGNOSTIKY STROJE

Základním komponentem stávajícího systému vibrační diagnostiky na strojích Datron M8Cube ve firmě EMKO Case je osmikanálový měřicí systém od firmy SKF. Druhým stěžejním komponentem současného stavu on-line vibrační diagnostiky je software @ptitude Observer. Koncept konfigurace systému pro diagnostiku od firmy SKF s klíčovým bodem kompaktní monitorovací jednotkou Multilog IMx-8 je zobrazen na obrázku 18. [19]



Obr. 18) Konfigurace systému pro diagnostiku. [19]

5.1 SKF Multilog online systém IMx-8

Tato kompaktní monitorovací jednotka o rozměrech knížky je ve firmě EMKO Case uložena ve skříni CMON 4150. Do jednotky je připojen ethernetový kabel a jsou připojeny tři snímače vibrací, které monitorují vibrace ve třech směrech. [19,9]



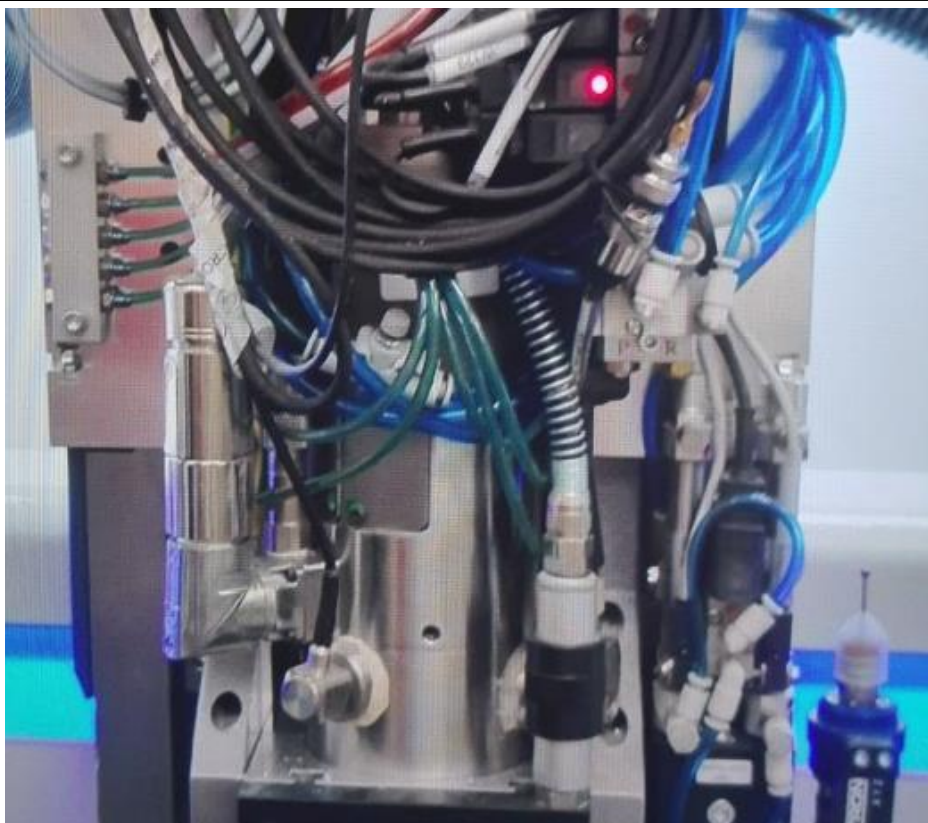
Obr. 19) Zapojený Multilog IMx-8 ve firmě EMKO Case

Po připojení monitorovací jednotky k softwaru SKF @plitude nebo SKF Enlight jsou data vizualizována do grafů. Z těch je možné získat informace o stavu stroje a zabránit poškození stroje. [19]

Velkou výhodou této monitorovací jednotky je možnost konfigurace a monitorování pomocí chytrých zařízení s operačním systémem iOS nebo Android. Konfiguraci lze provádět přes bezdrátovou technologii Bluetooth. [19]

5.2 Snímače vibrací CMAC244 - 1D

Na vřetenu obráběcího stroje jsou upevněny tři snímače vibrací. Standardní citlivost tohoto snímače je 100 mV/g (u jednotlivých snímačů se tento parametr může mírně lišit). Při umístění těchto snímačů bylo postupováno co nejvíce v souladu s normou ČSN ISO 20816-1 [21]. Upevnění snímačů lze vidět na obrázku 20. Snímače jsou šroubovány do podložky, která je připevněna pomocí lepidla HBM X60. [19,9]



Obr. 20) Vřeteno stroje se snímači vibrací

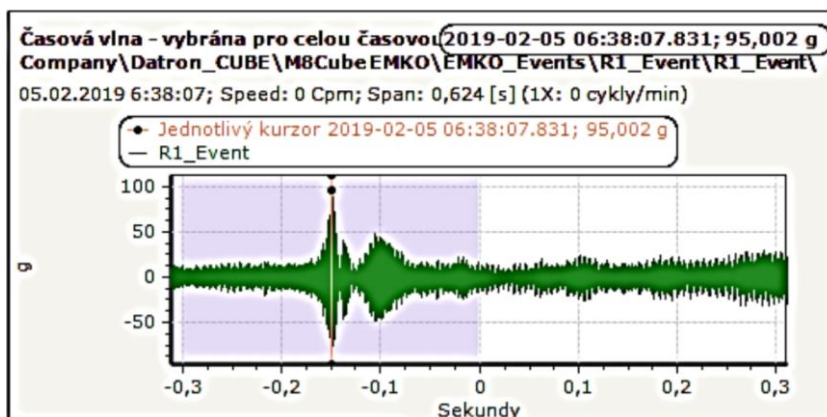
5.3 SKF @ptitude Observer

Softwarová aplikace firmy SKF z názvem @ptitude Observer umožnila analyzovat naměřená data a stanovit tak požadované provozní meze.

Aplikace pracuje s databázemi. Tyto databáze mají různé možnosti nastavení. Je důležité toto nastavení provést v souladu s požadavky měření. Zaznamenání hodnot vibrací je dobré nastavit třeba tehdy, když se otáčí vřeteno (nebo od určité hodnoty otáček). Jinak by se databáze zaplnila příliš brzy a nemusela by ani zaznamenat požadovaný obráběcí proces. Dále se zvolí snímače, které záznam provedou. [19,9]

Data jsou do databáze zaznamenána za určitý časový úsek. Za tento časový úsek je zaznamenána největší hodnota.

Pokud je třeba provést kontinuální záznam vibrací za krátký časový úsek (významných událostí – „Eventy“) lze nastavit spuštění záznamu buď manuálně, nebo při překročení poplachové úrovně. [19,9]



Obr. 21) Detailní záznam události („Eventu“) v software @ptitude Observer [25]

Měřicí databáze pro firmu EMKO Case je sestavena ze zachycených významných událostí. Akcelerometr R1 a R2 snímá radiální vibrace na vřetenu. Data z akcelerometrů R1 a R2 jsou zobrazovány společně. Akcelerometr A1 snímá axiální vibrace. Data ze snímačů jsou pak zobrazena v měřících bodech např. R1/R2 EN4/20 kHz, nebo A1 EN4/20 kHz. Význam jednotlivých měřících bodů je obsažen v tabulce 1.

Tab 1) Popis měřících bodů a metoda detekce [25]

| Metoda | Popis | Detekce |
|----------------|--|-------------------|
| ACC 10k | zrychlení vibrací v pásmu do 10000 Hz, 6400 čar | špička-špička |
| ACC 20k | zrychlení vibrací v pásmu do 20000 Hz, 6400 čar | špička-špička |
| ACC 40k | zrychlení vibrací v pásmu do 40000 Hz, 6400 čar | špička-špička |
| VEL 2k | rychlost vibrací v pásmu do 2000 Hz, 3200 čar | efektivní hodnota |
| VEL 5k | rychlost vibrací v pásmu do 5000 Hz, 3200 čar | efektivní hodnota |
| EN3 20k | obálka zrychlení III (5-10 kHz), v pásmu do 20000 Hz, 6400 čar | špička-špička |
| EN4 20k | obálka zrychlení IV (5-40 kHz), v pásmu do 20000 Hz, 6400 čar | špička-špička |
| EN4 40k | obálka zrychlení IV (5-40 kHz), v pásmu do 40000 Hz, 6400 čar | špička-špička |

6 NAPLÁNOVÁNÍ A PROVEDENÍ EXPERIMENTÁLNÍ VÝROBNÍ SÉRIE

Tato experimentální výrobní série byla vyráběna dne 9.1.2019 od 10:30 do 16:30 na stroji 1 i 2. Na stroji 2 probíhalo měření od 10:30 do 13:30 a na stroji 1 se měřilo od 14:15 do 16:30.

6.1 Stanovení výrobku a nástrojů

Již při pozorování bylo zjištěno, že při různých výrobních programech jsou kritické jiné hodnoty vibrací. Ke zlomení nástroje o menším průměru docházelo při nižších hodnotách vibrací než u nástroje o větším průměru. Z tohoto důvodu jsou v práci měřeny vibrace pro tři frézovací nástroje o dvou různých průměrech.

Nástroje byly vybrány tak aby se jednalo o nástroje, které se ve firmě používají nejvíce. Katalogová čísla těchto nástrojů jsou 0068808K, 0068086L a 0068460A. Jedná se o nástroje o průměru šest a osm milimetrů. Rozdíl u šesti milimetrových fréz je v délce ostří a ve vyvážení nástroje.



Obr. 22) Frézy pro testování hodnot vibrací

Ke stanovení mezí je nutno sledovat i průběžnou degradaci (opotřebení) nástroje. Je nutno zajistit nástroje těsně před koncem své životnosti a těmito nástroji frézovat na doporučených rezných podmínkách.

Pro experimentální výrobní sérii bylo vyčleněno 7 nástrojů. Tři byly nové a tři se nacházely těsně před koncem své životnosti. U jednoho z těchto tří typů nástrojů byl k dispozici nástroj, který se nacházel již za hranou své životnosti. Životnost nástroje je dána tím jak dlouho daný nástroj obráběl a za jakých podmínek. Zajištění nástrojů na hraně životnosti zajistila obsluha strojů, která nástroje vybrala dle počtu odfrézovaných hodin.

Pro výrobu bylo vyčleněno 40 polotovarů o tvaru kvádrů (rozměry 128 mm x 48 mm x 10 mm) z materiálu AlMg3. Na těchto kvádrech se pak provádělo frézování vzorků. Provádělo se frézování s posuvem pouze v ose z, tady šlo o to se do obrobku lehce zavrtat. Frézovaly se kapsy, které měly tvar kruhu a čtverce (vždy se frézoval rozměr o trojnásobku průměru nástroje). Různé tvary byly provedeny kvůli zapojení různých směrů a velikosti posuvů na vibrace. Zkušební vzorky byly číslovány a popsány pomocí rýsovací jehly. Výsledný zkušební vzorek jde vidět na obrázku 23.



Obr. 23) Vzorek pro testování vibrací při obrábění

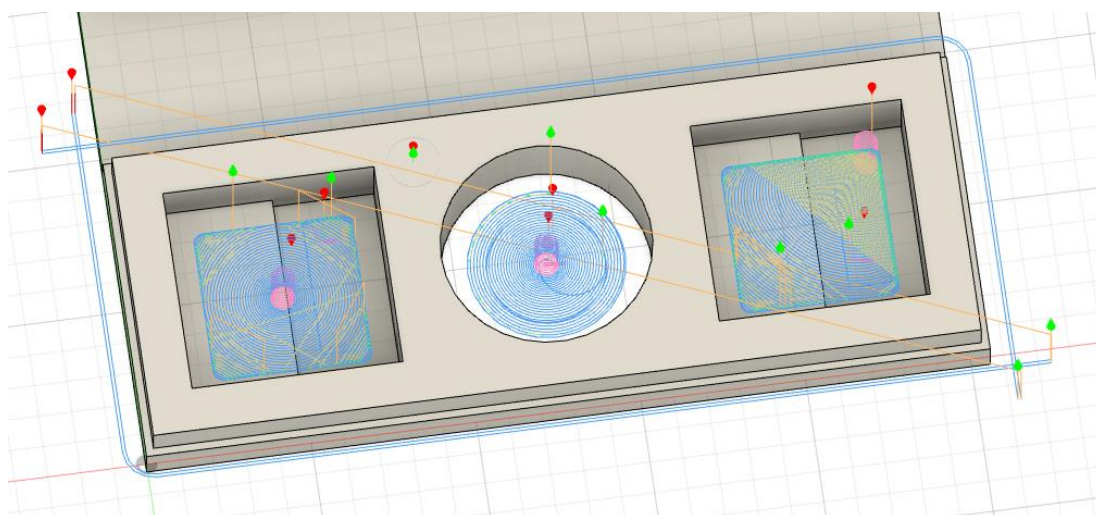
6.1.1 Nastavení řezných podmínek

S nastavením vhodných řezných podmínek pro zkušební vzorek pomohl český distributor strojů Datron, který disponuje katalogem doporučených řezných podmínek pro jednotlivé nástroje a výkony vřeten. Tento katalog byl z větší části vytvořen testováním nástrojů při obrábění v různých podmínkách. Obrábění bylo vyhodnocováno dle kvality povrchu, pokud měl nástroj problémy s obráběním tak se objevoval i zvýšený hluk (červené hodnoty). Bylo zde pracováno s množstvím objemu odebraného materiálu a ne s hodnotami vibrací. Pro ukázkou tohoto postupu je zde tabulka 2, která obsahuje vyhodnocení pro frézu o průměru 6mm.

Tab 2) Ukázka stanovení optimálních rezných podmínek dle objemového úběru materiálu [10]

| v_f (m/min) - rychlost posuvu | 3,5 | 4,2 | 4,9 | 5,6 | 6,3 | 7 | 7,7 |
|---------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Posuv na zub [mm] | 0,1 | 0,12 | 0,14 | 0,16 | 0,18 | 0,2 | 0,22 |
| Hloubka frézování [mm] | | | | | | | |
| 2,7 | 85,1 | 102,1 | | | | | |
| 2,4 | 75,6 | 90,7 | 105,8 | | | | |
| 2,1 | 66,2 | 79,4 | 92,6 | 105,8 | | | |
| 1,8 | 56,7 | 68 | 79,4 | 90,7 | 102,1 | 113,4 | |
| 1,5 | 47,3 | 56,7 | 66,2 | 75,6 | 85,1 | 94,5 | 104 |
| 1,2 | 37,8 | 45,4 | 52,9 | 60,5 | 68 | 75,6 | 83,2 |
| 0,9 | 28,4 | 34 | 39,7 | 45,4 | 51 | 56,7 | 62,4 |
| 0,6 | 18,9 | 22,7 | 26,5 | 30,2 | 34 | 37,8 | 41,6 |
| 0,3 | 9,5 | 11,3 | 13,2 | 15,1 | 17 | 18,9 | 20,8 |

Podmínky pro frézování z katalogu byly testovány a použity do experimentální výrobní série. Byly vytvořeny dva programy pro každý nástroj. Jeden program pro stroj 1 (vřeteno 4kW) a druhý program pro stroj 2 (vřeteno 2 kW). Frézovací dráhy nástroje jsou zobrazeny v simulaci v programu Autodesk Fusion 360 na obrázku 24. Při sestavování doporučených podmínek pro frézování by záznam hodnot vibrací byl jistě cenným pomocníkem.



Obr. 24) Znázornění strategie obrábění

7 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ VÝROBNÍ SÉRIE

V této kapitole je obsaženo statistické zpracování naměřených vibračních signálů a stanovení provozních mezí nástroje 0068808K.

Pro měření bylo vyčleněno již zmíněných 40 polotovarů.

Nástroj s katalogovým číslem 0068808K vyrobil na stroji 2 sedm vzorků (tabulka 3). Ostatní dva nástroje na stroji 2 vyrobily každý šest kusů (nebyl k dispozici extrémně opotřebený nástroj). Dva kusy vzorku byly znehodnoceny při přípravě měření.

Na stroji 1 vyrobily všechny nástroje šest kusů vzorků. Dva z těchto vzorků byly vyrobeny s programem pro 2 kW vřeten a čtyři s programem pro 4 kW vřeten. Obrábění bylo vždy rozděleno, aby nový i opotřebený nástroj vyfrézoval stejný počet vzorků.

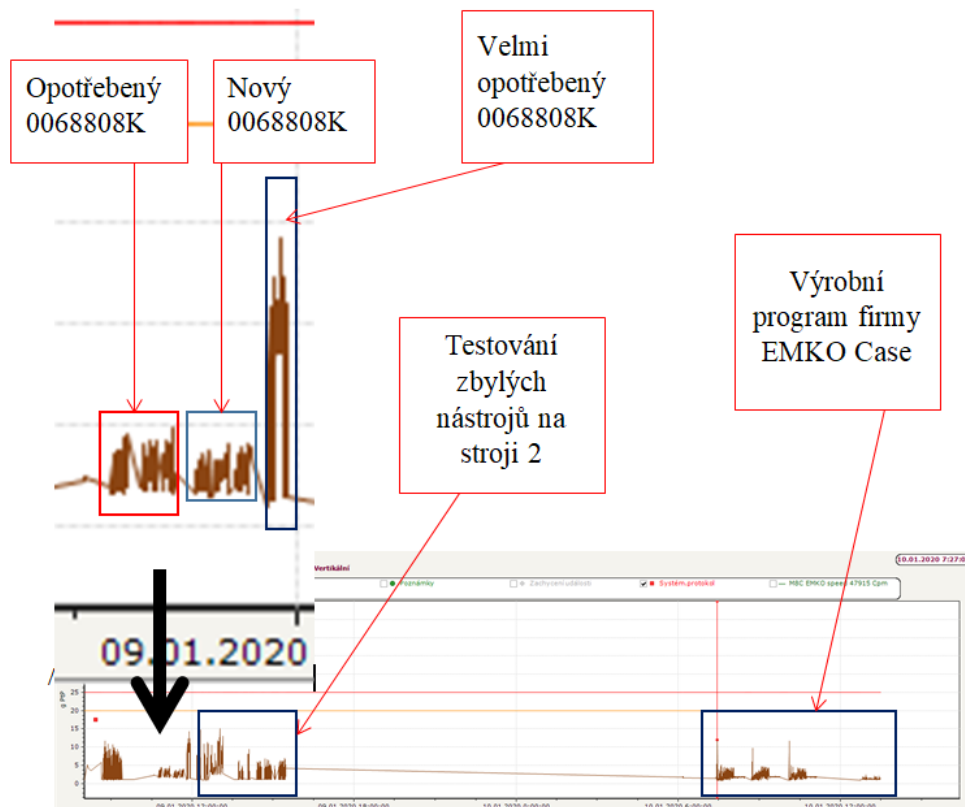
7.1 Zpracování naměřených vibrací pro nástroj 0068808K

U nástroje 0068808K byly jako u jediného k dispozici nástroje ve třech fázích své životnosti. Tento nástroj byl k dispozici jako nový, opotřebený (na hraně své životnosti) a jeden nástroj, který byl za hranou své životnosti. V tabulce 3 lze vidět použití těchto nástrojů v čase na frézované vzorky. V příloze 1 je fotografie vzorků po obrobení nástrojem 0068808K.

Tab 3) Tabulka frézování nástrojem 0068808K na stroji 2

| Stroj | čas začátku | vzorek | Průměr Nástroje | Stav nástroje |
|-------|-------------|--------|-----------------|------------------|
| 2 | 10:45:25 | V | 8 | opotřebený |
| 2 | 10:57:17 | VI | 8 | opotřebený |
| 2 | 11:15:33 | VII | 8 | opotřebený |
| 2 | 11:19:24 | VIII | 8 | nový |
| 2 | 11:27:08 | IX | 8 | nový |
| 2 | 11:39:56 | X | 8 | nový |
| 2 | 11:48:22 | XI | 8 | velmi opotřebený |

Po provedení měření byly nutné tyto data vyextrahovat z programu @ptitude Observer. Ukázka těchto dat pro extrahování je na obrázku 25. Dále bude postup výpočtu předveden pro měřicí bod R1/R2 ACC/10kHz pro snímač R2.



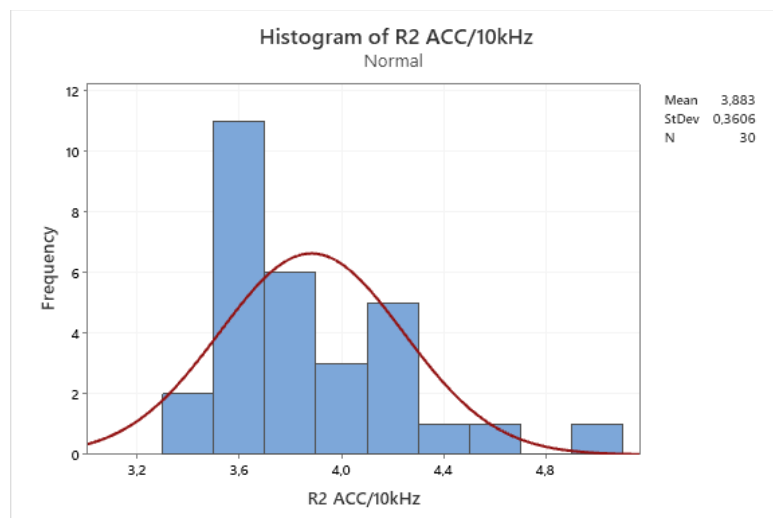
Obr. 25) Data z testování vibrační z měřicího bodu R1/R2 ACC/10kHz pro snímač R2.

Na měřícím bodu R1/R2 ACC/10kHz pro snímač R2 bylo zaznamenáno 109 hodnot. Pro stanovení a zdůvodnění hodnot provozních mezí vibrační byla použita speciální statistická metoda. Vedoucím diplomové práce byla navržena statistická metoda využívající třiceti největších hodnot vibrační (dále jen 30MAX).

Tab 4) 30 největších hodnot ze snímače R2 pro měřící bod R1/R2 ACC/10kHz

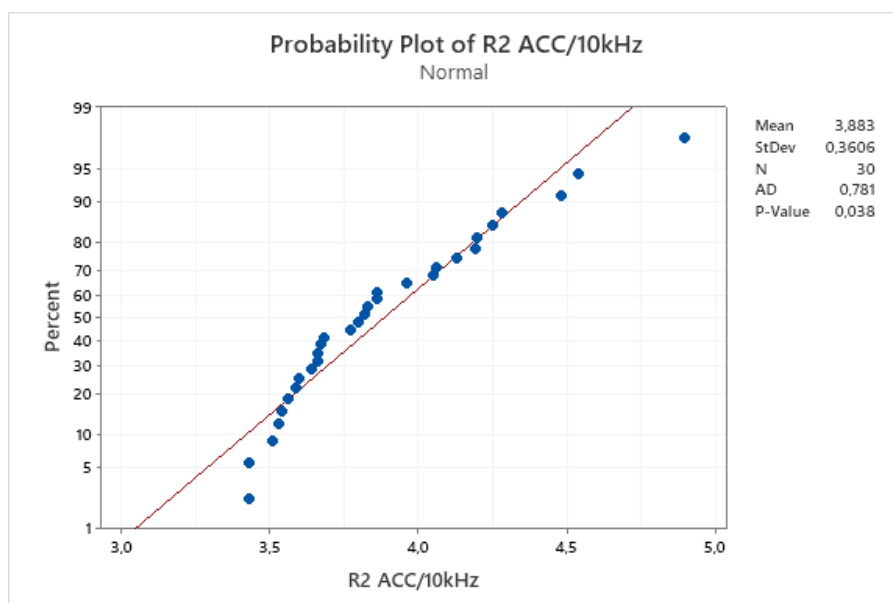
| Čas měření | Hodnota [g] | Čas měření | Hodnota [g] |
|------------|-------------|------------|-------------|
| 11:10:21 | 4,9 | 10:49:38 | 3,8 |
| 11:10:00 | 4,54 | 11:08:45 | 3,77 |
| 10:51:22 | 4,48 | 10:51:01 | 3,68 |
| 10:49:58 | 4,28 | 10:47:01 | 3,67 |
| 11:00:55 | 4,25 | 10:47:32 | 3,66 |
| 11:09:23 | 4,2 | 11:03:21 | 3,66 |
| 11:03:00 | 4,19 | 10:49:18 | 3,64 |
| 11:07:24 | 4,13 | 10:46:30 | 3,6 |
| 11:10:11 | 4,06 | 11:09:05 | 3,59 |
| 11:09:14 | 4,05 | 11:01:59 | 3,56 |
| 10:58:41 | 3,96 | 10:50:29 | 3,54 |
| 11:07:13 | 3,86 | 11:06:10 | 3,53 |
| 11:09:42 | 3,86 | 11:08:14 | 3,51 |
| 11:01:38 | 3,83 | 11:08:24 | 3,43 |
| 10:49:48 | 3,82 | 11:09:32 | 3,43 |

Histogram z metody 30MAX je zobrazen na obrázku 26.



Obr. 26) Histogram z dat testování vibrační snímače R2 pro měřicí bod R1/R2 ACC/10kHz

Z histogramu jde vidět poměrně nepříliš pěkné vyrovnaní tříd dle Gaussovy křivky je poměrně pravděpodobné, že data nepochází ze základního souboru, který má normální rozdělení. Pro potvrzení tohoto předpokladu bude proveden Anderson-Darlingův test dobré shody (obrázek 27)



Obr. 27) Anderson-Darlingův test dobré shody z dat testování vibrační snímače R2 pro měřicí bod R1/R2 ACC/10kHz

Po provedení testu dobré shody hypotézu o původu dat ze základního souboru, který má normální rozdělení, zamítáme na hladině významnosti 5%. Důvodem pro zamítnutí je p-hodnota, která je menší než 0,05.

U hodnot z většiny snímačů po upravení metodou 30 MAX byly hypotézy o původu dat ze základního souboru zamítnuty.

Z hodnot v tabulce 3 je spočten aritmetický průměr a směrodatná odchylka.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i}{k} = \frac{\sum_{i=1}^{30} x_i}{30} = 3,88 \text{ g} \quad (5)$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2}{k-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - 25,76)^2}{30-1}} = 0,361 \text{ g} \quad (6)$$

Pokračujeme ve výpočtu pro všechny stavy nástroje. Pro stav nástroje extrémně opotřebený bylo pro výpočet použito kvůli nedostatku dat (48 hodnot) pouze 10 maximálních hodnot, tedy metoda 10 MAX

Tab 5) Směrodatná odchylka a aritmetický průměr hodnot vibrací u stroje 2 pro nástroj 0068808K při experimentální výrobní sérii

| Stav nástroje 0068808K | nový | | opotřebený | | velmi opotřebený | |
|---------------------------|-----------|-------|------------|-------|------------------|-------|
| | \bar{x} | s_x | \bar{x} | s_x | \bar{x} | s_x |
| Měřící body | \bar{x} | s_x | \bar{x} | s_x | \bar{x} | s_x |
| R1_ACC_10kHz | 21,41 | 3,66 | 25,76 | 5,50 | 68,23 | 6,98 |
| R2_ACC_10kHz | 3,38 | 0,32 | 3,88 | 0,36 | 12,02 | 0,88 |
| R1_ACC_20kHz | 23,87 | 4,15 | 29,58 | 6,23 | 74,15 | 8,24 |
| R2_ACC_20kHz | 4,29 | 0,18 | 5,04 | 0,59 | 12,49 | 0,61 |
| R1_ACC_40kHz | 25,26 | 4,31 | 37,03 | 7,42 | 82,93 | 9,84 |
| R2_ACC_40kHz | 4,70 | 1,35 | 5,21 | 0,56 | 12,15 | 0,31 |
| R1_VEL_5kHz | 4,00 | 0,42 | 5,65 | 0,41 | 9,51 | 1,07 |
| R2_VEL_5kHz | 1,13 | 0,22 | 1,29 | 0,17 | 2,38 | 0,13 |
| R1_EN3_20 | 18,88 | 2,72 | 22,04 | 3,30 | 57,31 | 6,94 |
| R2_EN3_20 | 3,37 | 0,33 | 4,00 | 0,40 | 12,31 | 0,81 |
| R1_EN4_20 | 18,80 | 1,82 | 19,76 | 1,52 | 47,41 | 3,79 |
| R2_EN4_20 | 2,85 | 0,35 | 3,24 | 0,38 | 8,36 | 0,62 |
| R1_EN4_40 | 25,09 | 1,23 | 28,06 | 3,64 | 61,61 | 5,89 |
| R2_EN4_40 | 3,38 | 0,10 | 3,85 | 0,26 | 8,47 | 0,46 |
| A1_ACC_10 | 5,84 | 0,88 | 7,44 | 0,89 | 21,26 | 2,35 |
| A1_ACC_20 | 7,28 | 0,82 | 8,41 | 0,79 | 25,11 | 0,71 |
| A1_ACC_40 | 8,37 | 0,44 | 9,67 | 0,76 | 24,63 | 0,77 |
| A1_VEL_5 | 2,08 | 0,22 | 3,07 | 0,24 | 5,59 | 0,26 |
| A1_EN3_20 | 4,01 | 0,72 | 7,28 | 0,99 | 23,54 | 1,32 |
| A1_EN4_20 | 4,72 | 0,20 | 5,01 | 0,40 | 11,87 | 1,09 |
| A1_EN4_40 | 6,18 | 0,36 | 6,53 | 0,58 | 15,22 | 0,49 |

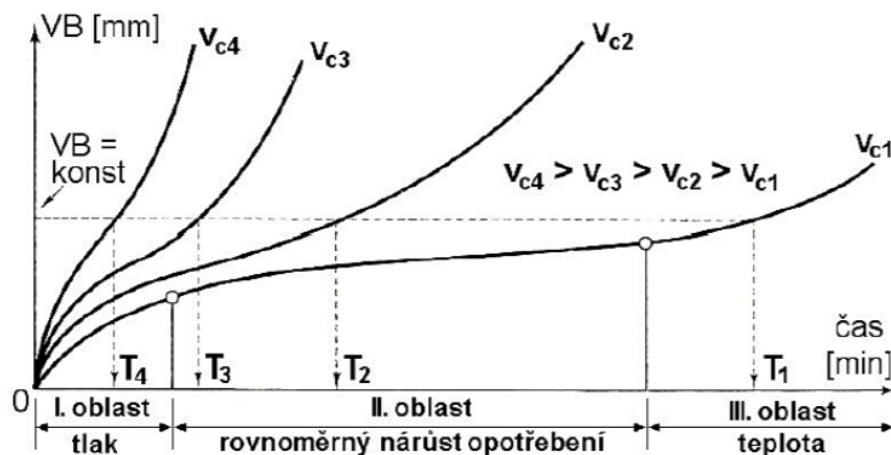
7.2 Stanovení doporučených mezí vibrací

Diplomová práce je zpracována v souladu s prací Metodika I: Metodika pro on-line diagnostiku [25]. Při stanovení mezí vibrací je problém v terminologii jednotlivých provozních mezí. V této práci bude dodržována terminologie pro provozní meze vibrací dle softwaru SKF @ptitude Observer 10.5.0 dle tabulky 6. Výpočet pokračuje chronologicky pro data testování vibrací snímače R2 pro měřící bod R1/R2 ACC/10kHz.

Tab 6) Terminologie pro provozní meze vibrací [25]

| <i>ČSN ISO 13372:2013 Monitorování stavu a diagnostika strojů - Slovník</i> | <i>ČSN ISO 20816-1:2017 Vibrace – Měření a hodnocení vibrací strojů – Část 1: všeobecné pokyny</i> | <i>Software SKF @ptitude Observer 10.5.0</i> |
|---|--|--|
| <i>poplach (alarm)</i> | <i>výstraha (alarm)</i> | <i>úroveň varování (warning level)</i> |
| <i>výstraha (alert)</i> | <i>přerušení provozu (trip)</i> | <i>poplachová úroveň (alarm level)</i> |

Meze jsou stanoveny v návaznosti na opotřebený nástroj, protože se nachází v oblasti II rovnoměrných opotřebení, ve které se opotřebení mění nejméně.



Obr. 28) Závislost míry frézového opotřebení při různých řezných rychlostech [26]

- **I. Oblast**

Oblast zrychleného záběhového opotřebení – k opotřebení dochází rychleji v důsledku tlaku působícího na mikro nerovnosti a drobné nepřesnosti po ostřícím nebo výrobním procesu.[27]

- **II. Oblast**

Oblast lineárního opotřebení s konstantní intenzitou – v této oblasti dochází k postupnému plynulému lineárnímu nárůstu opotřebení.

- **III. Oblast**

Oblast zrychleného opotřebení – dochází k větším odchýlkám v geometrii nástroje, což má za následek zvyšování teploty.

Stanovení mezí vibrací je prováděno s opotřebovaným nástrojem. Jednotlivé meze vibrací pak mají následující výpočetní vztahy:

- **Úroveň varování**

Hodnota vibrací, při které se stroj nemusí zastavit. Je třeba hledat nápravné opatření, které pomůže snížit vibrace (např. výměna nástroje).

$$\text{Úroveň varování (ÚV)} = \bar{x} + 2 * s_x \quad (7)$$

$$\text{Úroveň varování}_{0068808K} = 3,88 + 2 * 0,361 = 4,602 \text{ g}$$

- **Poplachová úroveň**

Hodnota vibrací, při které by se měl stroj zastavit. Je třeba najít nápravné opatření, které pomůže snížit vibrace (např. výměna nástroje).

$$\text{Poplachová úroveň (PÚ)} = \bar{x} + 3 * s_x \quad (8)$$

$$\text{Poplachová úroveň}_{0068808K} = 3,88 + 3 * 0,361 = 4,963 \text{ g}$$

- **Úroveň hospodárneho užití nástroje**

Hodnota vibrací, která oznamuje, že je frézováno příliš „mírně“. Je doporučeno zvýšit úběr materiálu. Frézování tímto způsobem by nebylo ekonomické. Pod úroveň hospodárneho užití nástroje se je možno dostat při finišování. V takovém případě jsou tyto hodnoty vibrací v pořádku. Tato úroveň není obsažena v Metodice I. Je zavedena v této práci a byla konzultována s diplomové vedoucím práce.

$$\text{Úroveň hospodárneho užití nástroje (ÚHUN)} = \bar{x} - 3 * s_x \quad (9)$$

$$\text{Úroveň hospodárneho užití nástroje}_{0068808K} = 3,88 - 3 * 0,361 = 2,797 \text{ g}$$

Vypočítané hodnoty pro meze vibrací jsou zobrazeny v tabulce 7.

Tab 7) Vypočtené meze vibrací pro stroj 2 a nástroj 0068808K

| Nástroj | 0068808K | | | | |
|--------------|-----------|-------|-------|-------|-------|
| Měřící body | \bar{x} | s_x | ÚHUN | ÚV | PÚ |
| R1_ACC_10kHz | 25,76 | 5,50 | 9,25 | 36,77 | 42,27 |
| R2_ACC_10kHz | 3,88 | 0,36 | 2,80 | 4,60 | 4,96 |
| R1_ACC_20kHz | 29,58 | 6,23 | 10,89 | 42,04 | 48,27 |
| R2_ACC_20kHz | 5,04 | 0,59 | 3,26 | 6,22 | 6,82 |
| R1_ACC_40kHz | 37,03 | 7,42 | 14,77 | 51,87 | 59,29 |
| R2_ACC_40kHz | 5,21 | 0,56 | 3,52 | 6,34 | 6,91 |
| R1_VEL_5kHz | 5,65 | 0,41 | 4,40 | 6,47 | 6,89 |
| R2_VEL_5kHz | 1,29 | 0,17 | 0,77 | 1,63 | 1,80 |
| R1_EN3_20 | 22,04 | 3,30 | 12,14 | 28,65 | 31,95 |
| R2_EN3_20 | 4,00 | 0,40 | 2,78 | 4,80 | 5,21 |
| R1_EN4_20 | 19,76 | 1,52 | 15,20 | 22,80 | 24,32 |
| R2_EN4_20 | 3,24 | 0,38 | 2,08 | 4,00 | 4,39 |
| R1_EN4_40 | 28,06 | 3,64 | 17,13 | 35,34 | 38,99 |
| R2_EN4_40 | 3,85 | 0,26 | 3,08 | 4,36 | 4,62 |
| A1_ACC_10 | 7,44 | 0,89 | 4,77 | 9,22 | 10,12 |
| A1_ACC_20 | 8,41 | 0,79 | 6,04 | 10,00 | 10,79 |
| A1_ACC_40 | 9,67 | 0,76 | 7,40 | 11,19 | 11,95 |
| A1_VEL_5 | 3,07 | 0,24 | 2,35 | 3,54 | 3,78 |
| A1_EN3_20 | 7,28 | 0,99 | 4,30 | 9,26 | 10,25 |
| A1_EN4_20 | 5,01 | 0,40 | 3,81 | 5,81 | 6,21 |
| A1_EN4_40 | 6,53 | 0,58 | 4,78 | 7,70 | 8,28 |

Dílčí kontrolou může být porovnání hodnot v tabulkách 4, 5 a 7.

Hodnoty ÚHUN pro snímač R2 pro měřící bod R1/R2 ACC/10kHz jsou dosahovány poměrně značně. Celkově je pro tento nástroj ve všech stavech opotřebení 265 hodnot vibrací z tohoto snímače na tomto stroji. Bylo by dobré tuto mez vyhodnocovat za delší časový úsek než 6 sekund

Hodnoty ÚV a PÚ jsou u velmi poškozeného nástroje překračovány neustále, ale u zbylých dvou nástrojů došlo k překročení jedné meze pouze jednou, což bylo vyhodnoceno jako zásah obsluhy do posuvové rychlosti stroje. Stroj by v takovém případě reagoval upozorněním.

7.3 Vyhodnocení zbylých nástrojů na stroji 1 a 2

Stroj 1 byl díky vyššímu výkonu včetně rychlejší. Program, co na stroji 2 trval přibližně 6 minut, na stroji 1 trval minuty 4. Pro každý stav nástroje (nový a opotřeбенý) byly vyčleněny 2 vzorky pro maximální podmínky na 4 kW. Jeden vzorek pro každý stav nástroje byl testován s podmínkami pro 2 kW. Pro výpočet hodnot vibrací ze stroje 1 bylo použito statistické metody 10MAX. Z tabulky lze vidět, že na stroji 1 jsou zaznamenávány menší hodnoty vibrací.

Tab 8) Porovnání výškových parametrů textury povrchu nástroje 0068460A

| | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Podmínky obrábění pro stroj | 2 kW | 2 kW | 2 kW | 4 kW | 4 kW | 4 kW | 4 kW | 4 kW | 4 kW |
| Stroj | 2 kW | 2 kW | 2 kW | 2 kW | 2 kW | 2 kW | 4 kW | 4 kW | 4 kW |
| Nástroj_otřebený | ...808K | ...086L | ...460A | ...808K | ...086L | ...460A | ...808K | ...086L | ...460A |
| Snímač | \bar{x} | \bar{x} | \bar{x} | \bar{x} | \bar{x} | \bar{x} | \bar{x} | \bar{x} | \bar{x} |
| R1_ACC_10kHz | 25.76 | 46.45 | 37.92 | 8.34 | 11.23 | 14.79 | 10.90 | 16.43 | 16.42 |
| R2_ACC_10kHz | 3.88 | 9.05 | 12.31 | 6.51 | 9.68 | 14.35 | 11.03 | 16.54 | 18.68 |

7.4 Vyhodnocení pomocí interferometru Taylor Hobson Talysurf CCI Lite

Bezdotykový 3D interferometr Taylor Hobson Talysurf CCI Lite. Měření s tímto přístrojem je založeno na principu koherenční rastrovací interferometrie (Coherence scanning interferometry; CSI). Tato technologie má různé komerční názvy. U firmy Taylor Hobson - „Coherence correlation interferometry“, zkráceně CCI. [24]

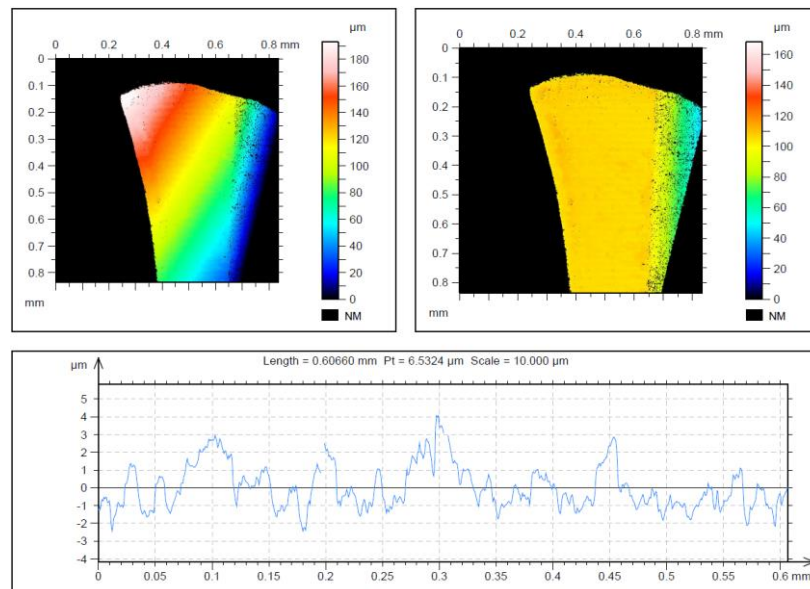
Na povrch vzorku dopadá nekoherentní polychromatické světlo přes interferometrický objektiv. Na povrchu vzorku k interferenci světla různých vlnových délek. To vede ke změně výsledné intenzity odraženého světla, která se projeví typickými interferenčními proužky. Jednotlivým snímaným bodům je softwarově přiřazena výšková souřadnice přibližně odpovídající výšce, při níž bylo dosaženo maximální intenzity světla dopadajícího na snímač.[24]



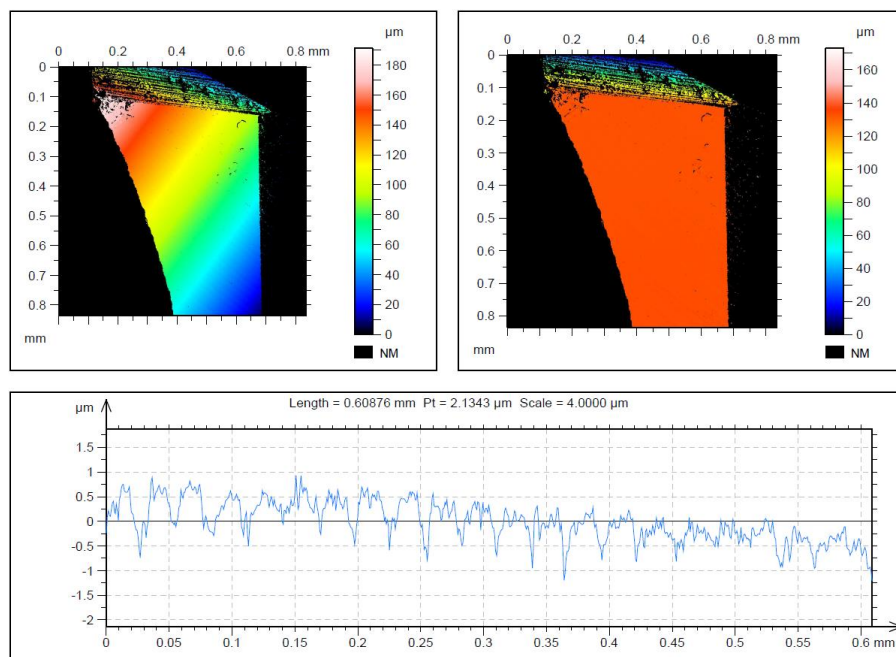
Obr. 29) Taylor Hobson Talysurf CCI Lite [22]

7.4.1 Stav opotřebení nástroje

Pomocí interferometru CCI Lite bylo zobrazeno opotřebení nástroje. Povrch hrotu nástroje byl osvětlován nekoherentním polychromatickým světlem. Výsledkem bylo sestavení modelu osvětlované plochy. Na obrázcích jsou pro porovnání ukázány modely ploch opotřebovaného a nového nástroje 0068460A. Tento nástroj byl pro zvolen z důvodu nejjednoduššího upínání pro měření na interferometru.



Obr. 30) Model povrchu plochy nástroje a charakteristický profil ostří opotřebovaného nástroje 0068460A



Obr. 31) Model povrchu plochy nástroje a charakteristický profil ostří nového nástroje 0068460A

Jiným způsobem měření opotřebenosti nástroje, kromě vytvoření virtuálního modelu tedy metody nepřímé by mohla být metoda přímá. Nejjednodušší metodou by byla metoda váhová. V této metodě je měřen úbytek materiálu. Dalším příkladem je software IMPOR BASIC, který zvládá vyhodnocovat opotřebenost přímo on-line na mikroskopu. [26]

7.4.2 Hodnocení textury povrchu vzorku

Za pomoci interferometru Talysurf CCI budou porovnány průměrné výškové parametry textury povrchu vzorků vyrobených na stroji 2 nástrojem 0068460A pro nový a opotřebovaný nástroj. Poloha bodu 1 se nachází uprostřed plochy na vnějším obrysu, který je nejbližší nejmenší díry.

Tab 9) Porovnání výškových parametrů textury povrchu nástroje 0068460A

| | Nástroj_0068460A_opotřebená _stroj2_bod1 | Nástroj_0068460A_nová _stroj2_bod1 | Hodnota poklesla o |
|---------|---|---------------------------------------|--------------------|
| Pz [μm] | 8 | 2,423 | 70% |
| Wz [μm] | 1,047 | 0,477 | 54% |
| Rz [μm] | 6,822 | 1,911 | 72% |
| Pv [μm] | 1,88 | 1,097 | 42% |
| Wv [μm] | 0,34 | 0,194 | 43% |
| Rv [μm] | 1,86 | 0,861 | 54% |
| Pp [μm] | 6,13 | 1,329 | 78% |
| Wp [μm] | 0,705 | 0,282 | 60% |
| Rp [μm] | 4,959 | 1,051 | 79% |
| Pa [μm] | 0,448 | 0,252 | 44% |
| Wa [μm] | 0,275 | 0,141 | 49% |
| Ra [μm] | 0,359 | 0,168 | 53% |
| Pq [μm] | 0,745 | 0,326 | 56% |
| Wq [μm] | 0,32 | 0,16 | 50% |
| Rq [μm] | 0,597 | 0,244 | 59% |
| Pc [μm] | 2,626 | 0,666 | 75% |
| Rc [μm] | 2,874 | 0,572 | 80% |
| Pt [μm] | 8,001 | 2,427 | 70% |
| Wt [μm] | 1,059 | 0,48 | 55% |
| Rt [μm] | 7,26 | 1,916 | 74% |
| Pku[μm] | 36,491 | 5,2525 | 86% |

Při výrobě těchto vzorků nebyl stanoven žádný toleranční předpis. Měření pomocí interferometru ukazuje, že rostoucí opotřebenost fréz zhoršuje výškové parametry textury obráběného povrchu. Parametr Pku vykazuje nejvyšší citlivost.

Kromě výškových parametrů textury povrchu byly měřeny pomocí Talysurf CCI průměrné plošné hodnoty textury povrchu.

Tab 10) Porovnání plošných parametrů textury povrchu nástroje 0068460A

| | Nástroj_0068460A_opotřebená _stroj2_bod1 | Nástroj_0068460A_nová _stroj2_bod1 | Hodnota poklesla o |
|----------|---|---------------------------------------|--------------------|
| Sz [μm] | 69,617 | 12,294 | 82% |
| Sv [μm] | 5,475 | 3,871 | 29% |
| Sp [μm] | 64,142 | 8,423 | 87% |
| Sa [μm] | 0,67 | 0,469 | 30% |
| Sq [μm] | 1,129 | 0,573 | 49% |
| Sku [μm] | 434,82 | 6,253 | 99% |
| Ssk [μm] | 13,527 | 0,514 | 96% |

U plošných parametrů textury povrchu vykazuje velkou citlivost parametr Ssk.

8 DOPORUČENÍ PRO PRAXI

Návrh nové metodiky pro stanovení provozních mezí vibrací vzhledem k upnutému nástroji provázela řada prvotních problémů, které se diplomová práce snaží vyřešit. Podkapitoly v této kapitole dávají rady a doporučení pro pokračování v tomto způsobu stanovení provozních mezí vibrací.

8.1 Opakovatelnost podmínek

Nejelementárnější věcí, kterou je třeba dodržet, jsou opakovatelné podmínky při měření. Ustálené podmínky umožňují provést přesnou analýzu a vedou ke stanovení uspokojivých hodnot provozních mezí vibrací.

O přesném umístění snímačů vibrací je pojednáno v Metodice I: Metodika pro on-line diagnostiku[25].

Data jsou pro jednotlivé měřicí body ze snímačů sbírána při otáčení vřetene jako největší hodnoty v časovém úseku o velikosti 6 sekund.

Upínání nástroje do vřetene je rovněž důležitým aspektem. Na stroji 2 je přímý upínací systém pro upínání nástroje. Délka vyložení nástroje z kleštiny byla volena tak, aby byla co nejmenší. Celá část upínací stopky nástroje byla schována do kleštiny. V kleštině, ale nesmí být schována řezná část nástroje, ani krček frézy.

Pro měření byl vytvořen testovací vzorek. S cílem zapojit maximální možné úběry materiálu ve všech směrech. Tento vzorek je z materiálu AlMg3 a jeho polotovár má rozměry kvádrů (rozměry 128 mm x 48 mm x 10 mm). Pro tento vzorek byly vytvořeny svěrákové čelisti. V čelistech je naznačeno místo pro doraz. Jednotlivé šrouby a svěrák byly dotahovány momentovým klíčem. Hodnoty velikosti utahovacího momentu byly voleny dle manuálu momentového klíče.

Chlazení nástroje, rovněž ovlivňuje hodnoty vibrací. Po konzultaci s obsluhou bylo zjištěno, že množství a poměr chladicího média (chladicí mazací prostředek a stlačený vzduch) se při změně výrobních programů nemění. Důležité se je pouze přesvědčit, zda je chlazení spuštěno.

Samostatnou kapitolou je pak volba nástroje dle opotřebení. V diplomové práci se meze provozních mezí stanovují dle opotřebeného nástroje (nástroj by se měl nacházet v II. oblasti opotřebení nástroje, tedy v oblasti lineárního opotřebení s konstantní intenzitou), výběr tohoto nástroje byl ponechán na zkušenosti operátora stroje. Vhodným řešením by bylo opotřebení zjistit softwarově. Vhodným softwarem by mohl být software IMPOR BASIC.

8.2 Dostatečné množství naměřených dat a způsob získání dat

Pro stanovení mezí je důležité mít dostatečné množství validních dat. Data vibrací pro nástroj lze získat dvěma způsoby.

První způsob spočívá v neustálé komunikaci s technologem a operátorem stroje. Je nezbytné zjistit, kdy bude daný nástroj obrábět. Jaký materiál se bude obrábět. Další věcí, kterou je třeba zohlednit je opotřebením nástroje. V tomto případě je pravděpodobné získání zkreslených výsledků. Zkreslení bude dáno jinou délkou vyložení nástroje, jiným typem upnutí, atd.

Druhým způsobem je naplánování experimentální výrobní série. Tento způsob se zdá vhodnější, protože obsluha stroje může být kontrolována, zda dodržuje podmínky stanovené pro toto měření. Toto měření, ale zasahuje mimo výrobní program firmy a je pouze na její vstřícnosti, zda ho dovolí. V případě, že je takové měření zorganizováno je vhodné monitorovat vibrace u co nejvíce vzorků. V práci jsou vibrace monitorovány pro každý stav opotřebením nástroje třemi vzorky. Vhodné by bylo zvolit jedno opotřebením nástroje, se kterým se budou obrábět vzorky a provést obrábění ideálně deseti vzorků.

8.3 Zálohování a přístup k datům

Kontinuální měření ve firmě generuje obrovské množství dat. Tyto data jsou ve formě databází o velikosti přibližně 10 GB. Tyto databáze by měli být dostupné na uzavřeném cloudu a přístup by měli získat zainteresovaní lidé. Je nutno myslet na to, že samotná databáze bez popisu, toho co se na stroji dělalo je zcela neužitečná. K souboru s databází musí být připojen soubor, který popisuje naměřená data.

9 ZÁVĚR

Tato diplomová práce byla zaměřena na návrh provozních mezí pro diagnostický systém obráběcího stroje. Obráběcí stroj, který byl sledován diagnostickým systémem zařízení Multilog IMx-8, je stroj Datron M8Cube. Systém byl na stroji již zaveden před tvorbou diplomové práce.

První z cílů diplomové práce bylo popsat současný stav on-line diagnostiky na stroji Datron M8Cube. Tento cíl byl splněn v kapitole 5. V kapitole jsou popsány dílčí části systému online vibrační diagnostiky (Multilog IMx-8, akcelerometry CMAC244 - 1D a software @plitude Observer), dále má firma Datron na stroji přítomen dálkový přístup ke stroji. O dálkových přístupech a dálkové diagnostice je pojednáno v podkapitole 3.1.

Druhým z cílů byl systémový rozbor problému hodnocení stavu stroje pomocí online vibrační diagnostiky. Tento cíl byl splněn s využitím normy ČSN ISO 10816-1 [23]. Byly posouzeny dvě kritéria podle, kterých lze stav stroje hodnotit. Kritéria hodnocení jsou vztaženy jak na provozní monitorování, tak zkoušky prováděné při přejímce stroje. Vibrace jsou na stroji sledovány a zařazeny do pásem či trendů A až D. Tím je rozhodnuto o jejich technickém stavu. Cíl byl splněn v kapitole 3.5.6.

Splnění třetího cíle je vypracováno v kapitolách 4, 6 a 7. V kapitole 4 jsou představeny dva stroje firmy Datron M8Cube ve firmě EMKO Case. Dále je monitorován díl „Raspberry“. Výsledkem je zjištění, že různé nástroje mají velmi pravděpodobně jiné provozní meze vibrací. Dále je proto tento cíl řešen pomocí experimentální výrobní série (pomocí zkušební vzorku). Výsledky jsou popsány v kapitoly 6 a 7. Výsledkem je stanovení provozních mezí pro nástroj 0068808K při obrábění polotovaru z materiálu AlMg3 a dodržení délky vyložení z nástroje z kleštiny a podmínek chlazení.

Čtvrtý cílem diplomové práce bylo statistické zpracování naměřených signálů při aktuálním výrobním programu. Statistickému zpracování dat bylo provedeno pro experimentální výrobní sérii. Splnění cíle bylo doloženo v kapitole 7.

Pátým a posledním cílem této diplomové práce je tvorba vlastních závěrů a doporučení pro praxi. Doporučení pro praxi a jsou v kapitole 8. Při tvorbě provozních mezí vibrací pro výrobní program je hlavním doporučení pro všechny použité nástroje o rozdělení provozních mezí v závislosti na upnutém nástroji. Toto tvrzení se při tvorbě diplomové práce ukázalo jako správné. V práci se ukázalo, že míra opotřebení nástroje souvisí s parametry textury povrchu obráběného vzorku.

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] TŮMA, Jiří. Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT. Praha: Sdělovací technika, 1997. ISBN 80-901936-1-7.
- [2] HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER. Technická diagnostika a spolehlivost. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0650-9.
- [3] LEGÁT, Václav. Management a inženýrství údržby. Druhé doplněné vydání. Praha: Kamil Mařík - Professional Publishing, 2016. ISBN 978-807431-163-5.
- [4] Prediktivní údržba - cesta ke snížení nákladů, 2012. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prediktivni-udrzba-cesta-ke-snizeni-nakladu.html>
- [5] HAMMER, Miloš. Přednášky z předmětů: Technická diagnostika I (XT1), Technická diagnostika II (XT2), Spolehlivost I (XS1). Vysoké učení technické v Brně. [cit. 2020-01-11].
- [6] Vibrační diagnostikou ke zlepšení kvality obrobeneho povrchu, 2017. *Řízení a údržba průmyslového podniku* [online]. Praha: Trade Media International [cit. 2020-02-02]. Dostupné z: <http://udrzbapodniku.cz/hlavni-menu/artykuly/artyku/artykul/article/vibrační-diagnostikou-ke-zlepseni-kvality-obrobeneho-povrchu/>
- [7] *IMPLEMENTAČNÍ AKČNÍ PLÁN OBORU STROJÍRENSKÉ VÝROBNÍ TECHNIKY pro období 2020–2025+*, 2019. Brno.
- [8] KASALOVÁ, Aneta. Proaktivní systém údržby strojů. Brno, 2016. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=128379. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.
- [9] KRÍŽ, Petr. *Online vibrační diagnostika vřetene frézovacího stroje DATRON*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116911>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Róbert Jankových.
- [10] DATRON TECHNOLOGY [online]. [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://www.datrontechnology.cz/>
- [11] SEMOTAM, Petr. Prediktivní systém údržby obráběcích strojů s využitím vibrodiagnostiky. Brno, 2018. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=174782. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.
- [12] ZUTH, Daniel, VDOLEČEK František. *Měření vibrací ve vibrodiagnostice* [online]. [cit. 2020-03-01]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40375.pdf>
- [13] Technická diagnostika, 2006. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/technicka-diagnostika.html>
- [14] Diagnostika a testování elektronických systémů, 2012. Umel, VUT Brno [online]. Brno: Umel, VUT Brno [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/bdts/index.php/multimedialni-ucebnice-menu/diagnosticky-system/9-multimedialni-ucebnice/zakladni-pojmy>

- [15] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část Vibrační diagnostika*. Ostrava, 2012, 142 s. Studijní opora. VŠB-TU Ostrava.
- [16] MONTGOMERY, Douglas C. *Introduction to statistical quality control*. 5th ed. Hoboken: John Wiley, 2005. ISBN 0-471-66122-8.
- [17] ČSN ISO 5348. *Vibrace a rázy – Mechanické připevnění akcelerometrů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1999.
- [18] Hlídání vibrací strojů a zařízení podle ISO 10816 s IFM VKV02x, 2017. *Automatizace.hw* [online]. Praha: HW server [cit. 2020-01-12]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/hlidani-vibraci-stroju-a-zarizeni-podle-iso-10816-s-ifm-vkv022.html>
- [19] SKF CZ, a.s. [online]. 2019 [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://www.skf.com/cz/products/index.html>
- [20] PLONKA, Daniel, 2014. *Technická diagnostika - vibrodiagnostika*. Slide player [online]. Ostrava: VŠB Ostrava [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2451946/?fbclid=IwAR3349g56iqRf4CBuDv5Lk2abHPPY26jdjvifqzL2nsO8VP7VX61IlvPIIQ>
- [21] ČSN ISO 20816-1. *Vibrace-Měření a hodnocení vibrací strojů - Část 1: Obecné pokyny*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [22] Výškové parametry textury povrchu, 2014. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <http://firmy.mmspektrum.com/clanek/vyskove-parametry-textury-povrchu.html>
- [23] ČSN ISO 10816-1. *Vibrace-Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech - Část 1: Všeobecné směrnice*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [24] HARČARÍK, Matej. *Měření parametrů textury povrchu výrobků kontaktní a bezkontaktní metodou*. Brno, 2016. Dostupné také z https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=127372:. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.
- [25] JANKOVÝCH, Róbert, Miloš HAMMER a Tadeáš LIPUS. *Metodika I: Metodika pro on-line diagnostiku*. Brno, VUT FSI, 2019.
- [26] *Technologie II_1díl*, 2015. In: *VSB* [online]. Ostrava: VŠB [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf
- [27] *Zpracování signálů - Fourierova transformace, FFT Frekvenční*, 2016. In: *Docplayer* [online]. Praha: Docplayer [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/11104428-Zpracovani-signalu-fourierova-transformace-fft-frekvencni.html>
- [28] *Experimentální dynamika (motivace, poslání, cíle)*, 2016. In: *ZCU* [online]. Plzeň: ZCU [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: https://www.kme.zcu.cz/kmet/exm/download/EXM_PREDNASKA_06.pdf
- [29] EMKO Case [online]. [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://www.emko.cz/>
- [30] ČSN ISO 2041. *Vibrace, rázy a monitorování stavu - Slovník*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.

11 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

11.1 Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| TAB 1) POPIS MĚŘÍCÍCH BODŮ A METODA DETEKCE [25]..... | 44 |
| TAB 2) UKÁZKA STANOVENÍ OPTIMÁLNÍCH ŘEZNÝCH PODMÍNEK DLE OBJEMOVÉHO ÚBĚRU MATERIÁLU [10] | 47 |
| TAB 3) TABULKA FRÉZOVÁNÍ NÁSTROJEM 0068808K NA STROJI 2 | 49 |
| TAB 4) 30 NEJVĚTŠÍCH HODNOT ZE SNÍMAČE R2 PRO MĚŘÍCÍ BOD R1/R2 ACC/10KHZ | 50 |
| TAB 5) SMĚRODATNÁ ODCHYLKA A ARITMETICKÝ PRŮMĚR HODNOT VIBRACÍ U STROJE 2 PRO NÁSTROJ 0068808K PŘI EXPERIMENTÁLNÍ VÝROBNÍ SÉRII..... | 52 |
| TAB 6) TERMINOLOGIE PRO PROVOZNÍ MEZE VIBRACÍ [25] | 53 |
| TAB 7) VYPOČTENÉ MEZE VIBRACÍ PRO STROJ 2 A NÁSTROJ 0068808K ... | 55 |
| TAB 8) POROVNÁNÍ VÝŠKOVÝCH PARAMETRŮ TEXTURY POVRCHU NÁSTROJE 0068460A..... | 56 |
| TAB 9) POROVNÁNÍ VÝŠKOVÝCH PARAMETRŮ TEXTURY POVRCHU NÁSTROJE 0068460A | 58 |
| TAB 10) POROVNÁNÍ PLOŠNÝCH PARAMETRŮ TEXTURY POVRCHU NÁSTROJE 0068460A | 59 |

11.2 Seznam obrázků

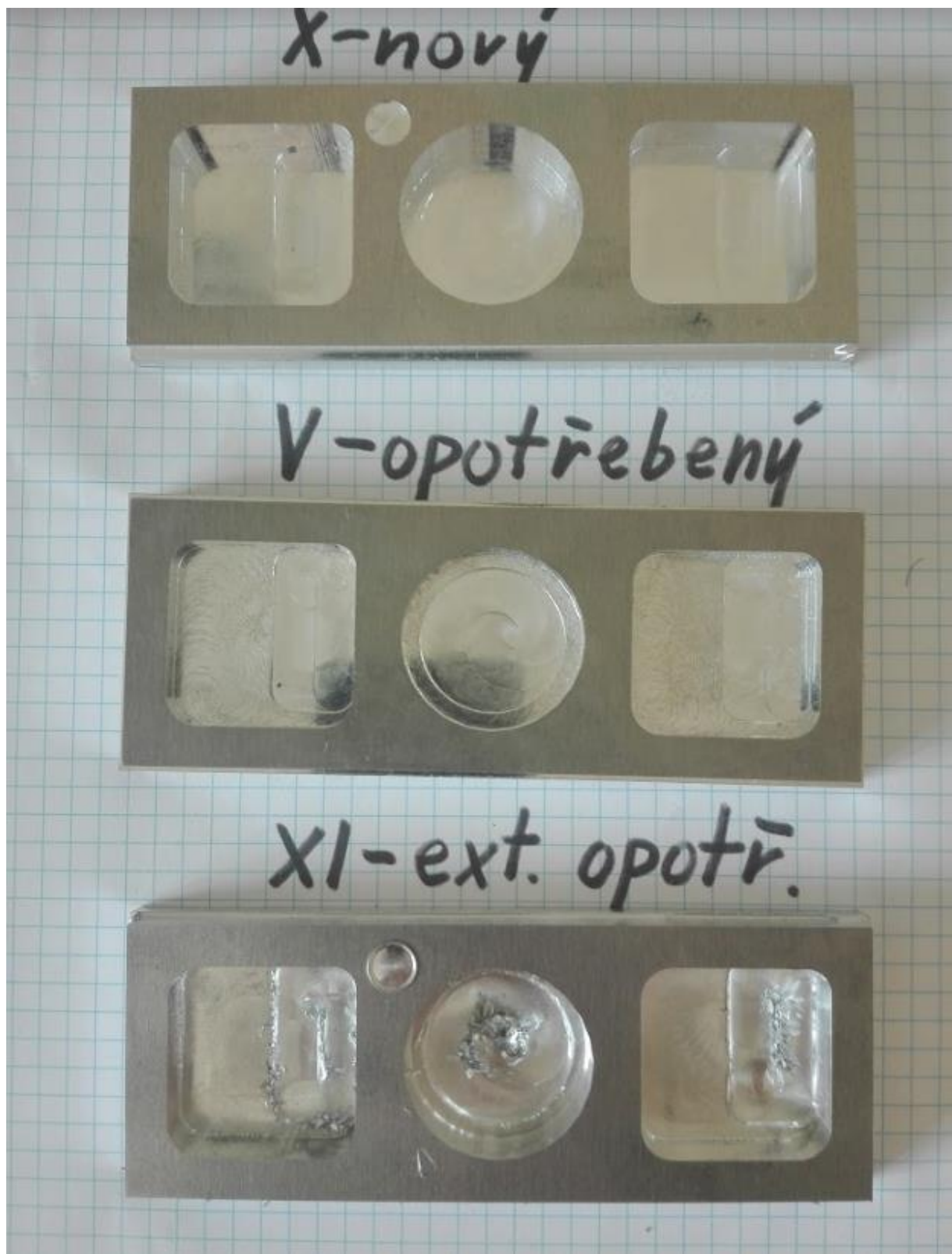
| | |
|---|----|
| OBR. 1) FRÉZOVACÍ CENTRUM DATRON M8CUBE [10]..... | 15 |
| OBR. 2) VÝVOJ TYPŮ A NÁSTROJŮ ÚDRŽBY [8] | 20 |
| OBR. 3) ZNÁZORNĚNÍ DOBY A ČETNOSTI ÚDRŽBY [20]..... | 21 |
| OBR. 4) ROZDĚLENÍ SIGNÁLŮ DLE NÁHODNOSTI JEJICH PRŮBĚHU [20] ... | 22 |
| OBR. 5) ILUSTRACE ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU [27] | 23 |
| OBR. 6) GRAFICKÝ VÝSTUP Z TERMOVIZNÍHO MĚŘENÍ [15] | 24 |
| OBR. 7) HODNOTY ZRYCHLENÍ A HLUČNOSTI REÁLNÝCH VIBRACÍ [28] .. | 26 |
| OBR. 8) VZÁJEMNÁ PROVÁZANOST VELIČIN VIBRACÍ [17] | 27 |
| OBR. 9) RELATIVNÍ A ABSOLUTNÍ KMITÁNÍ [12] | 28 |
| OBR. 10) KALIBRAČNÍ KŘIVKA SNÍMAČE ZRYCHLENÍ [15]..... | 29 |
| OBR. 11) VLIV ZPŮSOBU UCHYCENÍ NA FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKU AKCELEROMETRU [12] | 31 |
| OBR. 12) VAKUOVÉ UPEVNĚNÍ AKCELEROMETRU [17] | 32 |
| OBR. 13) STATISTICKÁ, MOMENTOVÁ A OBECNÁ NEVYVÁŽENOST [15]..... | 33 |

| | |
|---|----|
| OBR. 14) MOŽNÉ TRENDY CELKOVÝCH HODNOT VIBRACÍ [15]..... | 35 |
| OBR. 15) CNC FRÉZOVACÍ CENTRUM M8 CUBE VE FIRMĚ EMKO CASE [29]..... | 37 |
| OBR. 16) SKŘÍŇKA PRO ZÁKLADNÍ DESKU RASPBERRY PI, MODEL 2/3 [29]..... | 38 |
| OBR. 17) MĚŘENÍ VIBRACÍ VE FIRMĚ..... | 39 |
| OBR. 18) KONFIGURACE SYSTÉMU PRO DIAGNOSTIKU. [19]..... | 41 |
| OBR. 19) ZAPOJENÝ MULTILOG IMX-8 VE FIRMĚ EMKO CASE | 42 |
| OBR. 20) VŘETENO STROJE SE SNÍMAČI VIBRACÍ..... | 43 |
| OBR. 21) DETAILNÍ ZÁZNAM UDÁLOSTI („EVENTU“) V SOFTWARE @PTITUDE OBSERVER [25]..... | 44 |
| OBR. 22) FRÉZY PRO TESTOVÁNÍ HODNOT VIBRACÍ..... | 45 |
| OBR. 23) VZOREK PRO TESTOVÁNÍ VIBRACÍ PŘI OBRÁBĚNÍ | 46 |
| OBR. 24) ZNÁZORNĚNÍ STATETEGIE OBRÁBĚNÍ..... | 47 |
| OBR. 25) DATA Z TESTOVÁNÍ VIBRACÍ Z MĚŘÍČÍHO BODU R1/R2 ACC/10KHZ PRO SNÍMAČ R2. | 50 |
| OBR. 26) HISTOGAM Z DAT TESTOVÁNÍ VIBRACÍ SNÍMAČE R2 PRO MĚŘÍČÍ BOD R1/R2 ACC/10KHZ | 51 |
| OBR. 27) ANDERSON-DARLINGŮV TEST DOBRÉ SHODY Z DAT TESTOVÁNÍ VIBRACÍ SNÍMAČE R2 PRO MĚŘÍČÍ BOD R1/R2 ACC/10KHZ | 51 |
| OBR. 28) ZÁVISLOST MÍRY FRÉZY OPOTŘEBENÍ PŘI RŮZNÝCH ŘEZNÝCH RYCHLOSTECH [26]..... | 53 |
| OBR. 29) TAYLOR HOBSON TALYSURF CCI LITE [22]..... | 56 |
| OBR. 30) MODEL POVRCHU PLOCHY NÁSTROJE A CHARAKTERISTICKÝ PROFIL OSTŘÍ OPOTŘEBENÉHO NÁSTROJE 0068460A..... | 57 |
| OBR. 31) MODEL POVRCHU PLOCHY NÁSTROJE A CHARAKTERISTICKÝ PROFIL OSTŘÍ NOVÉHO NÁSTROJE 0068460A..... | 57 |

7.1 Seznam zkratek a symbolů

| | |
|------------|---|
| <i>R1</i> | <i>Radiální snímač vibrací</i> |
| <i>R2</i> | <i>Radiální snímač vibrací</i> |
| <i>A1</i> | <i>Axiální snímač vibrací</i> |
| <i>CCI</i> | <i>coherence correlation interferometry (koherenční rastrovací interferometr)</i> |
| <i>Pz</i> | <i>nejvyšší výška základního profilu</i> |
| <i>Pp</i> | <i>největší výška výstupku základního profilu</i> |
| <i>Pv</i> | <i>největší hloubka prohlubně základního profilu</i> |
| <i>Wz</i> | <i>nejvyšší výška profilu vlnitosti</i> |
| <i>Wp</i> | <i>největší výška výstupku profilu vlnitosti</i> |
| <i>Wv</i> | <i>největší hloubka prohlubně profilu vlnitosti</i> |
| <i>Rz</i> | <i>největší výška profilu pro profil drsnosti</i> |
| <i>Rp</i> | <i>největší výška výstupku profilu drsnosti</i> |
| <i>Rv</i> | <i>největší hloubka prohlubně profilu drsnosti</i> |
| <i>Sz</i> | <i>maximální výšky posuzované plochy</i> |
| <i>Sp</i> | <i>maximální výška vrcholu posuzovaného povrchu</i> |
| <i>Sv</i> | <i>maximální hloubka dna posuzovaného povrchu</i> |
| <i>Pa</i> | <i>průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu pro základní profil</i> |
| <i>Wa</i> | <i>průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu pro profil vlnitosti</i> |
| <i>Ra</i> | <i>průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu pro profil drsnosti</i> |
| <i>Sa</i> | <i>průměrná aritmetická výška posuzovaného povrchu</i> |
| <i>Pq</i> | <i>průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu pro základní profil</i> |
| <i>Wq</i> | <i>průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu pro profil vlnitosti</i> |
| <i>Rq</i> | <i>průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu pro profil drsnosti</i> |
| <i>Sq</i> | <i>průměrná kvadratická výška posuzovaného povrchu</i> |
| <i>Pc</i> | <i>průměrná výška prvků základního profilu</i> |
| <i>Rc</i> | <i>průměrná výška prvků profilu drsnosti</i> |
| <i>Aqm</i> | <i>střední hodnota $Aq(i)$ z vícenásobného měření</i> |
| <i>Aqs</i> | <i>směrodatná odchylka $Aq(i)$ z vícenásobného měření</i> |
| <i>Aqt</i> | <i>neboli rozpětí hodnot $Aq(i)$ z vícenásobného měření</i> |
| <i>VB</i> | <i>opotřebení břitu</i> |

PŘÍLOHA 1 – VZORKY ZE STROJE 2 S NÁSTROJEM 0068808K



PŘÍLOHA 2 – ZPĚTNÉ ZAVEDENÍ PROVOZNÍCH MEZÍ PRO EXPERIMENTÁLNÍ VÝROBNÍ SÉRII

