



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

ZVÝŠENÍ ODOLNOSTI PROTI SAMOBUZENÉMU KMITÁNÍ U CNC OBRÁBĚCÍCH STROJŮ PRO OBRÁBĚNÍ NEROTAČNÍCH OBROBKŮ

INCREASING RESISTANCE TO SELF-EXCITED OSCILLATIONS IN CNC MACHINE TOOLS FOR MACHINING NON-ROTATING WORKPIECES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michaela Prchalová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Jiří Marek, Ph.D., DBA

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Studentka:	Bc. Michaela Prchalová
Studijní program:	Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	prof. Dr. Ing. Jiří Marek, Ph.D., DBA
Akademický rok:	2021/22

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:

Zvýšení odolnosti proti samobuzenému kmitání u CNC obráběcích strojů pro obrábění nerotačních obrobků

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Samobuzené kmitání je jedním z nejčastěji se vyskytujících doprovodných jevů při obrábění obrobků. Existuje řada zásahů, které mohou tento jev minimalizovat. Tím je šetřen nejenom vlastní obráběcí stroj, ale jsou i optimalizovány náklady na nástroj. Sestavení takových zásahů však vyžaduje řadu zkoušek a experimentů.

Cíle diplomové práce:

Rozbor současného stavu vědy a techniky u řešené problematiky.

Systémový rozbor řešené problematiky, návrh a zdůvodnění zvoleného způsobu řešení zadaného úkolu.

Návrh metodiky predikce samobuzeného kmitání u zadaného typu stroje, včetně doporučení pro budoucí uživatele jak postupovat.

Zrealizujte, pokud to bude možné, potřebná měření, verifikující vaše předpoklady.

Komentář k předloženému řešení.

Seznam doporučené literatury:

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů IV.0. Praha: MM publishing, s.r.o., 2018. MM speciál. ISBN 978-80-906310-8-3.

JANÍČEK, Přemysl a Jiří MAREK. Expertní inženýrství v systémovém pojetí. Praha: Grada, 2013. Expert (Grada). ISBN 978-80-247-4127-7.

Firemní literatura a www stránky výrobců obráběcích strojů.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na zvýšení odolnosti proti samobuzenému kmitání u CNC obráběcích strojů pro obrábění nerotačních obrobků. Hlavním cílem práce je provedení systémového rozboru řešené problematiky a zdůvodnění zvoleného způsobu řešení zadaného úkolu. Dalším cílem této práce je provedení rozboru současného stavu vědy a techniky u řešené problematiky. Na základě provedeného rozboru současného stavu byl proveden návrh metodiky predikce samobuzeného kmitání u zadaného typu stroje, včetně doporučení pro budoucí uživatele, jak postupovat. Celá práce je založena na reálném problému vyskytujícím se při obrábění konstrukčně těžko obrobitelného obrobku.

ABSTRACT

The Master's Thesis is focused on increasing resistance to self-excited oscillations in CNC machine tools for machining non-rotating workpieces. The main goal of the thesis is to perform a system analysis of the solved problematics and justification of the chosen way of solving the assigned task. Another goal of this thesis is to perform an analysis of the current state of science and technology in the specified problematics. Based on the analysis of the current state, a proposal for the methodology of prediction of self-excited oscillations for a specified type of machine was made, including recommendations for future users on how to proceed. The whole thesis is based on a real problem occurring during machining of a structurally difficult workpiece.

KLÍČOVÁ SLOVA

Přesnost obráběcího stroje, samobuzené kmitání, tlumení vibrací, systémový rozbor, predikce samobuzeného kmitání.

KEYWORDS

Precision of machine tool, self excited vibrations, vibration damping, system analysis, prediction of self excited vibrations.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PRCHALOVÁ, Michaela. *Zvýšení odolnosti proti samobuzenému kmitání u CNC obráběcích strojů pro obrábění nerotačních obrobků*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139995>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jiří Marek.

PODĚKOVÁNÍ

Především bych ráda poděkovala svému vedoucímu práce za cenné rady a zajímavé téma diplomové práce. Také bych ráda poděkovala všem kantorům, kteří nás celým studiem na vysoké škole prováděli a předali nám spoustu užitečných informací nejen do profesního života, ale také do života osobního. Dále bych chtěla poděkovat mé rodině a nejbližším za to, že mě po celou dobu studia podporovali.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval a jsem ji samostatně pod vedením pana profesora Jiřího Marka a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 20.5.2022

.....
Prchalová Michaela

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	17
2.1	Vznik samobuzených vibrací.....	17
2.2	Předcházení a kompenzace samobuzených vibrací	17
3	TEORIE SYSTÉMOVÉHO PŘÍSTUPU	19
3.1	Strukturovanost technické soustavy.....	19
3.2	Struktura technické soustavy	19
3.3	Systémové atributy	20
3.3.1	První podskupina systémových atributů.....	20
3.3.2	Druhá podskupina systémových atributů	20
3.3.3	Třetí podskupina systémových atributů.....	21
3.3.4	Čtvrtá podskupina systémových atributů	22
3.3.5	Pátá podskupina systémových atributů.....	22
4	SYSTÉMOVÝ ROZBOR VLIVŮ PŮSOBÍCÍCH NA CNC FRÉZKU Z POHLEDU VÝROBNÍ PŘESNOSTI	25
4.1	Představení společnosti.....	25
4.2	Výrobní portfolio.....	25
4.2.1	Swing kompresory.....	25
4.2.2	Scroll kompresory.....	26
4.3	Strojní zařízení.....	27
4.4	Systémový rozbor faktorů ovlivňujících přesnost obrábění	27
4.4.1	Základy stroje.....	27
4.4.2	Vlivy působící na nosnou soustavu	28
4.4.3	Obrobek	29
4.4.4	Teplotní gradient.....	30
4.4.5	Kompenzační algoritmus.....	31
4.5	Systémový rozbor mechanické soustavy	33
4.5.1	Rám stroje.....	33
4.5.2	Řídicí systém CNC stroje	35
4.5.3	Lineární vedení	36
4.5.4	Zpětná vazba.....	37
4.5.5	Vřeteník.....	38
4.5.6	Nástroj	40
4.5.7	Závěr systémového rozboru mechanické soustavy CNC frézky z pohledu výrobní přesnosti.....	41
4.6	Systémový rozbor vlivů způsobujících vznik samobuzeného kmitání	41
5	PŘÍPADOVÁ STUDIE VIBRACÍ	43
5.1	Kitamura MYCENTER HX300 iG.....	43
5.2	Výrobní proces.....	44
5.2.1	Hrubování vnitřního průměru.....	44
5.2.2	Vrtání obvodových děr	45
5.2.3	Finální obrobení vnitřního průměru	45
5.3	Testovací měření vibrací.....	46
5.3.1	Podmínky měření.....	48
5.3.2	Výsledky měření.....	49

6	SAMOBUZENÉ VIBRACE	51
6.1	Řezný proces.....	53
6.2	Vznik samobuzených vibrací.....	53
6.2.1	Princip polohové vazby	54
6.2.2	Regenerativní princip	55
6.3	Vliv pracovních parametrů na stabilitu řezného procesu	58
6.3.1	Vybrané pracovní parametry ovlivňující intenzitu kmitání.....	58
6.4	Kompenzace vibrací	61
6.4.1	Zvýšení tuhosti stroje	62
6.4.2	Diagram stability	63
6.4.3	Pasivní kompenzace vibrací	64
6.4.4	Poloaktivní kompenzace vibrací	67
6.4.5	Aktivní kompenzace vibrací.....	68
7	NÁVRH ŘEŠENÍ – AKTIVNÍ TLUMENÍ.....	73
7.1	Snímání akcelerometrem	73
7.1.1	Princip piezoelektrického akcelerometru	73
7.1.2	Nábojový zesilovač	74
7.2	Vyhodnocování.....	74
7.3	Aktivní tlumení.....	75
8	NÁVRH METODIKY PREDIKCE SAMOBUZENÉHO KMITÁNÍ	77
8.1	Doporučený postup předcházení vzniku samobuzených vibrací.....	77
8.1.1	Vhodná konstrukce stroje.....	77
8.1.2	Instalace stroje.....	77
8.1.3	Sestavení diagramu stability.....	77
8.1.4	Dostatečně tuhé upnutí nástroje a obrobku	77
8.2	Doporučený postup při vzniku samobuzených vibrací.....	78
9	KOMENTÁŘ K PŘEDLOŽENÉMU ŘEŠENÍ.....	79
9.1	Návrh řešení – aktivní tlumení	79
9.2	Návrh řešení – predikce samobuzeného kmitání	79
10	ZÁVĚR.....	81
11	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	83
12	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK	87
12.1	Seznam zkratk a symbolů	87
12.2	Seznam tabulek.....	87
12.3	Seznam obrázků.....	87
13	SEZNAM PŘÍLOH.....	89

1 ÚVOD

Spokojený zákazník je podmínkou dosažení vysokého postavení na trhu nejen ve strojírenství. Ke spokojenosti zákazníka musí být dodavatel schopen nabídnout spolehlivost a požadovanou kvalitu svých výrobků. Vyspělost dnešních technologií je na tak vysoké úrovni, že se požadavky na kvalitu obrábění neustále zpřísňují a je tak vyvíjen obrovský tlak nejen na dodavatele obráběných produktů, ale v první řadě hlavně na konstruktéry výrobních strojů. Avšak i přes snahu konstruktérů o výrobu co nejpřesnějšího stroje a snahu inženýrů o vhodné nastavení procesu může dojít k nežádoucím výsledkům. Obráběcí stroj je soustava, na kterou působí množství okolních vlivů ovlivňujících jeho přesnost a také samotná konstrukce stroje určuje přesnost obrábění.

Možnými vnějšími aspekty, jež mohou ovlivnit přesnost obráběcího procesu jsou samotné okolí stroje, jeho základy, vlastnosti obráběného materiálu, či upnutí polotovaru. Mezi vnitřní aspekty pak patří například vlastnosti struktury stroje či jeho geometrické vlastnosti.

Neustále zkoumaným tématem je problematika samobuzených vibrací. V dnešní době již existuje řada možností předcházení a kompenzace samobuzených vibrací. Sestavení takových zásahů však vyžaduje řadu zkoušek a experimentů. Jelikož je ale samobuzené kmitání jedním z nejčastěji se vyskytujících doprovodných jevů při obrábění, a žádná z možností nezaručuje komplexní ochranu proti tomuto typu vibrací, jsou samobuzené vibrace stále aktuálně řešeným tématem.

Tato diplomová práce se zabývá zvýšením odolnosti stroje proti účinku samobuzených vibrací. Cíly práce je provést rozbor současného stavu vědy a techniky této problematiky, systémový rozbor řešené problematiky, návrh metodiky predikce samobuzeného kmitání pro CNC stroje nerotačních obrobků, a bude-li to možné, zrealizovat podpurná měření.

Na úvod diplomové práce je zpracován stručný rozbor současného stavu vědy a techniky problematiky samobuzených vibrací pro lepší přehled a orientaci v této problematice. Celá diplomová práce je zpracována za využití atributů systémového přístupu, jež jsou v práci popsány. Rovněž byl sestaven systémový rozbor vlivů působících na CNC frézku a vlivů samotné CNC frézky z pohledu výrobní přesnosti, který poukazuje na systematické řešení dané problematiky, což by mělo být základním přístupem při řešení jakéhokoliv problému.

Další kapitolou v této diplomové práci je případová studie vibrací na CNC frézce v předemné firmě. Je zde popsáno výrobní zařízení a proces, při kterém se firma potýká s nekvalitně obroběným povrchem v důsledku působení vibrací. Na stroji byla provedena potřebná měření poukazující na přítomnost vibrací během obrábění.

V následující kapitole je vypracována důkladná rešerše na téma samobuzených vibrací. V této kapitole je popsán vliv samobuzených vibrací na proces obrábění a stroj samotný. Dále je zde uveden princip vzniku samobuzených vibrací, vliv rezných podmínek na problematiku samobuzených vibrací a možnosti jejich předejití a kompenzace.

Jedním z cílů byl také návrh metodiky predikce samobuzeného kmitání u obráběcího stroje pro nerotační obrobky a návrh možného způsobu řešení kompenzace již vzniklých vibrací tohoto typu. Zmíněné cíle jsou rovněž zapracovány v dalších kapitolách této diplomové práce.

2 ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Samobuzené kmitání patří mezi jeden z nejčastěji se vyskytujících doprovodných jevů procesu obrábění. Výskyt samobuzených vibrací během procesu obrábění neovlivňuje pouze výsledný produkt, ale má také velmi nežádoucí vliv na strojní součásti a stroj samotný. Tento typ vibrací u obrobku zapříčiňuje nedokonale obrobený povrch, a tím nedodržení požadavků na výslednou texturu povrchu. Vlivem samobuzených vibrací je stroj během obrábění nadměrně přetěžován a jsou nadměrně namáhány jeho součásti, což vede k jejich nízké trvanlivosti. Nadměrné přetěžování stroje v důsledku působení samobuzených vibrací může vést k poškození stroje až k jeho úplnému zničení. Dalším z negativních dopadů při výskytu samobuzených vibrací je snížená produktivita v důsledku omezení výkonu stroje. Samobuzené vibrace jsou taktéž doprovázeny nepříjemným hlukem, který působí negativně na obsluhu stroje.

2.1 Vznik samobuzených vibrací

Samobuzené vibrace vznikají v průběhu řezného procesu. Existují dva základní principy jejich vzniku. Prvním z nich je princip regenerativního efektu, jež spočívá v tom, že při obrábění kmitajícím nástrojem vzniká zvlněný obrobený povrch. Při dalším obrábění jsou kmity nástroje a zvlněného povrchu obrobku vzájemně fázově posunuty a mění se tak tloušťka odebírané třísky, čímž je modulována řezná síla a celý systém je rozkmitán. Druhým principem je princip polohové vazby, kdy ke vzniku samobuzeného kmitání dochází vlivem současného kmitání ve dvou na sebe kolmých směrech. Tyto kmity jsou o stejné frekvenci, s konstantní vzájemnou fází, a zapříčiňují pohyb nástroje po elipse. Pohyb nástroje z bodu A do bodu B znamená odběr energie ze systému. Pohyb nástroje z bodu B do bodu A energii do systému dodává, což zapříčiňuje větší hloubku třísky, a tím i větší řeznou sílu. Energie dodávána do systému je větší než energie odebraná, a pokud tato nadbytečná energie není spotřebována tlumením, zvýší se amplituda kmitání a může dojít k samobuzenému kmitání. Podrobnější popis vzniku samobuzených vibrací je popsán v kapitolách 6.1 Řezný proces a 6.2 Vznik samobuzených vibrací.

2.2 Předcházení a kompenzace samobuzených vibrací

Největší slabinou obráběcího stroje při vzniku samobuzených vibrací je tuhost celé soustavy stroj – nástroj – obrobek. Nedostatečná tuhost soustavy je příčinou nestabilního řezného procesu a vzniku samobuzených kmitů. Zvýšení tuhosti soustavy, a tím stability řezného procesu je možné dosáhnout při výrobě stroje použitím vhodných materiálů, jako jsou například polymerbeton pro výrobu rámu stroje, hydrobeton pro vyplnění svařovaných konstrukcí či přírodní žula pro výrobu loží. Z konstrukčního hlediska lze tuhost soustavy zvýšit také vhodným žebrovaním částí stroje nebo použitím správné tloušťky stěn. Základním krokem pro dostatečnou tuhost soustavy je zvýšení tuhosti upnutí obrobku a nástroje.

Další možností předcházení vzniku samobuzených vibrací je vhodná volba řezných podmínek. Ke vhodné volbě řezných podmínek slouží diagram stability – lobe diagram. Diagram stability znázorňuje mezní křivku oddělující stabilní a nestabilní proces obrábění. Mezní křivka stability je závislostí mezi otáčkami vřetene a mezní šířkou třísky. Pomocí diagramu stability lze také nastavit optimální řezné podmínky tak, aby byl maximalizován výrobní výkon obráběcího stroje bez vzniku samobuzených vibrací. V případě již vzniklých

samobuzených vibrací lze proces stabilizovat vhodnou změnou řezných podmínek či změnou nástroje. Diagram stability a vhodná volba řezných podmínek je podrobněji popsána v kapitolách 6.4.2 Diagram stability a 6.3.1 Vybrané pracovní parametry ovlivňující intenzitu kmitání.

V případě, že se nepodaří předejít vzniku samobuzených vibrací, je potřeba vzniklé vibrace vhodným způsobem kompenzovat. Kompenzace samobuzených vibrací se obecně dělí na tři základní způsoby. Jedná se o kompenzaci pasivní, poloaktivní a aktivní.

Pasivní kompenzaci rozumíme použití různých pasivních tlumičů či hltičů vibrací, mezi něž patří například dynamický hltič, hydraulický držák nástrojů, tlumící vyvrtávací tyče, viskózní tlumiče apod. Dalším způsobem pasivního tlumení může být použití nástroje s nerovnoměrnou roztečí zubů a s nestejným stoupáním šroubovice nástroje. Bližší popis pasivní kompenzace samobuzených vibrací a vybraných tlumících prostředků je vypracován v kapitole 6.4.3 Pasivní kompenzace vibrací.

Nahrazením pasivního členu při návrhu dynamického hltiče členem poloaktivním dosáhneme poloaktivního tlumení vibrací. Poloaktivní tlumiče řídí velikost tlumící síly, přičemž energii vzniklou samobuzenými vibracemi ze systému pouze odebírají a nedochází tak k destabilizaci systému. Mezi poloaktivní tlumiče patří například hydraulický tlumič s proměnnými škrťacími ventily či elektoreologické a magnetoreologické tlumiče, jejichž podrobnější popis je uveden v kapitole 6.4.4 Poloaktivní kompenzace vibrací.

Aktivní tlumení vibrací je poněkud komplikovanější. Systém aktivního tlumení zahrnuje množství senzorů pro snímání otáček vřetene, výpočet řezné síly, aktuátory a zpětnou vazbu. V těchto tlumících systémech mohou být použity například piezoelektrické aktuátory, magnetická ložiska, chytré kapaliny nebo aktivní hltiče. Systémy jsou schopny pracovat v automatickém režimu a měnit frekvenční charakteristiky a vibrační signály přímo v procesu, nicméně za cenu prodloužení strojního času. Mezi systémy aktivního tlumení řadíme ku příkladu již zmíněná magnetická ložiska a piezoaktuátory nebo také systém Okuma Machining Navi či systém dynamické výkonnosti Heidenhain. Aktivní kompenzace vibrací spolu s vybranými systémy je blíže popsána v kapitole 6.4.5 Aktivní kompenzace vibrací.

Přestože existuje řada možností předcházení a kompenzace samobuzených vibrací, je toto téma stále aktuální, a firmy vyvíjejí snahu vynalézt komplexní systém pro ochranu stroje před samobuzenými vibracemi.

3 TEORIE SYSTÉMOVÉHO PŘÍSTUPU

K dosažení požadovaných výsledků při jakékoliv činnosti je důležité provádět úkony systematicky. Systémový přístup lze vnímat jako „návod“ ke zdařilému a efektivnímu vykonávání činností při aplikaci atributů systémového přístupu. Jednotlivé atributy jsou popsány v podkapitole 0. Před samotnou aplikací systémového přístupu na řešený problém by mělo dojít k vymezení základních pojmů a struktury technické soustavy [1]. Systémový přístup je základem při řešení jakékoliv úlohy, u které chceme dosáhnout zdárného a relevantního výsledku.

3.1 Strukturovanost technické soustavy

Strukturovanost je základní vlastností technických objektů. Strukturovanost znamená, že na objektu lze vymezit další prvek, který má charakter entity vyšší úrovně [1]. Se strukturovaností souvisejí pojmy prvek, soustava a systém.

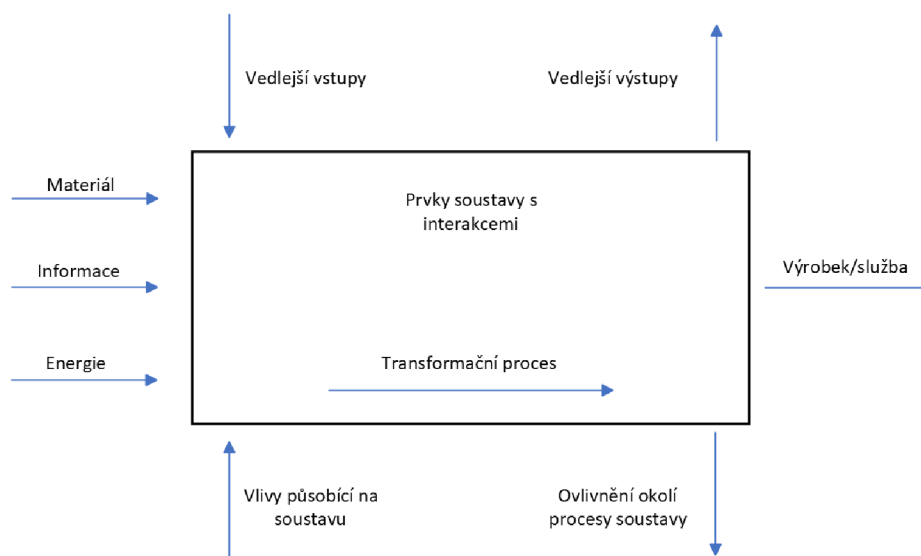
Prvek je každá část soustavy, kterou lze vymezit na rozlišovací úrovni, přičemž na této rozlišovací úrovni tvoří celek [1].

“Soustava je reálný nebo abstraktní objekt se systémovými vlastnostmi, který může být na dané rozlišovací úrovni vyšetřován, nebo vytvářen jako soubor jeho částí a vazeb mezi nimi a probíhajícími interakcí” [1].

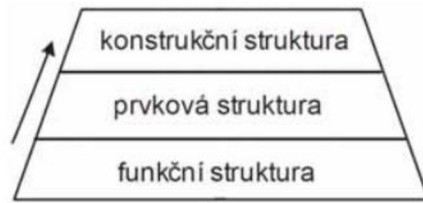
Systém je abstraktní objekt mající systémové vlastnosti a je účelně vytvořený s cílem vyřešit konkrétní problém. Běžně se v praxi používá jako synonymum pojmu soustava [1].

3.2 Struktura technické soustavy

Strukturou technické soustavy myslíme množinu prvků a jejich interakci tvořící celek. Obecné schéma technické soustavy je zobrazeno na Obr. 1). Dle toho, jaké máme typy prvků, rozlišujeme strukturu funkční, prvkovou a konstrukční. Tyto struktury jsou uspořádány hierarchicky (Obr. 2)) a při návrhu technické soustavy postupujeme od funkční, přes prvkovou, ke konstrukční struktuře [1].



Obr. 1) Obecné schéma technické soustavy [1]



Obr. 2) Hierarchické uspořádání struktur [1]

3.3 Systémové atributy

Tyto atributy vznikly na základě odpozorovaných skutečností z každodenního běžného a profesního života a rozdělujeme je do pěti základních skupin. Aby výsledky byly relevantní, je nutné během řešení jakéhokoli problému postupovat systematicky, tudíž aplikovat atributy uvedené v následujících podkapitolách [2].

3.3.1 První podskupina systémových atributů

V první podskupině jsou uvedeny atributy, které lze považovat za předpoklady k aplikaci systémového přístupu [2].

Atribut A0 – vymezení entity. V první řadě je nejdůležitější vymezit obsahově, logicky a lingvisticky to, co je předmětem dané činnosti [2].

Atribut A1 – požadavek pojmové čistoty. Pojmová čistota znamená obsahově i významově správné vymezení pojmů spojených s danou entitou. Vymezením pojmů dosáhneme správného dorozumění se a pochopení. Dodržování pojmové čistoty je jakousi komunikační povinností každého z nás, ať už v životě osobním či profesním [2].

Atribut A2 – vymezení a formulace problému. Při každém řešení problému je nutné ujasnit si o co se jedná a čeho má být dosaženo. Na základě celkové analýzy situace se vymezí, co je pro ni podstatné a poté se formuluje problém [2].

3.3.2 Druhá podskupina systémových atributů

V této skupině jsou atributy doporučující, jakým způsobem přistupovat k analyzovaným entitám a formulovaným problémům [2].

Atribut A3 – posuzování entit strukturovaně. Základní vlastností všech entit je strukturovanost. Znamená to, že na entitě je možné vymezit další prvek, jenž má vyšší rozlišovací úroveň. Strukturovaný přístup usnadňuje analýzu entity, formulaci jejich problémů a jejich řešení [2].

Atribut A4 – posuzování entit účelově. Jedná se o posuzování podstatnosti všeho, co je ve vztahu k entitě [2].

Atribut A5 – posuzování entity komplexně. Entity by měly být posuzovány z hlediska vnějších a vnitřních vazeb a jejich interakcí. Vnější vazby a interakce probíhají mezi entitou a jejím okolím, kdežto vnitřní vazby jsou vazby uvnitř entity. Komplexnost při řešení problematiky často vyžaduje mezioborovou spolupráci [2].

Atribut A6 – posuzování entity hierarchicky. Hierarchické uspořádání znamená, že každý prvek kromě nevyššího je podřízen právě jednomu nadřízenému [2].

Atribut A7 – posuzování entity orientovaně. U entity jsou z určitého hlediska vytvářeny sledy skutečností, jevů a charakteristik. Existuje orientovanost příčinná, hierarchická a časová [2].

3.3.3 Třetí podskupina systémových atributů

Ve třetí podskupině jsou atributy doporučující, jaké vlastnosti by u entit měly být posuzovány. Podstatnými vlastnostmi jsou: dynamičnost, úroňová vyváženost, otevřenost, cílové chování, potenciální výskyt deterministického chaosu a synergických procesů [2].

Atribut A8 – posuzování entity z hlediska otevřenosti. Otevřenost entity znamená, že existují vazby mezi ní a mezi jejím okolím, na nichž se realizují interakce. Otevřenost je základní podmínkou entity proto, aby se ve vztahu k okolí mohla chovat dynamicky [2].

Atribut A9 – posuzování entity z pohledu úroňové vyváženosti. Úroňová vyváženost znamená, že všechny prvky a vazby v soustavě mají stejnou kvalitu posuzovaných vlastností [2].

Atribut A10 – posuzování entity z hlediska dynamičnosti. Dynamičnost znamená, že při veškerých činnostech s entitami je nutno uvažovat časové závislosti. Z pohledu časové závislosti je potřeba zanalyzovat podmínky řešeného problému spolu s jeho cílem. Všechny veličiny systému by měly být podrobeny analýze dynamičnosti, jelikož v opačném případě, při nerespektování časové proměnnosti, by mohlo dojít ke znehodnocení výsledků řešení [2].

Atribut A11 – posuzování entity z hlediska stochastičnosti a determinističnosti. Stochastičnost a determinističnost chápeme z hlediska veličin a z hlediska procesů [2].

Hledisko veličin: stochastické veličiny jsou určeny množinou čísel, patří zde tedy veličiny intervalové, pravděpodobnostní a náhodné. Deterministické veličiny jsou určeny pouze jednou hodnotou na dané úrovni rozlišitelnosti a s objektivností [2].

Hledisko procesu: v případě, kdy v počátečním stavu entity nelze předvídat charakter procesů s ní spojených, jejich stavů a chování, je entita považována za stochastickou. Protikladem je proces deterministický, u něhož umíme zmíněné atributy do budoucna předvídat [2].

Atribut A12 – posuzování cílového chování entity. Cílové chování entity odpovídá požadavkům, které jsou od ní očekávány. Chování lze také charakterizovat jako projev stavu entity, do kterého se dostala po uskutečnění všech procesů [2].

Atribut A13 – posuzování entity z hlediska výskytu deterministického chaosu a samoorganizace. S chaosem se spojují pojmy jako jsou: nepředvídatelnost, nepřehlednost, nepochopitelnost, nejasnost, nepřehlednost, nejednoznačnost, neuspořádanost apod. Rozlišuje se chaos subjektový, chaos objektový a synergické procesy [2].

Chaos subjektový: vyskytuje se u člověka a má dvě podoby. První podobou je přímý subjektový chaos, při němž subjekt vytváří chaos svými projevy a činy. Druhou podobou je nepřímý subjektový chaos, kdy subjekt považuje za chaotické to, co se děje v jeho okolí.

Chaos objektový: jedná se o chaos, který vzniká na objektech. Chaotické chování entity se vyznačuje nepředvídatelností následků na určité příčiny a tyto entity jsou rovněž velmi citlivé na odchylky v počátečních podmínkách vstupujících do procesů [2].

Synergické procesy: vyskytují se u dynamických otevřených soustav, které nejsou ve stavu termodynamické rovnováhy. Jedná se o samoorganizovaný vznik nových struktur vázaných na přírodní zákony. Na těchto nově vytvořených strukturách probíhají nové procesy a vznikají

nová chování. U neživých soustav mohou být tyto procesy vyvolány cílenými aktivacemi člověka. V živých soustavách tyto procesy patří k jejich přirozeným vlastnostem [2].

3.3.4 Čtvrtá podskupina systémových atributů

V této podskupině se nacházejí atributy doporučující, aby se všechny činnosti člověka uskutečňovaly na současné úrovni poznatků vědy a techniky s využitím progresivních trendů [2].

Atribut A14 – využívání poznatků současné vědy a techniky. Tento atribut poukazuje na to, že při postupování dle systémového přístupu by se mělo využívat všeho nového a progresivního z oblasti vědy a techniky, z oblasti metod, teorií a přístupů. K progresivním řešením problémů se v dnešní době řadí modelování, používání logických a statistických metod, metod tvůrčího myšlení, metod analýzy a syntézy a další. Při řešení problémů by nemělo být používáno zastaralých metod a přístupů [2].

Atribut A15 – používání progresivních a heuristických přístupů v nestandardních situacích. Nestandardní situace u objektů či subjektů nastávají tehdy, nelze-li je řešit známými činnostmi. Jedná se tedy o problémové situace, při jejichž řešení subjekt používá heuristické a progresivní přístupy a tvůrčí, rozhodovací a hodnotící činnosti. S rozvojem umělé inteligence by mělo množství nestandardních situací klesat [2].

Atribut A16 – vytváření algoritmů činností. Algoritmus lze chápat jako posloupnost určitých činností vedoucí ke splnění subjektem vymezeného cíle. Pojmeme algoritmus činností zdůrazňujeme vědomé tvoření postupů k vyřešení určitých tříd úkolů. Charakteristickými vlastnostmi pro tyto algoritmy jsou hromadnost, zobecnění a uživatelská přijatelnost, čímž dosáhneme nezávislosti procesu a výsledku řešení na jednání jedince. Algoritmus se pak stává zobecněným přístupem k řešení obdobných tříd úkolů [2].

Atribut A17 – analýza výsledků řešení problémů. Pouhá prezentace výsledků není dostačujícím řešením problému. Všechna získaná řešení musí být zanalyzována, zda jsou v souladu se základními fyzikálními, chemickými a biologickými principy a zda jsou věrohodné. Do závěrečného hodnocení se realizuje syntéza získaných poznatků s využitím výsledků analýzy [2].

3.3.5 Pátá podskupina systémových atributů

Poslední podskupina se zabývá etickými postoji subjektů k entitám. Jedná se zejména o odpovědnost za věrohodnost výsledků, dodržování příslušných etických norem a zájem o začlenění výsledků řešení a jejich důsledků do okolí entity [2].

Atribut A18 – odpovědnost za věrohodnost výsledků řešení problémů. Tento atribut je svázán s povinností k odpovědnosti za věrohodnost a správnost výsledků řešení dané problematiky [2].

Atribut A19 – dodržování etických norem. Člověk, jakožto subjekt pracující na řešení problému by měl jednat v souladu s etickými zásadami. Zásady jednání mohou mít obecný charakter (slušnost, přímost, čestnost, slušnost), osobnostní charakter (zodpovědnost, povinnost, odborná a vědecká skromnost, poctivost, sebekritičnost), společenský charakter (povinnost k odpovědnosti) či geo-environmentální charakter (šetrnost k přírodě a vesmíru, neničit a příliš nezatěžovat životní prostředí) [2].

Atribut A20 – sledování způsobu implementace výsledků. Mnoho řešení vědeckých či odborných problémů končí odevzdáním práce zadavateli projektu. Tento způsob ukončení

projektu je standardní, nicméně není nejvhodnější, jelikož se řešiteli problému nedostane zpětné vazby, která by mohla ovlivnit jeho další činnosti. V případě, že řešitel problému sleduje způsob implementace výsledků, může si z odhalených nedostatků vzít ponaučení a dále rozvinout své poznávací činnosti. Sledování způsobu implementace výsledků lze rovněž využít při pozorování dopadu výsledků řešení na lidi, společnost či přírodu [2].

4 SYSTÉMOVÝ ROZBOR VLIVŮ PŮSOBÍCÍCH NA CNC FRÉZKU Z POHLEDU VÝROBNÍ PŘESNOSTI

Vysoká výrobní přesnost CNC obráběcích strojů je v dnešní době považována za standard. Nicméně je zde mnoho faktorů negativně ovlivňujících výrobní přesnost stroje, se kterými je nutno se vypořádat. Mezi tyto faktory patří například chyby tepelné a geometrické, vlivy upnutí obrobku či vlivy samotného obráběcího procesu a v neposlední řadě i vlivy řídicího systému.

Systémový rozbor bude proveden na frézce používané ve výrobním závodě strojího zaměření. Představení společnosti a vlastní systémový rozbor je popsán v následujících podkapitolách.

4.1 Představení společnosti

Společnost Helafries Czech Republic s.r.o. se sídlem v Ostravě je součástí skupiny Helafries. Firma byla založena v roce 2005 jako výrobní závod kompresorů do klimatizačních jednotek. Následně byla rozšířena o elektronické a elektromechanické součásti tepelných zařízení, výrobu tlakových láhví a další komponenty do klimatizačních zařízení.

Společnost je založena na principu „Zákazník na prvním místě.“ Cílem je poskytovat zákazníkům vysoce kvalitní výrobky. Neustálé zvyšování efektivnosti systému řízení kvality, životního prostředí, bezpečnosti práce a ochrany zdraví při práci je závazkem firmy vůči svým zákazníkům, neboť je jejím cílem poskytovat zákazníkům výrobky nejvyšší kvality, a přitom přispívat k ochraně životního prostředí a zajistit zaměstnancům bezpečné a zdravé pracovní podmínky.

Společnost splňuje certifikace ČSN EN ISO 9001:2016 pro zajištění kvality, ČSN EN ISO 14001:2015 pro zajištění systému životního prostředí a ČSN EN ISO 45001:2018 pro zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví při práci. Kvůli výrobě tlakových nádob je ve firmě také splňována certifikace PED 2014/68/EU.

4.2 Výrobní portfolio

Helafries vyrábí kompresory pro split a multi-split klimatizační jednotky. Veškeré kompresory jsou synonymem perfektně tichého výkonu, vynikající účinnosti a absolutní spolehlivosti. Swingové a scrollové kompresory nabízejí jedinečné technologie s tichým provozem a větší úsporou energie než běžné modely kompresorů. Swingové konstrukce eliminují problémy, jako jsou lopátkové oděry a úniky plynu, které jsou v tradičních rotačních kompresorech běžné. Revoluční scrollové technologie přinášejí všestrannou spolehlivost a skvělou obsluhu hotových klimatizačních jednotek. Nově se začaly vyrábět kompresory typu Swing již s použitím alternativního chladiva CO₂. CO₂ kompresory jsou zacílené na chladírenské systémy. Kompresory jsou dále implementovány do systému klimatizační jednotky, jako je zobrazeno na Obr. 4) [3].

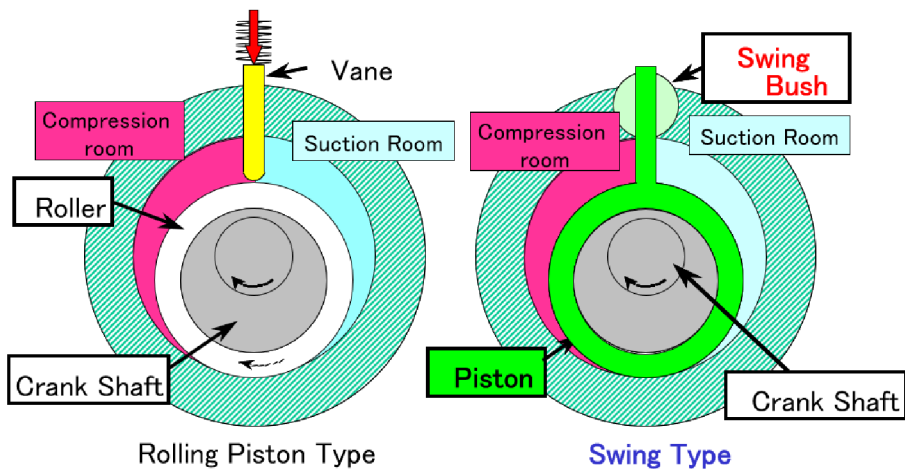
4.2.1 Swing kompresory

Součástí všech swingových (pístových) kompresorů je vysoce výkonný stejnosměrný motor se silnými neodýmiovými (NdFeB) magnety, které jsou 10x silnější než konvenční feritové magnety. Maximalizací točivého momentu dosahují tyto stejnosměrné motory až o 20 % vyšší

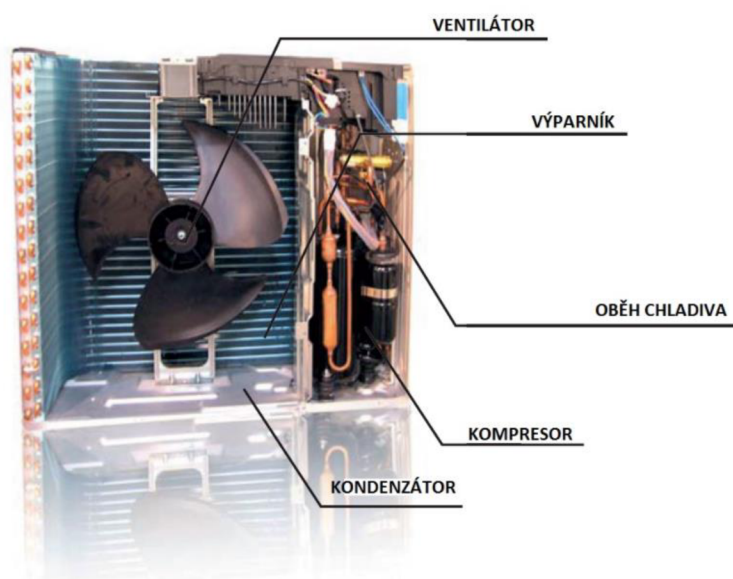
účinnosti než běžné motory na střídavý nebo stejnosměrný proud. Patentovaná konstrukce swingového kompresoru je založena na konceptu kyvného pístu, který má kompresní prostory zatěsněny unikátní metodou pomocí kyvných (Swing) ložisek. Tím došlo k minimalizaci ztrát mezi třecí čepelí a rotační plochou pístu a zvýšení účinnosti. Výsledkem je klimatizace, která tak pracuje efektivně a tiše [3]. Rozdíl je patrný z Obr. 3).

4.2.2 Scroll kompresory

Scrollový kompresor (nazývaný také spirálový kompresor) obsahuje dva protichůdné spirálovité orbity. Jeden zůstává fixní, zatímco druhý obíhá okolo statické části. Proti sobě se pohybující orbity vytváří postupně se zmenšující kapsy, které jsou tlačeny z vnějšího obvodu orbity, k jejímu středu, kde takto dochází ke kompresi chladiva až po dosažení požadovaného tlaku. Stlačené chladivo se poté protlačí výstupním otvorem a opouští kompresor. Scrollové kompresory též používají bezkartáčové stejnosměrné elektromotory s IPM (vnitřní permanentní magnet). Tyto kompresory mohou používat alternativní chladiva [3].



Obr. 3) Swing kompresor [3]



Obr. 4) Implementace kompresoru do jednotky [3]

4.3 Strojní zařízení

Ve firmě se používá mnoho typů strojních zařízení od různých výrobců. Mezi nejpoužívanější však patří CNC soustruhy a CNC frézky. Právě na CNC frézku je zaměřena případová studie vypracovaná v této diplomové práci. Konkrétně se jedná o frézku HX300iG. Frézka se ve firmě využívá k obrábění tenkostěnných plášťů kompresorů a je zobrazena na Obr. 5).



Obr. 5) Frézka Kitamura HX300iG

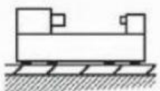
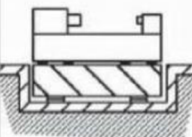
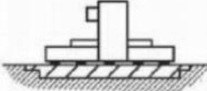
4.4 Systémový rozbor faktorů ovlivňujících přesnost obrábění

Schéma systémového rozboru vnějších a vnitřních vlivů působících na CNC stroj a ovlivňujících jeho výrobní přesnost je přiloženo v příloze G. V následujících podkapitolách jsou popsány některé vnější vlivy působící na stroj. Podrobnější schéma samotné soustavy a jejich vnitřních vlivů jsou předmětem kapitoly 4.5 Systémový rozbor mechanické soustavy.

4.4.1 Základy stroje

Nesprávné uložení stroje může mít vliv na proces obrábění a zhoršovat jeho kvalitu. Správným uložení obráběcího stroje rozumíme jeho připojení k vhodnému základu pomocí správného počtu optimálně rozmístěných upínacích prvků. Samotný základ musí být schopný snášet zatížení statickými i dynamickými silami bez deformace a musí zabránit změnám polohy upínacích prvků, které mohou způsobit chyby polohování. Základ dále musí být schopen absorbovat dynamické účinky vznikající při provozu stroje, zamezit přenosu chvění a vibrací na okolní stroje a zároveň bránit přenosu chvění a vibrací z okolí. Nevhodné uložení stroje má negativní dopad na jeho dynamickou a statickou tuhost, a tím i na možnost dosažení výsledků obrábění, které výrobce stroje, jeho uživatel, i zákazník očekávají. Vlivem nevhodného uložení stroje se snižuje přesnost polohování a kvalita obráběného povrchu, dochází k nežádoucím deformacím od pohyblivých hmot a možnost nasazení ideálních řezných parametrů se stává problematickou [4].

Přenos chvění a vibrací na okolní stroje ovlivňuje jejich produktivitu a přesnost. V případě nevhodně uloženého stroje přenos vibrací a chvění z okolí násobí negativní účinky vibrací generovaných strojem samotným. U přesných obráběcích strojů, zejména u strojů s dlouhým ložem, je nezbytné uložení na takový základ, který dostatečně zvýší jejich tuhost [4]. Způsob, kterým lze dostatečně zvýšit tuhost lože je jeho ukotvení. Ukotvením lože na správně dimenzovaný základ se může tuhost celku zvýšit až čtyřikrát [5]. Druhy použitých uložení stroje na základ v závislosti na jejich vlastnosti a použití je zobrazeno na Obr. 6).

Druh uložení stroje na základ			
	Volné ustavení na zákl. desce - podlaze	Uložení na samostatném izolovaném základě	uložení na samostatém základě
Použití - vlastnosti			
Oblast využití	malé (lehké) stroje	přesné obr. stroje	střední a velké obráběcí stroje
tuhost. obr. stroje	vlastní tuhost dobrá (rám samonosný)	celk. tuhost rámu nízká (rám nesamonosný)	celková tuhost rámu nízká (rám nesamonosný)
účel ukládacích prvků	tlumení + ustavení stroje	tlumení - ustavení stroje - tuhé spjení se zákl.	ustavení stroje + tuhé spohjení se základem

Obr. 6) Uložení stroje v závislosti na použití [6]

4.4.2 Vlivy působící na nosnou soustavu

Na nosnou soustavu stroje působí řada vlivů vznikajících přímo v obráběcím stroji nebo v jeho okolí. Z pevnostního hlediska bývají rámy často předimenzovány díky snaze o dosažení stabilního, bezporuchového, a především přesného fungování stroje. Na nosnou část stroje jsou kladeny největší nároky z hlediska tuhosti a dynamické a tepelné stability [7].

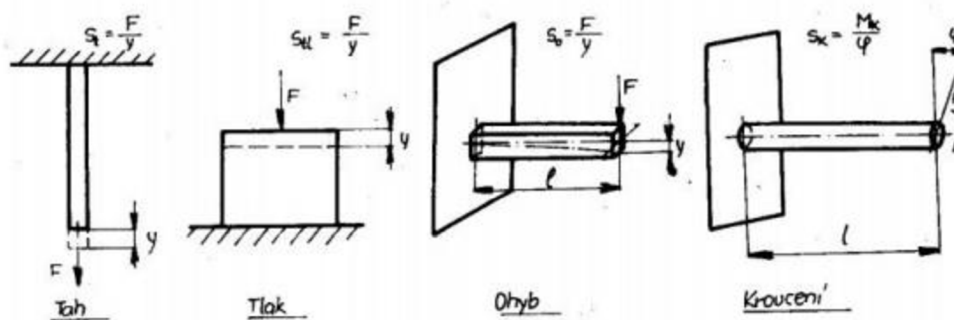
Statická tuhost

Deformace nosných částí stroje má značný význam pro udržení vzájemné polohy pracovních ploch, což má velký vliv na pracovní přesnost obráběcího stroje. Statická tuhost znamená schopnost konstrukce odolat deformacím. Hodnota statické tuhosti musí být vyšší než vznikající deformace. Zajištění statické tuhosti lze dosáhnout měření m nebo výpočtem a lze ji posuzovat jako celek nebo jako tuhost dílčích částí stroje. Nejčastěji se vyskytujícími zatíženími jsou zatížení tahem, tlakem, ohybem a krutem (Obr. 7)) [7]. Zvýšením statické tuhosti nosné soustavy zajistíme vyšší pracovní přesnost stroje.

Dynamika obráběcího stroje

Obráběcí stroj je systémem vzájemně spojených těles, které se při obrábění navzájem ovlivňují. Kmitání vznikající v průběhu procesu obrábění je nedílnou součástí práce stroje. Vzniklé vibrace zvyšují namáhání stroje, které lze dospět až k mezi pevnosti materiálu součástí. Tento nežádoucí jev snižuje přesnost stroje a urychluje opotřebení součástí, dále ovlivňuje kvalitu obrobeneho povrchu a snižuje trvanlivost nástrojů. Nosná soustava stroje musí být

navrhnutá tak, aby byla dynamicky stabilní, jinak řečeno odolná proti kmitání. Nejdůležitějším úkolem v konstrukci rámu je vyhnout se rezonančnímu jevu. Rezonanční jev je stav, kdy se vlastní frekvence rámu rovná frekvenci z okolí. V takovém případě mohou výchylky nezadržitelně narůstat a tím dochází k poruše stroje. Kmitání je u obráběcích strojů rozděleno na čtyři druhy. Jedná se o kmitání volné, vynucené, samobuzené a trhavé pohyby [7].



Obr. 7) Druhy zatížení [7]

Teplotní stabilita

V průběhu své činnosti jsou obráběcí stroje pod vlivem mnoha zdrojů tepla. Teplo působící na stroj způsobuje nežádoucí deformace, které pak ovlivňují jeho geometrickou přesnost a kvalitu obrobenej plochy [7].

Odstranění negativních zdrojů tepla, a tím zvýšení teplotní stability lze dosáhnout několika způsoby [7]:

- Vhodně dimenzovat konstrukci,
- využít náležitýho materiálu,
- plynule odvádět třísky,
- dostatečně chladit.

4.4.3 Obrobek

Správně obrobenej polotovár je výstupem z procesu obrábění a na jeho geometrickou přesnost jsou kladeny vysoké požadavky. Velkou roli hraje správné ustavení nástroje vůči obrobku, které omezí chvění při obrábění. Samotné upnutí obrobku má však také vliv na kvalitu výsledného obrobenej povrchu. Při procesu obrábění je obrobek také deformován teplotními vlivy vznikajícími v průběhu obrábění, proto je důležité během celého procesu obrobek měřit a na základě měření případné výchylky vyrovnávat pomocí kompenzačního algoritmu.

Upnutí obrobku na frézce musí být bezpečné a dostatečně pevné a nesmí docházet k jeho deformaci vlivem upnutí. U frézování vznikají velké řezné síly, a proto by síly a tlaky vzniklé při obrábění měly působit zejména proti pevným částem upínacího zařízení, aby nedocházelo ke vzniku chvění. Na frézku se upínací prvky připevňují převážně upínacími šrouby ve tvaru T, které jsou vsunuty do drážek pracovní plochy frézky a utahují se maticí viz Obr. 8) [8].

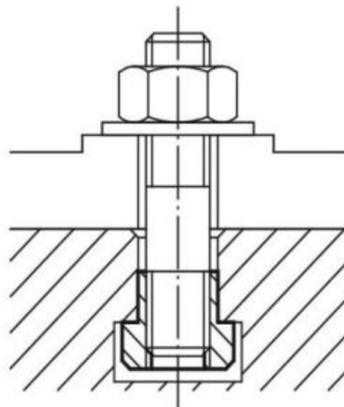
Pro upnutí obrobků se při frézování často využívá upínacích přípravků. Použití upínacích přípravků zjednodušuje a urychluje nastavení obrobku a tím ulehčuje jeho upnutí. Díky přípravkům se taktéž zvyšuje pracovní přesnost a je zde možnost upnutí více kusů najednou, což vede ke zvýšení produktivity. Frézovací přípravky mohou být univerzální nebo speciální. Mezi univerzální se řadí univerzální sklíčidlo, strojní svěráky a dělící přístroje a jsou

uplatněny především v kusové výrobě při upínání obrobků různých tvarů a velikostí. Speciální frézovací přípravky se využívají zejména u sériové výroby, kde je nižší variabilita výrobků. Přípravky mohou být upnuty mechanicky, pneumaticky, hydraulicky či elektromagneticky [8].

Požadavky na upínání obrobku

Správné upnutí obrobku je jedním z kroků, jak zajistit větší přesnost obráběcího procesu. Základními požadavky na upnutí obrobku jsou [9]:

- správná poloha obrobku vůči nástroji,
 - dodržení určitých zásad pro umístění obrobku
- jednoduchost upnutí,
- dostatečná tuhost a pevnost upnutí,
- bezpečnost upnutí,
 - obrobek musí být v upínacím prostředku dobře zajištěn, aby se vlivem působení odstředivé síly a síly řezného odporu neuvolnil
- rychlost upínání,
 - ta závisí na druhu upínacího zařízení, velikosti, váze a tvaru obrobku.
- minimální náklady na provedení upnutí,
- přesnost upínání,
 - ta závisí na přesnosti vlastního upínače (samotná konstrukce upínače musí být navržena tak, aby se obrobek při působení upínacích a řezných sil při obráběcím procesu nedeformoval)
- odolnost vůči vibracím,
- životnost upínacího prostředku,
- soustřednost a vyváženost rotujících částí,
- nesmí bránit odchodu třísek a odtoku řezné kapaliny,
- nesmí bránit proměření součástí.



Obr. 8) Řez upínacím šroubem [8]

4.4.4 Teplotní gradient

Důležitým kritériem pro tepelnou deformaci je teplotní gradient neboli změna teploty. Jedná se buď o změny v čase nebo o prostorové gradienty. Změny v čase mohou být například náhlé změny teploty v důsledku otevření vrat v zimním období, které pro obráběcí stroj způsobí teplotní šok. Prostorovými gradienty mohou být rozdíly teplot v různé výšce nad podlahou nebo rozdíly v různých místech ve stejné výšce [10].

Tepelná chyba je jedním z hlavních faktorů ovlivňujících výrobní přesnost obráběcích strojů. Tento faktor může být způsoben vnitřními nebo vnějšími zdroji tepla [11].

Zdroje tepla

Vnitřní zdroje tepla vznikají při vlastním obráběcím procesu. Lze je rozdělit na teplo od řezného procesu a na teplo vytvářené agregáty či mechanismy stroje. Mezi tyto zdroje se řadí vřetenové motory, tření v převodech, uložení v ložiscích a vedení [10]. Vnějšími zdroji tepla mohou být topná tělesa, ventilátory, ostatní stroje nacházející se na pracovišti, vlastní teplota obráběného dílu a další. Činiteli tepla jsou také například sluneční záření či tepelné záření z jiných těles, teplota vzduchu, chladicí kapaliny a mazací prostředky. Příčinou tepelných chyb jsou změny teploty v okolí a vnitřní tepelné ztráty. Rozdělení teplotních rušivých vlivů lze vidět na Obr. 9) [11].



Obr. 9) Teplotní rušivé vlivy [11]

4.4.5 Kompenzační algoritmus

Jak již bylo zmíněno, mezi nepříznivě ovlivňující faktory výrobní přesnosti patří také tepelné a geometrické chyby. Tyto chyby lze regulovat mechanicky, například vyrovnáním lože, či opracováním vodících ploch. Druhým způsobem je regulace chyb pomocí SW [11].

Kompenzační algoritmus slouží k regulaci chyb a zvýšení přesnosti obrábění. Obecně funguje tak, že se z naměřených vstupních dat vytvoří model a na základě sestaveného modelu dojde k ovlivnění plánovače trajektorie v řídicím systému a k následné kompenzaci.

Kompenzace tepelné chyby

Redukce tepelné chyby může být realizována dvěma způsoby. Prvním způsobem je vyloučení chyb použitím tepelně stabilních materiálů, mezi něž se řadí různé kompozitní materiály vyztužené vlákny, hybridní materiály, polymerbeton apod. Přímou v konstrukci stroje lze tepelnou chybu snížit izolací zdrojů nebo tepelně symetrickým uspořádáním stroje. Druhým způsobem redukce tepelných chyb je jejich kompenzace. Pro teplotní kompenzaci chyb je důležitá znalost tepelného chování stroje [11].

Kompenzaci tepelné chyby rozumíme proces, při němž je chyba nastavením polohy nástroje vůči obrobku korigována. Tato metoda redukce tepelné chyby je hospodárnější než metody regulace či zamezení. Metoda je hospodárná primárně ze dvou důvodů. Prvním

důvodem je, že není potřeba drahého hardware, jako jsou různé druhy chlazení či drahé pokročilé materiály. Druhým důvodem je možnost realizace metody v jakékoliv fázi návrhu či stavby obráběcího stroje [11].

Podstatou kompenzace tepelných chyb obráběcích strojů je jejich měření či prognóza v reálném čase a následné zavedení korekcí do řídicího systému nebo dráhy nástroje. Základní přípravné práce ke kompenzaci tepelných chyb sestávají z analýzy, testování a teplotně strukturálního modelování [11]. Vstupy pro modelování teplotních deformací mohou být údaje z pohonů (hodnoty proudů procházející vinutím motorů, otáčky vřetene apod.), a také teploty měřené na různých místech konstrukce stroje a jeho okolí, zejména v blízkosti významného zdroje tepla a propadu tepla [12]. Obecný proces kompenzace tepelných chyb je složen z následujících kroků:

- Analýza rozložení teploty a odchylky polohy v místě nástroje teoretickým, experimentálním a numerickým způsobem,
- sestavení modelu tepelných chyb popisujících vztahy mezi teplotními chybami a teplotami na základně výsledků testování či analýzy,
- prognóza a kompenzace tepelných chyb dle vytvořeného modelu [11].

Geometrická kompenzace

Při procesu obrábění vznikají také chyby geometrické. Z časového hlediska tyto chyby rozlišujeme na kvazi-statické a dynamické [13].

Kvazi-statické chyby se v čase mění pozvolně. Do tohoto druhu chyb řadíme například chyby kinematické nebo chyby vznikající v důsledku oteplování částí stroje. Kvazi-statické chyby tvoří až 70 % geometrických chyb [13].

Chyby dynamické se vyznačují náhodným charakterem, a proto je poměrně složité je popsat, a tedy i kompenzovat. Tento druh chyb vzniká především vibracemi od chvějících se sousedních strojů a vibracemi od rotujícího vřetene stroje. Během procesu obrábění jsou dynamické chyby příčinou nejistoty polohy nástroje vůči obrobku [13].

Zdroje geometrických chyb mohou být následující [13]:

- a) **Kinematické chyby** – vznikají v důsledku nedokonalosti tvaru funkčních komponent a jejich vzájemné polohy. Při postupném opotřebování funkčních ploch může docházet i ke změně kinematických chyb.
- b) **Termomechanické chyby** – v důsledku ztrát na elektromotorech a kuličkových šroubech a také při vlastním procesu obrábění generuje stroj velké množství tepla. Kolísání teplot na jednotlivých částech stroje zapříčiňuje jejich smršťování a rozpínání. Tyto chyby lze eliminovat udržováním konstantní teploty stroje a jeho okolí například pomocí klimatizačních systémů. Provoz klimatizačních systémů však bývá značně nákladný.
- c) **Zatížení** – jelikož žádný stroj není dokonale tuhý, vlivem statického zatížení od tíhy obrobku či posuvných částí stroje může docházet k nezanedbatelné deformaci částí stroje. Deformace mohou vést k chybám přímosti lineárních os.
- d) **Dynamické síly** – dynamickými silami mohou být např. řezné síly při obrábění. Tyto síly lze vzhledem k jejich charakteru kompenzovat velmi obtížně.
- e) **Chyby řídicího systému** – u vyšších rychlostí posuvu nemusí být řídicí systém schopen dostatečně rychle a přesně interpolovat dráhu pohybu nástroje. Nedostatečný výpočetní výkon procesoru řídicího systému a tím způsobené

chyby lze snadno rozlišit od jiných chyb tak, že vykonáme stejnou dráhu nástroje s jinou posuvovou rychlostí. Dokončovací procesy obrábění bývají velmi precizní, a tak se využívají malé posuvové rychlosti, tudíž je konečný vliv tohoto druhu chyb nízký.

Postup kompenzace geometrických chyb je následovný. Prvním krokem procesu kompenzování je měření chyby obráběcího stroje. Následně jsou naměřené geometrické chyby vyhodnoceny a zpracovány. V dalším kroku vhodným způsobem chybu korigujeme [13].

Geometrické chyby je možno eliminovat mechanicky nebo softwarově. Mechanickým eliminováním rozumíme úkony jako je například vyrovnání lože, opracování vodících ploch apod. U softwarové eliminace lze postupovat vytvořením korekční tabulky, ve které jsou uvedeny údaje o odchylkách a jejím vložení do paměti řídicího systému stroje.

Obecně se kompenzace dělí do dvou základních skupin [13]:

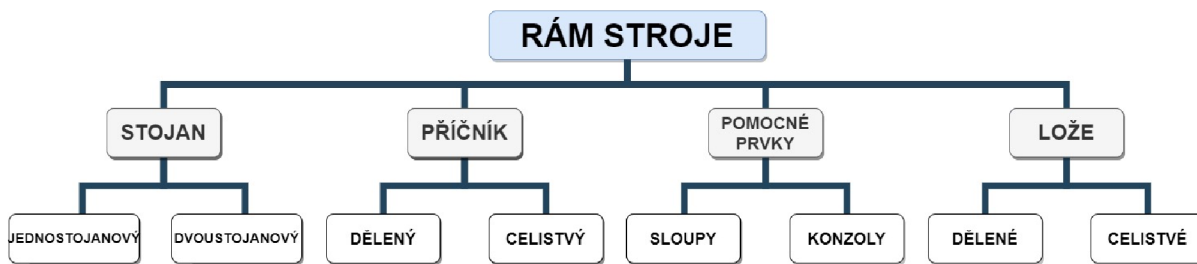
- a) **Kalibrace** – konkrétně kalibrace stroje. Při odstávce stroje jsou naměřeny chyby a následně se vkládají do řídicího systému stroje. Příkladem je kompenzace po sestavení stroje, generální opravě stroje či před obráběním obrobku složitě tvaru.
- b) **Aktivní kompenzace** – jedná se o monitorování chyb v průběhu procesu obrábění. Chyby jsou řídicím systémem průběžně vyhodnocovány a kompenzovány v reálném čase. Příkladem může být teplotní kompenzace prodloužení vřetene.

4.5 Systémový rozbor mechanické soustavy

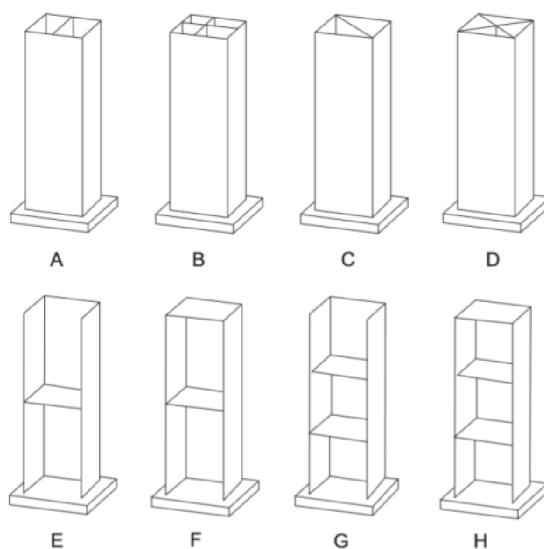
Samotná mechanická soustava – frézka a její části taktéž působí mnoho faktory mající nepříznivý vliv na přesnost obrábění a výslednou kvalitu obrobku. Systémovým rozбором vlivů působících mechanickou soustavou na proces obrábění dojdeme k problému, který je pro proces obrábění největší hrozbou. Schéma CNC frézky je zobrazeno v příloze H a její hlavní části jsou popsány v následujících podkapitolách.

4.5.1 Rám stroje

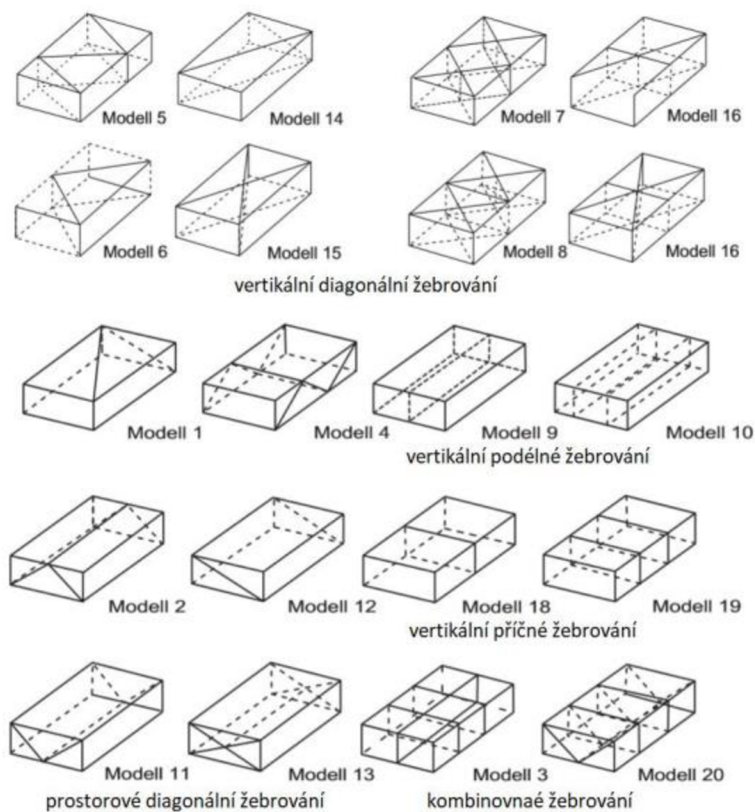
Rám obráběcího stroje je složen z loží, stojanu, příčnicku a pomocných prvků. Základní prvky rámu jsou zobrazeny na Obr. 10). Ze kterých částí se rám skládá záleží na konstrukci a provedení stroje. Přesnost obráběcího procesu závisí na tuhosti, odolnosti proti opotřebení, dynamické stabilitě a stálosti těchto částí [14]. Odolnost nosných rámu vůči krutu a ohybu lze zlepšit jejich žebrováním. Teoretické možnosti žebrování stojanů je zobrazeno na Obr. 11). Příklad žebrování loží lze vidět na Obr. 12) [15]. Při návrhu rámu stroje musí brát konstruktér v potaz mnoho aspektů, mezi něž se řadí kvalita materiálu, dobrá statická tuhost, dynamická a tepelná stabilita, snadný odvod třísek, nízká hmotnost a dobré uložení na základ [14]. Komplexní chování nosné struktury obráběcího stroje je zpravidla ovlivněno materiálem nosných dílců, konstrukčním provedením nosných dílců, provedením pohyblivých dílců, provedením spojení mezi pevnými dílci a uložení na základovou desku [6]. Pro konstrukci rámu stroje se nejčastěji využívá šedá litina, ocel a ocelolitina. Dalšími materiály nosných rámu mohou být vláknové kompozity na bázi uhlíkových vláken, přírodní žula, polymerbeton, vysokopevnostní beton a hybridní materiály. Při volbě materiálu je potřeba brát v úvahu technické a provozní vlastnosti, které musí stroj splňovat. Části rámu mohou být svařence nebo odlitky [14].



Obr. 10) Základní prvky rámu [14]



Obr. 11) Teoretické možnosti žebrování stojanu [15]



Obr. 12) Teoretické možnosti žebrování lože [15]

4.5.2 Řídicí systém CNC stroje

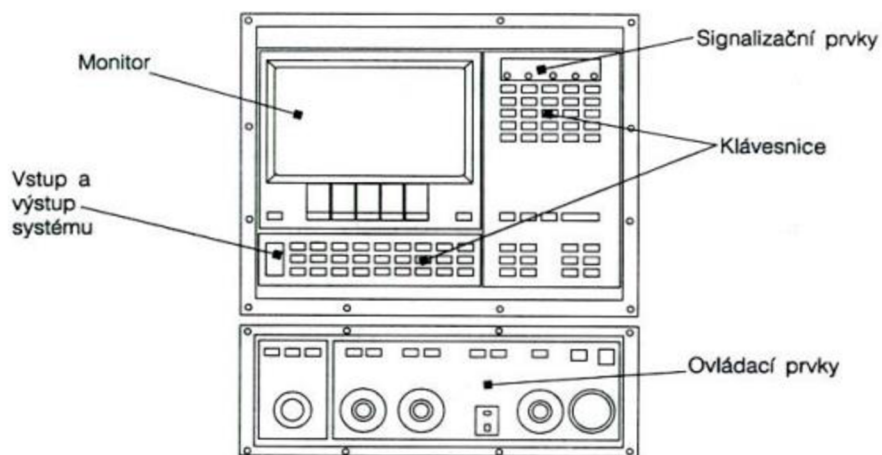
Řídicí systémy CNC strojů slouží k ovládání servopohonů na základě plánovače trajektorie řídicího systému. Systém je sestaven z paměti, interpolátoru a porovnávacích obvodů. V paměti řídicího systému jsou v číselné formě uloženy instrukce programu. Tyto instrukce obsahují předpis pro postup činností počítače, nachází se zde programy dílců, údaje o korekcích nástrojů, zpracovávaná data, posunutí počátků apod. Interpolátorem jsou zajištěny pohyby po zadané dráze. Porovnávací obvody neboli komparátory mají za úkol vlastní zpracování informací. Díky nim je systém schopen číselně vyhodnocovat rozdíly mezi skutečnou a naprogramovanou hodnotou [16].

U dnešních, moderních CNC strojů se využívá systémů se souvislým řízením. Používá se pro vytváření ploch omezených libovolnými prostorovými nebo rovinnými křivkami. Zajišťují plynulý pohyb nástroje vůči obrobku nejméně ve dvou souřadnicových osách. Funkční závislost mezi pohyby je zpracovávána interpolátorem. Při 4D a 5D řízení jsou kromě pohybu v osách X, Y a Z možné další pohyby kolem osy X nebo Y [16].

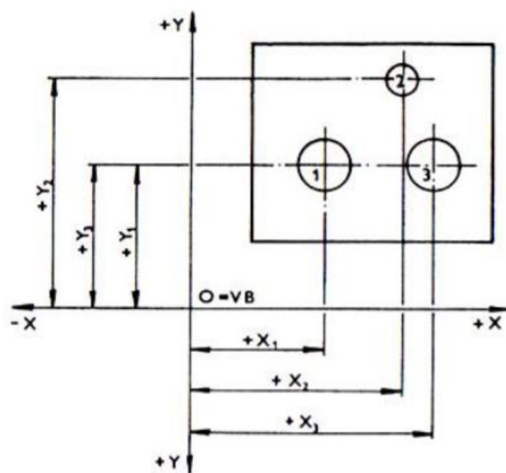
Řídicí systémy lze rozdělit dle způsobu programování na systémy s absolutním, přírůstkovým nebo kombinovaným programováním. U systému s absolutním programováním jsou všechny souřadnice bodů dráhy nástroje vztaheny k předem zvolenému počátku – nulovému bodu obrobku viz Obr. 14). U systémů s přírůstkovým programováním jsou souřadnice naprogramovaných bodů vztaheny vzhledem k bodům předcházejícím. To znamená, že každý předcházející bod je považován za výchozí. Programuje se po přírůstku. Schéma přírůstkového programování je zobrazeno na Obr. 15). Řídicí systémy s kombinovaným programováním jsou kombinací absolutního a přírůstkového programování a lze v rámci jednoho programu přecházet z jednoho způsobu na druhý a naopak [16].

Podobně lze systémy rozdělit dle způsobu odměřování. V tomto případě se systémy rozdělují na systémy s odměřováním absolutním, přírůstkovým nebo cyklicky-absolutním. Při absolutním odměřování jsou informace o skutečné poloze nástroje vůči obrobku udávány k předem zvolenému počátku, zatímco u přírůstkového odměřování jsou během pohybu řízené části stroje vydávány odměřovací impulsy, které jsou v řídicím systému zpracovávány na délkový údaj. Cyklicky-absolutní odměřování udává zařízení absolutní informaci o poloze v určitém rozsahu (např. 2 mm) [16].

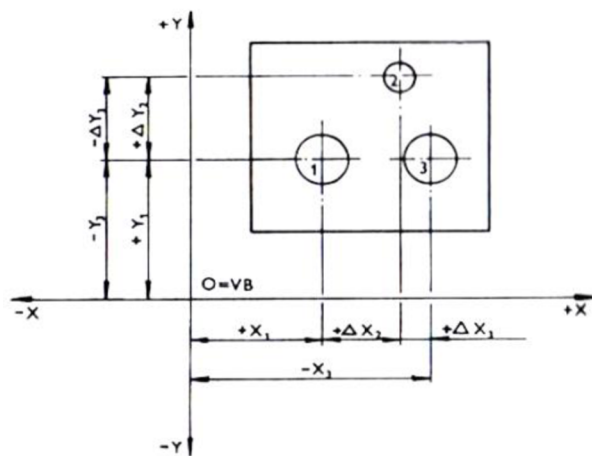
Spojením mezi obsluhou a řídicím systémem je ovládací panel. Ovládací panel se skládá z monitoru, klávesnice, ovládacích prvků, signalizačních prvků a vstupů s výstupy systému, viz Obr. 13). Monitor slouží k indikaci programů a dalších údajů, klávesnice pro zadávání či úpravu programů, ovládací prvky využíváme pro změny pracovních režimů a ovládání funkcí stroje, signalizační prvky pak signalizují stav systému (otáčky, chlazení), a vstupy a výstupy jsou zde pro připojení externích zařízení, jako je počítač sloužící k přečtení vstupních informací řídicího programu a jeho uložení do vnitřní paměti [16].



Obr. 13) Ovládací panel CNC [16]



Obr. 14) Absolutní programování [16]



Obr. 15) Přírůstkové programování [16]

4.5.3 Lineární vedení

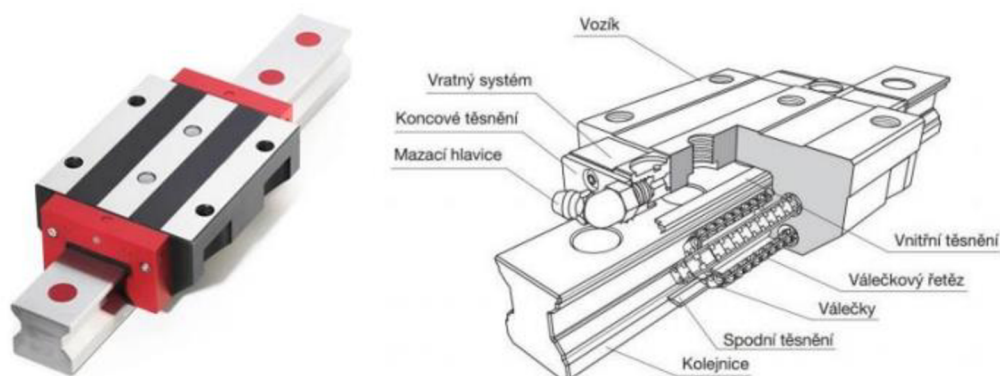
Jedná se o systém vodících ploch s přesně definovanou dráhou, na kterých se stýká nepohyblivá a pohyblivá část stroje. Hlavní úlohou lineárního vedení je zajištění pohybu daného prvku po

dané trajektorii. Další úlohou, jež musí vedení zvládat je přenášení určitých zatížení od vlastní hmotnosti součástí a eventuelně od zatěžujících sil od samotného obráběcího procesu [7].

Přímočaré vedení lze dle způsobu přenášení zatížení mezi pohyblivými se prvky rozdělit na vedení kluzné, valivé či kombinované. V případě většiny strojů se využívá vedení valivé [7].

Valivé lineární vedení

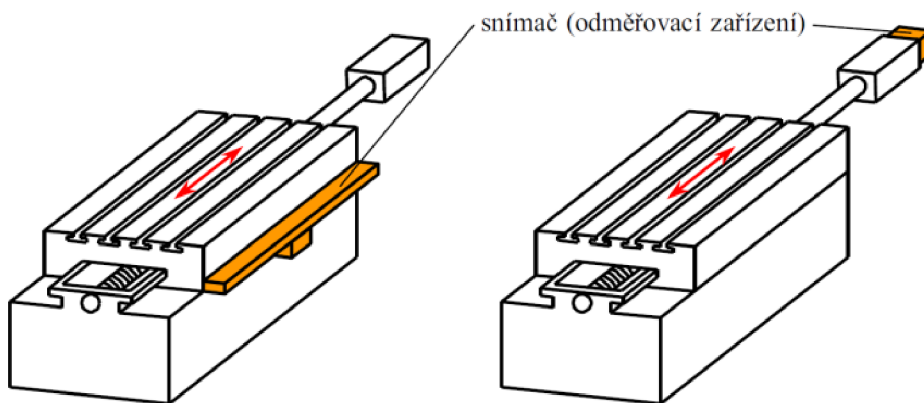
Lineární vedení se skládá z kalených kolejnic, které jsou pomocí šroubů upevněny na dosedací plochy. Na kolejnicích jsou umístěny vozíky nesoucí pohyblivý se objekt. Počet a rozmístění vozíků se odvíjí od způsobu a velikosti zatížení. Mezi vozíkem a kolejnicí jsou umístěny valivé elementy, zajišťující pohyb po určité dráze. Mezi základní valivé elementy patří kuličky a válečky případně to mohou být i jehly. Tento způsob vedení zajišťuje velmi přesné polohování, plynulost pohybu, snadnou údržbu a dlouhodobou životnost. Díky své vysoké tuhosti a nízkému součiniteli tření zvládá použití při vysokých rychlostech posuvu. Nevýhodou tohoto typu vedení je nízká schopnost tlumení vibrací a vysoká náročnost na přesnost výroby. Dále je nezbytné dohlédnout na důkladné mazání kvůli snížení opotřebení a použití ochranných krytů proti vnikání nečistot [7]. Schéma lineárního vedení lze vidět na Obr. 16).



Obr. 16) Lineární vedení [7]

4.5.4 Zpětná vazba

Jedním z faktorů ovlivňujících kvalitu obrábění je kvalita pohonů jednotlivých os pohyblivých s obráběcím nástrojem. V důsledku kladení velkého důrazu na rychlost obrábění jsou nezbytně nutné vysoké rychlosti posuvů při obrábění [1]. Pohony os jsou tvořeny řídicím systémem, regulátorem, motorem, pohybovým mechanismem a také odměřovacím systémem, přičemž každý z těchto prvků má vliv na výsledné vlastnosti osy [17]. Nejpodstatnějším faktorem jsou však odměřovací systémy, poskytující zpětnou vazbu. Odměřovací systémy zajišťují okamžitou polohu stolu a odměřují skutečnou polohu obrobku vůči nástroji, přičemž každá osa musí mít vlastní odměřovací zařízení [18]. Základní rozdělení odměřovacích systémů je na přímé a nepřímé odměřování, viz Obr. 17).



Obr. 17) Přímé a nepřímé odměřování [18]

Nepřímé odměřování

U nepřímého odměřování nedochází k přímému odměřování polohy pohybující se části obráběcího stroje, nýbrž k odměřování polohy pohybového mechanismu, například úhel natočení kuličkového šroubu. Tento způsob odměřování je aplikován u méně náročných činností nebo u os majících menší zdvihy. U nepřímého odměřování nastává nevýhoda, že je přesnost dosažené polohy ovlivněna teplotními dilatacemi pohybových mechanismů a také nepřesností vložených převodů. Na druhou stranu je konstrukční řešení osy s nepřímým odměřováním jednodušší, a tím i levnější, jelikož se využívá odměřování zabudovaného přímo v motoru osy a není potřeba vytvářet další konstrukční prvky pro jeho připevnění [17].

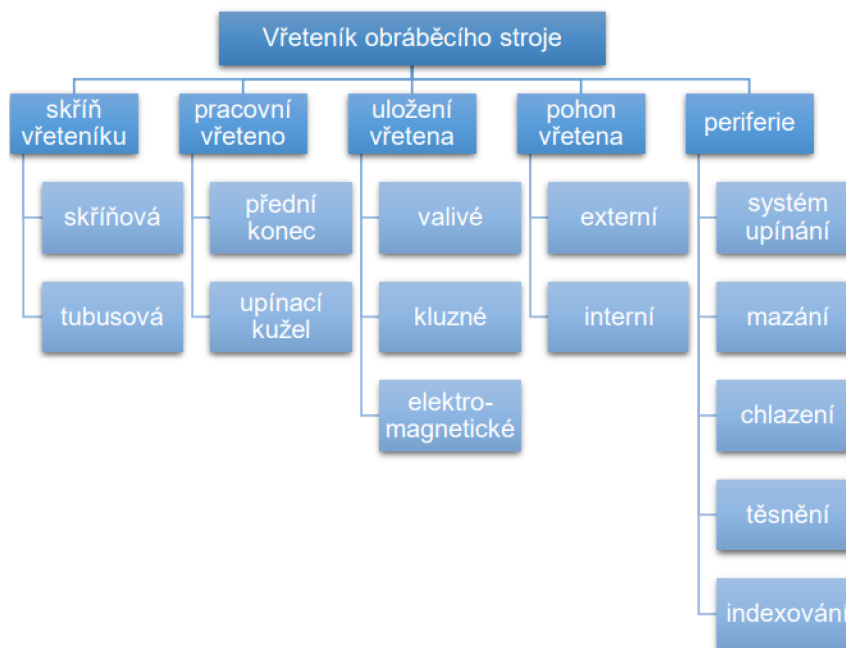
Přímé odměřování

U přímého odměřování jsou systémy namontovány přímo na pohybujících se částech stroje. Tyto systémy se umísťují co nejbližší k pohybujiícímu se nástroji, aby byly vyloučeny teplotní dilatace konstrukce. Přesnost přímého způsobu odměřování není ovlivněna typem a přesností pohonu, tudíž najde využití u přesnějších strojů. Použití tohoto typu odměřování však bývá konstrukčně náročnější a má vyšší pořizovací cenu, přičemž s rostoucí délkou lineárního odměřování roste také cena snímače [18].

4.5.5 Vřeteník

Konstrukce vřeteníku má zásadní vliv na produktivitu, jelikož je řezná rychlost svázána s otáčkami vřetena a zároveň je výrobnost přímo úměrná řezné rychlosti. Vřeteník je obvykle nejslabším uzlem z hlediska tuhosti soustavy. S tuhostí přímo souvisí kvalita povrchu včetně tvarové a rozměrové přesnosti součástí, a tak je snahou tuto tuhost maximalizovat [19].

Hlavním úkolem vřeteníku je zajistit, aby nástroj konal přesný rotační pohyb. Jde o pohyb, při kterém se trajektorie bodů nástroje liší od kružnice pouze v mezích přípustné tolerance [19]. Stavba vřeteníku je zobrazena na Obr. 18).



Obr. 18) Stavba vřeteníku [19]

Mezi hlavní části vřeteníku patří skříň vřeteníku, která může být tubusová nebo skříňová a pracovní vřeteno s takovou úpravou předního konce, která umožňuje upnutí nástroje. Neméně důležité je uložení vřetena ve vřeteníku a jeho pohon. Pro správnou funkci vřeteníku je nezbytný také systém upnutí, chlazení, mazání, těsnění a indexování. Všechny tyto aspekty ovlivňují pracovní přesnost a výrobnost stroje. Konstrukční návrhy vřeteníků vznikají s ohledem na požadavky na projektovaný stroj [19].

Vřeteno

Jak již bylo zmíněno, vřeteno má za úkol zajistit nástroji přesný rotační pohyb, tedy pohyb, při kterém se dráha bodů nástroje liší od kružnice jen tak, jak dovoluje tolerance. Hlavním materiálem pro výrobu vřetene je ocel. Vřetena vyrobená z oceli mají vysokou statickou tuhost. Pro konstrukci lehčího vřetene s menším průřezem a vyššími otáčkami vřetene může být použito kompozitních materiálů [19].

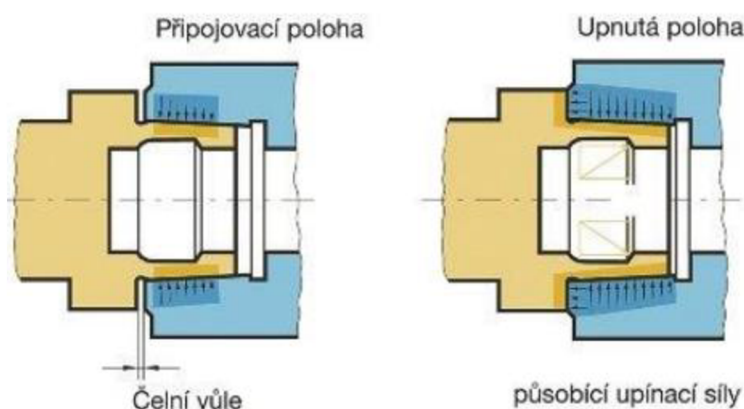
Vyčnívající část vřetena se nazývá přední konec. Její provedení koresponduje s velikostí a typem obráběcího stroje a je normalizováno. Spojení konce vřetena s nástrojem musí být přesné, rychlé, dostatečně tuhé a spolehlivé [19].

Rotující nástroj je do vřetena upnut pomocí pružin a hydraulické síly. Nástrojové držáky jsou normalizovány například s kužely [19]:

- Big Plus, ISO – kuželovitost 7:24
- Coromant Capto – polygonální objímka
- HSK – kuželovitost 1:10

Rozdíl mezi kuželem Big Plus a ISO (Obr. 19) je ten, že zatímco ISO kužel dosedá do protikusu pouze plochou kužele, u kužele Big Plus se dotýká i příruba. Přenos kroutícího momentu je zajištěn kameny na vřetenu, které zapadají do výřezů v přírubě a třením na kuželové ploše [19].

Přenos kroutícího momentu je u kužele HSK realizován unašečem na kuželi, třením na čele a kuželové ploše. U Coromant Capto je přenos realizován prostřednictvím polygonálního tvaru objímky [19].



Obr. 19) Rozdíl mezi kuželem ISO (vlevo) a Big Plus (vpravo) [19].

Z hlediska konstrukce je snaha o co nejjednodušší geometrii vřetena. Proto se při návrhu minimalizuje počet změn průměrů. Počet a velikost průměrů je určena zejména řadou použitých ložisek. Vřeteno musí být dokonale vedeno a musí mít zaručenou přesnost chodu. Vůli vznikající při provozu musí být možné vymezit [19]. Je potřeba dosáhnout maximální tuhosti vřetene, jelikož má přímý vliv na přesnost obrábění a jeho dynamickou stabilitu [20].

Požadavky na konstrukční provedení vřetene

Protože vřeteno představuje velmi důležitý prvek ve skladbě obráběcích stroje, jsou kladeny náročné požadavky na jeho konstrukční provedení. Základními konstrukčními požadavky jsou [20]:

- přesnost chodu – je určena velikost tzv. radiálního a axiálního házení,
- dokonalé vedení – vřeteno nesmí měnit polohu v prostoru, mění-li jeho zatížení směr a smysl,
- v uložení vřetena musí být možno vymezovat vůli vzniklou opotřebením,
- ztráty v uložení vřetena musí být co nejmenší (účinnost, oteplování a tepelné dilatace, změna polohy funkce),
- vřeteno musí být tuhé – jeho deformace spolu s přesností chodu má rozhodující vliv na přesnost práce obráběcího stroje.

4.5.6 Nástroj

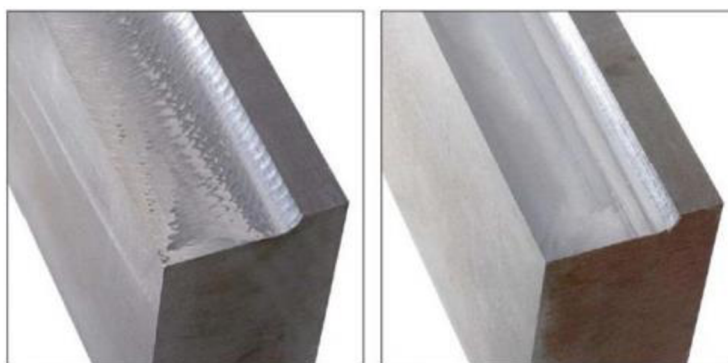
Vliv nástroje na výslednou přesnost obrábění spočívá v jeho geometrii a upnutí. Geometrie nástroje souvisí s řeznými silami ovlivňujícími celkovou tuhost. Upnutí nástroje ovlivňuje celkovou tuhost nástroje. Při upínání nástroje je důležité jeho vyložení a typ upínače [21]. Při procesu obrábění mohou vlivem nevhodné geometrii či nevhodného upnutí nástroje vznikat nežádoucí vibrace.

Řezný proces

Pro dosažení klidného a stabilního řezného procesu je nezbytná vhodně zvolená geometrie řezného nástroje. Geometrie nástroje má vliv na orientaci, velikost a průběh řezné síly, odchod třísek z místa řezu a další faktory, které jsou přímo spojeny se vznikem vibrací. Problémy se stabilitou řezného procesu se obvykle objevují již v okamžiku, kdy dosáhne hodnota vyložení nástroje trojnásobek jeho průměru [22].

Potlačení vznikajících vibrací je možné docílit pomocí vhodně navržené rozteče zubů nástroje či použitím fréz s děleným ostřím. Dalším způsobem je upravení řezných podmínek, nejčastěji snížením řezných parametrů – řezné rychlosti a posuvu. To ale vede ke snížení produktivity obrábění [22].

Během řezného procesu může vznikat také samobuzené kmitání. Za určitých řezných podmínek dochází ke kmitání soustavy stroj – nástroj – obrobek. Z důvodu vzniku samobuzeného kmitání nelze využít stroj na plný výkon, což je velkou překážkou pro produktivitu výroby. V důsledku samobuzeného kmitání dochází ke zhoršení kvality obráběného povrchu (Obr. 20), snížení produktivity výroby kvůli omezení stroje a k nadměrnému namáhání nástroje. Samobuzené vibrace mohou vést až k poškození stroje.



Obr. 20) Obráběný povrch za přítomnosti (vlevo) a nepřítomnosti samobuzených vibrací (vpravo) [19]

4.5.7 Závěr systémového rozboru mechanické soustavy CNC frézky z pohledu výrobní přesnosti

Jak lze vyhodnotit z provedeného systémového rozboru vlivů působících na CNC frézku, přesnost obrábění závisí na více faktorech. Těmi nejpodstatnějšími jsou však teplotní vlivy a působení vibrací. Během celého procesu obrábění dochází k odměřování a ke kompenzaci tepelných a geometrických chyb. Taktéž se při nastavování procesu a konstrukci stroje dbá na předcházení vzniku nežádoucích vibrací, které jsou ale hůře řešitelné.

Z provedeného systémového rozboru plyne závěr, že nejdůležitějším krokem pro stabilizaci procesu obrábění je vyhnout se nežádoucím, samobuzeným vibracím. Obecně je na části mechanické soustavy kladen požadavek správného uložení, tuhosti, odolnosti vůči vibracím, dynamické stability a teplotní stability. Dalším významným faktorem je samotný řezný proces. Všechny tyto faktory přímo souvisí se vznikem vibrací, které mají velmi nežádoucí účinek jak na kvalitu obrábění, tak i na samotnou mechanickou soustavu a tím na celkový stav a životnost stroje.

4.6 Systémový rozbor vlivů způsobujících vznik samobuzeného kmitání

Přehlednější zobrazení analýzy příčin vzniku samobuzených vibrací je vypracováno pomocí diagramu příčin a následků. Vytvořený diagram příčin a následků je předmětem přílohy I. Diagram příčin a následků, tzv. Ishikawův diagram je nástrojem kvality, jehož principem je kauzalita, kdy každý následek má svou příčinu a jeho cílem je určení nejpravděpodobnější příčiny vzniku problému.

V Ishikawově diagramu lze zohlednit příčiny v osmi základních skupinách, jimiž jsou: lidé, metody, stroje, materiál, měření, prostředí, řízení a údržba. Ne vždy musí být v diagramu zohledněno všech osm skupin.

Předmětem vytvořeného diagramu pro zkoumání příčin vzniku samobuzených vibrací bylo šest základních skupin, jimiž jsou: lidé, prostředí, stroj, materiál, metoda a údržba. U každé skupiny jsou uvedeny základní možné příčiny vzniku samobuzených vibrací a u některých příčin jsou uvedeny i jejich sub příčiny. Ve vypracovaném diagramu jsou uvedeny pouze nejčastější příčiny nežádoucího stavu.

5 PŘÍPADOVÁ STUDIE VIBRACÍ

V představené firmě se k výrobě kompresorů a dalších tlakových nádob používají CNC soustruhy a frézky různých výrobců, kterými jsou například Mori Seiki, Fanuc, Fujii nebo Okuma. U těchto strojů se vibrace vyskytují ojediněle, jelikož většina aplikací splňuje předpoklady tuhosti soustavy stroj – nástroj – obrobek. Je zde ovšem jedna aplikace, u které se firma potýká s problémy vzniku vibrací, které se vyskytují i přes to, že byly uvažovány již při technických vyjednáváních a specifikaci požadovaných parametrů u dodavatele horizontálního vyvrtávacího stroje Kitamura MYCENTER HX300 iG. Touto aplikací je obrábění plášťů kompresorů.

V této kapitole bude popsána zmíněná frézka a proces obrábění plášťů kompresorů. Také zde budou uvedeny výsledky měření vibrací během procesu obrábění a jejich vyhodnocení.

5.1 Kitamura MYCENTER HX300 iG

Horizontální CNC frézka Kitamura MYCENTER HX300 iG je zobrazena na Obr. 21). Frézka je schopna obrábět ve čtyřech osách – X, Y, Z a B a je vybavena automatickou výměnou nástrojů. Ze skladovacího řetězového zásobníku lze pomocí točného ramena zvolit z výběru až 50 nástrojů. Nástroj je schopen se v ose X pohybovat do 460 mm, v ose Y do 510 mm, v ose Z do 560 mm a v ose B mezi úhly 0° – 360°. Lze zde obrábět polotovary o výšce 745 mm, o průměru až do 500 mm a o hmotnosti do 250 kg.



Obr. 21) Horizontální frézka Kitamura MYCENTER HX300 iG

Frézka je umístěna na základech složených ze hutněného posypu, podkladního betonu a železobetonu. Hutněný posyp má tloušťku 200 mm, podkladní beton 100 mm a železobeton 600 mm. Takto vypracované základy slouží jako forma pasivního tlumení vibrací přenášeného na stroj z jeho blízkého okolí. Technický výkres základů frézky KITAMURA MYCENTER HX300 iG umístěného v předmětné firmě je uveden v příloze A.

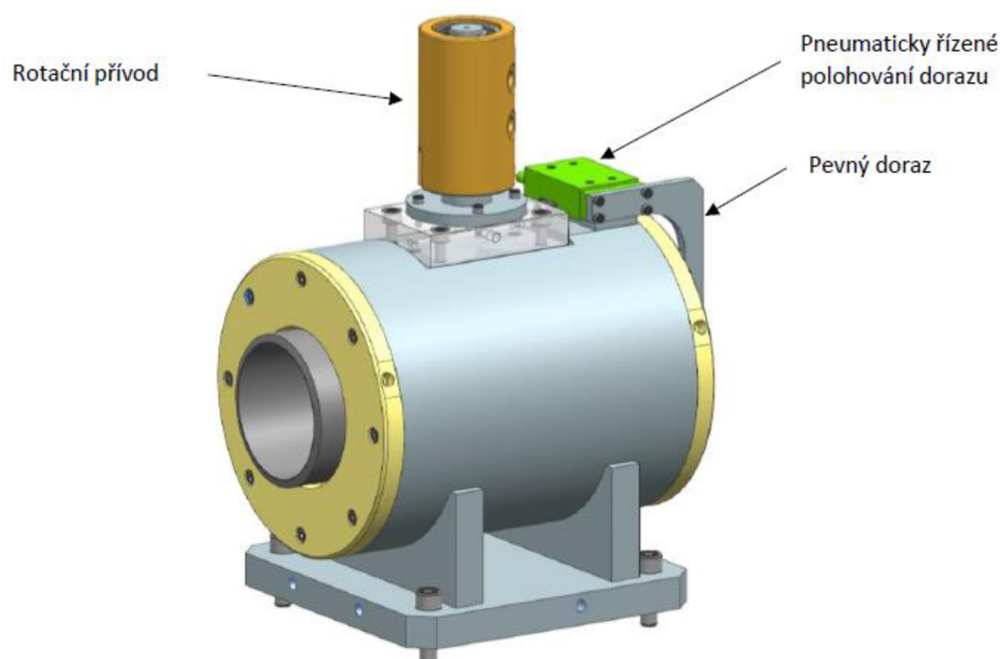
5.2 Výrobní proces

Výrobní proces pláště kompresoru je na tomto obráběcím centru rozdělen do tří základních operací. První operací je hrubování vnitřního průměru. Po vyhrubování vnitřního průměru se do pláště kompresoru vyvrtávají obvodové díry. Poslední operací na tomto stroji je obrobení vnitřního průměru do konečné podoby. Obrobený plášť následně projde ještě několika procesy, aby se dostal do finální podoby hotového kompresoru. Následující procesy už ale nejsou prováděny na předmětném obráběcím stroji. Operace prováděné na horizontální frézce budou popsány v následujících podkapitolách.

5.2.1 Hrubování vnitřního průměru

První operací na této frézce je hrubování vnitřního průměru na požadovaný průměr $124,4 \pm 0,05$ mm. Pro tuto operaci je používána hrubovací tyč od firmy Kennametal. Nástrojový držák hrubovací tyče od výrobce D' Andrea má vyložení 211,5 – 212,5 mm.

Polotovaru je upnut ve speciálním přípravku navrženém procesními inženýry a dodavatelskou firmou. Přípravek byl navržen tak, aby splňoval předpoklady co nejtěžšího upnutí. Upnutí polotovaru v přípravku pro operaci hrubování je zobrazeno na Obr. 22). Technický výkres přípravku pro hrubování je uveden v příloze B.

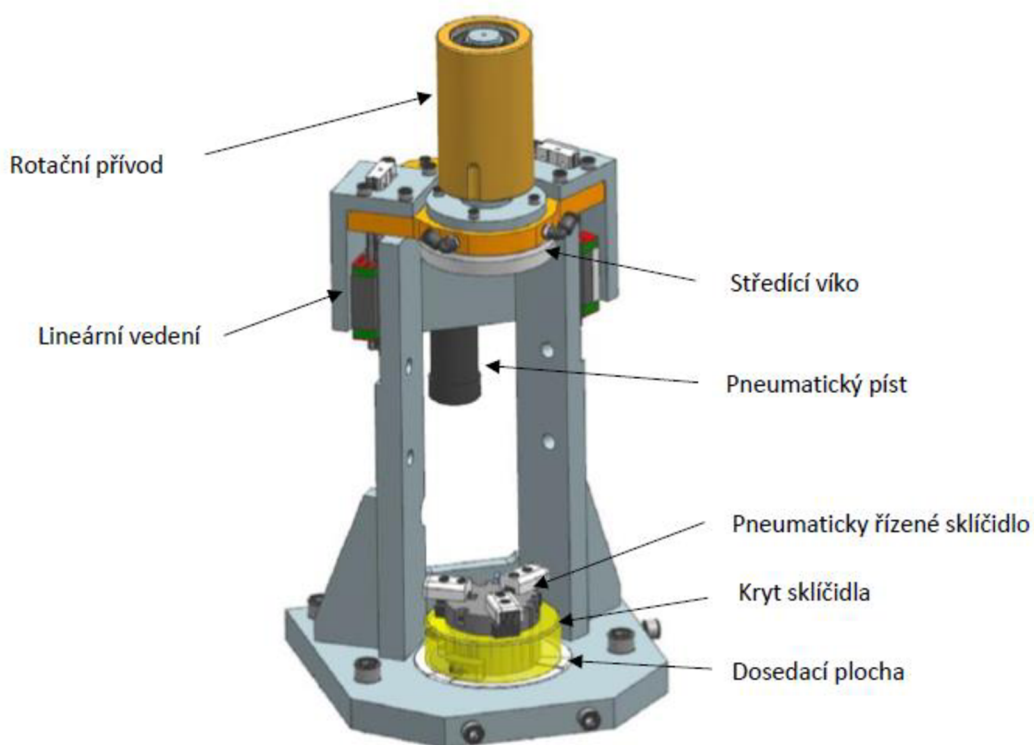


Obr. 22) Upnutí polotovaru v přípravku pro hrubování [3]

5.2.2 Vrtání obvodových děr

Druhou operací na této frézce je vrtání obvodových děr. Pro vrtání obvodových děr se používá osm nástrojů. Technický výkres s nástroji pro vyvrtávání obvodových děr je uveden v příloze C.

Pro vyvrtávání obvodových děr je opět využito speciálního přípravku navrženého procesními inženýry. Upnutí polotovaru v přípravku pro vyvrtávání obvodových děr lze vidět na Obr. 23) a jeho technický výkres je přiložen v příloze D.

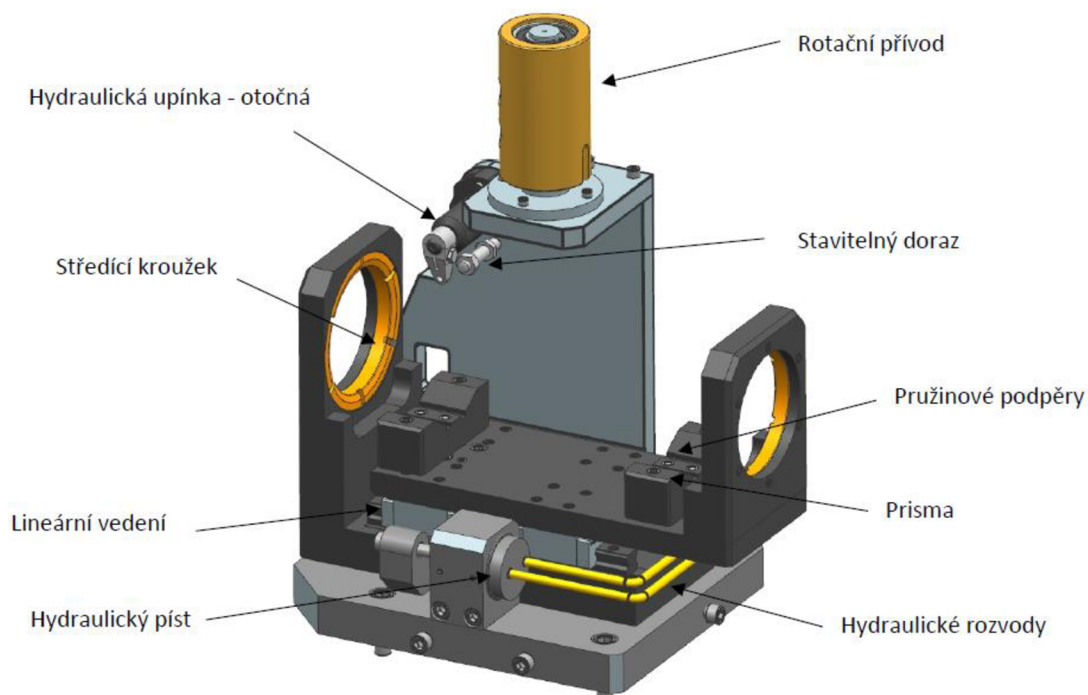


Obr. 23) Upnutí polotovaru pro vyvrtávání obvodových děr [3]

5.2.3 Finální obrobení vnitřního průměru

Poslední operací prováděné na této frézce je finální obrábění vnitřního průměru na průměr $125 + 0,2$ mm. Přímost vnitřního průměru musí být maximálně 0,05 mm. Pro poslední operaci jsou použity dva nástroje. Prvním nástrojem je hrubovací tyč od firmy Kennametal a druhým nástrojem je tyč dokončovací od firmy Iscar. Technický výkres nástrojů finálního vrtání vnitřního průměru je uveden v příloze E.

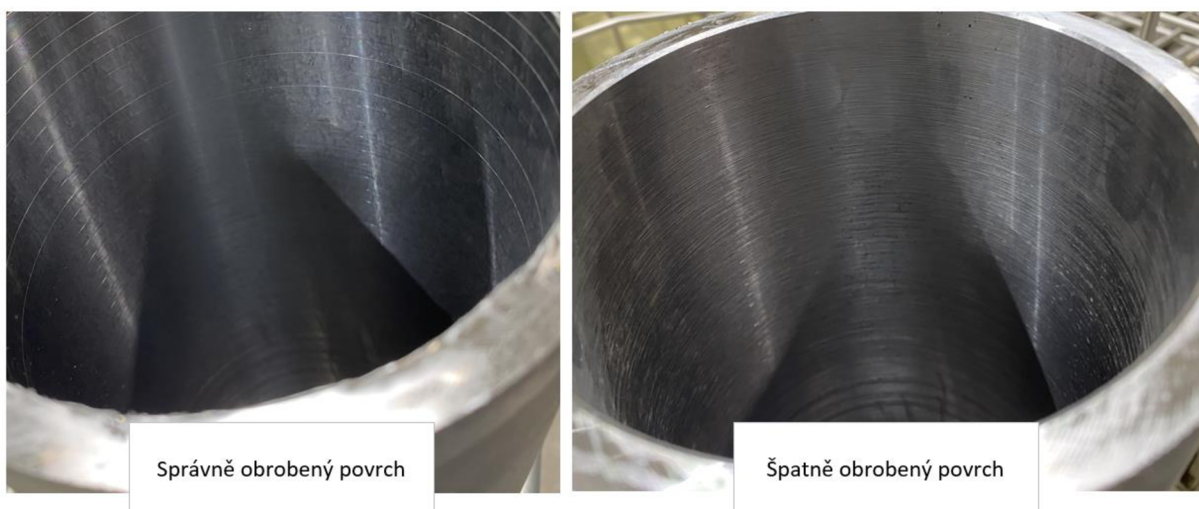
Pro finální vrtání vnitřního byl rovněž navrhnout a vyroben speciální přípravek zajišťující dostatečně tuhé upnutí polotovaru. Upnutí polotovaru v přípravku je zobrazeno na Obr. 24) a jeho technický výkres je uveden v příloze F.



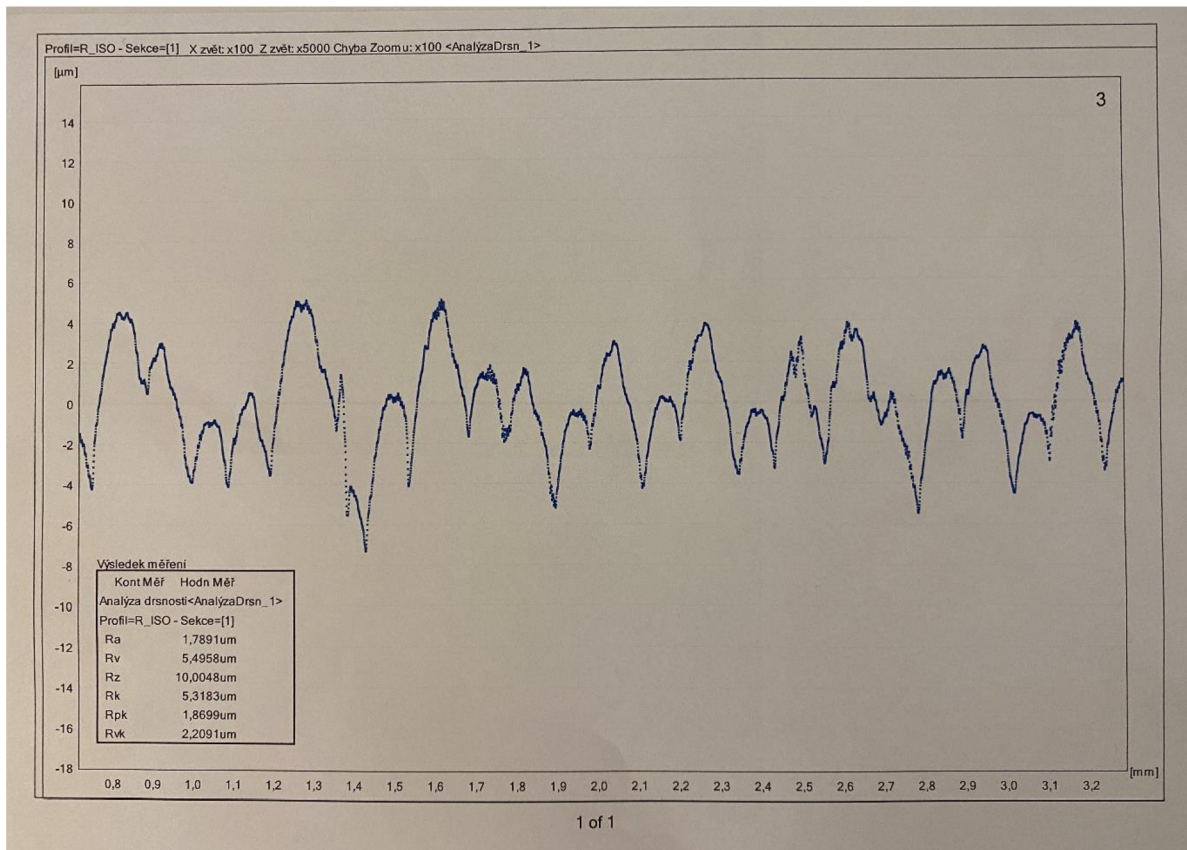
Obr. 24) Upnutí polotovaru pro finální vyvrtávání vnitřního průměru [3]

5.3 Testovací měření vibrací

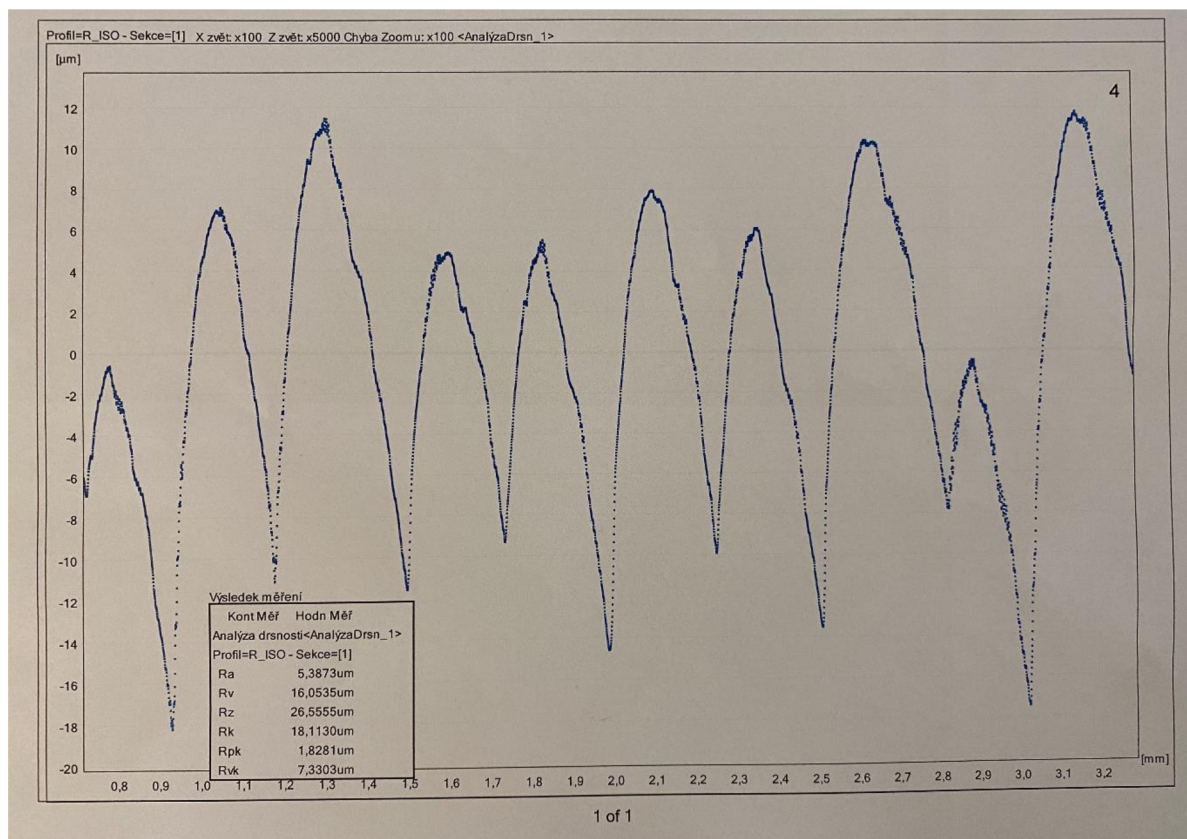
Jak již bylo zmíněno, při jedné operaci se vyskytují potíže s kvalitou obrobeneho povrchu. Konkrétně se jedná o první operaci obrábění plášťů kompresorů, na kterém lze vidět značné stopy po obrábění. Porovnání správně obrobeneho pláště a pláště se stopami po obrábění lze vidět na Obr. 25). Na obou obrobenech kusech bylo provedeno měření struktury povrchu pomocí měřicího přístroje Surfrest SV-2000 od firmy Mitutoyo. Výsledek měření správně obrobeneho povrchu je zobrazen na Obr. 26). Výsledek měření špatně obrobeneho povrchu lze vidět na Obr. 27). V důsledku potýkání se s problémy špatně obrobeneho pláště kompresoru byla provedena měření vibrací.



Obr. 25) Porovnání správně a špatně obrobeneho povrchu pláště



Obr. 26) Měření textury povrchu na správně obroběném povrchu



Obr. 27) Měření textury povrchu na špatně obroběném povrchu

5.3.1 Podmínky měření

K měření vibrací bylo použito měřicí zařízení Fluke 810. Senzor měřicího zařízení byl umístěn na vřeteník stroje. Měřicí zařízení a umístění senzoru je zobrazeno na Obr. 28). Vibrace byly měřeny při obrábění frézou se dvěma břity při vyložení nástroje 212 mm, posuvu 420 mm/m, otáčkách 800 ot/min a při výkonu stroje 13 kW. Fréza použitá při měření vibrací je zobrazena na Obr. 29). Za těchto podmínek byla provedena dvě opakování měření.



Obr. 28) Měřicí zařízení Fluke 810 a umístění senzoru



Obr. 29) Fréza použitá při měření vibrací

5.3.2 Výsledky měření

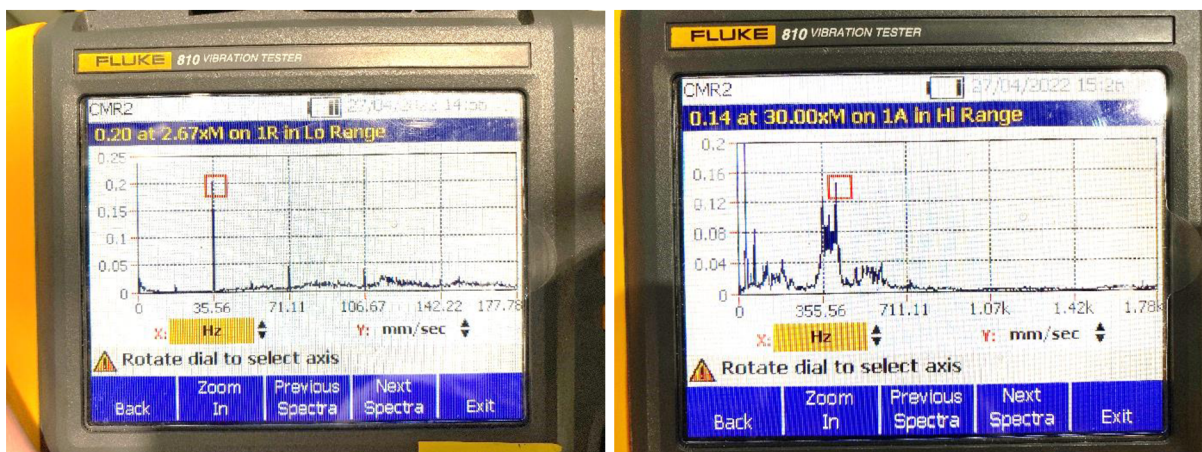
Z Obr. 30) a Obr. 31) jde vidět, že při obráběcím procesu dochází ke zvýšeným vibracím. Zvýšené vibrace se vyskytují ve frekvenčním pásmu od 34 Hz do 80 Hz a také na vyšších harmonických frekvencích od 300 Hz do 700 Hz. Nelze přesně říct, o jaký typ vibrací se jedná. Pro konkrétnější určení vibrací by bylo potřeba měřit filtrovanou efektivní hodnotu z těchto oblastí, které mohou sloužit jako ukazatel samobuzených vibrací.

Výpočet efektivní hodnoty v definovaném frekvenčním pásmu se provádí pomocí součtu kvadrátů amplitud z FFT dle vzorce:

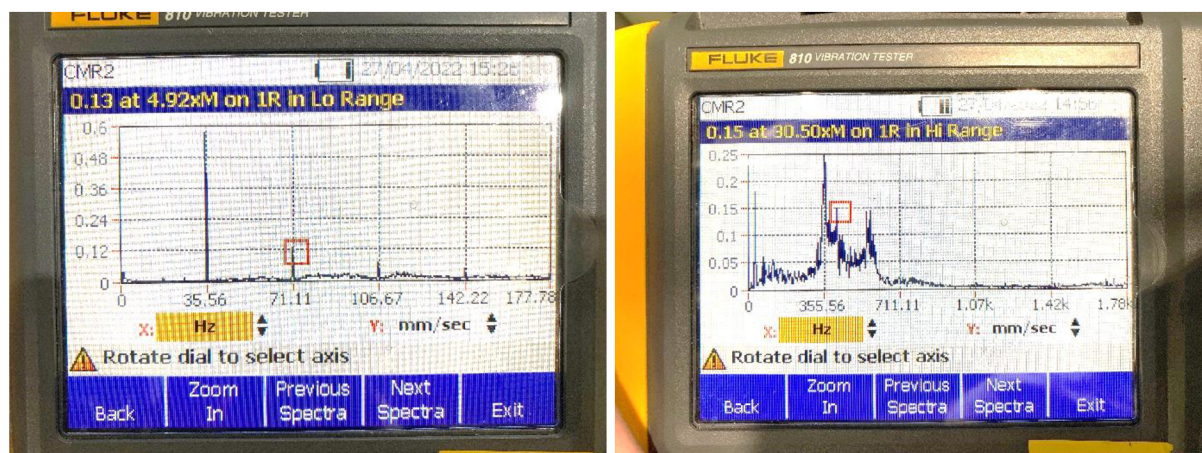
$$ef = \sqrt{\sum_{f=f_{min}}^{f=f_{max}} A_f^2}$$

Pro vyhodnocení efektivní hodnoty je však zapotřebí mít zakoupený SW, který by tyto matematické operace umožnil provádět. Ve firmě, kde byla měření prováděna nebyl takový SW k dispozici, proto nebylo možné provést podrobnější analýzu naměřených dat.

Tato data však mohou být ukazatelem samobuzených vibrací, které jsou velmi škodlivé a bylo by tak vhodné na provedená měření navázat a zrealizovat podrobnější analýzu a vyhodnocení. Tato analýza však vyžaduje spoustu času a pro její realizaci je potřeba disponovat kvalitními měřicími přístroji a příslušnými SW programy.



Obr. 30) Výsledky z prvního měření



Obr. 31) Výsledky z druhého měření

6 SAMOBUZENÉ VIBRACE

Při obrábění se často vyskytují různé druhy vibrací. Působení vibrací má za následek větší či menší periodické odchylky od definovaných požadavků na kvalitu obráběného povrchu. Výsledkem působení vibrací může být mimo nevyhovující kvality povrchu také zatížení obsluhy obráběcího stroje nesnesitelným hlukem [23]. Vibrace navíc působí negativně na nástroje, neboť způsobují jejich nadměrné opotřebení. Dále snižují životnost komponent stroje a mohou způsobit jejich nevratné poškození až úplné zničení stroje. Vibrace dle jejich charakteru rozdělujeme na:

- vynucené,
- volné,
- vznikající řezným procesem.

Volné kmitání vzniká například vlivem rychlého brzdění či přesouvání pohyblivých částí stroje, náhlou změnou odřezávaného průřezu způsobenou tvarem obráběného povrchu, rychlým najetím a vyjetím do řezu apod. Volné vibrace mají charakter přenosový, což znamená, že po krátkém čase vlivem tlumení vymizí [23].

Vynucené kmitání bývá důsledkem nevyvážených rotujících částí stroje, nepravidelností v ovládacích a převodových členech, ve vedení, v hydraulických zařízeních či důsledkem nesprávně navržených elektrických obvodů. Není podmínkou, že vynucené kmitání pochází přímo ze stroje. Může být přenášeno také z okolního prostředí přes základy stroje. Potlačení vzniklého vynuceného kmitání je poměrně jednoduché. Pro eliminaci vynucených kmitů postačí vyvážení příslušných rotujících částí, izolování stroje od okolního prostředí zvolením vhodných základů nebo použití dodatečných tlumících prvků [23].

Vibrace vznikající řezným procesem se dělí na volné a samobuzené. Volné kmitání je způsobeno nepravidelností řezného procesu a bývá ve velmi krátké době samo utlumené. Příkladem může být výskyt tvrdých uskupení zrn v materiálu, přerušovaný řez, přerušovaná tíška, pórovitost materiálu nebo náhlý rozpad nárůstka na břítu nástroje [23].

Samobuzené chvění je typ vibrací, který čerpá energii generovanou samotným řezným procesem a nutí stroj konat kmitavý pohyb. Tento kmitavý pohyb zpětně ovlivňuje řezný proces, který dále generuje energii. Samobuzené vibrace se projevují v některém případě extrémním nárůstem amplitudy, což může vést dokonce k vyskakování nástroje z místa řezu. V tomto případě je nutné snížit rychlost obrábění, popřípadě ho úplně zastavit [23].

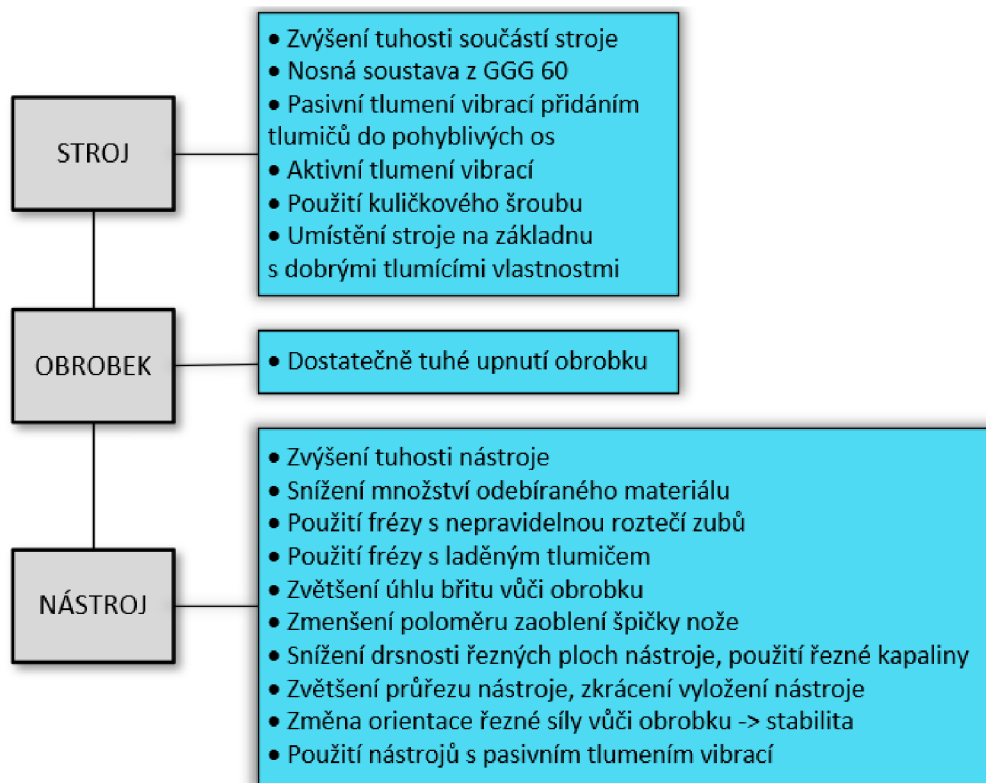
Charakteristikou samobuzených vibrací je jejich rostoucí hodnota spolu s rostoucím časem až do maximální hodnoty, která je dána vlastnostmi sledované soustavy. Právě rostoucí charakteristikou spolu s časem se samobuzené vibrace řadí mezi hlavní příčinu vzniku nepřesností při obráběcích procesech [24].

Existuje vícero možností, jak snížit nebo odstranit tento typ chvění. Jedná se o úkony prováděné na soustavě stroj – nástroj – obrobek. Možná řešení snížení nebo odstranění chvění jsou zobrazeny na Obr. 32).

V současné době, kdy je kladen důraz na masovou průmyslovou výrobu a snižování nákladů, samobuzené chvění je stále více řešeným tématem. Pochopení chování samobuzených vibrací a možnost jejich predikce umožňuje maximální využití výkonového potenciálu obráběcích strojů pro třískové obrábění [23].

Existují dva směry, kterými lze nahlížet na tuto problematiku při jejím řešení. Prvním směrem je studování podmínek, za kterých samobuzené chvění může existovat, resp. studium podmínek jeho samotného vzniku a interakce stroje s řezným procesem. Druhým směrem je definování pravidel při návrhu strojů, nástrojů a technologie obrábění s požadavkem na vyšší odolnost proti vzniku samobuzených vibrací [23].

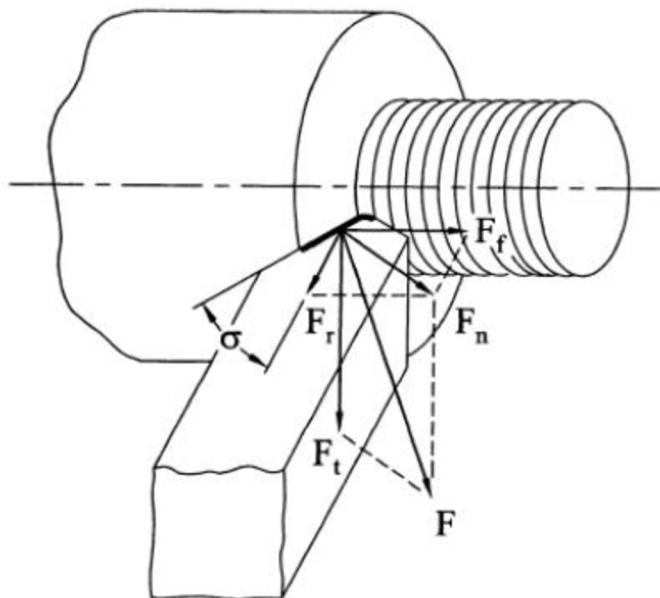
Přestože je výzkumu samobuzeného chvění věnováno mnoho úsilí, ještě se nepodařilo tento fenomén natolik pochopit, aby bylo možné jej spolehlivě predikovat. Pro kvalitní studium samobuzených vibrací je vyžadováno složitých a nákladných přístrojů, které bývají k dispozici v laboratorních a akademických prostředích. Rozmanitost dnes používaných nástrojů a obráběných materiálů nabízí mnoho možností, kde samobuzené chvění zkoumat [23].



Obr. 32) Možná řešení snížení nebo odstranění samovolného chvění

6.1 Řezný proces

V průběhu řezného procesu dochází k oddělování třísek z obráběného povrchu polotovaru pomocí řezného nástroje. V interakci mezi řezným nástrojem a obráběným povrchem působí síly, jejichž směr působení lze vidět na Obr. 33) [25].



Obr. 33) Směr působení řezných sil [25]

Celková řezná síla F je složena z dílčích sil v poměru $4F_t : 2F_f : 1F_r$, kde

F_t – je řezná síla, která působí ve směru vektoru řezné rychlosti

F_f – je síla posuvu, která působí ve směru posuvu

F_r – je pasivní síla, která při vázaném řezání působí kolmo na plochu [25].

Pasivní síla je síla působící ve směru nejmenší tuhosti obráběcí soustavy a tato skutečnost pak výrazně ovlivňuje přesnost obrobenej plochy a chvění při procesu obrábění [25].

Vektor výsledné celkové řezné síly závisí na jejich jednotlivých složkách a je ovlivněn parametry řezného procesu. Jeho velikost je dána vztahem [25]:

$$F = \sqrt{F_t^2 + F_f^2 + F_r^2}$$

Právě samotný řezný proces je příčinou vzniku samobuzených vibrací. Nastavením správných parametrů řezného procesu lze samobuzené vibrace do jisté míry eliminovat nebo jim předcházet. Samotná otázka vzniku vibrací by však měla být řešena už při návrhu konstrukce obráběcího zařízení.

6.2 Vznik samobuzených vibrací

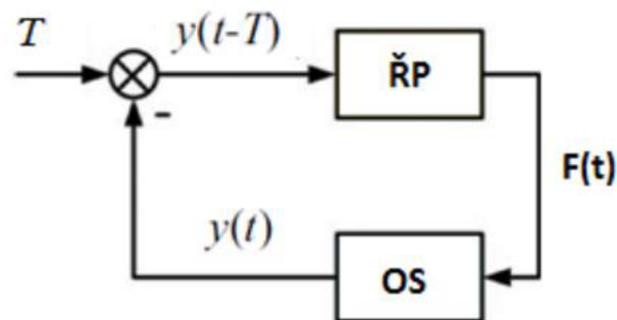
Vznik samobuzeného kmitání se neobjevuje pouze při operaci hrubování, nýbrž i při obrábění na čisto. Vibrace vznikají vzájemným ovlivňováním obráběcího stroje a řezného procesu, což lze vyjádřit zpětnovazebným obvodem, který lze vidět na Obr. 34). Vibrace jsou způsobeny modulací statické složky řezné síly, která vzniká proměnným průřezem neboli proměnnou hloubkou třísky (Obr. 35)). Změna hloubky třísky je dána změnou relativní polohy nástroje vůči

obrobku v důsledku kmitání soustavy stroj – nástroj – obrobek. Řezný proces je tak zdrojem vnitřního buzení systému. Samobuzené vibrace vznikají pouze za dodržení podmínky existence proměnlivé tloušťky třísky. Proměnlivá tloušťka třísky vzniká při překročení určité mezní hodnoty, kterou je mezní axiální hloubka třísky a_p , resp. šířka třísky b . Rozlišujeme dva základní principy vzniku samobuzeného kmitání při obrábění [26].

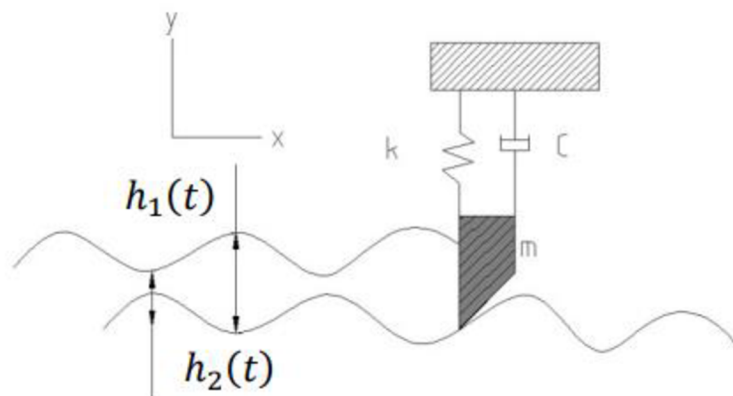
Aby samobuzené kmitání nastalo, musí být splněny následující podmínky:

- hodnota šířky třísky b musí být větší než limitní hodnota b_{lim} ,
- směr tvaru kmitu s nižší vlastní frekvencí musí ležet mezi směrem dynamické řezné síly a směrem normály [23].

Pokud výše uvedené podmínky nebudou splněny, jedná se o absolutně stabilní řezný proces a samobuzené kmitání nenastává [23].



Obr. 34) Zpětnovazebný obvod [27]



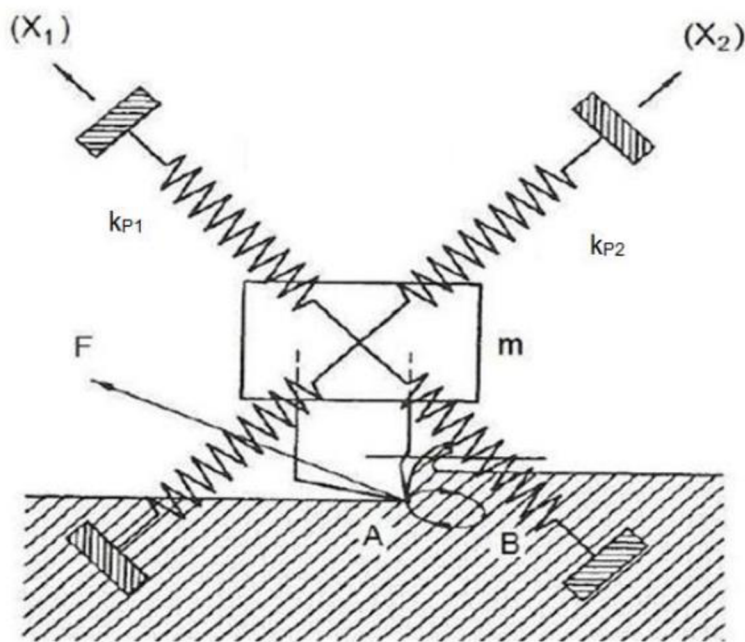
Obr. 35) Proměnlivá tloušťka třísky [26]

6.2.1 Princip polohové vazby

Dle principu polohové vazby je pro vznik samobuzených vibrací nutná existence dvou dominantních tvarů kmitů mezi obrobkem a nástrojem, které jsou na sebe kolmé a zároveň mají různé frekvence. Periodická řezná síla pak současně rozkmitá systém obou směrech tvarů stejnou frekvencí a konstantní vzájemnou fází tak, že se břit pohybuje po eliptické dráze, viz Obr. 36). Při pohybu po elipse z bodu A do bodu B ve směru hodinových ručiček působí řezná síla proti směru pohybu a tím odebrává energii ze systému. Naopak je tomu při pohybu z bodu B do bodu A, kdy řezná síla do systému energii dodává. Protože se na dráze BA obrábí ve větší hloubce než na dráze AB, převažuje energie do systému dodávaná. Pokud se dodávaná energie nestačí tlumením spotřebovat, dojde k postupnému nárůstu amplitudy kmitů a řezný proces se

tak stává nestabilním. Tímto způsobem může docházet ke vzniku samobuzeného kmitání i při obrábění hladkých, nezvlněných povrchů. Dle principu polohové vazby je pro vznik vibrací rozhodující vzájemná směrová orientace kmitavého pohybu stroje a orientace řezné síly [27].

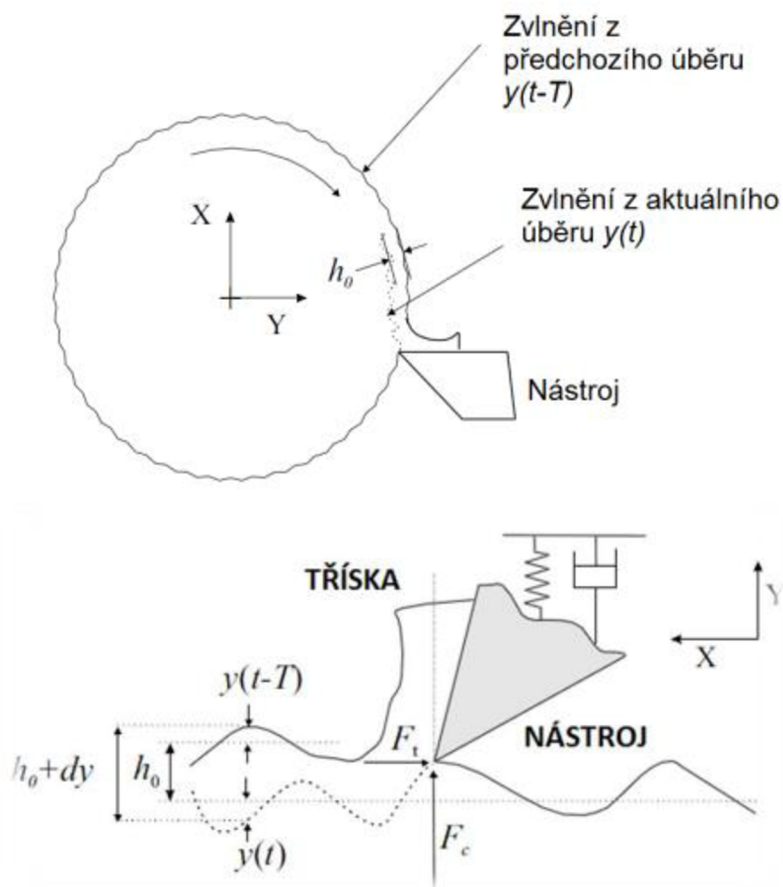
Z pohledu praxe polohová vazba nemá příliš velký význam, jelikož ve všech případech na povrchu obrobku zůstávají vlny, které po sobě zanechal kmitající nástroj. Následným seřezáváním vln vzniká dynamická řezná síla, charakteristická pro regenerativní princip. Nicméně právě v principu polohové vazby byly nalezeny příčiny vzniku samobuzeného kmitání. Princip polohové vazby ukazuje, že stejně jako působící řezná síla má i kmitavý systém svůj význam [23].



Obr. 36) Princip polohové vazby [27]

6.2.2 Regenerativní princip

Dle tohoto principu je vznik samobuzených kmitů důsledkem kmitajícího břitu nástroje $y(t)$, který obrábí zvlněný povrch obrobku $y_0(t)$, vzniklý při předchozím řezu nástroje (Obr. 37). Zvlněný povrch obrobku periodicky mění průřez třísky, a tím moduluje řeznou sílu, která způsobuje buzení celého systému. Tímto způsobem se při každé otáčce vřetene generují další vlny. Pro vznik samobuzených kmitů je dle regenerativního principu rozhodující fázový posun mezi vlnitostí obrobku a kmity nástroje. V případě, že by byl tento fázový posun nulový, bude průřez třísky konstantní, tudíž nebude modulována řezná síla a samobuzené kmitání nenastane [27].



Obr. 37) Regenerativní princip [27]

Tento jev byl objeven Tobiasem a Fishwickem ve stejnou dobu jako jej nezávisle na sobě objevili Tlustý a Poláček. Označili regenerativní kmitání jako příčinu chvění při procesu obrábění a odvodili vztah ukazující závislost mezi řeznými parametry a celkovou řeznou silou F . Mezi tyto parametry patří posuv f , tloušťka třísky $h(t)$ a řezná rychlost v , která je úměrná úhlové rychlosti ω , pro kterou platí [27]:

$$\omega = \frac{2 \cdot n \cdot N}{60}$$

Dynamika ohebného řezného nástroje a dynamika obrobku ovlivňují celý řezný proces. Během řezání nástroj čelí tvrdším strukturám na povrchu obrobku a začíná oscilovat, což se projeví vytvořením zvlněného profilu obráběné plochy. Po provedení jedné otáčky obrobku začíná nástroj řezat zvlněný povrch, což se projeví na tloušťce třísky. Doba jedné plné rotace obrobku T je rovna [27]:

$$T = \frac{60}{N}$$

N je rovna rychlosti vřetena. Za předpokladu, že je nástroj ve směru Y flexibilní, $y(t)$ je vibrace aktuální a $y(t-T)$ je vibrace vzniklá během předchozí otočky obrobku. Výsledný úběr $h(t)$ je potom roven [27]:

$$h(t) = h_0 + y(t-T) - y$$

Pro řeznou sílu pak platí [27]:

$$F_C = k_C \cdot a \cdot [h_0 + y_{(t-T)} - y]$$

Jelikož řezná síla neustále kolísá, odchylka řezné síly dF je vyjádřena jako funkce přírůstku šířky třísky ds , změny posuvu df a úhlové rychlosti $d\omega$ [27].

$$dF = k_1 \cdot a \cdot ds + \frac{2\pi}{\omega} \cdot k_2 \cdot df + k_3 \cdot d\omega$$

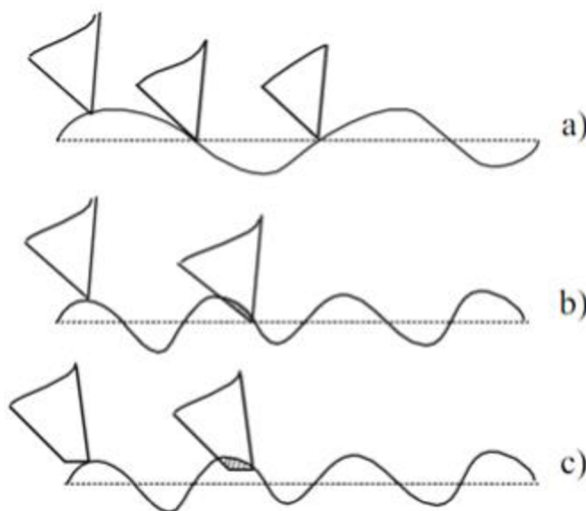
Odpovídající silové koeficienty odpovídají proměnným k_1 , k_2 , k_3 . Koeficienty se stanovují experimentálně a poskytují vztah mezi řeznou silou a dalšími parametry. V případě, že je změna tloušťky třísky $h_{(s)} = y_{(t-T)} - y_{(t)}$ a změnu rychlosti posuvu můžeme vyjádřit jako $f = dy/dt$, pak za předpokladu konstantních otáček bude $d\omega = 0$ a koeficient $k_1 = K_f$. Rovnici pak můžeme upravit na tvar [27]:

$$dF = K_f \cdot a \cdot [y_{(y-T)} - y_{(t)}] - \frac{2\pi k_2}{\omega} \cdot \frac{dy}{dt}$$

Rovnice má dva členy. První člen je ve fázi s tloušťkou třísky a druhý člen je vztažen k rychlosti posuvu a je od prvního fázově posunutý. Druhý člen rovnice má zápornou hodnotu v důsledku pohybu nástroje v kladném směru osy Y. To má za následek zmenšení velikosti řezné síly a tím i tloušťky třísky. Velikost druhého prvku rovnice je přímo úměrná velikosti posuvu. Změna posuvu se pak projeví jako další složka řezné síly, která v tomto případě představuje sílu tlumící. Tato složka síly je významná pro malé rychlosti otáček, neboť ovlivňuje stabilitu obrábění. Tento jev je vysvětlením pro vysokou stabilitu obrábění za použití nízkých otáček vřetena [27].

Při obrábění se můžou vyskytnout tři možné situace při kontaktu nástroje s obrobkem. Jedná se o obrábění [27]:

- za vysokých otáček,
- za nízkých otáček,
- s použitím tupého nástroje.



Obr. 38) Povrch obrobku za různých podmínek [27]

Jak lze vidět z Obr. 38), při porovnání řezání za vysokých a nízkých otáček vřetene, resp. za předpokladu, že nástroj osciluje se stejnou frekvencí, počet vln vytvořených nástrojem za jedno úplné otočení je v případě vysokých otáček nižší než v případě nízkých. Vlny vniklé při obrábění budou v případě nízkých otáček strmější než při otáčkách vysokých, a proto zde vzniká vyšší pravděpodobnost poškození čela nástroje, roste tření a poté také ztráta energie. Tento fakt způsobuje větší stabilitu při obrábění za nižších otáček. Při použití tupého nástroje se tento fakt ještě umocňuje [27].

6.3 Vliv pracovních parametrů na stabilitu řezného procesu

Základními charakteristikami chvění jsou frekvence a intenzita. U samobuzeného kmitání dochází ke kolísání frekvence jen zřídka, a proto je intenzita charakteristikou hlavní. Vzhledem k tomuto faktu budou v následující podkapitole popsány právě vybrané pracovní parametry ovlivňující intenzitu kmitání [27].

Při procesu obrábění se frekvence samobuzeného kmitání mění v podstatě pouze ve dvou oblastech. Těmito oblastmi jsou [27]:

- nízké frekvence – v rozmezí 50-500 Hz vyskytující se u různých komponent soustavy,
- vysoké frekvence – v rozmezí 1500-1800 Hz, které jsou připisovány kmitům nástroje.

Kmitání o vysokých frekvencích je mnohem méně nebezpečné než kmitání o frekvencích nízkých, jelikož lze poměrně snadno eliminovat. Pro jejich eliminaci většinou postačí upravit parametry nože – změnit průřez či vyložení. V případě výskytu kmitání o nízkých frekvencích u jiné komponenty soustavy může amplituda kmitání dosahovat značných hodnot, což může vést k destrukci dané komponenty [27].

6.3.1 Vybrané pracovní parametry ovlivňující intenzitu kmitání

Jak již bylo zmíněno, v této kapitole budou popsány vybrané pracovní parametry, které ovlivňují intenzitu kmitání, neboť právě intenzita kmitání je hlavní charakteristikou samobuzeného kmitání.

Tuhost soustavy

Největším problémem při vzniku samobuzeného kmitání je tuhost systému stroj – nástroj – obrobek. Zvýšením tuhosti soustavy dosáhneme stabilizace, ne vždy však nastane možnost tuhost soustavy zvýšit, a jsme tak omezeni pouze na některé případy [27].

Celkovou tuhost soustavy lze ovlivnit materiálem i tvarem. V případě materiálu záleží zejména na modulu pružnosti materiálu E , eventuálně na modulu ve smyku G , protože deformace jsou nepřímo úměrné jejím hodnotám. Příklady nejběžněji používaných materiálů a jejich konstant jsou uvedeny v Tab 1) [28].

Materiál	E [MPa]
Šedá litina	120 000
Tvárná litina	180 000
Ocel	210 000

Tab 1) Moduly pružnosti v tahu [28]

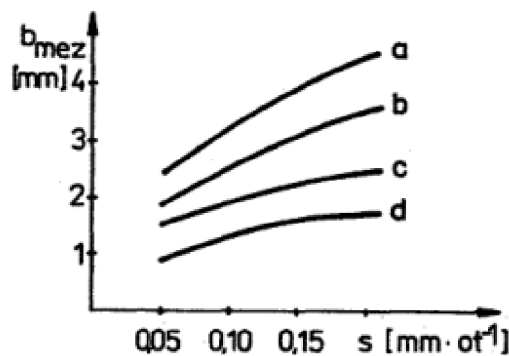
Z hlediska zvyšování tuhosti systému jejím tvarem se jedná o kvadratický moment průřezu v ohybu a krutu. U jednoduchých nosíkových tvarů můžeme kvadratické momenty snadno spočítat. Otázka tvaru nosníků by se měla řešit už při prvotních návrzích tvaru rámu stroje. Návrhy vhodných tvarů a výztuhy žebrováním pro konkrétní použití stroje se provádí pomocí metody konečných prvků s využitím tvarově optimalizačních algoritmů [28].

Obráběný materiál

Dalším faktorem ovlivňujícím stabilitu obrábění je druh obráběného materiálu. Na diagramu Obr. 39) lze vidět závislost mezní šířky odřezávané třísky vůči posuvu. Na diagramu jsou zavedeny čtyři křivky nejčastěji používaných materiálů [27]:

- a – ocel 11600
- b – normalizačně žíhaná ocel 12060.1
- c – ocel 14100
- d – zušlechtnutá ocel 12060.6

Z diagramu je jasné, že houževnatost obráběného materiálu ovlivňuje intenzitu samobuzeného kmitání [27].



Obr. 39) Závislost mezi posuvem a tloušťkou třísky [27]

Úhel nastavení

Úhel nastavení je úhel mezi hlavním ostrím břitové destičky a mezi povrchem obráběné plochy. Nejčastěji používanými úhly při obrábění jsou úhly nastavení 90°, 45°, 10° a takové, které plynou z použití kruhových destiček. Menší úhel nastavení vede ke snížení tloušťky třísky, zajišťuje plynulejší zahájení řezu, chrání ostří a snižuje radiální tlak. V důsledku snižování úhlu však dochází k nárůstu axiální řezné síly, což zvětšuje tlak na obrobek [29].

Úhel nastavení K_r významně ovlivňuje intenzitu samobuzeného kmitání (Obr. 40)), přitom má relativně nízký vliv na trvanlivost nástroje a na optimální řezné podmínky. Proto se při výskytu samobuzeného kmitání snažíme v první řadě o změnu úhlu nastavení. Vliv úhlu nastavení na intenzitu samobuzeného kmitání souvisí se zmenšováním radiální složky řezné síly při zvětšování úhlu nastavení. Radiální složka řezné síly působí ve směru malé tuhosti soustavy stroj – nástroj – obrobek, a z hlediska chvění je rozhodující složkou pro vznik samobuzených vibrací [27].

Poloměr špičky

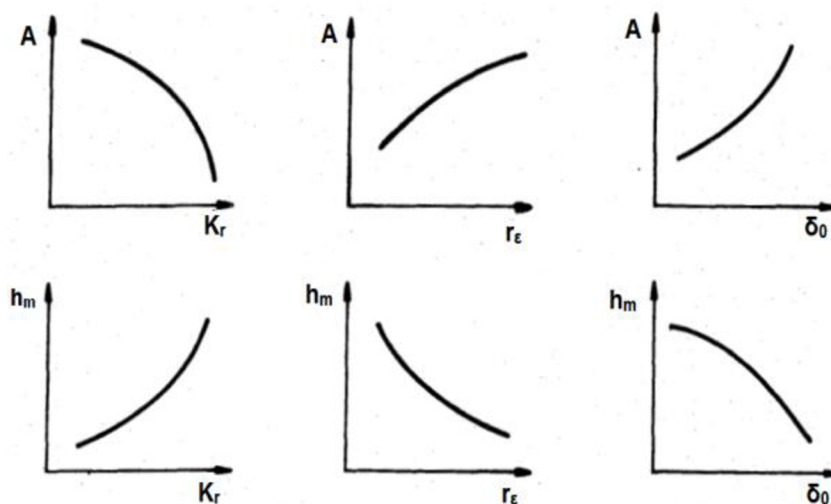
Poloměr špičky r_e má na stabilitu obrábění opačný vliv než úhel nastavení (Obr. 40)), a to z toho důvodu, že vlivem poloměru špičky se mění střední hodnota úhlu nastavení. Zvětšuje-li se poloměr špičky, pak se střední hodnota úhlu nastavení zmenšuje. Poloměr špičky

neovlivňuje intenzitu kmitání v takové míře jako úhel nastavení, ale má zásadní vliv na trvanlivost nástroje. Zmenšování poloměru špičky může vést k výraznému snižování trvanlivosti bříty v důsledku zhoršeného odvodu tepla ze špičky [27]. Poloměr špičky bříty by měl být menší než hloubka řezu, čímž se minimalizuje radiální složka řezné síly působící ve směru malé tuhosti soustavy stroj – nástroj – obrobek způsobující vznik samobuzeného chvění [30].

Úhel řezu

Úhel řezu δ_0 působí na radiální složku řezné síly, tudíž má velký vliv na vznik samobuzených vibrací (Obr. 40). Snižováním hodnoty úhlu řezu se snižuje hodnota radiální složky řezné síly, což znamená vyšší stabilitu řezného procesu. Snižování úhlu řezu je limitováno pevností bříty. Pevnost bříty je možné zvýšit vytvořením fazety – sražením hrany. Tento způsob zvýšení pevnosti bříty nijak významně neovlivňuje řeznou sílu a samobuzené kmitání [27].

Úhel řezu přímo ovlivňuje řezný odpor během působení nástroje na materiál. Při malém úhlu řezu se snižuje nejen hodnota radiální složky řezné síly, ale také řezný odpor. Při snižování úhlu řezu je však nástroj náchylnější k rychlejšímu opotřebení a může dojít až k vylomení. V důsledku rychlého otupení nástroje pak úhel řezu roste a při extrémním otupení břit nástroje ztrácí schopnost oddělit třísku a dochází k pálení obráběné plochy a ke zničení nástroje [31].



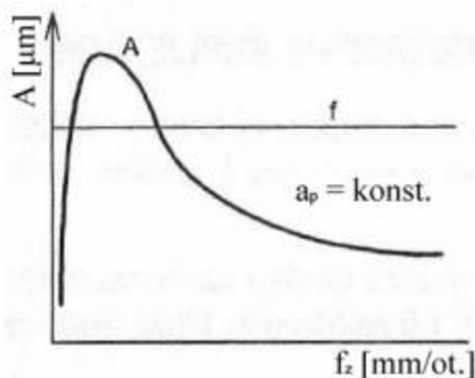
Obr. 40) Vliv řezných parametrů na intenzitu kmitání [27]

Posuv

Tento parametr má zásadní vliv na kvalitu obráběné plochy a utváření třísky. Příliš nízká rychlost posuvu způsobuje vznik nevyhovujícího tvaru třísky, rychlejší opotřebení nástroje, vznik nárůstků na nástroji a zapříčiňuje nevhodnost obrábění. Při příliš velkých posuvech dochází ke ztrátě kontroly nad tvarem třísky, zhoršení kvality obráběného povrchu, vysoké spotřebě energie, vysokému opotřebení nástroje a k zasekávání třísek [32].

Posuv, respektive tloušťka odřezávané třísky ovlivňuje samobuzené kmitání nemonotónně. V oblasti velmi malých posuvů (přibližně do tloušťky odřezávané třísky $s = 0,04$ mm) se projevuje vliv klesající závislosti koeficientu tření na rychlosti posuvu [27].

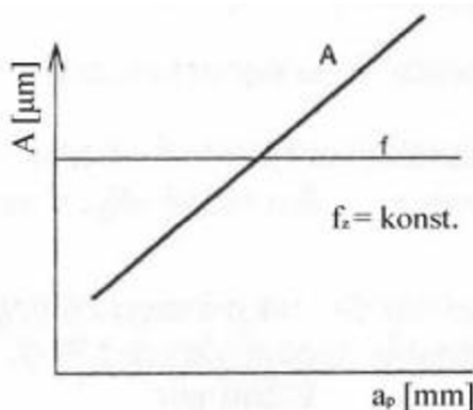
Velikost posuvu na zub f_z má při frézování stabilizující účinek. Nachází-li se řezný proces za mezí stability, pak se zvětšující se hodnotou posuvu f_z výsledná amplituda kmitů A klesá. Toto tvrzení však neplatí vždy, nýbrž pouze v určitém rozsahu hodnot posuvů [33]. Vliv posuvu na stabilitu řezného procesu lze vidět na Obr. 41).



Obr. 41) Vliv posuvu na stabilitu řezného procesu [33]

Hloubka řezu

Hloubka řezu, respektive šířka odřezávané třísky má destabilizující účinek. Při dosažení meze stability se postupné zmenšování hloubky řezu v praxi využívá k dosažení stability při nestabilním řezném procesu. Vliv hloubky odebírané třísky na intenzitu kmitání vyjádřenou pomocí amplitudy A , která působí ve směru složky řezné síly lze vidět na Obr. 42) [33].



Obr. 42) Vliv hloubky řezu na stabilitu procesu [33]

6.4 Kompenzace vibrací

Vzniku samobuzeného kmitání lze v určité míře předcházet nebo jej v případě vzniku eliminovat. Pro předejití jejich vzniku je nejdůležitější patřičně zvýšit statickou a dynamickou tuhost soustavy stoj – nástroj – obrobek. Zvýšení tuhosti soustavy je nutné uvažovat už ve fázi konstrukce obráběcího stroje, jelikož pozdější implementace může být obtížná. Ke zvýšení tuhosti celé soustavy existuje v dnešní době řada způsobů. Mezi tyto způsoby patří například vhodná volba materiálů a geometrie. Dalšími možnostmi je použití pasivních či aktivních tlumičů. Obecně můžeme uvažovat tři druhy kompenzace kmitání. Jedná se o kompenzaci aktivní, poloaktivní a pasivní.

Aktivní kontrola znamená změny při obráběcím procesu během chodu stroje. Aktivní kontrola bývá prováděna pomocí senzorů zabudovaných v základech stroje a pomocí řídicí jednotky, která je schopná informace ze senzorů dostávat a vyhodnocovat, a následně na zpracované informace reagovat změnou řezných podmínek [27]. U semiaktivních tlumičů dochází pouze k řízení velikosti tlumící síly a energie je ze systému pouze odebírána [34].

Pasivní kontrola spočívá v použití pasivních tlumičů a vhodných konstrukčních prvků. Nejpoužívanější pasivní kontrolou je kontrola dle vytvořeného diagramu stability, který udává mezní šířky třísky v závislosti na rychlosti vřetene. Nicméně experimentální odvození diagramu stability bývá mnohdy velmi obtížné [27].

6.4.1 Zvýšení tuhosti stroje

Při studiu kmitů je obráběcí stroj považován za kmitající soustavu s velkým počtem stupňů volnosti. Ukázalo se, že má stroj málo typů vlastních výrazných kmitů a obvykle jsou jejich frekvence dost vzdálené. To znamená, že se dá stroj rozdělit podle vlastních frekvencí do několika jednodušších kmitavých soustav. Samobuzené kmity stroje bývají velmi blízké některým z vlastních frekvencí určitého systému obráběcího stroje. Tento systém pak bývá nazván řídicím systémem a má největší vliv na vznik samobuzených kmitů [35].

Z toho důvodu je potřeba zvýšit tuhost částí tohoto systému, jež má charakter pružiny, čímž docílíme zvýšení odolnosti stroje proti vzniku samobuzených kmitů. U frézek pro čelní frézování dosáhneme zvýšení tuhosti zvýšením tuhosti upnutí nástroje a obrobku, u soustruhů to může být zvýšením tuhosti konika, pinoly či vřetena [35].

Potlačení chvění lze dosáhnout už v samotné konstrukci stroje. Použití minerálního kompozitu, tzv. polymerbetonu při výrobě rámu stroje má příznivý vliv na omezení pozdějšího vzniku samobuzených vibrací. Polymerbeton dosahuje řádově vyššího koeficientu tlumení vibrací než ocel nebo litina, a právě z tohoto důvodu je vhodným materiálem pro konstrukci obráběcích strojů. Dalším materiálem vhodným pro výrobu obráběcích strojů je cementový beton, tzv. hydrobeton. Tento materiál se používá k vyplnění svařovaných konstrukcí pro zvýšení jejich hmotnosti a tuhosti. K výrobě loží při konstrukci přesných obráběcích strojů se používá přírodní žula [36].

Z konstrukčního hlediska lze tuhost celé soustavy zvýšit také vhodným návrhem tvaru jednotlivých částí stroje. Vhodným žebrováním částí stroje či použitím správné tloušťky stěn lze zvýšit celkovou tuhost soustavy [37].

Další možností zvýšení tuhosti soustavy je předepnutí ložisek k uložení vřetene a předepnutí lineárních vedení pro pohybové osy. Vyšší tuhost upnutí nástrojů, držáků nástrojů na vřetenu a obrobků je základním krokem pro zvýšení tuhosti celé kmitavé soustavy [36].

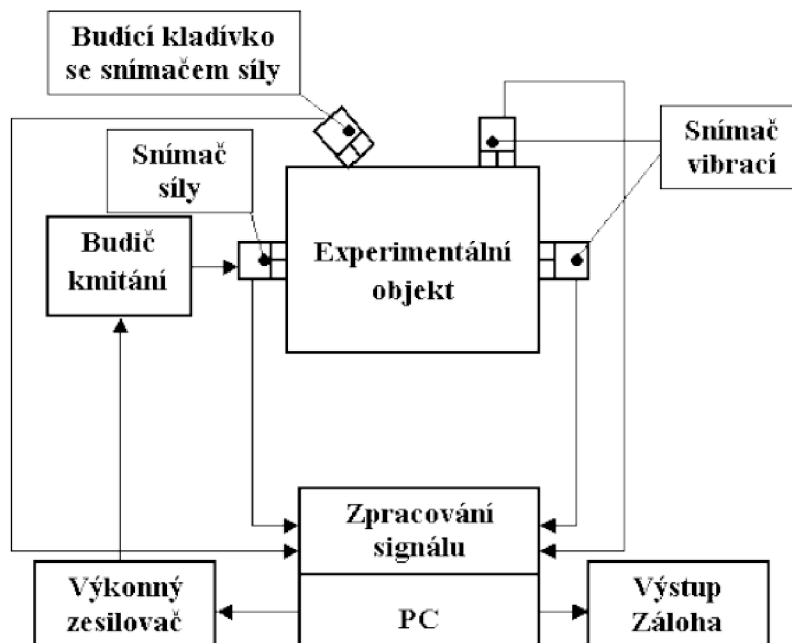
Zvyšování tuhosti jednotlivých prvků systému je základním přístupem k tlumení vibrací. Aby byl obráběcí stroj stabilní, musí být vyroben z hmotných a tuhých konstrukčních prvků, zesílených betonem nebo dalšími materiály utlumujícími vibrace [38].

Modální analýza

Modální analýza patří k nejmodernějším technikám zjišťování tuhosti stroje. Pomocí modální analýzy jsme schopni určit vlastní frekvence jednotlivých částí stroje nebo celé soustavy. Hodnoty vlastních frekvencí zjištěné analýzou se používají k posuzování provozních stavů strojů, kdy by mohla nastat rezonance provozní frekvence s vlastní frekvencí a posuzovaná část stroje by se mohla poškodit [36].

Experimentální modální analýza je analýza využívající k určení vlastních frekvencí experiment. Schéma realizace experimentu lze vidět na Obr. 43). Při experimentu je měřen silový impuls a odezva systému na daný impuls. Odezvou systému myslíme snímané vibrace, kdy při sytému obráběcího stroje, nástroje a obrobku jsou to právě samobuzené kmity. Pomocí výsledků z modální analýzy jsme schopni provést vizualizaci jednotlivých parametrů stroje a lépe navrhnout konstrukční provedení kriticky zatížených částí stroje. Zlepšením konstrukce na

základě výsledků z modální analýzy dojde k výraznému úbytku výskytu míst se sklonem ke vzniku samobuzených vibrací [36].



Obr. 43) Schéma experimentu modální analýzy [36]

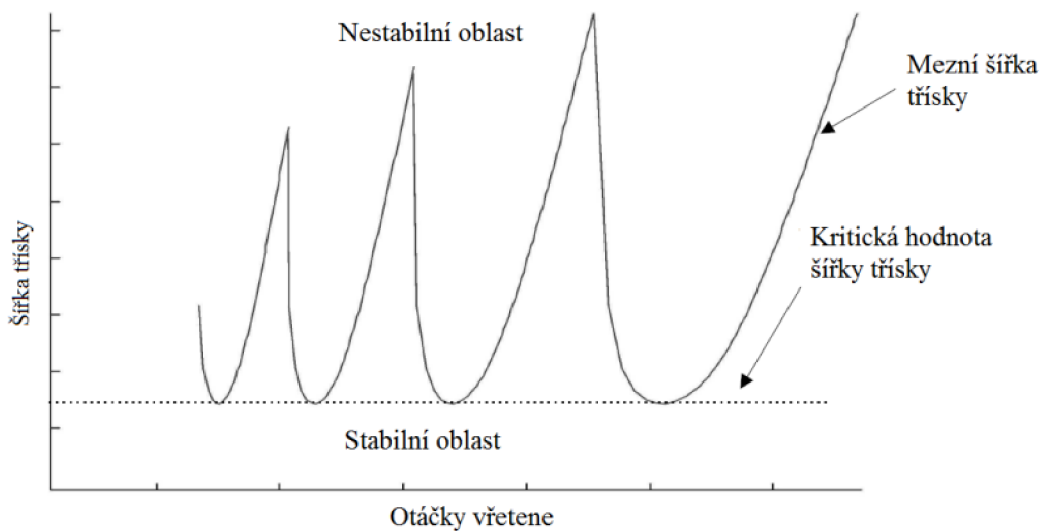
6.4.2 Diagram stability

Diagram stability (Obr. 44)) znázorňuje křivku oddělující stabilní a nestabilní proces obrábění. Mezní křivka stability je závislostí mezi otáčkami vřetene a mezní šířkou třísky. Složením jednotlivých lobů vzniká diagram stability, pomocí něhož jsme schopni určit optimální řezné podmínky, kterými jsou volba otáček a šířka odebírané třísky [36].

V oblasti nacházející se pod křivkou je pro konkrétní otáčky hodnota šířky třísky menší než hodnota mezní, což znamená, že je řezný proces stabilní. Oblast nad křivkou znázorňuje oblast nestabilních řezných podmínek, při kterých dochází ke vzniku samobuzeného kmitání [36].

Z diagramu jsme tedy schopni zjistit vícero informací. Pomocí diagramu lze nastavit řezné podmínky tak, aby bylo v celém rozsahu otáček zamezeno nebezpečí vzniku chvění. Toho lze dosáhnout v případě nastavení mezní šířky na menší hodnotu, než je hodnota kritická. Zároveň lze u některých operací ve vhodných oblastech otáček odebírat značně širší třísku, než je kritická hodnota. Příkladem možné operace je operace hrubování [36].

Na základě vytvořeného diagramu stability lze také optimalizovat řezné podmínky tak, aby vždy byla odebírána maximální přípustná šířka třísky, a tím byl maximalizován výrobní výkon obráběcího stroje. V případě vzniku chvění jsme schopni z diagramu stability vyčíst, zda je v daném případě k odstranění chvění výhodnější snížení či zvýšení otáček vřetene a o jakou hodnotu. Stejně tak lze z diagramu vyčíst, o jakou hodnotu je nutno snížit šířku třísky [36].



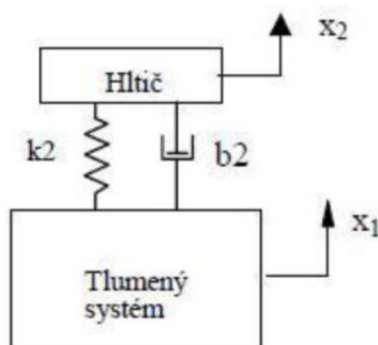
Obr. 44) Diagram stability [36]

6.4.3 Pasivní kompenzace vibrací

Pasivní kompenzace vibrací spočívá v přidání pasivních tlumičů či hltičů vibrací. Těmito prostředky jsme schopni potlačit vznik vibrací buzených částí obráběcího stroje [37]. Dalším efektivním opatřením proti samobuzeným vibracím je použití nerovnoměrného rozložení rozteče zubů a nestejného stoupání šroubovice nástroje. Tento způsob konstrukce je používán především na dlouhé vyložení v případě špatně dostupného místa řezu [34]. Některé metody pasivního tlumení vibrací jsou popsány v následujících podkapitolách.

Dynamický hltič

Schéma dynamického hltiče lze vidět na Obr. 45). Tato metoda tlumení vibrací spočívá v připojení vnější přídavné struktury skládající se z přídavné hmoty k primárnímu tlumenému systému. Přídavná hmota je k primární soustavě připojena pomocí prvku tuhosti a tlumení. Zvolením správných parametrů hmotnosti, tuhosti a útlumu lze u hltiče ladit jeho vlastní frekvenci. K utlumení systému dojde, pokud se tato frekvence shoduje s vlastní frekvencí tlumeného systému, přičemž hmota hltiče na sebe část energie kmitů tlumené soustavy přenáší. Velkou výhodou hltiče je jeho snadná konstrukce, a s tím spojena i jeho nízká cena a bezporuchovost. Nevýhodou hltiče je však nízká možnost přeladění [39].



Obr. 45) Schéma dynamického hltiče [39]

Hydraulický držák nástrojů

Schopnost tlumení kmitů pomocí hydraulického držáku nástrojů spočívá v přeměně mechanické energie kmitů na tepelnou energii. Mezi upínacím systémem a nástrojem se nachází

tenká vrstva hydraulické kapaliny, která funguje jako pružný tlumicí element k přeměně energie kmitů. Řez hydraulickým držákem nástrojů je zobrazen na Obr. 46), kde lze pod čísly 4 a 5 vidět přítomnost hydraulické kapaliny. Výhodou tohoto způsobu upínání je schopnost upnutí nástrojů o různých průměrech a vysoká schopnost tlumení kmitů v procesu obrábění. Nevýhodou tohoto systému je snížení statické tuhosti stroje, která je ale nahrazena zvýšením dynamické stability stroje [36].



Obr. 46) Řez hydraulickým držákem nástrojů [36]

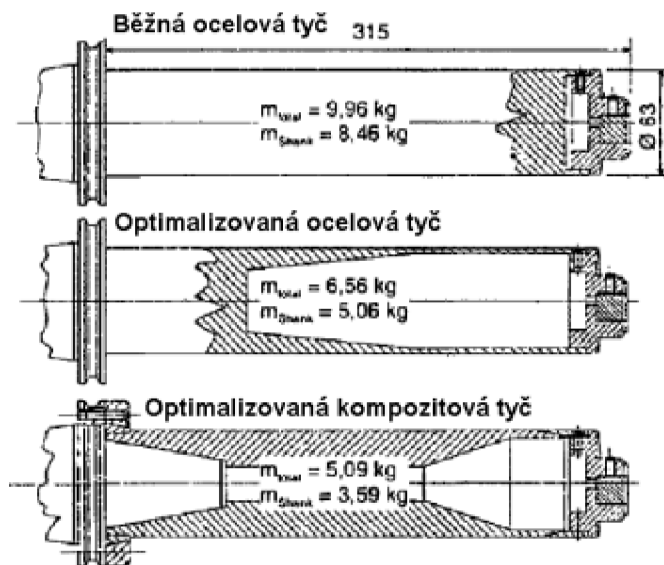
Tlumení vyvrtávací tyče

U dlouhých vyvrtávacích tyčí může velmi snadno dojít k rozkmitání. Aby byly zachovány dobré řezné podmínky, je nutné tyto vzniklé kmity tlumit. Jedním ze způsobů, jak kmity tlumit je přidání tělesa velké hmotnosti, které je uloženo v pružných pryžových pouzdrech. Tlumicí efekt se zvyšuje s přidáním tlumícího oleje do zbytku tyče, což lze vidět na Obr. 47) [36].

Dalšími možnostmi, jak předejít vzniku vibrací při obrábění je změna geometrie nástroje a použití vhodného materiálu. Na Obr. 48) lze vidět srovnání standardní vyvrtávací tyče vyrobené z oceli s optimalizovanou ocelovou tyčí, která má stejné rozměry, nýbrž nižší hmotnost, a tím i jiné vlastnosti frekvence kmitů. Třetí tyč z Obr. 48) je vyrobena z kompozitu a pod podmínkou zachování geometrických rozměrů má nejnižší hmotnost [36].



Obr. 47) Schéma vyvrtávací tyče s pasivním tlumením [36]



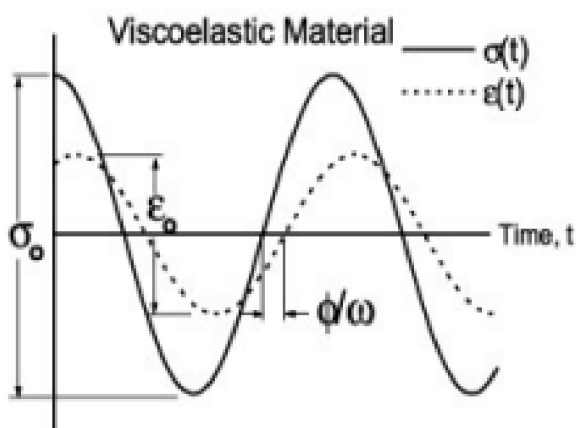
Obr. 48) Porovnání vyvrtávacích tyčí [36]

Viskózní tlumič

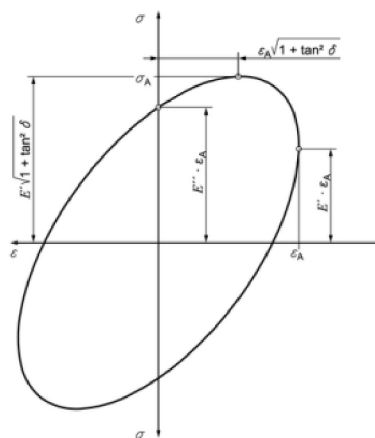
Ideálním materiálem pro viskózní tlumení je materiál schopen veškerou vloženou energii přeměnit na teplo. Při zpětném odlehčování vzorku pak nedochází ke zpětnému využívání mechanické energie. Napětí σ u takového materiálu předbíhá poměrnou deformaci ε , přičemž fázový posuv nabývá hodnoty $\pi/2$, což lze vidět na Obr. 49). Další důležitá vlastnost pro viskózní materiály je neplatnost Hookova zákona [39].

Viskoelastický tlumič

Viskoelastické materiály jsou přechodem mezi viskózními a elastickými materiály. Z praktického hlediska se jedná zejména o gumy, polymery, epoxidové pryskyřice či uretany. Stejně tak jako u materiálů viskózních, dochází k těmto materiálům k fázovému posuvu napětí a deformace, a to v intervalu $0 - \pi/2$. Principem tlumení je přeměna části poskytnuté energie na teplo. Množství přeměněné tepelné energie je pak přímo úměrné ploše hysterezní smyčky, která definuje závislost mezi poměrnou deformací a napětím v průběhu jednoho cyklu u harmonického namáhání, jak lze vidět na Obr. 50) [39].



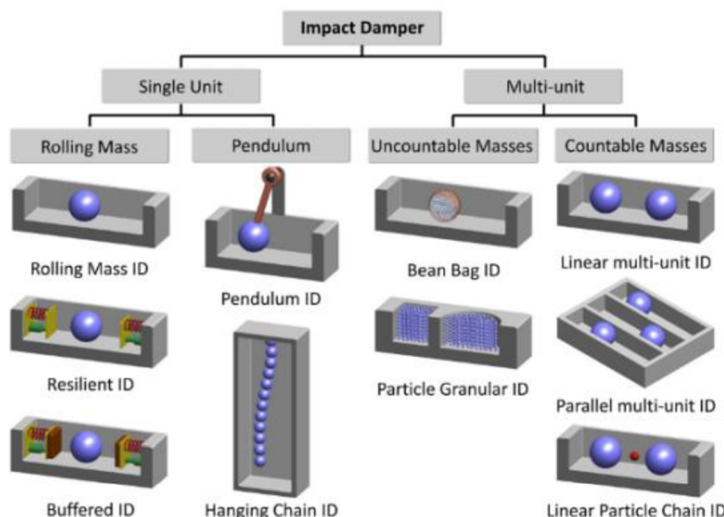
Obr. 49) Viskoelastický materiál [39]



Obr. 50) Hysterezní smyčka [39]

Impact damper

V řadě inženýrských aplikací se používá k pohlcení vibrací impact damper. Jedná se o velmi efektivní a ekonomické řešení. Typické je složení z jedné či více hmot, nejčastěji ve tvaru koule, které jsou volně pohyblivé v dutině, viz Obr. 51). Dutina může být k tlumící soustavě připevněna jako samostatný prvek nebo mohou být tyto hmoty integrovány přímo do soustavy pomocí děr vyvrtávaných přímo do konstrukce. Princip tlumení soustavy spočívá v nárazech hmoty o stěny tlumiče, popřípadě o stěny dutin v konstrukci. Během nárazů dochází ke změně kinetické energie, která je rozptýlena v podobě tepla, hluku a vibrací o vysokých frekvencích [39].



Obr. 51) Impact dampers [39]

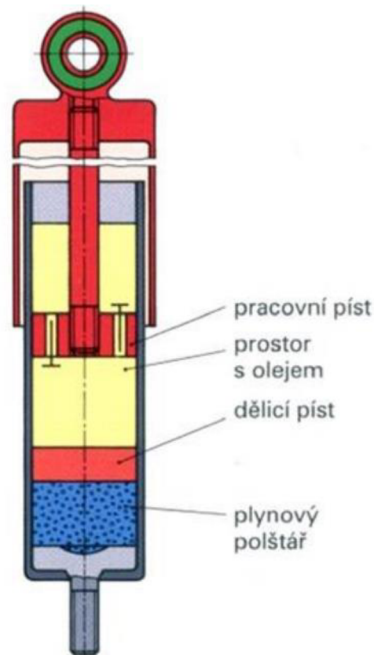
6.4.4 Poloaktivní kompenzace vibrací

Použitím aktivních členů při návrhu dynamického hltiče dostaneme tzv. aktivní hltič. Původní pasivní člen mezi soustavou a hmotou hltiče je nahrazen členem aktivním. Pomocí aktivního členu jsme schopni do systému dodávat energii. Hlavní výhodou aktivních hltičů je možnost řízení aktivního prvku tak, aby hltič pracoval v širokém frekvenčním rozsahu. Velkou nevýhodou aktivního hltiče je nebezpečí zesílení vysokých frekvencí systému vlivem zpětné vazby, což může vést k destabilizaci systému [34].

Z hlediska odstranění potenciálních problémů s destabilizací systému je nejbezpečnějším řešením nahrazení aktivního prvku prvkem poloaktivním. U poloaktivních tlumičů dochází k řízení velikosti tlumící síly, přičemž energie ze systému je pouze odebírána. Použitím této metody předcházíme destabilizaci systému a mnohdy bývá dosaženo lepších výsledků než při použití metody pasivního tlumení [34].

Hydraulický tlumič s proměnnými škrťacími ventily

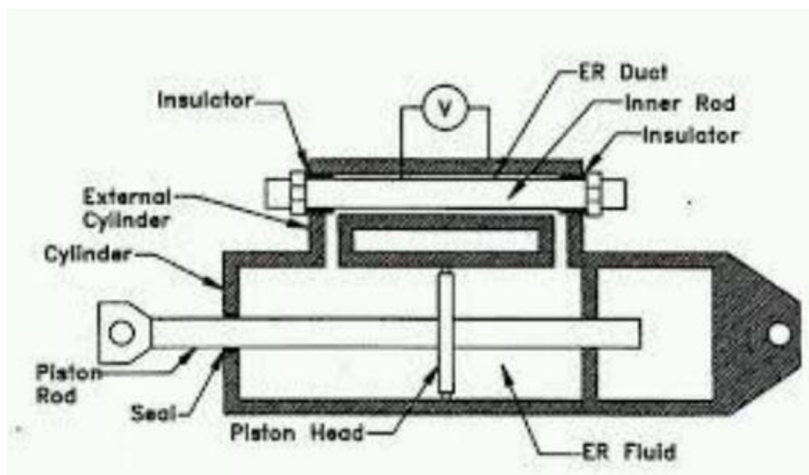
Základním poloaktivním aktuátorem je hydraulický tlumič s proměnnými škrťacími ventily, jež lze vidět na Obr. 52). Řízení průtoku hydraulického tlumiče může být minimální, maximální nebo plynule říditelné, přičemž řízení je realizováno buďto elektromagneticky, pneumaticky nebo pomocí servopohonů. Může být použito symetrických či nesymetrických tlumičů s rozdílnou charakteristikou pro roztahování a stlačování. Pro efektivní používání tohoto typu řízených tlumičů se zpětnovazebným snižováním vibrací je klíčovým prvkem rychlost odezvy tlumící síly na řídicí signál [34].



Obr. 52) Hydraulický tlumič [34]

Elektroreologické a magnetoreologické tlumiče

Další možností je použití elektroreologických či magnetoreologických tlumičů. Elektroreologické tlumiče (Obr. 53)) bývají složeny z hydraulického válce obsahujícího dielektrické částice o velikosti v řádu mikrometrů v olejové suspenzi. Působením elektrického pole dojde k řetězení částic, a tím ke zvýšení viskozity kapaliny, díky čemuž dochází ke změně tlumicí charakteristiky tlumiče. Magnetoreologické tlumiče pracují na stejném principu, nicméně zde není řídicí veličinou elektrické pole, nýbrž pole magnetické. Tento typ tlumičů je schopen reagovat rychleji než tlumiče kapalinové, ale jejich konstrukce je mnohem náročnější [34].



Obr. 53) Schéma elektroreologického tlumiče [34]

6.4.5 Aktivní kompenzace vibrací

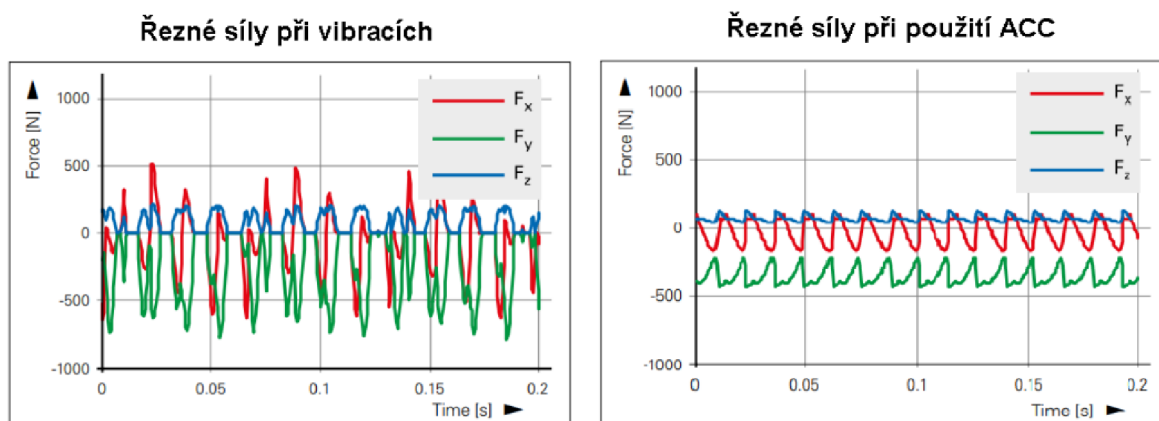
Způsob aktivního tlumení vibrací je aktuálně stále rozvíjejícím se tématem. Tímto tématem se zabývá mnoho firem a snaží se vyvíjet mechatronické systémy pro potlačení chvění při procesu obrábění. Tyto systémy obsahují množství senzorů pro snímání otáček vřetene,

výpočet řezné síly na nástroji, aktuátory a zpětnou vazbu a pokoušejí se o co největší přiblížení fázového posunu k nule, a tím zabránění samobuzenému chvění. V systémech se používá několik druhů aktuátorů. Patří mezi ně například piezoelektrické aktuátory, magnetická ložiska, chytré kapaliny nebo aktivní hltiče. Systémy jsou schopny pracovat v automatickém režimu, měnit frekvenční charakteristiku a vibrační signál přímo v procesu obrábění, ale za cenu prodloužení strojního času. Systém je schopen při nárustu chvění vypočítat optimální hloubku řezu nebo optimální otáčky vřetene, ke kterým však potřebuje znát počet zubů nástroje, řídicí mód a prahovou hodnotu vibrací [34]. Některé systémy využívající metodu aktivního tlumení jsou popsány v následujících podkapitolách.

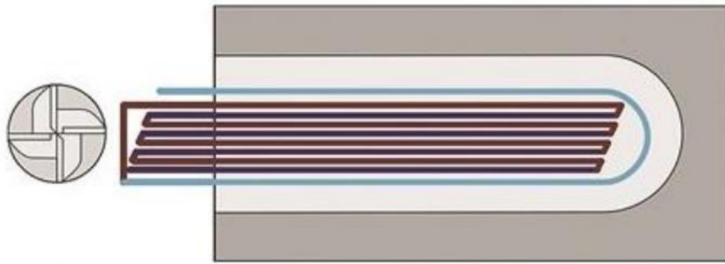
Dynamická výkonnost Heidenhain

Firma Heidenhain přišla s balíkem, jehož nejdůležitějším prvkem je funkce ACC. Tato funkce spočívá v aktivním potlačování chvění, což omezuje sklon stroje k nežádoucím kmitům. Systém je schopen snímat a analyzovat chvění stroje a ve chvíli, kdy zaznamená nežádoucí chvění, snaží se pohltit vzniklou energii za pomoci řízení lineárních os. Samotné pohony stroje jsou tak využívány i jako prostředek aktivního tlumení chvění. Porovnání velikostí řezných sil bez použití systému ACC a s jeho použitím lze vidět na Obr. 54). Velkou nevýhodou při použití tohoto systému je možnost tlumení vibrací pouze do frekvence o velikosti 100 Hz [36].

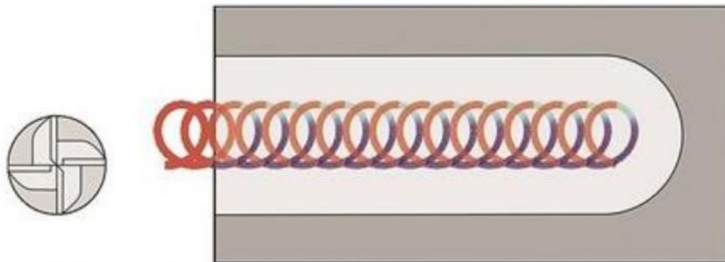
Další funkcí v tomto balíčku od společnosti Heidenhain je trochoidální frézování. Tato funkce umožňuje sledovat a zohledňovat trasu nástroje při obrábění. Z hlediska stability řezného procesu je důležité, aby generovaná dráha nástroje programem byla volena tak, aby zatížení nástroje bylo konstantní a nedocházelo tak k náhlým změnám opásání stroje, a tedy k náhlé změně řezné síly, jež by mohla vybudit nežádoucí chvění. U trochoidálního frézování dochází ke snížení radiální hloubky řezu, a tedy ke snížení tloušťky třísky, což umožňuje zvýšení hodnoty posuvu. Kratší dobou kontaktu mezi obrobkem a břitem nástroje docílíme nižšího buzení při řezném procesu a může být zvětšena hloubka řezu tak, aby kmitání nebylo vybudeno [36]. Na Obr. 55) lze vidět srovnání dráhy nástroje za běžného frézování a za trochoidálního frézování.



Obr. 54) Porovnání velikosti řezných sil s použitím ACC [36]



Klasická metoda řádkového obrábění na 4 plné řezy a 2 částečné řezy po určitých krocích v ose Z. Doba obrábění je 96 s.



Trochoidální metoda s použitím AFC. Doba obrábění je v druhém případě 58 s. Při použití stejného nástroje a při obrábění stejného materiálu došlo ke snížení doby obrábění o 40 %. Rozměry drážky: délka 63 mm, šířka 1,5D a hloubka 1,9D, kde D je průměr nástroje.

Obr. 55) Porovnání dráhy nástroje běžného a trochoidálního frézování [36]

Magnetické ložisko

Princip použití magnetického ložiska k aktivnímu tlumení je založen na aplikaci opačných dynamických sil o stejné frekvenci, než jsou síly budící kmitání. Jelikož aplikace proměnlivé síly probíhá skrze elektromagnetické pole, nedochází zde ke vzniku třecích sil. Výhodou magnetických ložisek je tichý chod a dlouhá životnost, nevýhodou je pak vysoká energetická náročnost provozu. Kvůli bezpečnosti a zvýšení tuhosti uložení jsou tato ložiska vzhledem k jejich elektronickému řízení používána v kombinaci s valivými ložisky, což pomáhá snižovat i energetickou zátěž [36].

Jak lze vidět na Obr. 56), magnetické ložisko je složeno z několika pólových dvojic. V rotoru se nachází senzory polohy využívané ke snímání otáček. Přesnost ovlivnění stroje magnetickými ložisky je dána právě přesností odezvy senzorů na rotoru [36].

Síla v ložisku lze být velmi dobře modulována pomocí software a dokáže tak efektivně potlačit vibrace rotoru [36].



Obr. 56) Magnetické ložisko [40]

Piezoaktuátory

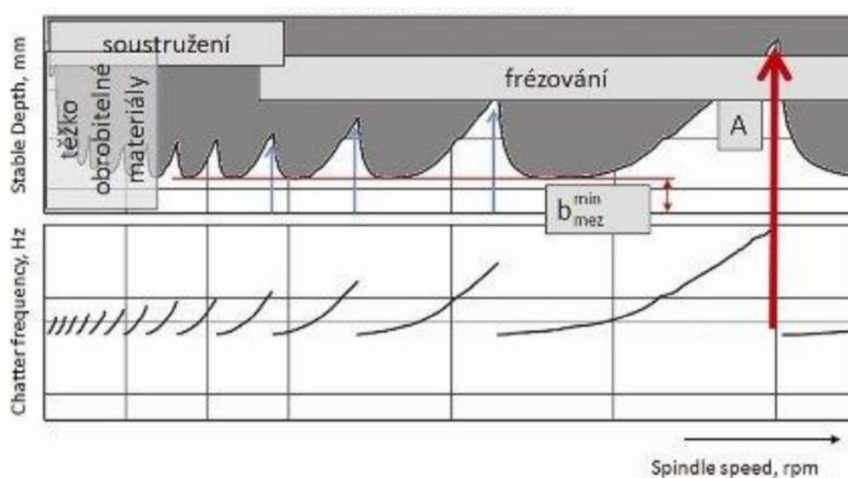
U piezoaktuátorů se využívá piezoelektrického jevu, spočívajícího ve vzniku elektrického náboje při deformaci krystalů. Krystal je deformován při aplikaci elektrického pole, odkud vyplývá, že aplikace síly není bezkontaktní, jako je tomu u použití magnetických ložisek. Výhodou použití piezoaktuátorů je aplikace velké síly na malou vzdálenost a s velkou přesností. Díky tomu, že jsou ovládány elektronicky je lze využít k modulaci síly působící na hřídel, a tím k tlumení vibrací. V mnoha případech však aplikace na hřídel není možná a tlumící síla pak bývá aplikována na ložiska [36].

Okuma Machining Navi systém

Bezkonkurenční řešení v otázce samobuzených vibrací nabízí antivibrační systém Machining Navi od japonské společnosti Okuma. Tento systém pro frézování funguje ve dvou možnostech. První možností je Navi M-g, kdy je stroj ovládán ručně operátorem. Druhou možností je Navi M-i, kdy je stroj ovládán automaticky. Verze tohoto systému pro operaci soustružení je nazývána Navi L-g.

Princip tohoto systému spočívá ve snímání vibrací během procesu obrábění pomocí akcelerometru uloženého ve vřetení nebo pomocí hlukového signálu. Následně dojde k vykreslení diagramu stability a vypočítání optimálních otáček vřetene a dle verze použitého programu buďto k automatické úpravě procesu nebo zobrazení doporučených otáček obsluze stroje.

Na Obr. 57) lze vidět diagram stability. Řezný proces je stabilní v oblasti bílé plochy a optimálním otáčkám odpovídají špičky bílé plochy v diagramu, jež jsou označeny šipkami [36].



Obr. 57) Diagram stability [36]

7 NÁVRH ŘEŠENÍ – AKTIVNÍ TLUMENÍ

Jak již bylo popsáno v předchozí kapitole, existuje vícero možností eliminace samobuzeného kmitání. Z mého pohledu je nejpokročilejším řešením systém Machining Navi od společnosti Okuma.

Jelikož z hlediska samobuzených vibrací je při procesu obrábění nejslabším místem soustava nástroj – obrobek, navrhuji soustředit řešení samobuzených vibrací právě na tuto soustavu. Základním předpokladem předejití vzniku samobuzených vibrací je dostatečná tuhost soustavy nástroj – obrobek. Ne při každé aplikaci je však možné dostatečné tuhosti dosáhnout.

V předchozí kapitole byla zmíněna také existence nástrojů s možností pasivního tlumení. Princip nástrojů s pasivním tlumením vibrací je založen na koncepci přídavné hmoty a má za úkol minimalizovat amplitudu vibrací kmitajícího systému. Pasivní tlumič odebírá energii kmitajícímu systému dvěma způsoby. Za prvé je ohybové kmitání vyvrtávací tyče brzděno působením kinetické energie pomocné přidané hmoty proti kmitání tyče. Za druhé je efekt tlumení způsoben změnou energie kmitání vazby mezi přidanou hmotou a samotnou vyvrtávací tyčí [41].

Novým návrhem na řešení problematiky samobuzených vibrací je namísto pasivního tlumení v nástroji použít tlumení aktivní. Konkrétně umístění aktivního členu přímo do vřetene, jelikož právě tuhost soustavy nástroj – obrobek, jak již bylo zmíněno, je z hlediska samobuzených vibrací nejslabším místem při procesu obrábění.

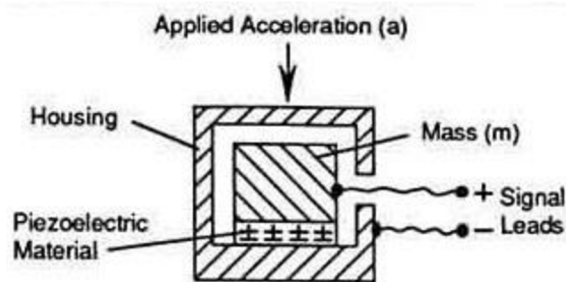
Při návrhu tohoto řešení jsem se inspirovala systémem Okuma Machining Navi. Návrh nového řešení spočívá ve snímání, vyhodnocování a aktivním tlumení. Dílčí kroky budou popsány v následujících podkapitolách.

7.1 Snímání akcelerometrem

Prvním krokem při detekci samobuzeného kmitání je snímání vibrací. Vhodným kandidátem na snímání vibrací by mohly být MEMS snímače. Výhodou MEMS snímačů je jejich malá velikost, nevýhodou je však nízký frekvenční rozsah a reakce snímačů na statické zrychlení. Nejvhodnějším snímačem pro detekci samobuzených vibrací je piezoelektrický akcelerometr. Tento typ akcelerometru se vyznačuje vysokou přesností a citlivostí a je schopen snímat ve velkém kmitočtovém rozsahu. Kladnými vlastnostmi jsou rovněž nízká hmotnost a malé rozměry. Nevýhodou piezoelektrických akcelerometrů je nízká úroveň výstupního signálu, což vyžaduje použití zesilovače, a tudíž je potřeba vyřešit napájení. Akcelerometr bude umístěn ve vřetenu a bude snímat v osách X, Y a Z.

7.1.1 Princip piezoelektrického akcelerometru

Základní funkcí piezoelektrického akcelerometru je měření a převod mechanické síly na elektrický signál. Základ piezoelektrického akcelerometru je tvořen dvěma hlavními částmi. Jedná se o piezoelektrický materiál (piezoelectric material), sloužící ke snímání zrychlení a o seismickou hmotu (mass), která převádí dle Newtonova zákona hodnotu zrychlení na sílu. Schéma principu piezoelektrického akcelerometru je zobrazeno na Obr. 58) [42].



Obr. 58) Schéma principu piezoelektrického akcelerometru [42]

Jedna strana piezoelektrického materiálu je upevněna k základně senzoru. Na piezoelektrický materiál (snímač) je upevněna seismická hmota. V případě působení zrychlení a na akcelerometr způsobí generovaná síla F , působící na piezoelektrický element, vygenerování náboje, respektive napětí na výstupu senzoru. Působící síla je dle Newtonova zákona úměrná zdroji zrychlení a seismické hmotě. Piezoelektrickým efektem je tak na výstupu generován náboj q , který je úměrný působící síle. Jelikož má seismická hmota konstantní hmotnost, je výstupní signál v podobě náboje úměrný akceleraci senzoru. Tím, že je akcelerometr pevně umístěn na snímaném objektu, měří jeho zrychlení [42].

7.1.2 Nábojový zesilovač

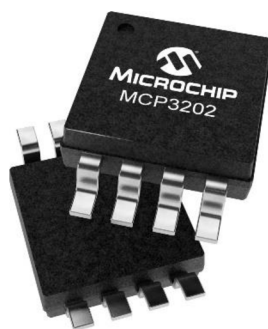
Jak již bylo zmíněno, piezoelektrické akcelerometry generují nízkou úroveň výstupního signálu. Proto je potřeba výstupní signál z akcelerometru zesílit. Pro zesílení signálu je vhodné použít nábojový zesilovač.

Výstupem z piezoelektrického čidla je náboj, který je přímo úměrný působící síle. Nábojový zesilovač nábojový signál na svém vstupu převádí na signál napěťový. Převod signálu zajišťuje kondenzátor zapojený ve zpětné vazbě operačního zesilovače. Náboj z piezoelektrického čidla je v něm shromažďován, čímž je vytvářeno napětí [42].

7.2 Vyhodnocování

Dalším krokem po nasnímání signálu je jeho vyhodnocování. Vzniklý signál bude pomocí SW zpracován a zpracovaná data obsahující informace o vzniklých vibracích budou odeslána do aktuátoru, který provede jejich kompenzaci.

Pro vyhodnocení musí být použito AD převodníku, jež navazuje na akcelerometr a díky němuž jsme schopni z akcelerometru rychle vzorkovat analogový signál. Jako příklad reálné konfigurace pro vývoj systému s aktivním tlumením by mohl být použitý 12-Bit AD převodník se 100 kHz frekvencí MCP3202, který lze vidět na Obr. 59).



Obr. 59) AD převodník MCP3202 [43]

Na AD převodník navazuje mikrokontroler, který získává data z AD převodníku a obsahuje nejdůležitější část, kterou je SW. Jako příklad reálné konfigurace pro vývoj systému s aktivním tlumením by mohl být použitý mikrokontroler Arduino Due s ARM procesorem, který lze vidět na Obr. 60).



Obr. 60) Mikrokontroler s ARM procesorem [44]

V SW budou data zpracovávána a pomocí dvojí integrace zrychlení a filtrace získáme polohu, která bude následně odeslána do regulátoru řídicího pohonu aktuátoru. Vyhodnocování dat probíhá automaticky a v reálném čase.

Tímto postupem lze dosáhnout aktivního tlumení všech vibrací, jež akcelerometr zaznamená. V případě, že by uživatel obráběcího stroje chtěl tlumit pouze vibrace samobuzené, musí být v SW naprogramován také výpočet pro identifikaci samobuzených vibrací. Daný SW by pak musel navíc vyhodnocovat data z akcelerometru pomocí výpočtu efektivní hodnoty ve frekvenčních pásmech, při nichž byly zjištěny zvýšené hodnoty vibrací. Výpočet efektivní hodnoty se provádí pomocí součtu kvadrátů amplitud z FFT dle vzorce:

$$ef = \sqrt{\sum_{f=fmin}^{f=fmax} A_f^2}$$

Volba varianty tlumení pouze samobuzených vibrací by však znamenala vyšší nároky na snímání dat, čímž se zvyšuje čas potřebný pro měření. Celý proces by tam byl o mnoho pomalejší a bylo by náročnější docílit včasného tlumení.

7.3 Aktivní tlumení

Aktivní tlumení vzniklých vibrací bude probíhat přímo ve vřetení pomocí vhodně konstruovaného tříosého aktivního tlumiče. Na základě vyhodnocených dat ze SW tlumič zareaguje s frekvencí a s fázovým posuvem tak, aby eliminoval vzniklé vibrace.

Tlumení bude probíhat ve vřetení co nejbliže k hřídeli, jelikož tlumič musí pracovat s co nejmenší hmotností, aby byl schopen vibrace kompenzovat s co nejvyšší rychlostí. Pevná část aktuátoru musí být upevněna na pevné části vřetene. Aktuátor bude tedy působit v nejbližší pevné části upnutí nástroje a jeho pohyblivá část bude uchycena k ložiskům, čímž se kompenzace přenesou přímo na nástroj. Aby bylo možné aktuátor ovládat, a přitom by byl motor statický, musí být mezi hřídel a motor umístěna speciální dvojice homokinetických kloubů s teleskopickým spojovacím členem pro umožnění pohybu na rotující hřídeli.

Aby bylo možné celý tento systém aktivního tlumení v budoucnu zrealizovat, musel by být navrhnout speciální aktivní tlumič schopný s vysokou rychlostí uvést do pohybu značně hmotný nástroj. Celá konstrukce stroje, konkrétně konstrukce vřetene a pohonu by musela být konstrukčně uzpůsobena potřebné velikosti aktivního tlumiče. Toto konstrukční řešení aktivního tlumení vibrací vyžaduje spoustu zkoušek a experimentů a může být námětem pro další zpracování diplomových či disertačních prací.

8 NÁVRH METODIKY PREDIKCE SAMOBUZENÉHO KMITÁNÍ

Predikce vzniku samobuzeného kmitání by měla být uvažována již při samotné konstrukci výrobního stroje. Při zadávání projektu musí být komunikován účel výrobního stroje a definován přesný postup obrábění. Vhodnou konstrukcí obráběcího stroje vzhledem k jeho budoucímu použití, vybavením stroje vhodnými tlumícími prvky a vhodnou volbou řezných podmínek můžeme předejít vzniku samobuzených vibrací.

8.1 Doporučený postup předcházení vzniku samobuzených vibrací

V této kapitole bude zpracováno doporučení postupu pro zamezení vzniku samobuzených vibrací při pořizování a instalaci nového obráběcího stroje.

8.1.1 Vhodná konstrukce stroje

Budoucí účel obráběcího stroje určuje jeho konstrukční zpracování. Ideální konstrukce stroje by měla sestávat z materiálů s dobrými tlumícími vlastnostmi. Doporučuji volit materiály jako jsou polymerbeton pro konstrukci stroje, hydrobeton pro vyplnění svařovaných konstrukcí a přírodní žulu pro výrobu loží. Jedná se sice o finančně nákladné materiály, nicméně zajistí dostatečnou tuhost stroje, která je velmi důležitým faktorem pro předejití vzniku samobuzených vibrací.

Tuhost stroje lze také zvýšit vhodným žebrováním částí stroje či vhodnou tloušťkou stěn. Návrhy vhodných tvarů a výztuží se provádějí pomocí metody konečných prvků s využitím tvarově optimalizačních algoritmů. Další možností zvýšení tuhosti soustavy je předepnutí ložisek k uložení vřetene a předepnutí lineárních vedení pro pohybové osy.

Pro předcházení vzniku samobuzených vibrací či jejich eliminaci doporučuji při konstrukci stroje zakomponovat také pasivní tlumící prvky. Volba vhodných tlumících prvků závisí jak na použití stroje, tak na finančních možnostech uživatele.

8.1.2 Instalace stroje

Vhodné umístění stroje má také vliv na vznik vibrací. Stroj by neměl být provozován v blízkosti jiné těžké techniky, jako jsou například lisy či buchary. Vhodnou volbou základů stroje jsme schopni eliminovat přenos vibrací z okolí stroje. Správné uložení obráběcího stroje znamená vhodné ukotvení stroje k základu pomocí upínacích prvků. Základy stroje musí být schopny snášet statické i dynamické zatížení bez deformace a musí bránit změnám polohy upínacích prvků, které mohou mít za následek chyby polohování.

8.1.3 Sestavení diagramu stability

Před uvedením nového stroje do provozu doporučuji sestavení diagramu stability pro vhodnou volbu řezných podmínek. Pomocí vytvořeného diagramu stability jsme schopni docílit maximálního možného využití stroje za řezných podmínek, při kterých je proces ještě stabilní.

8.1.4 Dostatečně tuhé upnutí nástroje a obrobku

Dostatečně tuhé upnutí nástroje a obrobku je z hlediska vzniku samobuzených vibrací nejcitlivějším místem soustavy stoj – nástroj – obrobek. V případě tvarově složitějších obrobků bývá dostatečně tuhé upnutí komplikované. V tomto případě je potřebné pro proces obrábění

těchto tvarově složitých komponent navrhnout vhodný přípravek pro dostatečně tuhé uchycení komponenty. Dostatečné tuhosti soustavy nástroj – obrobek lze dosáhnout také vhodnou volbou a uchycením nástroje.

8.2 Doporučený postup při vzniku samobuzených vibrací

V případě vzniku samobuzených vibrací je sestaven praktický postup pro odstranění chvění. Postup sestává ze tří úrovní. Kroky jsou sestaveny hierarchicky od nejpravděpodobnější příčiny vzniku chvění a nejméně obtížných zásahů až po nejobtížnější zásahy do nastaveného procesu obrábění:

1. Kontrola:
 - a) Kontrola opotřebení nástroje – pomocí zvětšovacího skla nebo ručního mikroskopu
 - b) Kontrola upnutí nástroje nebo výměnné břitové destičky – nečistoty nebo poškozené dosedací plochy
 - c) Kontrola upnutí držáku nástroje – dosedací plochy nástrojového upínače, držák, dutina vřetene – mechanické poškození nebo nečistoty
 - d) Zkrácení vyložení nástroje na nejmenší možnou délku
 - e) Kontrola upnutí obrobku – upínací síla, funkce čelistí
 - f) V případě nevhodné volby základů stroje či umístění stroje na nestabilním povrchu kontrola nivelačních šroubů – kontrola poklepem dle intenzity hluku, seřízení pomocí strojní vodováhy
2. Změna parametrů:
 - a) Změna otáček
 - b) Změna hloubky řezu
3. Změna geometrie nástroje
 - a) Výměna nástroje za nástroj s jinou geometrií
 - b) Aeroplaning příliš ostrého nástroje
 - c) Úprava CNC programu – trajektorie pro stabilní zatížení nástroje
 - d) Kontrola upínací síly tažného čepu upínače
 - e) Volba jiného nástroje, nástrojového držáku s pasivním tlumením.

9 KOMENTÁŘ K PŘEDLOŽENÉMU ŘEŠENÍ

V této kapitole jsou předloženy komentáře k návrhu řešení aktivního tlumení a návrhu metodiky predikce samobuzeného kmitání. Komentář k předloženým řešením byl jedním z cílů diplomové práce. V komentářích je stručně popsána podstata jednotlivých návrhů a akademický pohled autora diplomové práce.

9.1 Návrh řešení – aktivní tlumení

Výše diskutovaný návrh aktivního tlumení samobuzených kmitů byl inspirován mými závěry ze semestrální práce, kterou mi zadal vedoucí diplomové práce v předmětu GIS. Těmto semestrálním pracím se na Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky zkráceně říká mezi pedagogy a studenty Garcia. Při vypracování semestrální práce byl proveden rozbor současného stavu poznání a následně byl proveden návrh nového, inovativního řešení, čím bylo aktivní tlumení vzniklých vibrací v nástroji.

Aktivní tlumení přímo v nástroji je z konstrukčního hlediska stávajících obráběcích strojů a aktivních tlumičů nemožné. Proto by při realizaci tohoto způsobu kompenzace samobuzených vibrací muselo dojít ke konstrukční úpravě stroje samotného.

Nový návrh spočívá ve snímání, vyhodnocování a aktivním tlumení. Snímání by bylo prováděno pomocí vhodného tříosého piezoelektrického akcelerometru umístěného ve vřetení. Data z akcelerometru by byla zpracovávána pomocí AD převodníku, díky němuž dosáhneme rychlého vzorkování analogového signálu. Na AD převodník navazuje mikrokontroler zpracovávající data z převodníku a obsahující řídicí SW. V SW jsou data vyhodnocována a příslušné informace jsou posílány do pohonných os aktivního tlumiče.

Aktivní tlumení bude probíhat ve vřetení v blízkosti nástroje. Pevná část tlumiče bude upevněna k nepohyblivému vřetení a pohyblivá část bude upnuta k ložiskům pohybujícím nástrojem. Pro umožnění pohybu aktivního tlumiče na rotující hřídeli musí být mezi motor a hřídel umístěna speciální dvojice homokinetických kloubů s teleskopickým spojovacím členem.

V tomto systému by byla potřeba konkrétně vhodně vyřešit konstrukci aktivního tlumiče a uzpůsobení konstrukce stroje pro instalaci aktivního tlumiče. Dále by bylo potřeba vyřešit způsob připojení napájení aktivního tlumiče.

Tento návrh způsobu tlumení vibrací je zajímavý, nicméně je potřebné značné množství zkoušek a experimentů k jeho realizaci. Návrh může sloužit jako námět ke zpracování dalších diplomových či disertačních prací.

9.2 Návrh řešení – predikce samobuzeného kmitání

Fenomén samobuzených vibrací i přes jeho usilovné zkoumání není ještě natolik pochopen, aby jej bylo možné spolehlivě predikovat. Vypracovaný návrh predikce spočívá v uvažování možnosti vzniku samobuzených vibrací již při samotném návrhu stroje.

Předmětem návrhu metodiky predikce je vypracování postupu budoucího uživatele při návrhu a instalaci stroje. Postup obecně doporučuje čtyři základní body. Prvním bodem je vhodná konstrukce stroje vzhledem k jeho budoucímu používání. V zásadě jde o docílení dostatečně vysoké tuhosti soustavy použitím vhodných materiálů a vhodných tvarů a výztuží

konstrukce stroje. Do konstrukce stroje je možné také nainstalovat různé pasivní tlumicí prvky pro lepší tlumení.

Druhým bodem je instalace již vyrobeného strojního zařízení na provozní místo. Obráběcí stroj by neměl být instalován v blízkosti těžké techniky. Také základy obráběcího stroje hrají velkou roli pro působení vibrací na stroj a přesnost obrábění. Stroj musí být ukotven k základům pomocí vhodných upínacích prvků.

Třetím bodem je sestavení diagramu stability pro daný stroj. Diagram stability odděluje stabilní proces od nestabilního a jsme pomocí něj schopni nastavit optimální rezné podmínky za stabilního obrábění.

Posledním bodem v sestaveném postupu je důraz na tuhé upnutí nástroje a obrobku. Tuhost soustav nástroj – obrobek je z hlediska vzniku samobuzených vibrací rozhodující.

Další částí definovaného cíle na návrh predikce samobuzených vibrací je doporučení pro uživatele, jak postupovat. Proto byl sestaven praktický postup možné detekce a eliminace samobuzených vibrací. Tento postup je sestaven na základě reálných zkušeností se vznikem samobuzených vibrací a jejich eliminaci. Obecně je sestaven ze tří hlavních bodů, jimiž jsou kontrola, změna parametrů a změna geometrie nástroje.

10 ZÁVĚR

Tato diplomová práce přináší souhrnné informace týkající se přesnosti obrábění a vlivu samobuzených vibrací. Prvním cílem diplomové práce bylo provedení rozboru současného stavu vědy a techniky u řešené problematiky samobuzených vibrací. Dalším úkolem bylo vytvoření systémového rozboru faktorů ovlivňující přesnost obrábění, návrh řešení a zdůvodnění zvoleného způsobu řešení. Dalším cílem byl návrh metodiky predikce samobuzeného kmitání u zadaného typu stroje včetně doporučení pro budoucí uživatele, jak postupovat. V případě, že to bude možné, měla být provedena realizace potřebných měření. Na závěr bylo požadováno předložení komentáře k předloženému řešení.

První cíl, rozbor současného stavu vědy a techniky na téma samobuzených vibrací, je vypracován v druhé kapitole. V této kapitole je popsán přehled dopadů samobuzených vibrací na proces obrábění, princip vzniku samobuzených vibrací, jejich předcházení a kompenzace. Jednotlivé podkapitoly se odkazují na důkladnější řešerši samobuzených vibrací, která je vypracována v sedmé kapitole.

Systémový rozbor faktorů ovlivňujících přesnost obrábění je proveden ve čtvrté kapitole. V této kapitole je popsán systémový rozbor vnějších a vnitřních vlivů působících na stoj jako na soustavu. Celý systémový rozbor byl proveden na základě systémových atributů popsaných ve třetí kapitole a s použitím systémového přístupu. Výsledkem systémového rozboru je fakt, že na přesnost obrábění má vliv značné množství faktorů, nejhorším faktorem je však působení samobuzených vibrací, a právě to je předmětem vypracované diplomové práce.

Po vypracování systémového rozboru byla vypracována případová studie vibrací, která je předmětem páté kapitoly. V této kapitole je popsán proces obrábění pláště kompresoru, při kterém se předmětná firma potýká s nekvalitně obrobeným povrchem pláště v důsledku působení vibrací. Na stroji byla při daném procesu provedena patřičná měření.

Šestá kapitola je zaměřena na důkladnou řešerši na téma samobuzených vibrací. V této kapitole je důkladně popsán princip vzniku samobuzených vibrací, definice řezného procesu, při němž samobuzené vibrace vznikají, vliv určitých parametrů na proces obrábění, předcházení vzniku samobuzených vibrací a jejich kompenzace.

Další kapitolou této diplomové práce je předložení návrhu možného způsobu kompenzace samobuzených vibrací. V této kapitole je zpracován návrh aktivního tlumení samobuzených vibrací. Návrh spočívá v aktivním snímání, vyhodnocování a tlumení. Snímání vibrací bude uskutečněno pomocí piezoelektrického akcelerometru. Pomocí převodníku a mikrokontroleru jsou data zpracována a vyhodnocována a odesílána do aktivního tlumiče. Podrobnější popis návrhu je uveden v příslušné kapitole.

Následující kapitolou je návrh metodiky predikce samobuzených vibrací, včetně doporučení pro budoucí uživatele, jak postupovat. Predikce samobuzených vibrací by měla být uvažována již při samotném počátku konstrukce stroje. V této kapitole je uveden návod, jak postupovat při návrhu a instalaci nového stroje a návod, jak postupovat v případě vzniku samobuzených vibrací i přesto, že byly uvažovány již při samotném začátku konstrukce stroje.

Na závěr diplomové práce je vypracován komentář k předloženým návrhům predikce a řešení kompenzace samobuzených vibrací. K detailnějšímu řešení návrhu kompenzace

samobuzených vibrací vzhledem k charakteru diplomové práce nebyl dostatečný prostor. Tato problematika by si zasloužila mnohem více pozornosti a mohla by být podrobněji zpracována jako samostatné téma. Na tento návrh řešení by tedy v budoucnosti mohly navázat další diplomové nebo disertační práce.

11 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MICHALÍČEK, Michal. *Predikce pracovní přesnosti CNC obráběcích strojů*. Brno, 2013. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Jiří Marek, Dr.
- [2] MAREK, Jiří a Přemysl JANÍČEK. *Expertní inženýrství v systémovém pojetí*. 1. Praha: © Grada Publishing, a.s., 2013, 2013. ISBN 978-80-247-4127-7.
- [3] *Interní dokument*. Brno, 2005.
- [4] BORO VAN, Petr. Cesty ke zvýšení produktivity při obrábění složitých obrobků. In: *Technický týdeník* [online]. Praha: © Business Media CZ, 2015 [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/ze-zivota-vyzkumneho-centra/cesty-ke-zvyseni-produktivity-pri-obrabeni-slozitych-obrobku-7_32111.html
- [5] SVOBODA, Ondřej a Pavel BACH. Ukládání přesných obráběcích strojů na základ. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: © 2001 - 2022 Copyright. MM Průmyslové spektrum., 2015 [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/ukladani-presnych-obrabecich-stroju-na-zaklad>
- [6] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. IV.0. Praha: © MM publishing, s.r.o., 2018, 2018. ISBN 978-80-906310-8-3.
- [7] MATĚJKA, Jaroslav. *Návrh konstrukce lože obráběcího stroje*. Liberec, 2020. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Petr Zelený, Ph.D.
- [8] AMPAPA, Libor. *Upínání obrobků u třískového obrábění*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně. Vedoucí práce Ing. Jiří Votava Ph.D.
- [9] KAMENICKÁ, Pavlína. *ZPŮSOBY UPÍNÁNÍ NÁSTROJŮ A OBROBKŮ*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Milan Kalivoda.
- [10] SVOBODA, Ondřej. Řešení tepelných deformací obráběcích strojů. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: © 2001 - 2022 Copyright. MM Průmyslové spektrum., 2013 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/reseni-tepelnych-deformaci-obrabecich-stroju>
- [11] HANZAL, Jiří. *Metody kompenzace teplotní chyby obráběcího stroje*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Petr Minář.
- [12] BUREŠ, Jakub a Otakar HOREJŠ. *Průmyslová implementace pokročilých teplotních kompenzací*. Praha, 2014. Dostupné také z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/prumyslova-implementace-pokrocilych-teplotnich-kompenzaci_26833.html
- [13] PLICHTA, Zbyněk. *Online korekce geometrických a rozměrových odchylek*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D.

- [14] JANÍČKOVÁ, Petra. Moderní konstrukční řešení CNC strojů. *Sbližování teorie s praxí* [online]. 2012, 2012(1), 47 [cit. 2021-03-21]. Dostupné z: <http://www.uh.cz/szesgsm/files/sblizovani/pdf/mod-konstr-cnc.pdf>
- [15] TICHÝ, Antonín. *POROVNÁNÍ NOSNÝCH STRUKTUR OBRÁBĚCÍCH STROJŮ Z TRADIČNÍHO A NETRADIČNÍHO MATERIÁLU*. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Ondřej Merenus.
- [16] POLÁŠEK, Jaromír. *Číslicově řízené stroje*. Kopřivnice, 2007. Dostupné také z: http://moodle2.voskop.eu/download/teu/U31_Cislicove_rizene_stroje.pdf
- [17] KOPAL, Miroslav. Odměrovací systémy a jejich vliv na přesnost. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: © 2001 - 2022 Copyright. MM Průmyslové spektrum., 2013 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/odmerovaci-systemy-a-jejich-vliv-na-presnost>
- [18] MENDŘICKÝ, Radomír. *Elektrické pohony a servomechanismy*. Liberec, 2014. Dostupné také z: <http://www.ksa.tul.cz/getFile/id:3672>
- [19] SEHON, Tomáš. *NÁVRH VŘETENÍKU PRO OBRÁBĚCÍ CENTRUM*. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Dominik Hermanský.
- [20] PAGÁČ, Marek. *Obráběcí stroje: Integrovaná vřetena obráběcích strojů*. Brno, 2015. Dostupné také z: <https://www.prumysl.cz/obrabeci-stroje-integrovana-vretena-obrabecich-stroju/>
- [21] BAUER, Tomáš. *Kvalita povrchu po obrábění*. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [22] *Obráběcí nástroje pracující bez vibrací* [online]. Praha: © Business Media CZ, 2020 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/poutaky/obrabeci-nastroje-pracujici-bez-vibraci_50054.html
- [23] DROBÍLEK, Jiří. *Samobuzené kmitání v obráběcích strojích*. Praha, 2017. Dizertační práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [24] KULHÁNEK, Martin. *Charakterizace vibračního chování CNC obráběcího zařízení v optické výrobě*. Liberec, 2016. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Jan Václavík.
- [25] VETIŠKA, Jan. *Analýza stability řezného procesu obráběcího stroje vzhledem k samobuzenému kmitání*. Brno, 2012. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [26] SUCHÁČEK, Roman. *REGENERATIVNÍ KMITÁNÍ PŘI SOUSTRUŽENÍ*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [27] DAVID, Václav. *REGENERATIVNÍ KMITÁNÍ PŘI SOUSTRUŽENÍ*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.

- [28] LAŠOVÁ, Václava. *Základy stavby obráběcích strojů* [online]. 1. Zlín: © doc. Ing. Václava Lašová Ph.D., 2012 [cit. 2022-04-10]. ISBN 978-80-261-0126-0. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/16835/1/Zaklady_stavby.pdf
- [29] *Úhel nastavení a tloušťka třísky při frézování*. Praha, 2019. Dostupné také z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/entering-angle-and-chip-thickness.aspx>
- [30] *Překonejte limity při obrábění s dlouhým vyložením*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.secotools.com/article/89275?language=cs>
- [31] KOPECKÝ, Zdeněk. *Geometrie řezného klínu nástroje a jeho opotřebení*. 1. Brno, 2018.
- [32] VESELÝ, Jan. *Monitorování řezného procesu*. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Vítězslav Rázek, CSc.
- [33] ZEMENE, Petr. *Vliv frézování na stabilitu upnutí nástroje v tepelném upínači*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Jan Řehoř.
- [34] DVOŘÁK, Jan. *Vibrace při frézování kovů*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Fiala, Ph.D.
- [35] TLUSTÝ, Jiří. *Samobuzené kmity v obráběcích strojích*. 1. Praha: Nakladatelství československé akademie věd, 1954.
- [36] TOMEČEK, Ondřej. *VLIV SAMOBUZENÉHO KMITÁNÍ NA PRACOVNÍ PŘESNOST OBRÁBĚCÍCH STROJŮ*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Dominik Hermanský.
- [37] PROCHÁZKA, Luděk. *Vibrace při soustružení*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [38] *Jak se vypořádat s limity při obrábění s dlouhým vyložením nástrojů*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.strojirenstvi.cz/jak-se-vyporadat-s-limity-pri-obrabeni-s-dlouhym-vylozenim-nastroju>
- [39] HANŽL, Ondřej. *Návrh malého pasivního hltiče vibrací s možností frekvenčního přeladění*. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Lukáš Novotný.
- [40] Aktivní magnetické ložisko. In: *Ilovevaquero* [online]. Rakousko: © 2017, iLovevaquero.com., 2017 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://cs.ilovevaquero.com/domashniy-uyut/10877-aktivnyy-magnitnyy-podshipnik.html>
- [41] Vyvrtávací tyče s tlumením zvyšují kvalitu obrábění. In: *MM průmyslové spektrum* [online]. Praha: © 2001 - 2022 Copyright. MM Průmyslové spektrum., 2014 [cit. 2022-04-26]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyvrtavaci-tyce-s-tlumenim-zvysuji-kvalitu-obrabeni>
- [42] STŘELEČ, Zbyněk. *Vlastnosti moderních akcelerometrů*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Daniel Zuth, Ph.D.

- [43] MCP3202. In: *Microchip* [online]. Italy: © Copyright 1998-2022, 2019 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.microchip.com/en-us/product/MCP3202?msclkid=529c2722d0a511ecad524cd389dd5472>
- [44] Arduino Due. In: *Arduino* [online]. Vienna: © 2022 Arduino, 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/pmwiki.php?n=Main%2fArduinoBoardDue&msclkid=dea4b711d0a411ec97b4592169d5fd68>

12 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

12.1 Seznam zkratk a symbolů

CNC	Číslicové řízení počítačem
ČSN EN ISO	Česká verze mezinárodní normy
PED	Směrnice pro tlaková zařízení
CO ₂	Oxid uhličitý
IPM	Vnitřní permanentní magnet
SW	Software
AD	Analogově digitální

12.2 Seznam tabulek

Tab 1)	Moduly pružnosti v tahu [27].....	58
--------	-----------------------------------	----

12.3 Seznam obrázků

Obr. 1)	Obecné schéma technické soustavy [1].....	19
Obr. 2)	Hierarchické uspořádání struktur [1].....	20
Obr. 3)	Swing kompresor [3].....	26
Obr. 4)	Implementace kompresoru do jednotky [3].....	26
Obr. 5)	Frézka Kitamura HX300iG.....	27
Obr. 6)	Uložení stroje v závislosti na použití [6].....	28
Obr. 7)	Druhy zatížení [7].....	29
Obr. 8)	Řez upínacím šroubem [8].....	30
Obr. 9)	Teplotní rušivé vlivy [11].....	31
Obr. 10)	Základní prvky rámu [14].....	34
Obr. 11)	Teoretické možnosti žebrování stojanu [15].....	34
Obr. 12)	Teoretické možnosti žebrování lože [15].....	34
Obr. 13)	Ovládací panel CNC [16].....	36
Obr. 14)	Absolutní programování [16].....	36
Obr. 15)	Přírůstkové programování [16].....	36
Obr. 16)	Lineární vedení [7].....	37
Obr. 17)	Přímé a nepřímé odměřování [18].....	38
Obr. 18)	Stavba vřeteníku [19].....	39
Obr. 19)	Rozdíl mezi kuželem ISO (vlevo) a Big Plus (vpravo) [19].....	40
Obr. 20)	Obráběný povrch za přítomnosti (vlevo) a nepřítomnosti samobuzených vibrací (vpravo) [19].....	41
Obr. 21)	Horizontální frézka Kitamura MYCENTER HX300 iG.....	43
Obr. 22)	Upnutí polotovaru v přípravku pro hrubování [3].....	44
Obr. 23)	Upnutí polotovaru pro vyvrtávání obvodových děr [3].....	45
Obr. 24)	Upnutí polotovaru pro finální vyvrtávání vnitřního průměru [3].....	46

Obr. 25)	Porovnání správně a špatně obrobeného povrchu pláště.....	46
Obr. 26)	Měření textury povrchu na správně obrobeném povrchu.....	47
Obr. 27)	Měření textury povrchu na špatně obrobeném povrchu.....	47
Obr. 28)	Měřicí zařízení Fluke 810 a umístění senzoru.....	48
Obr. 29)	Fréza použitá při měření vibrací.....	48
Obr. 30)	Výsledky z prvního měření.....	49
Obr. 31)	Výsledky z druhého měření.....	49
Obr. 32)	Možná řešení snížení nebo odstranění samovolného chvění.....	52
Obr. 33)	Směr působení řezných sil [25].....	53
Obr. 34)	Zpětnovazební obvod [27].....	54
Obr. 35)	Proměnlivá tloušťka třísky [26].....	54
Obr. 36)	Princip polohové vazby [27].....	55
Obr. 37)	Regenerativní princip [27].....	56
Obr. 38)	Povrch obrobku za různých podmínek [27].....	57
Obr. 39)	Závislost mezi posuvem a tloušťkou třísky [27].....	59
Obr. 40)	Vliv řezných parametrů na intenzitu kmitání [27].....	60
Obr. 41)	Vliv posuvu na stabilitu řezného procesu [33].....	61
Obr. 42)	Vliv hloubky řezu na stabilitu procesu [33].....	61
Obr. 43)	Schéma experimentu modální analýzy [36].....	63
Obr. 44)	Diagram stability [36].....	64
Obr. 45)	Schéma dynamického hltiče [39].....	64
Obr. 46)	Řez hydraulickým držákem nástrojů [36].....	65
Obr. 47)	Schéma vyvrtávací tyče s pasivním tlumením [36].....	65
Obr. 48)	Porovnání vyvrtávacích tyčí [36].....	66
Obr. 49)	Viskoelastický materiál [39].....	66
Obr. 50)	Hysterezní smyčka [39].....	66
Obr. 51)	Impact dampers [39].....	67
Obr. 52)	Hydraulický tlumič [34].....	68
Obr. 53)	Schéma elektroeologického tlumiče [34].....	68
Obr. 54)	Porovnání velikosti řezných sil s použitím ACC [36].....	69
Obr. 55)	Porovnání dráhy nástroje běžného a trochoidálního frézování [36].....	70
Obr. 56)	Magnetické ložisko [40].....	70
Obr. 57)	Diagram stability [36].....	71
Obr. 58)	Schéma principu piezoelektrického akcelerometru [42].....	74
Obr. 59)	AD převodník MCP3202 [43].....	74
Obr. 60)	Mikrokontroler s ARM procesorem [44].....	75

13 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Technický výkres základů frézky KITAMURA MYCENTER HX300 iG

Příloha B – Technický výkres přípravku pro hrubování

Příloha C – Technický výkres pro vyvrtávání obvodových děr

Příloha D – Technický výkres přípravku pro vyvrtávání obvodových děr

Příloha E – Technický výkres nástrojů finálního vrtání vnitřního průměru

Příloha F – Technický výkres přípravku pro finální vyvrtávání vnitřního průměru

Příloha G – Systémový rozbor vlivů působících na přesnost obrábění

Příloha H – Schéma CNC frézky

Příloha I – Diagram příčin a následků