

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE

Diplomová práce

Adaptivní systémy řízení řezného procesu

Adaptive control systems for cutting process

Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní a materiálové inženýrství
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Vítězslav Rázek, CSc.
Autor:	Bc. Michal Křiklán
Kde:	V Praze 2018



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kříklán** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **409532**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Adaptivní systémy řízení řezného procesu

Název diplomové práce anglicky:

Adaptive control systems for cutting proces

Pokyny pro vypracování:

1. Přehled adaptivních systémů řízení
2. Možnosti monitorování řezného procesu pro adaptivní řízení
3. Monitorování dynamiky řezného procesu a využití získaných dat pro adaptivní řízení
4. Vyhodnocení a závěr

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Vítězslav Rázek, CSc., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:


Datum zadání diplomové práce: **09.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2018**

Platnost zadání diplomové práce: _____


Ing. Vítězslav Rázek, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce


Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

24.4.2018
Datum převzetí zadání

Kříklán
Podpis studenta

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

.....

V Praze

.....

Podpis autora

SOUHRN

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na adaptivní systémy řízení řezného procesu. Popisuje základní rozdělení těchto systémů, nároky na obráběcí stroje a měřící techniku. Dále se zabývá jednotlivými možnostmi a druhy monitorování řezného procesu, které jsou vstupem pro adaptivní systémy samotné. Experimentální část je zaměřena na monitorování řezných sil a kroutícího momentu pomocí rotačního dynometru Kistler. Zpracování dat proběhlo za pomoci počítačového softwaru DynoWare. Tato data byla vyhodnocena a byly vytvořeny závislostní křivky, kterých lze využít pro adaptivní systémy.

SUMMARY

The focus of this master's thesis is on adaptive cutting process management systems. It describes basic types of these systems, machine tools requirements and measurement techniques. Furthermore, the essential precondition of adaptive cutting management systems, cutting process monitoring is discussed. The experimental part of this thesis deals with monitoring of cutting forces and torque using the Kistler rotary dynamometer. The measured data was analysed using the DynoWare software program. The results were used to develop cutting conditions diagrams for usage in adaptive cutting systems.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Vítězslavu Rázkovi, CSc. za odborné vedení, cenné rady a za vstřícný přístup při konzultacích. Velký dík patří také Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie za vytvoření příjemných pracovních podmínek. Dále všem, kteří mě podporovali ve studiu a při vytváření mé diplomové práce.

Obsah

Obsah	6
Úvod	9
1 Adaptivní řízení.....	10
1.1 Požadavky na obráběcí stroj a měřicí techniku při aplikaci adaptivního řízení	11
1.1.1 Požadavky na obráběcí stroj	11
1.1.2 Požadavky na měřicí techniku.....	11
1.1.3 Řídicí systémy.....	12
1.1.4 Rozdělení řídicích systémů.....	13
2 Možnosti monitorování rezného procesu pro adaptivní řízení	15
2.1 Monitorování tepelných jevů při obrábění.....	15
2.1.1 Teplo při obrábění.....	15
2.1.2 Kontaktní měření teploty	16
2.1.3 Bezkontaktní měření teploty	20
2.2 Monitorování hodnoty otupení	24
2.2.1 Měření otupení mimo stroj.....	24
2.2.2 Nekontinuální měření otupení na stroji	24
2.2.3 Kontinuální měření otupení na stroji.....	25
2.3 Monitorování sil a vibrací	26
2.3.1 Síly při obrábění	26
2.3.2 Měření sil a momentů.....	26
2.3.3 Nepřímě měření sil a momentů.....	27
2.3.4 Přímá metoda.....	27
2.3.5 Kmitání	27

2.3.6	Monitorování řezného procesu	29
3	Monitorování dynamiky řezného procesu a využití získaných dat pro adaptivní řízení	30
3.1	Rotační dynamometr Kistler	31
3.2	Základní parametry přístroje	31
3.3	Vstupní hodnoty.....	32
3.4	Získaná data z programu DynoWare	33
3.5	Naměřené hodnoty:.....	34
3.5.1	Měření M10	34
3.5.2	Měření M12	37
3.5.3	Měření M21	40
3.5.4	Měření M13	43
3.5.5	Měření M15	46
3.5.6	Měření M16	49
3.5.7	Měření M18	52
3.6	Vyhodnocení měření.....	55
3.6.1	Závislost tečné síly na řezné rychlosti.....	56
3.6.2	Závislost tečné síly na posuvu.....	56
3.6.3	Závislost radiální síly na řezné rychlosti.....	57
3.6.4	Závislost radiální síly na posuvu.....	58
3.6.5	Závislost tečné síly na kroutícím momentu	58
3.7	Využití získaných dat pro adaptivní systémy řízení	59
3.7.1	Mezní systémy ACC.....	59
3.7.2	Optimalizační systémy ACO/ACG.....	60
3.7.3	Identifikace opotřebení nástroje	60

3.7.4 Destrukce nástroje	60
3.8 Zhodnocení	61
Závěr	62
Bibliografie	63
Seznam obrázků	66
Seznam grafů	67
Seznam tabulek	68

Úvod

Tato diplomová práce je zaměřena na adaptivní systémy řízení řezného procesu. Adaptivní systémy se vyznačují schopností měnit své parametry podle aktuálních informací či signálů. Principem je okamžité stanovení optimálních řezných podmínek.

První část diplomové práce se zaměří na požadavky pro obráběcí stroje a měřící techniku. Bude zde popsáno základní rozdělení těchto systémů pro aplikaci na adaptivní systémy.

V další části budou uvedeny způsoby a možnosti monitorování řezného procesu, které jsou vstupem pro adaptivní systémy samotné. Tato část bude rozdělena na tři celky. Budou popsány způsoby monitorování tepelných jevů, monitorování hodnot otupení, a monitorování řezných sil a momentů.

Experimentální část bude zaměřena na monitorování řezných sil a momentů. Proběhne praktické měření. Jedná se o obrábění slitiny titanu a sledování řezného procesu pomocí rotačního dynamometru Kistler, který je schopen měřit řezné i neřezné síly a kroutící moment. Naměřené hodnoty budou vyhodnoceny pomocí programu DynoWare.

Závěrem budou naměřená data vyhodnocena s ohledem na využití pro adaptivní řízení.

1 Adaptivní řízení

Pro adaptivní systémy obráběcích strojů je základním principem stanovení optimálních řezných podmínek, které jsou získávány z právě probíhajícího procesu. Optimální podmínky jsou stanoveny stejným způsobem jako před samotným obráběním, pouze s tím rozdílem, že do matematicko-optimalizačního modelu vstupují aktuální informace ze snímačů určitých charakteristik. [1]

Principem činnosti adaptivního řízení je dodržení požadovaných vlastností. Mezi základní vlastnosti řadíme především hospodárnost, výrobní náklady, kvalitu povrchu, tvarovou a rozměrovou přesnost výrobku. [2]

Tyto vlastnosti nám ovlivňují:

obrobek – druh materiálu, obrobitelnost, tvar, požadovaná přesnost rozměru, jakost povrchu atd.

nástroj – druh, způsob ostření, trvanlivost, geometrie

stroj – pracovní schopnost a přesnost, odolnost proti vzniku samobuzených kmitů, výkon

pracovní podmínky – posuv, řezná rychlost, hloubka záběru, chladiivo [2]

Mezi výhody adaptivního řízení lze zařadit dokonalejší optimalizace podmínek obrábění, zmenšení nebezpečí vylomení břitu nástroje, zastavení stroje při náhlém přetížení, eliminace samobuzených kmitů, rozměrová kompenzace opotřebení nástroje a automatické sledování opotřebení nástroje. Výsledkem je snižování počtu neshodných výrobků a vyšší produktivita. [1]

1.1 Požadavky na obráběcí stroj a měřicí techniku při aplikaci adaptivního řízení

Pro použití adaptivního systému je potřeba obráběcí stroj doplnit vhodnými snímači pro měření parametrů charakterizujících průběh řezného procesu. Stroj tedy musí být vhodný pro takovou úpravu s ohledem na co nejmenší ovlivnění obráběcího procesu. Dále musí být stroj svou koncepcí vhodný i pro samotné řízení řídicích veličin z pohledu softwarového.

1.1.1 Požadavky na obráběcí stroj

Existuje více druhů měřicí techniky. Ovšem veškerá technika musí být upevněna v oblasti obráběcího procesu. Je tedy důležité vybrat stroj podle způsobu monitorování. Některá měřicí technika potřebuje kromě náročného způsobu připojení také konstrukční úpravy stroje, některá je univerzální a není potřeba žádných zásadních změn na stroji, alespoň co se uložení týká. Společnou vlastností je převážně přenos dat. I dnes, s ohledem na množství dat a minimální velikost aparátu, je využíváno datového kabelu. Dalším požadavkem je podpora řídicího systému a pohonů, které musí být vhodné pro zavedení zpětných vazeb od adaptivního regulátoru. [3]

1.1.2 Požadavky na měřicí techniku

Existence vhodných měřicích metod, snímačů a aparatur je hlavním předpokladem pro vývoj a aplikaci adaptivního řízení obráběcích strojů. [3]

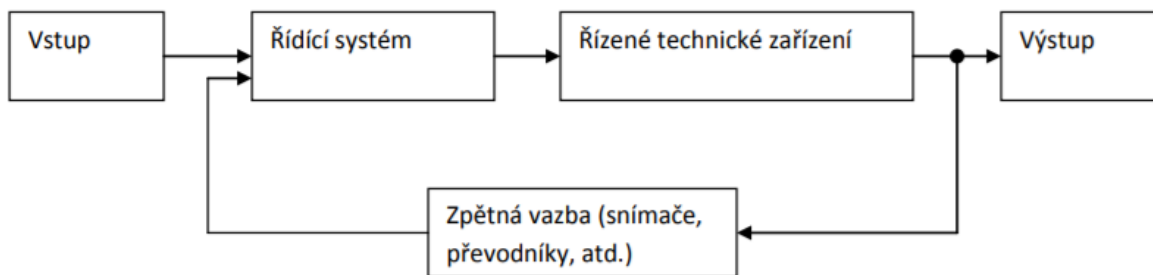
Klíčovými vlastnostmi pro takovéto snímače je spolehlivost, dostatečná citlivost, malé rozměry, cena a způsob instalace, které co nejméně ovlivní pracovní schopnosti stroje. Stejně tak připojení jednotlivých snímačů musí být jednoduché a spolehlivé. Dále je vyžadována dlouhodobá stálost těchto snímačů, pro dlouhodobou instalaci na stroj. Samozřejmostí je odolnost proti mechanickému opotřebení při běžné obsluze stroje, jako například upínání obrobku či nástroje. [4]

Obdobné vlastnosti jsou vyžadované i u měřicí aparatury. Ty by měly být vhodné pro dlouhodobý provoz v dílenských podmínkách, spolehlivé, stabilní a ideálně s nízkou

spotřebou. Aparatury by měly být snadno ovladatelné, malých rozměrů a co nejlevnější, ostatně jako běžné průmyslové měřicí systémy. [4]

1.1.3 Řídicí systémy

Fyzikální realizace algoritmu řízení, takto lze popsat řídicí systém. Matematickým modelem řídicího systému je tedy algoritmus řízení. Potřebné informace o stavu zařízení jsou získávány pomocí bloku snímačů. [2]



Obrázek 1 - Základní blokové schéma systému automatického řízení [2]

Za adaptivní řídicí systém v oblasti výrobních strojů je považován víceméně každý systém, který je doplněn zpětnovazebními smyčkami (přídavným regulačním systémem). Tento systém ovlivňuje při obrábění řezné podmínky podle aktuálních poměrů v obráběcích procesech s cílem dosáhnout požadovaných vlastností. Těmi mohou být zadané maximální mezní hodnoty jednoho nebo jednoho z více kritériálních parametrů či udržení optimální hodnoty parametru. [2]

Adaptivní systém musí vykonávat identifikaci a řízení. Jedná se o opakované zjišťování chování řízeného systému, na který působí a jeho výsledek se opět identifikuje. To vše opakovaně v nastavené frekvenci. Jako adaptivní systém tedy může být označován každý systém, který přizpůsobuje své vlastnosti měnícím se podmínkám a to tak, aby dodržoval nastavené parametry. [2]

1.1.4 Rozdělení řídicích systémů

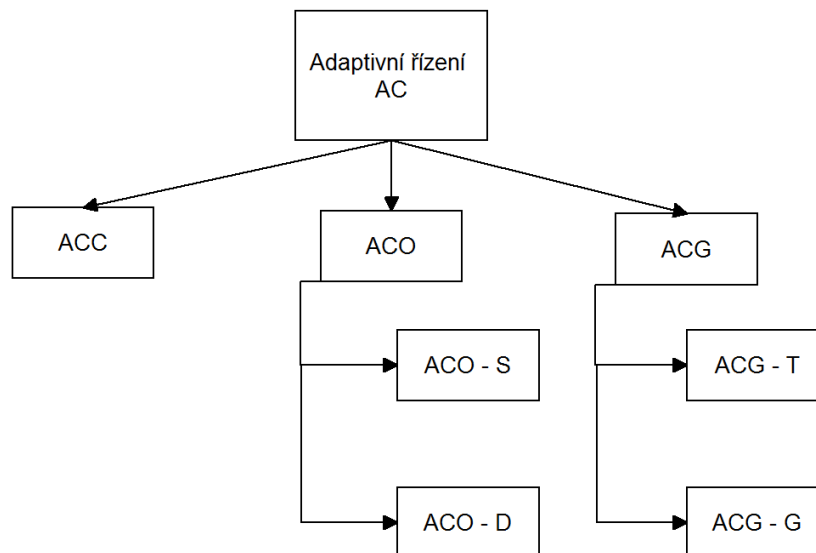
ACC (Adaptive control constraint) - AC systémy mezní

ACO (Adaptive control optimization) - AC systémy optimalizační

- ACO-S systémy se statickou optimalizací
- ACO-D systémy s dynamickou optimalizací

ACG (Adaptive control geometry) - AC systémy geometrické

- ACG-T systémy, jejichž akční veličiny jsou technologického charakteru
- ACG-G systémy, jejichž akční veličiny jsou geometrického charakteru [5]



Obrázek 2 - Rozdělení řídicích systémů pro adaptivní optimalizaci [5]

ACC a ACO systémy fungují na principu dosažení co nejlepších kvantitativních výsledků s případným zohledněním kvalitativních parametrů. Snahou je dosáhnout co nejmenších nákladů a maximální produktivity. Naopak primárním cílem ACG systémů je zajištění kvalitativní stránky procesu s přihlédnutím k ekonomické stránce. Hlavním aspektem ACG je výsledná geometrie výrobku, jeho drsnost atd. [5]

Mezní systémy ACC

Jedná se o nejjednodušší adaptivní systém. Optimalizují se buď posuv, nebo otáčky, avšak ne ve vzájemné vazbě. Kritériem bývá nejčastěji maximální úběr, samozřejmě s ohledem na omezující podmínky. Za omezujícími podmínky lze určit maximální přípustné hodnoty veličin, jako například výkon stroje, řezná síly, kroutící moment, maximální či minimální posuv stroj nebo tuhost soustavy. [1]

Optimalizační systémy ACO

Optimalizační systémy ACO navazují na systémy ACC s tím rozdílem, že je již nelze realizovat regulačním způsobem, ale je nutné použít výpočetního výkonu řídicího systému obráběcího stroje. Řezné podmínky se určují podle kritéria minimálních nákladů, respektive maximální produktivity. Regulována bývá řezná rychlost v návaznosti na posuv. Řídicími veličinami bývají nejčastěji příkon elektromotory, kroutící moment, řezné síly, opotřebení břitu nebo drsnost obrobené plochy. [1]

Optimalizační systémy ACG

Geometrické optimalizační systémy se ve své podstatě neliší od systémů optimalizačních a mezních. Jejich úkolem je v první řadě zajistit dosažení požadované přesnosti, resp. drsnosti obrobené plochy. Jsou tedy zdůrazněny právě tyto omezující podmínky společně s opotřebením nástroje vibracemi, nebo složkami řezné síly. Samozřejmě jsou u těchto systémů uvažována i kvantitativní a ekonomická kritéria. [5]

2 Možnosti monitorování řezného procesu pro adaptivní řízení

2.1 Monitorování tepelných jevů při obrábění

Monitorováním tepelných jevů při obrábění nám pomáhá analyzovat vhodnost obráběcích podmínek a způsob odvádění tepla. Nejčastěji nás zajímá teplota v kritickém místě, místě na nástroji, obrobku nebo na odcházející třísce. [6]

2.1.1 Teplo při obrábění

Teplo vzniklé při obrábění výrazně ovlivňuje obráběcí proces, jelikož působí na řezné vlastnosti nástroje, mění mechanické vlastnosti obráběcího materiálu, ovlivňuje velikost tření atd. Vzniká při odřezávání vrstvy materiálu břitem nástroje a její transformace v třísku vyvine určité množství tepla. Hlavními zdroji jsou vnitřní tření materiálu, plastická deformace, tření na čele a hřbetě nástroje. [6]

Teplo, které vzniká při řezném procesu se rozděluje a přechází nerovnoměrně do částí soustavy. Nejvíce tepla by mělo přecházet do třísky, další velká část do obrobku případně do okolního prostředí. Snahou je, aby nástroj přebíral co nejmenší podíl vzniklého tepla.

Podíl jednotlivých složek tepla, které je odváděno z procesu, jsou ovlivňovány tepelnou vodivostí jednotlivých materiálů, řeznými podmínkami, řezným prostředím a geometrií břitu nástroje. [7]

Množství vzniklého tepla se musí rovnat množství tepla odvedeného. Tepelná bilance musí nastat v každém případě. [6]

Rovnice tepelné bilance:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_t + Q_o + Q_n + Q_p$$

Q_1 [J] – teplo vzniklé deformací v oblasti střižné plochy,

Q_2 [J] – teplo vzniklé třením třísky v oblasti čela nástroje,

Q_3 [J] – teplo vzniklé třením v oblasti hřbetu nástroje,

Q_t [J] – teplo pohlcené třískou,

Q_o [J] – teplo pohlcené obrobkem,

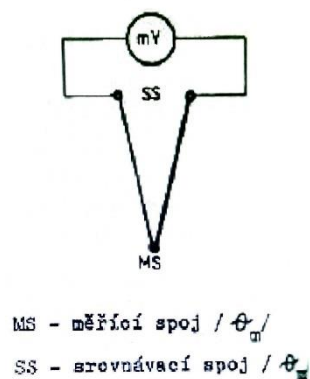
Q_n [J] – teplo pohlcené nástrojem,

Q_p [J] – teplo pohlcené okolím řezu. [6]

2.1.2 Kontaktní měření teploty

Měření pomocí termočlánků

Při měření termočlánky se využívá termoelektrického napětí, které vzniká v obvodu tvořeném dvěma různými vodiči, které jsou vodivě spojeny a oba konce udržovány na různých teplotách. Při obrábění lze termočlánek využít tak, že měrný spoj uložíme do blízkosti měření teploty a srovnávací spoj udržuje na známé teplotě, obvykle teplotě okolí. Velikost napětí není závislá pouze na teplotě, ale i na druhu materiálu obou vodičů tvořících termočlánek. Pomocí milivoltmetru pak snímáme vzniklé napětí. [1]

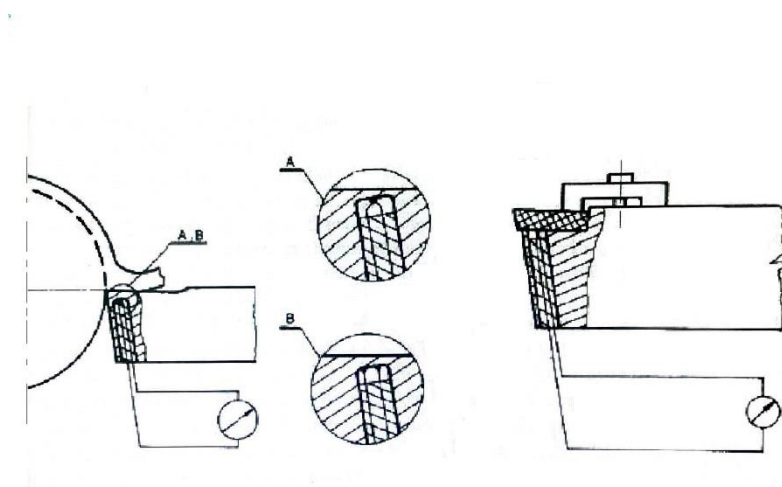


Obrázek 3 - Schéma zapojení termočlánku [1]

Pro praktické měření nelze použít libovolné dvojice materiálu. Musí splňovat některé podmínky. Důležitým faktorem je, aby vzniklé rozdíly napětí byly dostatečné v rozsahu předpokládaných teplot. Dále je vhodné, aby kombinace materiálů tvořila pokud možno lineární charakteristiku, stejně tak je důležitá stálost a chemická odolnost proti korozi. [1]
[8]

Umělý termočlánek

Pro měření teploty pomocí umělého termočlánu je dostačující, aby byl vodivě spojený konec v místě měření teploty. Díky tomu lze měřit teplotu v různých místech nástroje a obrobku. Nevýhodou je náročná instalace. Na obrázku (Obrázek 4) v levé části je vidět schématické zapojení pro použití monolitního soustružnického nože, na pravé části je vidět umístění v případě břitové destičky, což přináší výhodu v umístění termočlánu a jeho životnosti, ale nevýhodou tohoto uspořádání je, že místo měření je dosti vzdáleno od stykové plochy a nelze tak zjistit přesné teploty v místě styku nástroje s obrobkem. [1]



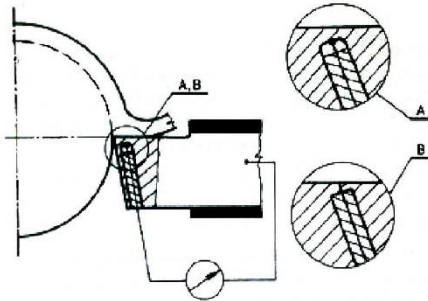
Obrázek 4 - Schéma zapojení umělého termočlánu [1]

Poloumělý termočlánek

Mezi hlavní nevýhody umělých termočlánu se řadí nemožnost měření teploty na stykových místech obrobku a nástroje. Na rozdíl od umělého článu tvoří poloumělý článek jeden z materiálů samotný nástroj či obrobek. Zbytek probíhá na stejné bázi, oba materiály jsou vodivě spojeny v místě řezu. Další výhodou je vyšší použitelnost díky malým rozměrům cizího vodiče, které lze snáze umístit na potřebné místo. [9]

Existují dvě základní varianty provedení, které je možné vidět na (Obrázek 5). První varianta je podobná umělému termočlánu, kdy je vodič přivařený na dno otvoru do určitého místa. Druhou variantou je vyvedení vodiče až na samotný povrch součásti, který je během procesu deformován, čímž se vytváří spoj přímo na stykových plochách třísky s čelem

nástroje. Toho se dá využít pro vyhodnocení teploty na stykových plochách. Při měření teplotních polí se používá rozmístění několika cizích vodičů v definovaných místech. [1] [10]



Obrázek 5 - Schéma zapojení poloumělého termočlánu [1]

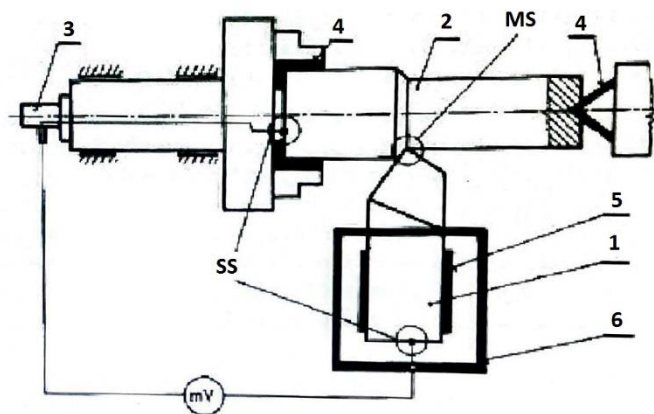
Další modifikací je zabudování cizího vodiče do odřezávané vrstvy, díky čemu získáme přehled teploty v oblasti primární plastické deformace. Vodivé spojení vznikne po plastické deformaci této vrstvy a její transformaci v třísku, tím pádem měřícího spoje termočlánu. [8]

Přirozený termočlánek

Jak již název napovídá přirozený termočlánek představuje v teorii obrábění pojem, pod kterým se rozumí termočlánek tvořený již zúčastněnými materiály. Jedním z vodičů je materiál obrobku a druhým je materiál řezného nástroje. Hlavní výhodou tohoto zapojení je spojení přímo v místě stykových míst a díky tomu jsou jakékoli změny teplot okamžitě zaznamenány. Nevýhodou je cejchování pro každou kombinaci obráběného materiálu a břitu nástroje. [1]

Na ploše styku vzniká soustava elementárních termočláneků, výsledkem je tedy aritmetický průměr napětí těchto termoelektrických mikročláneků. Zásadní podmínkou pro měření je vzájemné odizolování nástroje od obráběného materiálu. Z principu stačí izolace nejčastěji nástroje, ovšem pro zvýšení přesnosti je účelné odizolovat i obrobek od stroje. [8] [9]

- MS - měřicí spoj
- SS - srovnávací spoje
- 1 - nástroj
- 2 - obrobek
- 3 - zařízení pro přenos signálu z rotující části
- 4 - izolace obrobku
- 5 - izolace nástroje
- 6 - izolační kryt



Obrázek 6 - Schéma zapojení přirozeného termočláňku [1]

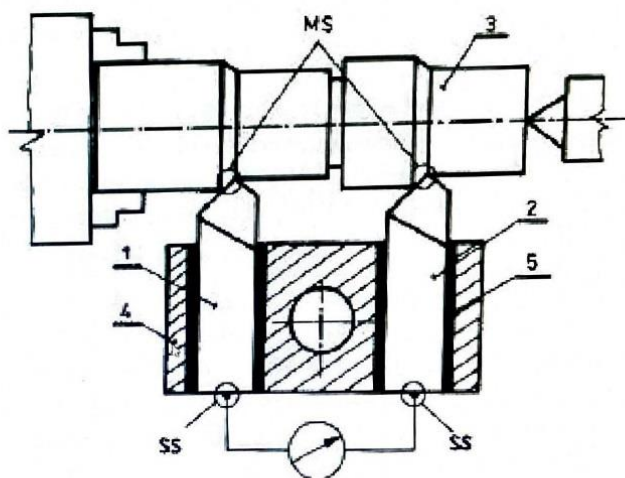
Termoduo

Princip metody termoduo je založen na současném obrábění jednoho obráběného materiálu pomocí dvou obráběcích nástrojů z různých materiálů stejné geometrie při stejných rezných podmínkách. Termočlánek zde tedy tvoří nástroje. Jedna z vhodných kombinací materiálů může být například slinutý karbid s rychlořeznou ocelí. [1]

Měření pomocí metody termoduo předpokládá stejné teploty v oblasti styku a díky rozdílnému chemickému složení, a tím i fyzikálních vlastností, vzniká termoelektrické napětí. Důležité je zde odizolování nástrojů od stroje. Výhodou metody je cejchování jedné dvojice rezných materiálů, kterou je možno použít pro jakýkoliv, elektricky vodivý, materiál obrobku. [9]

Za nevýhodu lze považovat dvojnásobnou spotřebu obráběného materiálu a nutnou úpravu obrobku pro použití souběžného použití dvou nástrojů. Stejně tak možnost uchycení dvou nástrojů zároveň. [10]

- MS - měřicí přístroj
- SS - Srovnávací spoj
- 1 a 2 - nástroje
- 3 - obrobek
- 4 - těleso termodua
- 5 - izolace



Obrázek 7 - Schéma zapojení termodua [1]

2.1.3 Bezkontaktní měření teploty

Princip metody monitorování teploty

Monitorování teploty se soustřeďuje na zjištění a vyhodnocení převážně v místech nejvyšších teplot, tedy ve stykovém místě a jeho okolí. Měřením a vyhodnocením teplot v oblasti nástroje můžeme zamezit či výrazně snížit opotřebenosti nástroje z důvodu nárůstu teploty nad limitní hodnoty určené pro daný materiál.

Účel je stejný pro kontaktní i bez kontaktní měření. Bezkontaktní měření nám převážně zjednodušuje práci v blízké oblasti stykových ploch, výhodou je tedy převážně menší zatížení obráběcího procesu měřicí technikou. [9]

Pro použití u adaptivních systému je důležité provázání měřicí techniky se softwarem stroje.

Jak již název napovídá bezkontaktní monitorování nám přináší výhodu v umístění, které nemusí být přímo v oblasti stykových ploch. Jedná se o kompaktní přístroje, ať už se jedná o pyrometry či termokamery, které lze pevně umístit do prostoru obráběcího prostoru. Na

rozdíl od kontaktních snímačů je vliv materiálů pro nástroj i obrobek minimální, zde nás zajímá pouze emisivita, kterou lze u měřidel nastavit. [9]

Ideálním způsobem měření je trvale umístěná termokamera či pyrometr se zaostřením na okolí řezu, nejlépe pak na samotný břit. Data jsou snímána v určitém intervalu a vyhodnocována příslušným softwarem. Výhodou termokamery je možnost sledovat detailně větší oblast, díky určitému rozlišení a velikosti snímané plochy. Lze tedy současně snímat jak teploty na břitu nástroje, tak celkový průběh teplot v okolí řezu (teploty třísek, teplotu obrobku, okolní teplotu). Pro adaptivní systémy je důležitá zpětnovazební funkce, kdy podle naměřených teplot software upravuje řezné podmínky, či jiné řídicí členy. [11]

Termokamery a pyrometry

Pro bezdotykové měření se v mnoha odvětvích průmyslu používají termokamery i pyrometry. Tato část se bude věnovat rozdílům mezi nimi. Jsou zde rozebrány jejich parametry, které je třeba vzít v úvahu při výběru vhodného přístroje pro konkrétní použití. [11]

Pomocí pyrometru se měří bezdotykově teplota na povrchu tělesa v určité oblasti. Oblast bývá zpravidla kruhová, ale jsou i speciální pyrometry, se kterými se měří teplota tekutého kovu při lití. Měřená oblast má v tomto případě například tvar obdélníku. Základní rozdíl mezi termokamerou a pyrometrem je v tom, že pyrometry zprůměrnují intenzitu IR záření v dané (měřené) oblasti a výsledkem je poté průměrná teplota v této oblasti. Naopak termokamery pomocí maticových detektorů dokáží změřit teplotu i rozložení teploty na povrchu tělesa (dvourozměrné teplotní pole), výstupem kamery je tzv. termogram. Pyrometry jsou specializované přístroje pro úzkou skupinu aplikací a materiálů, naopak termokamery jsou přístroji univerzálními. Stejná kamera se může použít na kontrolu a údržbu strojů, měření teplot při obrábění či termografickou diagnostiku budov. [12]



Obrázek 8 - Pyrometr [13]

Ceny pyrometrů se pohybují v jednotkách tisíců Kč, dražší a specializované pyrometry stojí i několik desítek tisíc Kč. Naopak cena termokamer začíná na jednotkách desetitisíců, kdy se jedná o kamery s nízkými teplotními rozsahy (cca -20 až 250 °C) a nízkým rozlišením (80x60 až 160x120). Maximální teplotní rozsah, ve kterém jsou dnešní termokamery schopny měřit teplotu, je -40 až 3500 °C, ovšem s požadavky na zvýšení těchto parametrů cena termokamer může vzrůst až na několik milionů korun. [11] [14]



Obrázek 9 - Termokamera Flir EX [14]

Přednosti pyrometrů ve srovnání s termovizními kamerami:

- pokud není vyžadována univerzálnost, použití pyrometru se jeví často jako levnější varianta,
- možnost pořízení pyrometru s velkou tepelnou a mechanickou odolností (u termokamer by zajištění velké tepelné a mechanické odolnosti bylo velmi nákladné),
- možnost zvolit úzkopásmový pyrometr se spektrálním rozsahem vztaženým k emisivitě a teplotě povrchu měřeného tělesa, u termokamery je běžný spektrální rozsah 7 až 14 μm ,
- poměrový pyrometr měří intenzitu dvou tepelných zářích na dvou vlnových délkách, což se využívá, když není známá emisivita [15] [13]

Přednosti termokamer:

- pořizování 2D termogramů (s rozlišením až 1280x1024),
- frekvence zaznamenávání až 1000 Hz,
- vysoká teplotní citlivost (0,02 $^{\circ}\text{C}$),
- komplexnější představa o teplotním rozložení v měřeném místě a o vlivech teplotních odrazů z okolí. [11] [14]

Termokamery i pyrometry měří teplotu nepřímo, na základě naměřené intenzity tepelného záření teplotu stanovují výpočtem z rovnice termografie. Pro co nejpřesnější nastavení teploty je zapotřebí v kameře nastavit parametry, které vstupují do rovnice:

- emisivita (-),
- teplota atmosféry ($^{\circ}\text{C}$),
- zdánlivá odražená teplota ($^{\circ}\text{C}$),
- relativní vlhkost atmosféry (%),
- vzdálenost mezi přístrojem a měřeným povrchem (m). [12]

Aplikace pro obrábění

Jelikož se jedná o univerzální přístroje, nejsou přímo určeny pro obrábění. Ovšem díky univerzálnosti přístroje lze jednoduše aplikovat také zde. V případě pyrometru je třeba dobře přístroj nastavit, tak aby stále mířil na stejné místo. Poté ho lze použít například jako snímač, který při překročení určité teploty může varovat nebo stroj odpojit. Komplexnějším přístupem je upravování řídicích členů podle teploty a limitní křivek. V případě termokamery není až tak důležité přesné zaměření na jeden bod, díky určité ploše snímání a jejímu rozlišení. Stejně jako pyrometr může fungovat i termokamera, ovšem termokamera nám přidává další možnosti snímání celkového procesu obrábění, tedy při nejmenším jeho teplot a teplotního okolí, kam je kamera namířena.

Nevýhoda bezdotykového měření

Největší nevýhodou současného bezdotykového měření oproti kontaktním měřícím technologiím, které lze umístit do jádra nástroje, je měření pouze povrchové teploty, která dost často přesně nevystihuje reálné teploty soustavy. I přes to se jejich použití stále rozšiřuje, a to právě díky univerzálnosti a snadné přenositelnosti. Může nám tedy zatím sloužit jako rychlá informace o teplotách [15]

2.2 Monitorování hodnoty otupení

2.2.1 Měření otupení mimo stroj

Měření otupení mimo stroj je nejjednodušší způsob kontroly otupení. Vyznačuje se vysokou pracností a časovou náročností. Probíhá při odstavení stroje, kdy se nástroj měří mimo stroj. Díky tomu je pro adaptivní řízení a přímou regulaci řezných podmínek u strojů nepoužitelné. [1]

2.2.2 Nekontinuální měření otupení na stroji

Nekontinuální měření otupení na stroji je ve své podstatě stejné jako měření mimo stroj, s tím rozdílem, že je vše přizpůsobeno, pro měření na vypnutém stroji, pouze bez odepnutí

samotného nástroje. Měření probíhá v době, kdy se neobrábí. Ani zde se tedy nedá mluvit o adaptivním řízení. [1]

2.2.3 Kontinuální měření otupení na stroji

Jedná se o nejvyšší stupeň měření otupení, které se dá využívat právě pro adaptivní systémy řízení. Velký význam ovšem přinášejí i pro laboratorní měření. Kontinuální otupení lze zjišťovat přímo nebo nepřímo. [16]

Metody přímé

Nejjednodušší měření u přímých metod je při broušení, kde lze stanovit úbytek brusného kotouče vzdáleností osy upnutí od obrobeného povrchu. Pro ostatní technologie ovšem není měření takto jednoduché. Byla vyvinuta řada metod, které jsou ovšem poměrně složité a nákladné. [17]

Metody nepřímé

Až metody nepřímé nám přinášejí vhodné použití pro adaptivní řízení řezného procesu. Jednou z nepřímých metod je měření velikostí složek řezné síly v závislosti na otupení. Bylo zjištěno, že velikost řezné síly v závislosti na otupení má přibližně lineární závislost, alespoň do určité hodnoty opotřebení. Od určité hodnoty opotřebení řezného nástroje začíná progresivní růst složek řezné síly. [1]

Další z nepřímých metod je sledování drsnosti povrchu. S velikostí opotřebení nástroje plynule vzrůstá taky hodnota drsnosti povrchu. Stejně jako u řezné síly, i zde po dosažení určitého opotřebení začne drsnost prudce narůstat. Ze změny drsnosti lze tedy nepřímo usuzovat velikost opotřebení. Měření lze provádět opticko-elektronickým systémem pracujícím na principu odrazu světelného paprsku. [1]

Dále při změně opotřebení dochází ke změně frekvenčního spektra, tedy chvění v systému stroje. I touto metodou lze nepřímo stanovit velikost opotřebení. Nevýhodou je poměrně náročné určení závislosti na daném systému stroj-nástroj-obrobek, i přes to, že změna frekvenčního spektra bývá dosti výrazná. [17]

2.3 Monitorování sil a vibrací

2.3.1 Síly při obrábění

Síle je veličina procesu obrábění, která je časově závislá a je základní veličinou pro hodnocení trvanlivosti, tedy životnosti rezného nástroje. Stav napjatosti v obráběném materiálu způsobuje rezný odpor R , který síla řezání musí při rezném procesu neustále překonávat. [8]

Při obrábění může rezná síla kolísat v závislosti na čase až o 20% od běžné hodnoty. Kolísání nastává i při obrábění za konstantních podmínek a je způsobené převážně rozptylem mechanickým vlastností materiálu a tvorbou třísky. [4]

2.3.2 Měření sil a momentů

Měření sil a momentů se může využívat pro laboratorní zkoušky materiálů případně pro adaptivní systémy řízení rezného procesu, kdy je účelem dodržení některých z kritérií, jako například maximální úběr, efektivita nebo životnost nástroje. [6]

Měření sil se používá při monitorování rezného procesu. Jedná se o snímání rezných i neřezných sil a momentů probíhajících při obráběcím procesu. Takto naměřená data jsou dále vyhodnocována a využívána pro nastavení řídicích členů. [6]

Měření se principiálně rozděluje do dvou kategorií: přímé a nepřímé metody.

2.3.3 Nepřímě měření sil a momentů

Metody pro nepřímě měření sil vycházejí převážně z výkonu elektromotoru obráběcího stroje. Zde se pomocí snímání aktuálního výkonu stroje nastavují parametry obráběcího procesu, jako je řezná rychlost a posuv. Maximální užitečný výkon lze vypočítat odečtením celkového výkonu obráběcího stroje od výkonu stroj při chodu stroje na prázdko. Užitečný výkon dostaneme, pokud vynásobíme tangenciální řeznou složku obráběcí síly F_c s řeznou složkou rychlosti obrábění v_c . Velkou výhodou této metody je minimální zásah do obráběcího stroje. [8]

2.3.4 Přímá metoda

Přímé měření složek síly řezání a jejich točivých momentů se zakládá na měření deformací v soustavě stroj – nástroj – obrobek během obrábění prostřednictvím dynamometrů. [18]

Základní rozdělení dynamometrů:

- podle počtu měřených složek síly řezání (jednosložkové, dvousložkové, třísložkové a pro měření kroutících momentů)
- podle aplikované měřicí metody (mechanické, hydraulické, pneumatické, elektrické, indukční, kapacitní, odporové, využívající piezoelektrického jevu, optické)
- podle metody obrábění (pro frézování, soustružení, vrtání, broušení...) [7]

Na přímé metody měření sil a momentů bude zaměřena experimentální část práce.

2.3.5 Kmitání

Kmitavý pohyb provází při provozu téměř každé strojní zařízení, tedy i obráběcí stroje. Ve skutečnosti je kmitání v obráběcích strojích velmi složitým jevem. Každý stroj je komplikovaná soustava hmotných a pružných těles. Kmitání, které vzniká v soustavě stroj-nástroj-obrobek může být tak malé, že nemá žádný vliv na řezný proces, ovšem jsou i situace, kdy je kmitání velmi intenzivní, to pak může nevhodně ovlivňovat samotný řezný

proces. Jedná se tedy o nežádoucí procesy. Nepříznivé účinky intenzivního kmitání se mohou projevit různými způsoby:

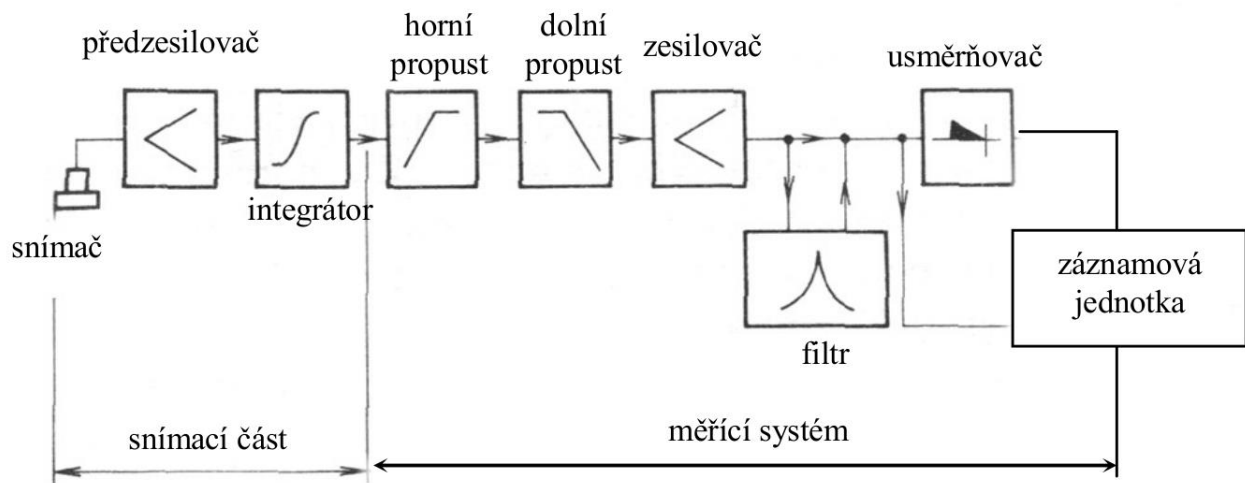
- snížení přesnosti
- zvýšení opotřebení nástroje
- zhoršení pracovního prostředí
- opotřebení stroje [19]

Princip měření vibrací

Převážně jsou snímače pro měření vibrací v průběhu obrábění založeny na principu měření zrychlení, tedy na principu akcelometrů. Ty můžeme rozdělit podle způsobu snímání na kapacitní, tenzometrické, elektrodynamické a piezoelektrické. Nejčastěji bývají využívány piezoelektrické, které pracují na podobné bázi jako dynamometry. [20]

Nejvíce jsou pro nás zajímavé vibrace, jež mají zdroj v nástroji. Tyto vibrace převážně souvisí s opotřebením nástroje. [20]

Základ měřicího zařízení by musel obsahovat minimálně tři členy. Snímač, zesilovač a záznamovou jednotku. Takovýto řetězec je schopný měřit jednoduchý harmonický pohyb. Pro praxi je ovšem vhodný sofistikovanější řetězec z důvodu například filtrování určitého spektra vibrací. [21]



Obrázek 10 – Schéma zapojení měřícího zařízení [20] [21]

- snímač slouží pro převedení mechanického impulzu na elektrický
- integrátor umožňuje stanovit velikost rychlosti případné polohy
- společně s předzesilovačem tvoří tyto tři členy snímací část
- horní a dolní frekvenční propusti slouží na nastavení požadovaného frekvenčního rozsahu a na omezení nežádoucích vlivů za jejich hranicemi
- usměřovač vyhodnocuje například efektivní hodnotu, maximální rozkmit [19]

Takto zpracovaný signál lze již dále softwarově zpracovávat a vyhodnocovat.

2.3.6 Monitorování řezného procesu

Pro monitorování řezného procesu se využívá výše zmíněných veličin, ty jsou posílány do sběrnice dat, která převádí analogický signál na digitální. Digitální data jsou pomocí výpočetní techniky a vhodného softwaru vyhodnocena podle zadaných parametrů. Takto zpracovaná data jsou následně zaslána zpět do obráběcího systému stroje, kde v případě adaptivních systémů přizpůsobují řezné podmínky. [20]

3 Monitorování dynamiky řezného procesu a využití získaných dat pro adaptivní řízení

Při obrábění klade materiál obrobku odpor, jenž je nutné překonat. V tomto důsledku musí nástroj vytvořit řezné síly, které tento odpor překonávají. Tato část diplomové práce se bude zabývat zjišťováním řezných sil, které vznikají při frézování titanové slitiny.

Velikost výsledné řezné síly F a jejich vybraných složek byla měřena rotačním piezoelektrickým dynamometrem Kistler. Dynamometr je vybaven čtyřmi piezoelektrickými senzory, na kterých vlivem zatížení vniká signál, který je veden do zesilovače a A/D převodníku. Zpracovávání signálu je zajištěno softwarovým programem Dynoware. Software vyhodnocuje složky síly ve třech osách F_x , F_y , F_z dle souřadnicového systému dynamometru. Dále vyhodnocuje kroutící moment M_z a dokáže vypočítat radiální F_r a tangenciální sílu F_t z průměru použité frézy. [11]

Měření probíhalo na vertikální konzolové frézce FV 25 CNC A s řídicím systémem Heidenhain. Experiment probíhal ve školních laboratořích Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie. Měření zajišťoval rotační dynamometr od firmy Kistler. Obráběným materiálem byla slitina Ti6Al4V ve tvaru kvádrů.



Obrázek 11- Upnutý dynamometr v konzolové frézce FV 25 CNC

3.1 Rotační dynamometr Kistler

Rotační dynamometr se řadí mezi přístroje pro přímé měření velikosti sil a momentů.



Obrázek 12 - Rotační dynamometr Kistler [22]

3.2 Základní parametry přístroje

Parametry rotačního dynamometru Kistler			
popis	veličina	jednotka	hodnoty
Rozsah silového zatížení v jednotlivých osách	F_x, F_y	[kN]	-5...5
	F_z	[kN]	-20...20
	M_z	[Nm]	-200...200
práh citlivosti	F_x, F_y	[mV/N]	≈ 2
	F_z	[mV/N]	$\approx 0,5$
	M_z	[mV/Nm]	≈ 50
hmotnost	M	[kg]	≈ 3

Tabulka 1 – Parametry rotačního dynamometru [22]

3.3 Vstupní hodnoty

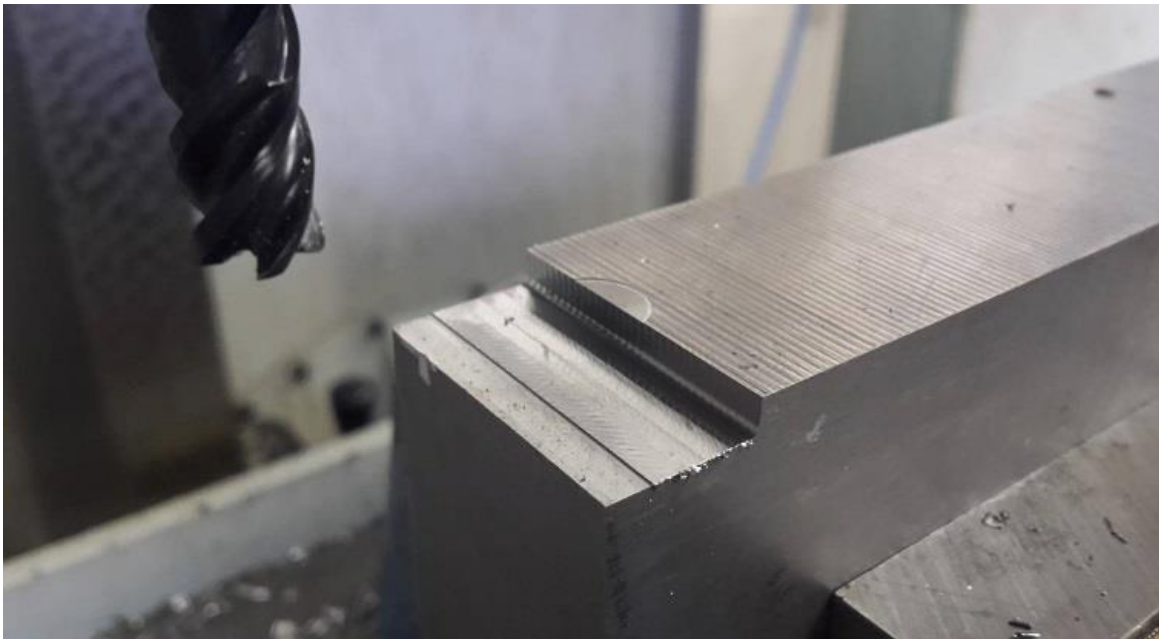
Vstupními hodnotami měření byl posuv na zub f , řezná síla v_c , radiální hloubka a_e a axiální hloubka řezu a_p . V tabulce uvedené níže jsou vypsána všechna nastavení. Pro samotné frézování byl vytvořen jednoduchý program, který proběhl pro každé jednotlivé nastavení, které bylo následně zpracováno.

Měření	v_c [m/min]	f_z [mm/z]	a_p [mm]	a_e [mm]	S (n)	f [mm/ot]
M10	20	0,05	3	0,5	637	0,2
M12	20	0,2	3	0,5	637	0,8
M21	20	0,2	3	1	637	0,8
M13	40	0,05	3	0,5	1273	0,2
M15	40	0,2	3	0,5	1273	0,8
M16	60	0,05	3	0,5	1910	0,2
M18	60	0,2	3	0,5	1910	0,8

Tabulka 2 – Vstupní hodnoty

Výše vybrané řezné podmínky byly zvoleny s ohledem na co největší názornost naměřených výsledků. Pro měření M10, M12, M21 bude změnou posuv za otáčku f [mm/ot] a šířka frézované plochy a_e [mm], při stejné hodnotě řezné rychlosti, hloubky třísky a otáček. Pro měření M13, M15 bude změnou řezné rychlosti se stejným nastavením, jako v části první. Pro M16, M18 bude opět změnou zvýšená řezná rychlost při zachování stejných nastavení.

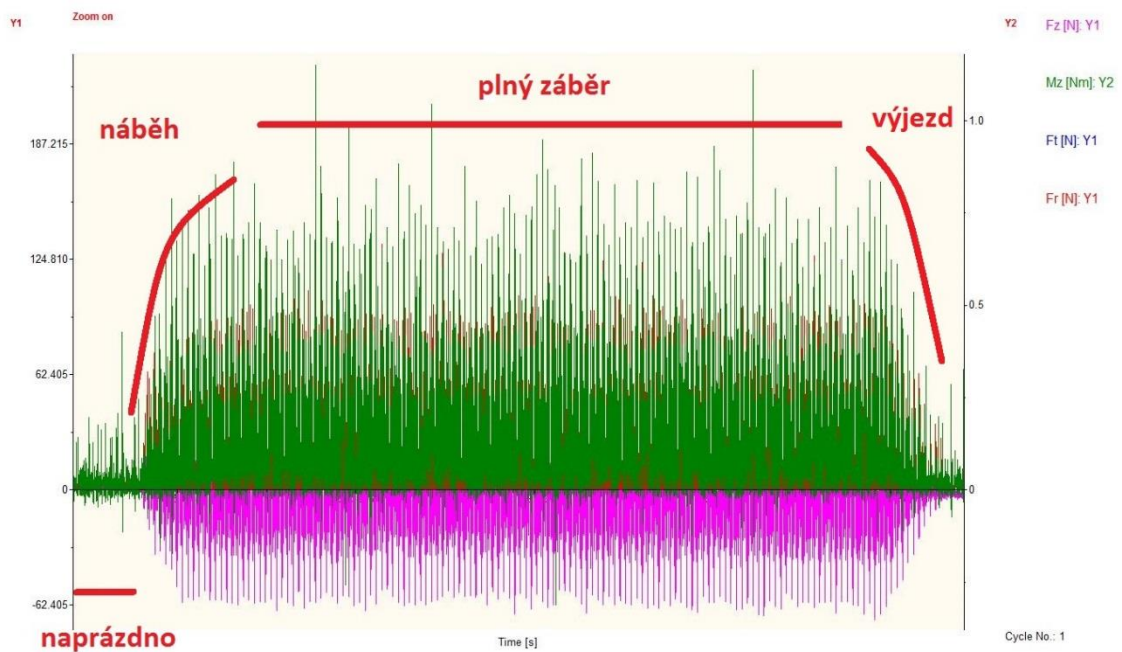
Byla použita čelní monolitní válcová fréza o průměru $D=10$ mm a počtu zubů $z=4$.



Obrázek 13 - Průběh frézování titanového bloku

3.4 Získaná data z programu DynoWare

Program DynoWare vykreslil průběhy jednotlivých sil a momentů. Vyhodnocování probíhalo pomocí pěti reprezentativních otáček frézy, které se nejvíce blížily průměrným hodnotám na daném úseku.



Obrázek 14 – Průběhy sil a momentů

Na snímku (viz. Obrázek 14) můžeme vidět nejdříve chod stroje na prázdko, poté postupný náběh do materiálu až po plný záběr frézy. Stejný je i průběh pro vyjždění nástroje z řezu. Výchyly může způsobovat homogenita materiálu, rušení z okolí, případně chyba měření.

3.5 Naměřené hodnoty:

3.5.1 Měření M10

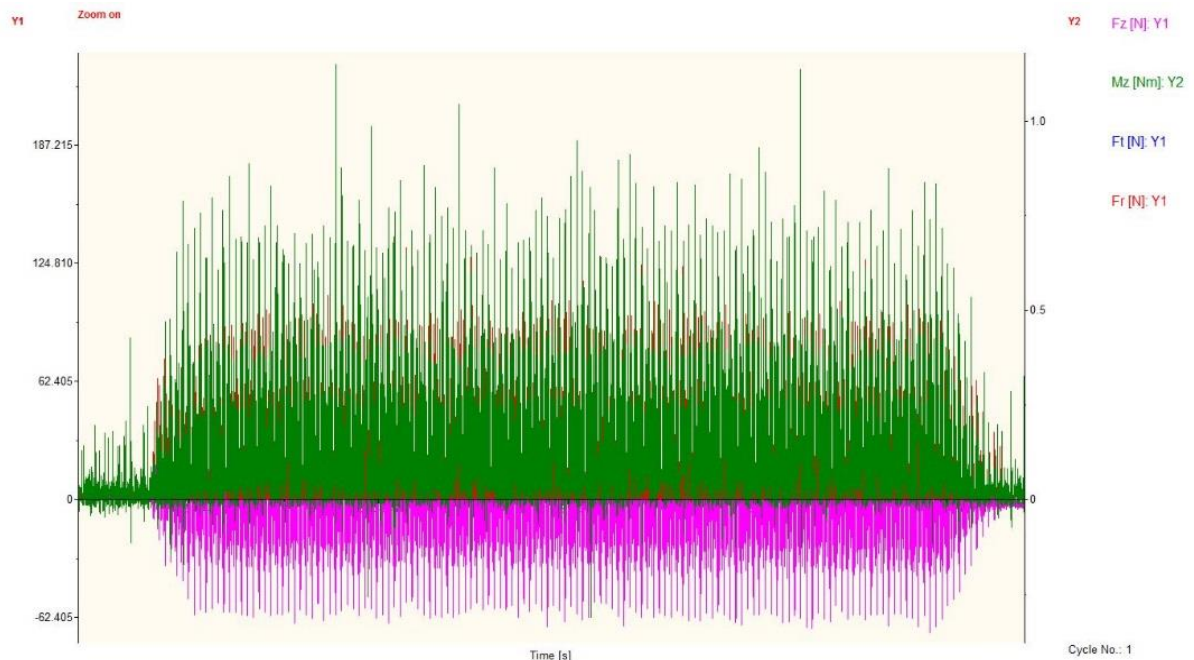
Měření	v_c [m/min]	f_z [mm/z]	a_p [mm]	a_e [mm]	S (n)	f [mm/ot]
M10	20	0,05	3	0,5	637	0,2

Tabulka 3 – Měření M10

Výstup z programu DynoWare

Celkový náhled

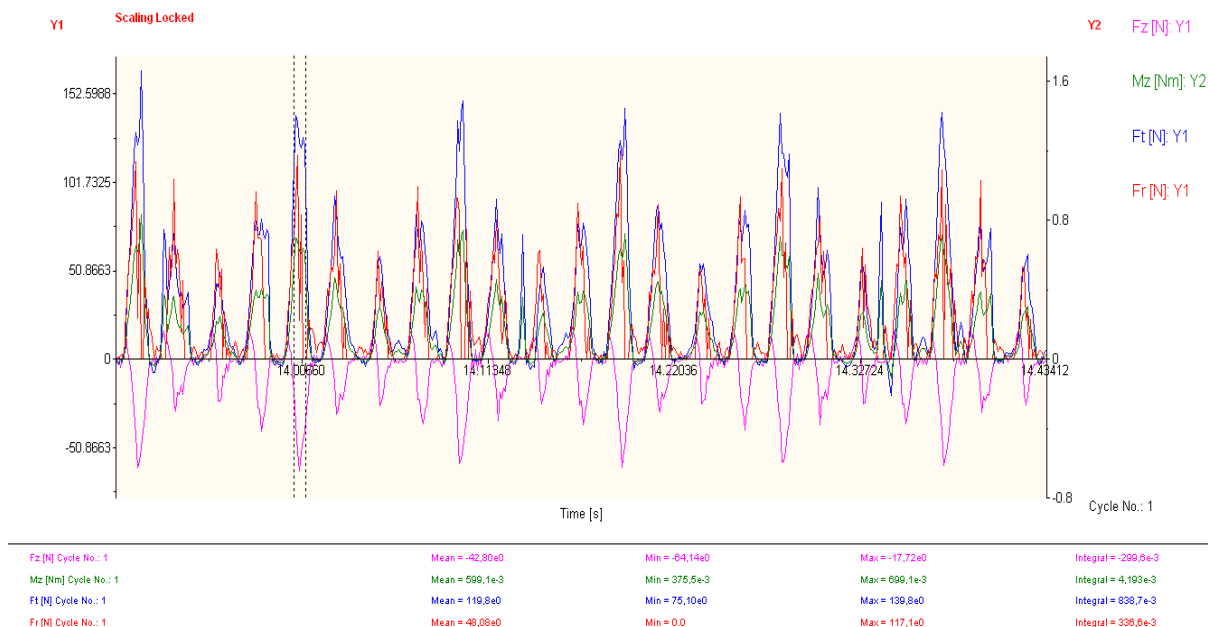
- jedná se o celý záznam pro měření M10



Obrázek 15 – M10 celkový náhled

Vybraný úsek

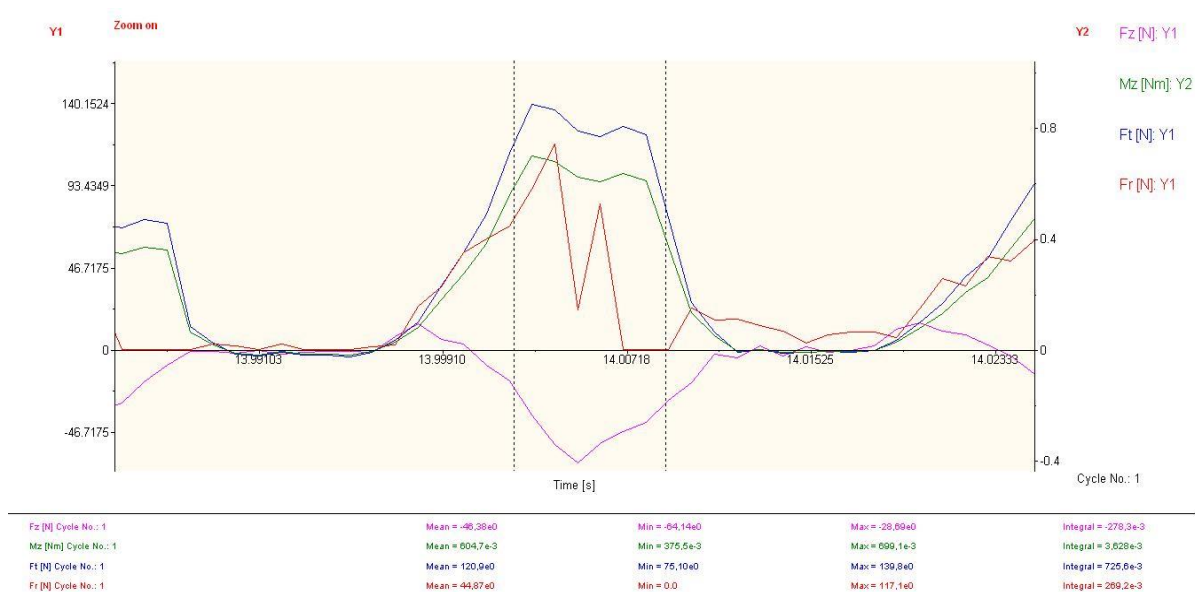
- jedná se o vybraný úsek, který nejlépe odpovídá průměrným hodnotám
- na obrázku je možné vidět pět otáček frézy (viz. Obrázek 16)



Obrázek 16 – M10 vybraný úsek

Detailní záběr jednoho zubu

- zde je vidět detailní záběr prvního zubu z (Obrázek 16)



Obrázek 17 - M10 detailní záběr jednoho zubu

Tabulka naměřených hodnot

čas 13.9-14.40 [s]	měření	ZUB	ot č. 1	ot č. 2	ot č. 3	ot č. 4	ot č. 5	Průměr
Fz [N]	M10	zub1	-45	-46	-50	-46	-42	-45,8
		zub2	-22					
		zub3	-14					
		zub4	-25					
Mz [Nm]	M10	zub1	0,59	0,60	0,64	0,58	0,56	0,59
		zub2	0,33					
		zub3	0,25					
		zub4	0,37					
Ft [N]	M10	zub1	119	121	129	115	112	119,2
		zub2	67					
		zub3	49					
		zub4	73					
Fr [N]	M10	zub1	51	45	45	37	48	45,2
		zub2	45					
		zub3	42					
		zub4	56					

Tabulka 4 – Tabulka naměřených hodnot M10

M10 – Zhodnocení

Měření probíhalo pro nastavení řezné rychlosti $v_c = 20$ [m/min], posuv na zub $f_z = 0,05$ [mm/z], radiální hloubka řezu $a_e = 0,5$ [mm], axiální hloubka řezu $a_p = 3$ [mm], otáčky S-637(n) a posuv na otáčku $f = 0,2$ [mm/ot].

Z naměřených dat je patrné, že jeden zub zabírá značně více než ostatní, a to o více než dvojnásobné hodnoty. Z pohledu opotřebení takové nastavení není ideální. Při tomto

způsobu obrábění by nám vznikalo výrazné opotřebení jednoho břitu, a tedy velké změny během životnosti nástroje, případně značně kratší životnost celého nástroje. Záporná hodnota do osy z je způsobena pozitivní geometrií nástroje, fréza je tedy vtahována do materiálu.

Maximální průměrné zatížení, se kterým je tedy nutné počítat při výpočtu zatížení stroje vidíme v tabulce. (viz. Tabulka 5)

Fz[N]	-45,8
Mz[Nm]	0,59
Ft[N]	119,2
Fr[N]	45,2

Tabulka 5 – Maximální průměrné zatížení M10

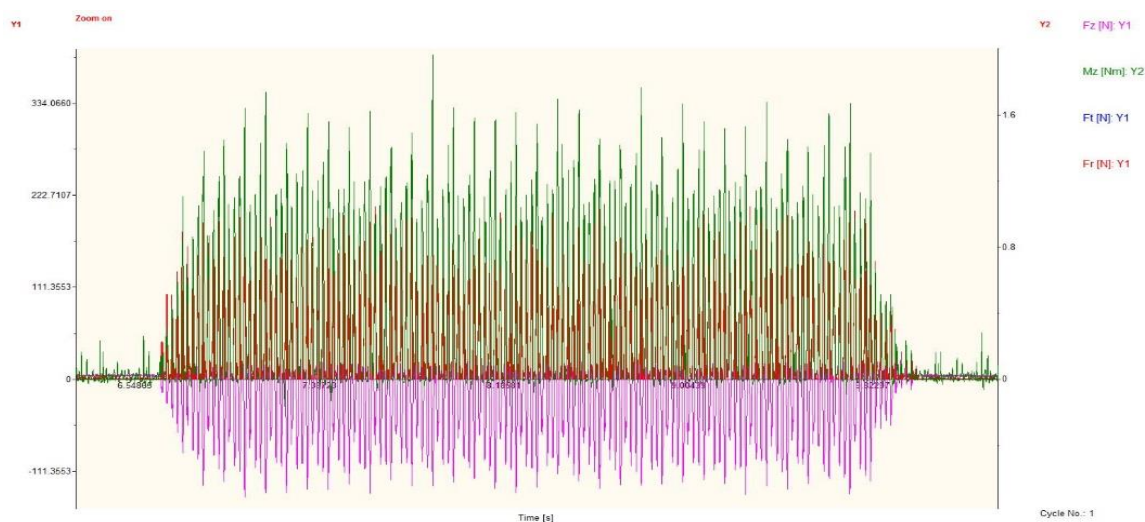
3.5.2 Měření M12

Měření	v_c [m/min]	f_z [mm/z]	a_p [mm]	a_e [mm]	S (n)	f [mm/ot]
M12	20	0,2	3	0,5	637	0,8

Tabulka 6 – Měření M12

Výstup z programu DynoWare

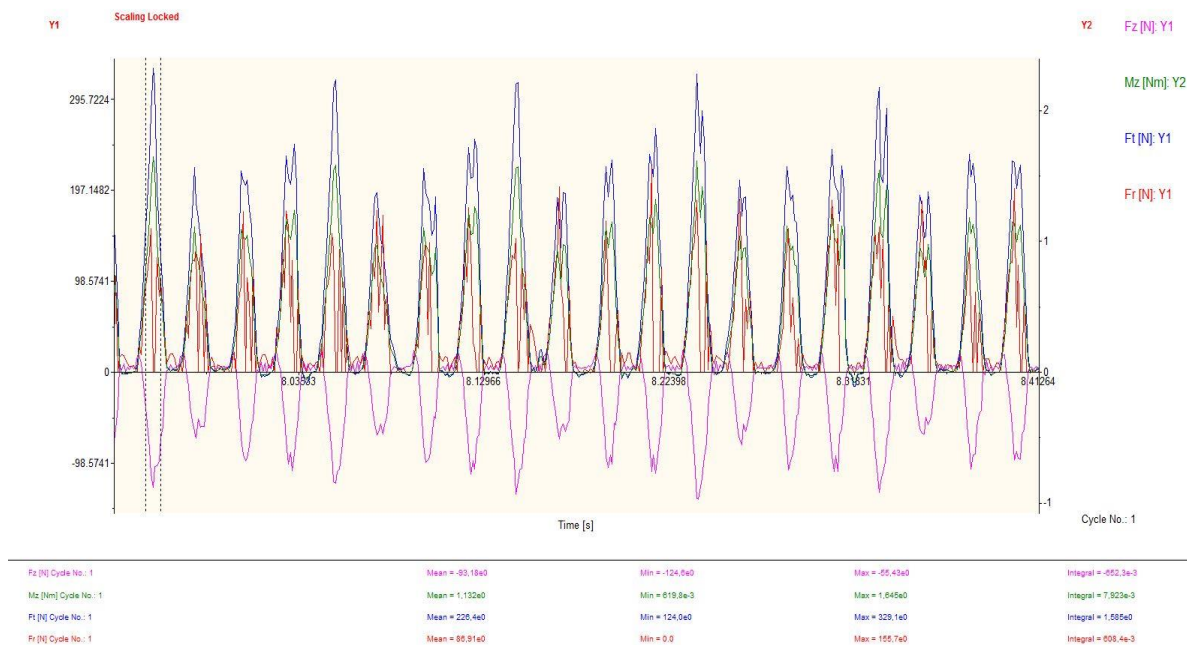
Celkový náhled



Obrázek 18 – M12 celkový záznam

Vybraný úsek

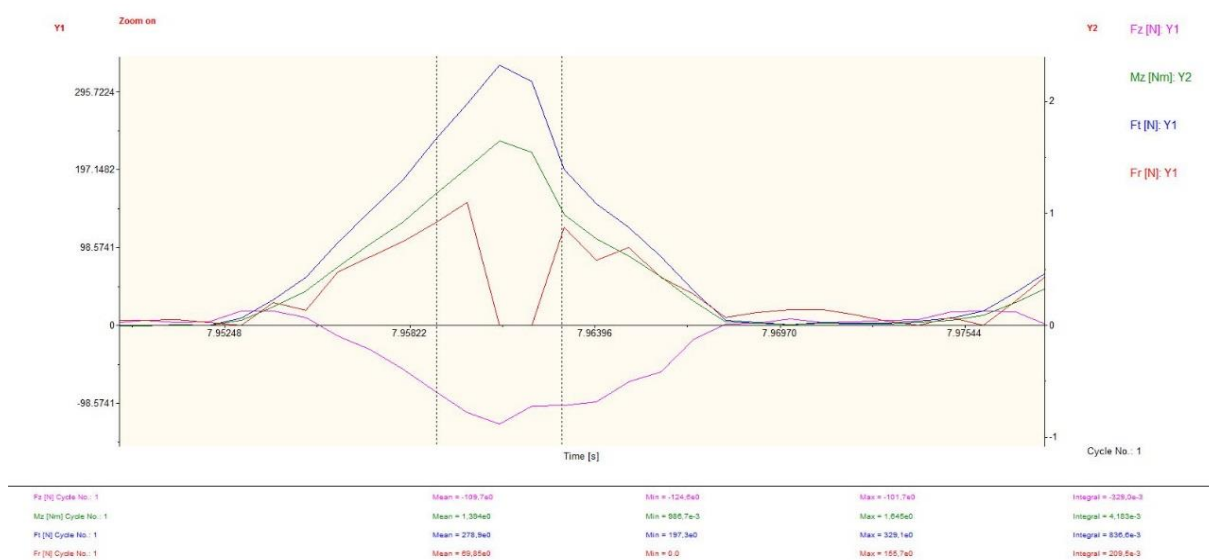
- jedná se o vybraný úsek, který nejlépe odpovídá průměrným hodnotám
- na obrázku je možné vidět pět otáček frézy (viz Obrázek 19)



Obrázek 19 – M12 vybraný úsek

Detailní záběr jednoho zubu

- zde je vidět detailní záběr prvního zubu z (Obrázek 19)



Obrázek 20 – M12 detailní záběr jednoho zubu

Tabulka naměřených hodnot

čas 7,9-8,4 [s]	měření	ZUB	ot č. 1	ot č. 2	ot č. 3	ot č. 4	ot č. 5	Průměr
Fz [N]	M12	zub1	-104	-108	-113	-121	-99	-109
		zub2	-60					
		zub3	-81					
		zub4	-81					
Mz [Nm]		zub1	1,35	1,34	1,44	1,38	1,2	1,34
		zub2	0,9					
		zub3	0,98					
		zub4	1,0					
Ft [N]		zub1	270	268	288	275	238	268
		zub2	178					
		zub3	195					
		zub4	200					
Fr [N]		zub1	82	83	71	64	85	77
		zub2	105					
		zub3	73					
		zub4	85					

Tabulka 7 – Tabulka naměřených hodnot M12

M12 – Zhodnocení

Měření probíhalo pro nastavení řezné rychlosti $v_c = 20$ [m/min], posuv na zub $f_z = 0,2$ [mm/z], radiální hloubka řezu $a_e = 0,5$ [mm], axiální hloubka řezu $a_p = 3$ [mm], otáčky S-637(n) a posuv na otáčku $f = 0,8$ [mm/ot].

V tomto měření byl změněn posuv na zub/otáčku při zachování stejných parametrů.

Z průběhu zatížení lze vyčíst, že rozdíl mezi zuby není tak zřetelný jako u měření M10 i přes to, jeden zub zabírá o zhruba 30 % více než ostatní. Ovšem ostatní zuby frézy již zabírají rovnoměrně.

Maximální průměrné zatížení na jeden zub, se kterým je tedy nutné počítat při výpočtu zatížení stroje (viz. Tabulka 8).

Fz[N]	-109
Mz[Nm]	1,64
Ft[N]	268
Fr[N]	77

Tabulka 8 – Maximální průměrné zatížení M12

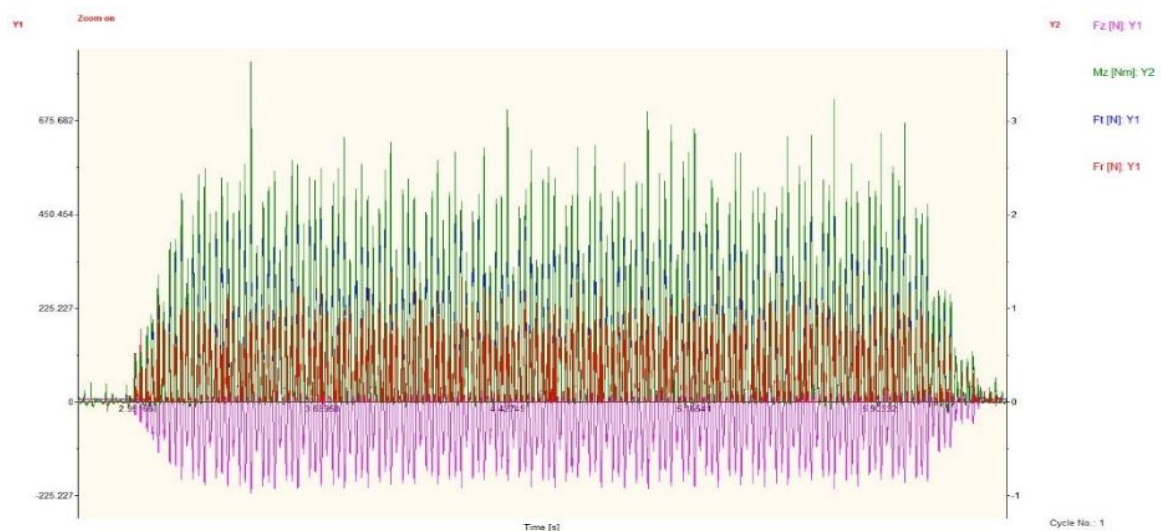
3.5.3 Měření M21

Měření	v_c [m/min]	f_z [mm/z]	a_p [mm]	a_e [mm]	S (n)	f [mm/ot]
M21	20	0,2	3	1	637	0,8

Tabulka 9 – Měření M21

Výstup z programu DynoWare

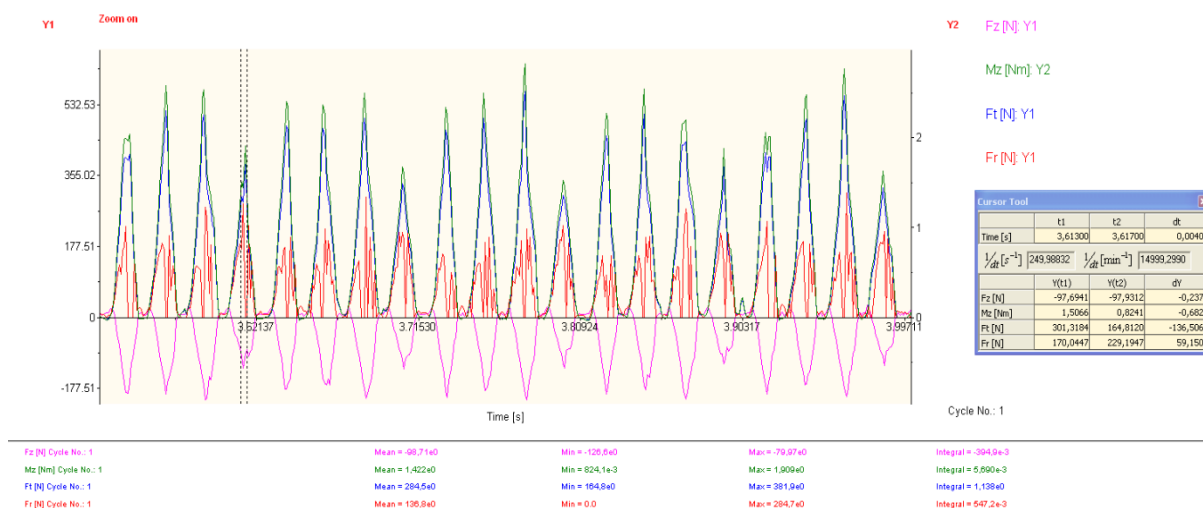
Celkový náhled



Obrázek 21 – M21 celkový náhled

Vybraný úsek

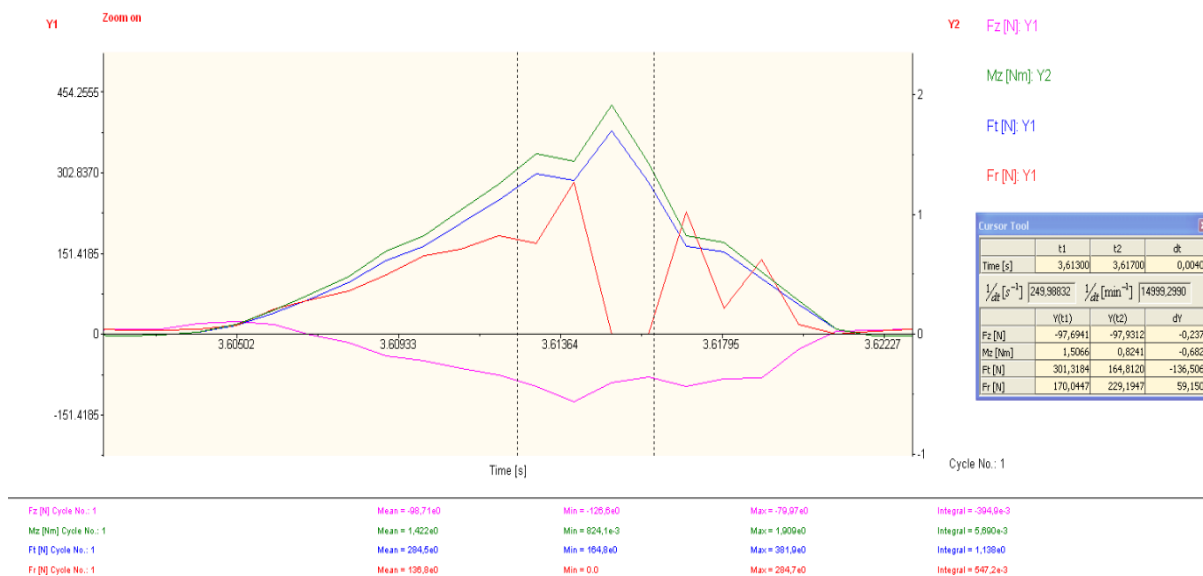
- jedná se o vybraný úsek, který nejlépe odpovídá průměrným hodnotám
- na obrázku je možné vidět pět otáček frézy (viz. Obrázek 22)



Obrázek 22 – M21 vybraný úsek

Detailní záběr jednoho zubu

- zde je vidět detailní záběr prvního zubu z (Obrázek 22)



Obrázek 23 – M21 detailní záběr jednoho zubu

Tabulka naměřených hodnot

čas 3,53-4 [s]	měření	ZUB	ot č. 1	ot č. 2	ot č. 3	ot č. 4	ot č. 5	Průměr
Fz [N]	M21	zub1	160	154	162	-157	-153	-157,2
		zub2	-158					
		zub3	-174					
		zub4	-99					
Mz [Nm]		zub1	1,90	1,92	1,94	1,94	1,85	1,91
		zub2	2,08					
		zub3	2,04					
		zub4	1,42					
Ft [N]		zub1	380	384,1	388	387	370	381,9
		zub2	416					
		zub3	408					
		zub4	285					
Fr [N]		zub1	95	109	66	77	85	86,4
		zub2	112					
		zub3	117					
		zub4	137					

Tabulka 10 – Naměřené hodnoty M21

M21 – Zhodnocení

Měření probíhalo pro nastavení řezné rychlosti $v_c = 20$ [m/min], posuv na zub $f_z = 0,2$ [mm/z], radiální hloubka řezu $a_e = 0,5$ [mm], axiální hloubka řezu $a_p = 3$ [mm], otáčky S-37(n) a posuv na otáčku $f = 0,8$ [mm/ot].

Ze záznamu je patrné, že u tohoto nastavení je záběr všech zubů velice rovnoměrný, pouze jeden zub zabírá o 20 % méně.

Maximální průměrné zatížení na jeden zub, se kterým je tedy nutné počítat při výpočtu zatížení stroje (viz. Tabulka 11).

Fz[N]	-158
Mz[Nm]	1,91
Ft[N]	382
Fr[N]	86,4

Tabulka 11 – Maximální průměrné zatížení M21

3.5.4 Měření M13

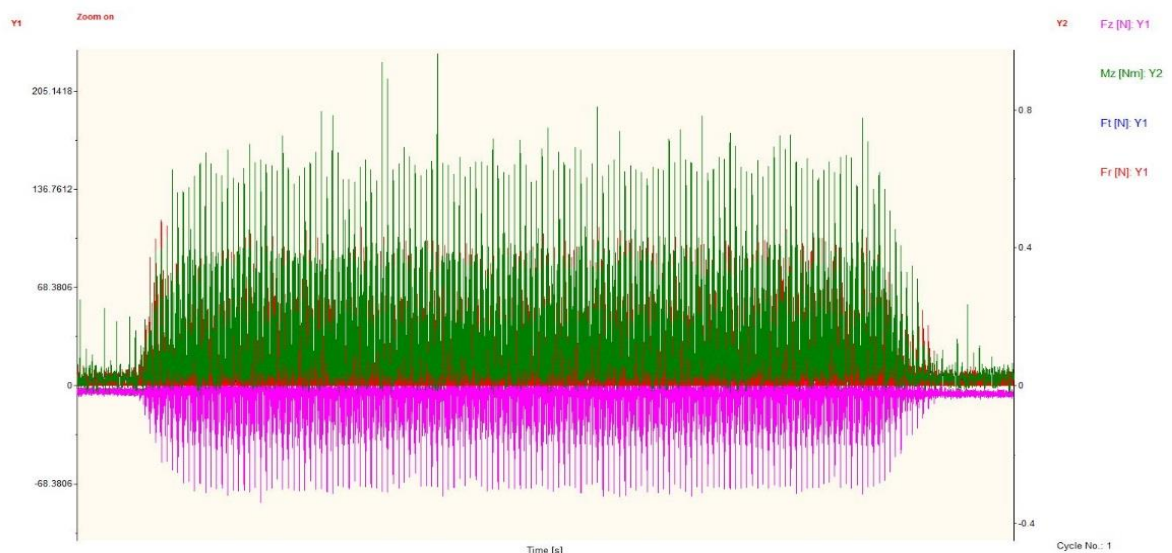
Měření	v_c [m/min]	f_z [mm/z]	a_p [mm]	a_e [mm]	S (n)	f [mm/ot]
M13	40	0,05	3	0,5	1273	0,2

Tabulka 12 – Měření M13

Výstup z programu DynoWare

Celkový náhled

- jedná se o celý záznam

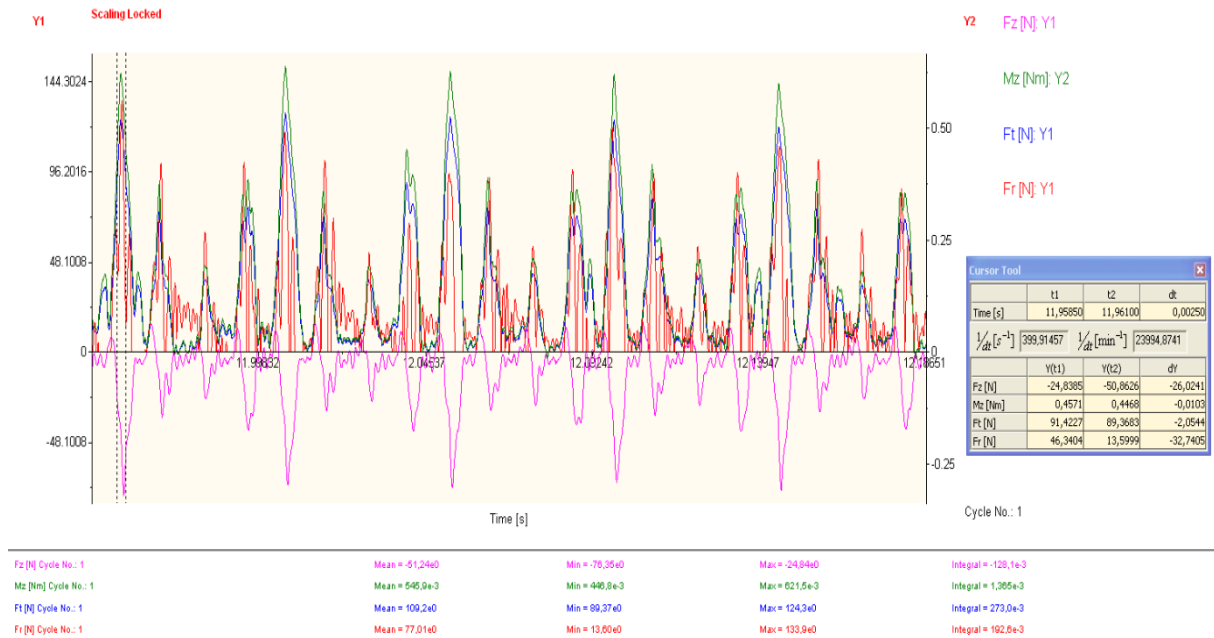


Obrázek 24 – M13 celkový náhled

Vybraný úsek

- jedná se o vybraný úsek, který nejlépe odpovídá průměrným hodnotám

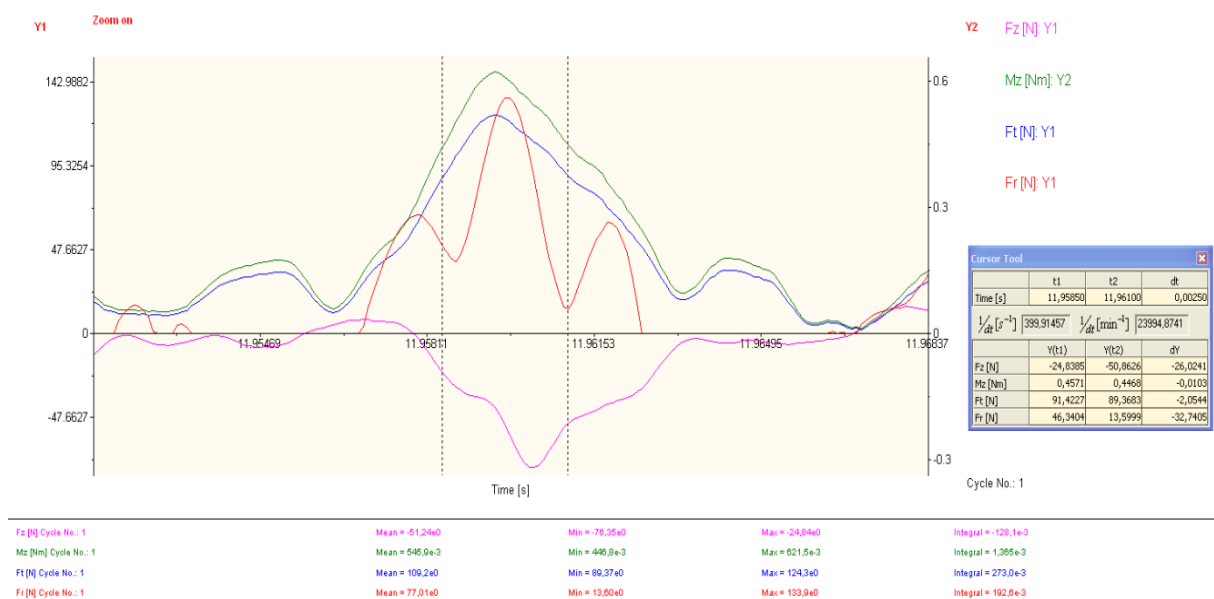
- na obrázku je možné vidět pět otáček frézy (viz. Obrázek 25)



Obrázek 25 – M13 vybraný úsek

Detailní záběr jednoho zubu

- zde je vidět detailní záběr prvního zubu z (Obrázek 25)



Obrázek 26 – M13 detailní záběr jednoho zubu

Tabulka naměřených hodnot

čas 11,95-12,2 [s]	měření	ZUB	ot č. 1	ot č. 2	ot č. 3	ot č. 4	ot č. 5	Průměr
Fz [N]	M13	zub1	-52	-53	-52	-51	-52	-52
		zub2	-19					
		zub3	-17					
		zub4	-31					
Mz [Nm]		zub1	0,45	0,56	0,57	0,53	0,54	0,53
		zub2	0,27					
		zub3	0,16					
		zub4	0,33					
Ft [N]		zub1	109	113	113	106	108	109,8
		zub2	54					
		zub3	31					
		zub4	67					
Fr [N]	zub1	76	67	63	83	66	71	
	zub2	50						
	zub3	28						
	zub4	51						

Tabulka 13 – Naměřené hodnoty M13

M13 – Zhodnocení

Měření probíhalo pro nastavení řezné rychlosti $v_c = 40$ [m/min], posuv na zub $f_z = 0,05$ [mm/z], radiální hloubka řezu $a_e = 0,5$ [mm], axiální hloubka řezu $a_p = 3$ [mm], otáčky S-1273(n) a posuv na otáčku $f = 0,2$ [mm/ot].

Z průběhu je zřejmé, že je odebírání třísky velmi nerovnoměrné. Rozdíly jsou skoro trojnásobné, podobně jak tomu bylo u měření M10.

Maximální průměrné zatížení na jeden zub, se kterým je tedy nutné počítat při výpočtu zatížení stroje viz. (Tabulka 14)

Fz[N]	-52
Mz[Nm]	0,53
Ft[N]	110
Fr[N]	71

Tabulka 14 – Maximální průměrné hodnoty M13

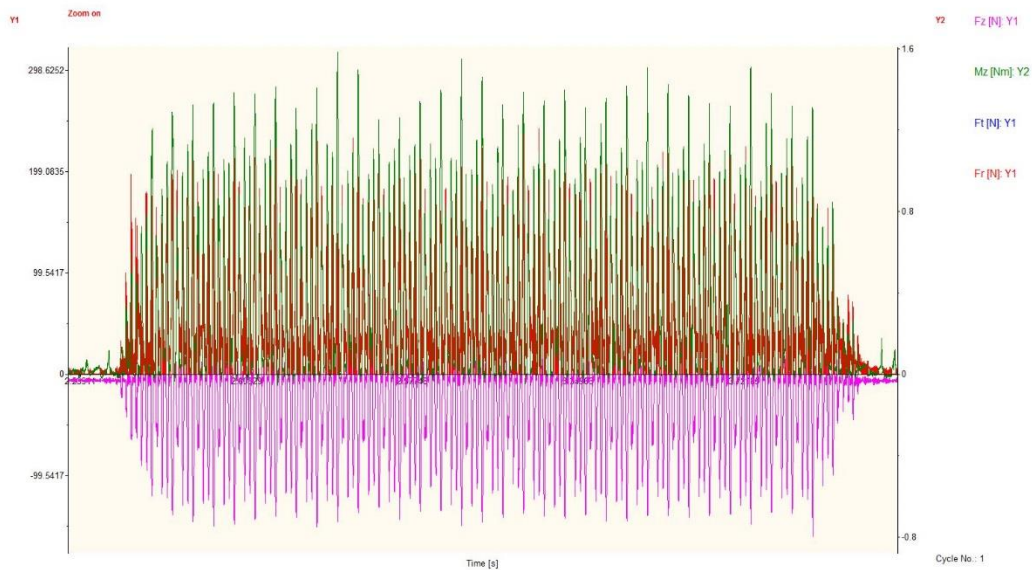
3.5.5 Měření M15

Měření	v_c [m/min]	f_z [mm/z]	a_p [mm]	a_e [mm]	S (n)	f [mm/ot]
M15	40	0,2	3	0,5	1273	0,8

Tabulka 15 – Měření M15

Výstup z programu DynoWare

Celkový náhled



Obrázek 27 – M15 celkový náhled

Vybraný úsek

- jedná se o vybraný úsek, který nejlépe odpovídá průměrným hodnotám

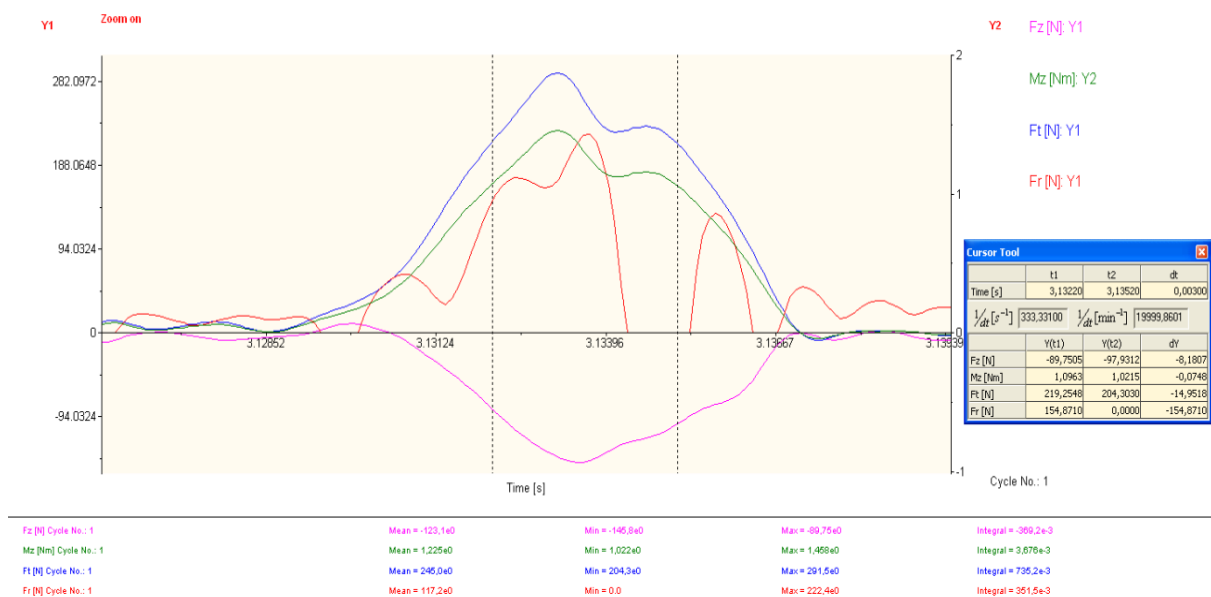
- na obrázku je možné vidět pět otáček frézy viz. (Obrázek 28)



Obrázek 28 – Vybraný úsek

Detailní záběr jednoho zubu

- zde je vidět detailní záběr prvního zubu z (Obrázek 28)



Obrázek 29 – Detailní záběr jednoho zubu

Tabulka naměřených hodnot

čas 3,12-3,36 [s]	měření	ZUB	ot č. 1	ot č. 2	ot č. 3	ot č. 4	ot č. 5	Průměr
Fz [N]	M15	zub1	-123	-115	-120	-123	-122	-120,6
		zub2	-61					
		zub3	-87					
		zub4	-93					
Mz [Nm]		zub1	1,23	1,15	1,24	1,11	1,19	1,184
		zub2	0,65					
		zub3	0,79					
		zub4	1,05					
Ft [N]		zub1	245	229	248	222	238	236,4
		zub2	130					
		zub3	158					
		zub4	211					
Fr [N]		zub1	117	133	103	104	107	112,8
		zub2	130					
		zub3	106					
		zub4	76					

Tabulka 16 – Naměřené hodnoty M15

M15 – Zhodnocení

Měření probíhalo pro nastavení řezné rychlosti $v_c = 40$ [m/min], posuv na zub $f_z = 0,2$ [mm/z], radiální hloubka řezu $a_e = 0,5$ [mm], axiální hloubka řezu $a_p = 3$ [mm], otáčky S-1273(n) a posuv na otáčku $f = 0,8$ [mm/ot].

Ani zde není rozložení sil na zub rovnoměrné, avšak pouze jeden zub se liší více než ostatní.

Maximální průměrné zatížení na jeden zub, se kterým je tedy nutné počítat při výpočtu zatížení stroje viz. (Tabulka 17)

Fz[N]	-120,6
Mz[Nm]	1,184
Ft[N]	236,4
Fr[N]	112,8

Tabulka 17 – Maximální průměrné hodnoty M15

3.5.6 Měření M16

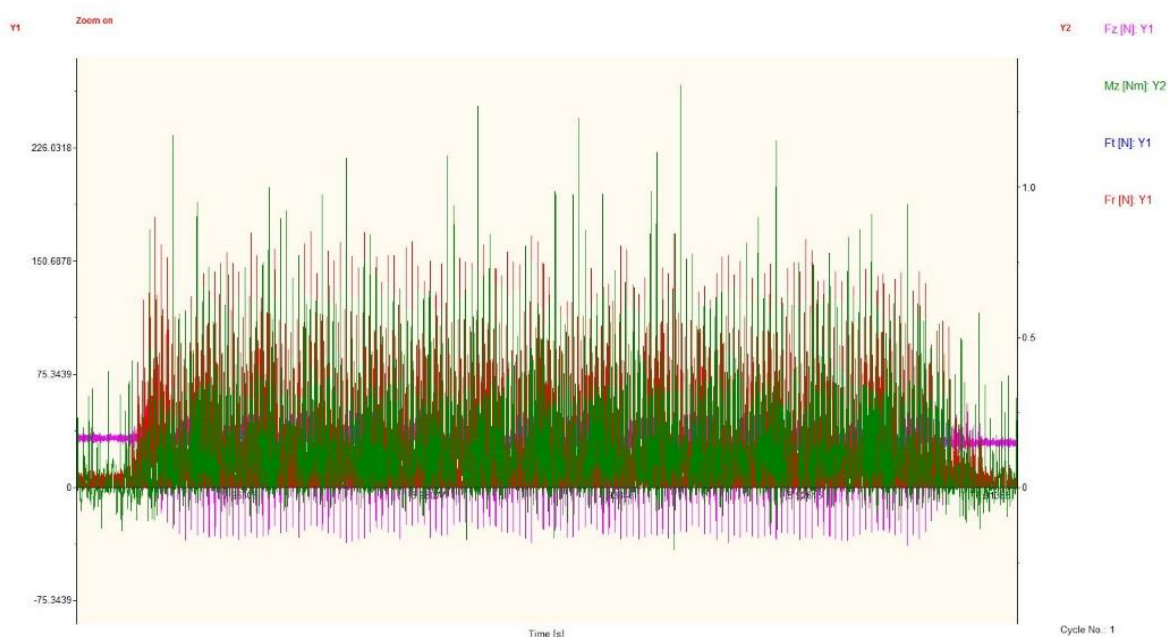
Měření	v_c [m/min]	f_z [mm/z]	a_p [mm]	a_e [mm]	S (n)	f [mm/ot]
M16	60	0,05	3	0,5	1910	0,2

Tabulka 18 – Měření M16

Výstup z programu DynoWare

Celkový náhled

- jedná se o celý záznam



Obrázek 30 – M16 celkový náhled

Vybraný úsek

- jedná se o vybraný úsek, který nejlépe odpovídá průměrným hodnotám

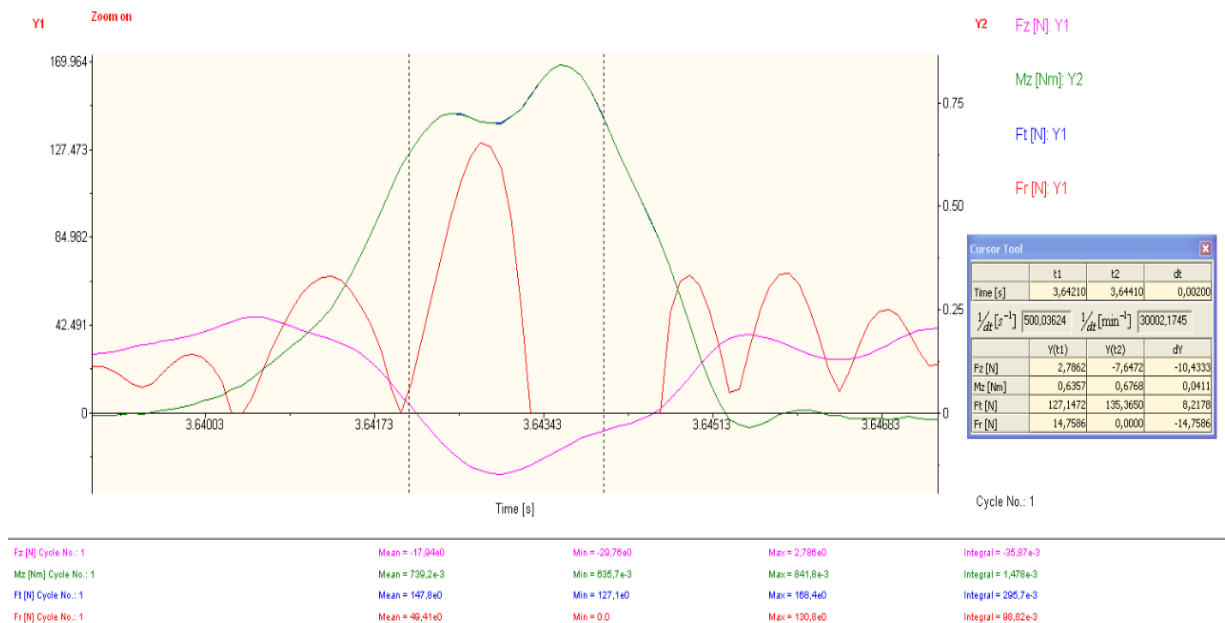
- na obrázku je možné vidět pět otáček frézy viz. (Obrázek 31)



Obrázek 31 – M16 vybraný úsek

Detailní záběr jednoho zubu

- zde je vidět detailní záběr prvního zubu z (Obrázek 31)



Obrázek 32 – Detailní záběr jednoho zubu

Tabulka naměřených hodnot

čas 3,64-3,8 [s]	měření	ZUB	ot č. 1	ot č. 2	ot č. 3	ot č. 4	ot č. 5	Průměr
Fz [N]	M16	zub1	-8	-4	-16	-12	-9	-11,8
		zub2	+20					
		zub3	+25					
		zub4	+9					
Mz [Nm]		zub1	0,61	0,63	0,53	0,53	0,5	
		zub2	0,26					
		zub3	0,12					
		zub4	0,31					
Ft [N]		zub1	110	125	107	105	100	
		zub2	52					
		zub3	23					
		zub4	62					
Fr [N]		zub1	47	57	67	81	92	
		zub2	19					
		zub3	41					
		zub4	65					

Tabulka 19 – Naměřené hodnoty M16

M16 – Zhodnocení

Měření probíhalo pro nastavení řezné rychlosti $v_c = 60$ [m/min], posuv na zub $f_z = 0,05$ [mm/z], radiální hloubka řezu $a_e = 0,5$ [mm], axiální hloubka řezu $a_p = 3$ [mm], otáčky S-1910(n) a posuv na otáčku $f = 0,2$ [mm/ot].

Z naměřených dat je patrné, že samotný chod neprobíhal hladce, jsou zde vidět velké změny, převážně v radiální síle, stejně tak v síle v ose z. Radiální síla dosahuje nárazově

vysokých hodnot, což naznačuje nerovnoměrný chod, a tedy velké vibrace stroje. I obráběný povrch v takovémto nastavení nelze očekávat na dobré úrovni. Zajímavostí je, že radiální síla ve špičkách dokonce převyšuje hlavní sílu F_t . Stejně tak síla v ose Z, které by měla být převážně v záporných hodnotách zde vyskakuje do kladných hodnot, což koresponduje s tvrzením, že chod stroje není klidný. I rozložení sil na jednotlivé zuby je velice nevhodné, kdy se hodnoty jednotlivých zubů liší až o více než pětinasobek.

Maximální průměrné zatížení, se kterým je tedy nutné počítat při výpočtu zatížení stroje viz. (Tabulka 20)

F_z [N]	-11,8
M_z [Nm]	0,586
F_t [N]	117
F_r [N]	69,2

Tabulka 20 – Maximální průměrné hodnoty M16

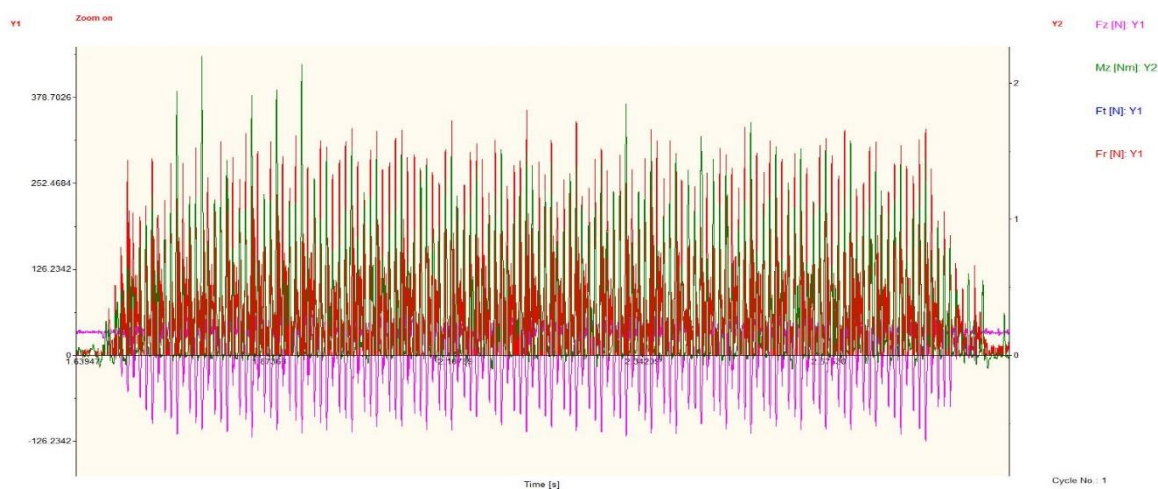
3.5.7 Měření M18

Měření	v_c [m/min]	f_z [mm/z]	a_p [mm]	a_e [mm]	$S(n)$	f [mm/ot]
M18	60	0,2	3	0,5	1910	0,8

Tabulka 21- Měření M18

Výstup z programu DynoWare

Celkový náhled

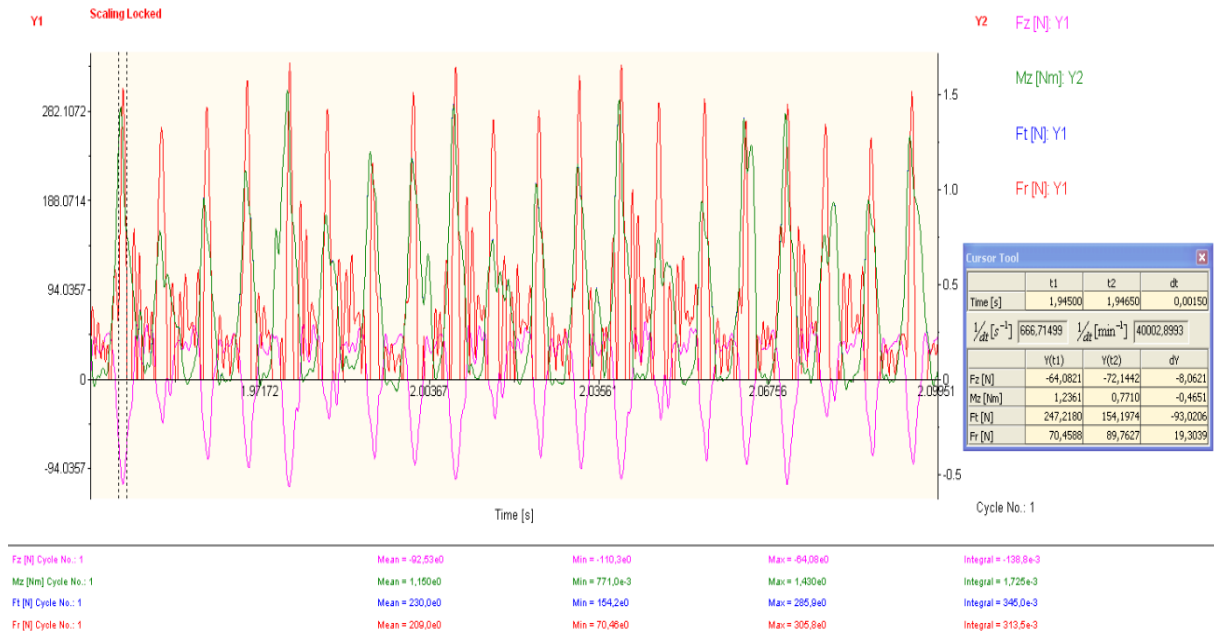


Obrázek 33 – M18 celkový náhled

Vybraný úsek

- jedná se o vybraný úsek, který nejlépe odpovídá průměrným hodnotám

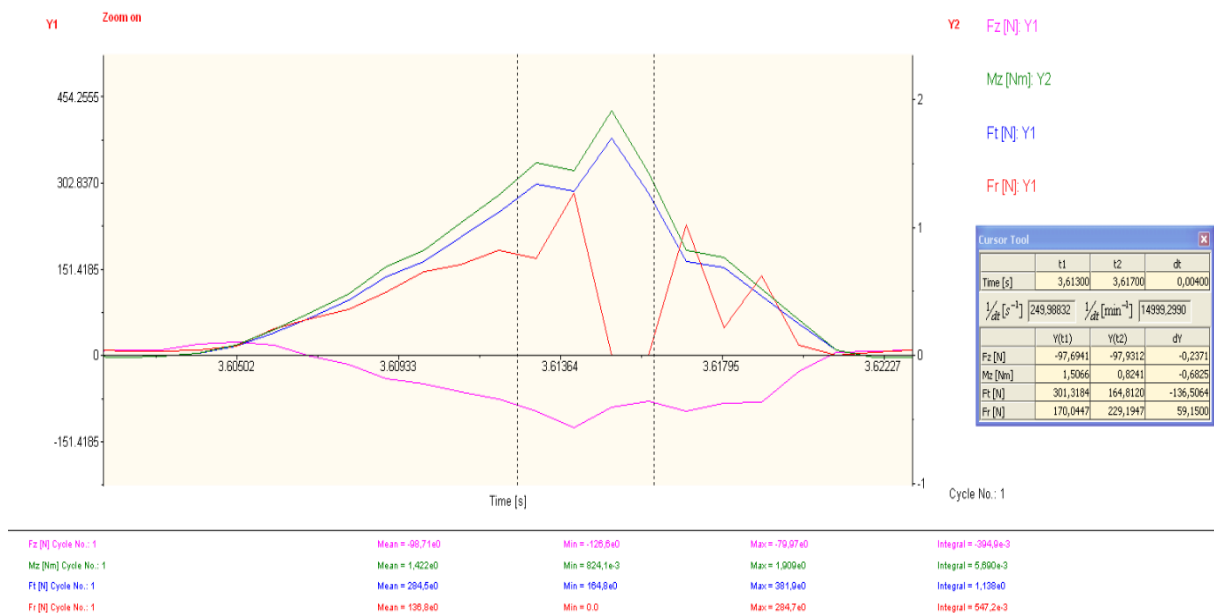
- na obrázku je možné vidět pět otáček frézy viz. (Obrázek 34)



Obrázek 34 – M18 vybraný úsek

Detailní záběr jednoho zubu

- zde je vidět detailní záběr prvního zubu z (Obrázek 34)



Obrázek 35 – M18 detailní záběr jednoho zubu

Tabulka naměřených hodnot

čas 1,94-2,01 [s]	měření	ZUB	ot č. 1	ot č. 2	ot č. 3	ot č. 4	ot č. 5	Průměr
Fz [N]	M18	zub1	-93	-97	-98	-91	-91	-94
		zub2	-29					
		zub3	-66					
		zub4	-73					
Mz [Nm]		zub1	1,15	1,23	1,7	1,15	1,11	
		zub2	0,63					
		zub3	0,81					
		zub4	0,96					
Ft [N]		zub1	230	246	234	231	222	
		zub2	125					
		zub3	161					
		zub4	193					
Fr [N]		zub1	210	197	212	205	208	
		zub2	204					
		zub3	187					
		zub4	212					

Tabulka 22 – Naměřené hodnoty M18

M18 – Zhodnocení

Měření probíhalo pro nastavení řezné rychlosti $v_c - 60$ [m/min], posuv na zub $f_z - 0,2$ [mm/z], radiální hloubka řezu $a_e - 0,5$ [mm], axiální hloubka řezu $a_p - 3$, otáčky S-1910(n) a posuv na otáčku $f - 0,8$ [mm/ot].

Podobnost s M16 je více než patrná, lze tedy předpokládat, že takovéto nastavení není pro obrábění vhodné, případně že jsou již parametry obrábění příliš náročné i pro samotný stroj, například pro tuhost. Rovnoměrnost na jednotlivé zuby je zde značně rozloženější, rozdíly dosahují zhruba 50 % pro hodnoty sil F_t a M_z .

Maximální průměrné zatížení, se kterým je tedy nutné počítat při výpočtu zatížení stroje viz. (Tabulka 23)

F_z [N]	-94
M_z [Nm]	1,268
F_t [N]	232,6
F_r [N]	206,4

Tabulka 23 – Maximální průměrné hodnoty M18

3.6 Vyhodnocení měření

Naměřené hodnoty byly vyneseny do grafických závislostí a proloženy mocninnými funkcemi. Vyhodnocení proběhlo konkrétně pro závislost tečné síly na řezné rychlosti, závislost tečné síly na posuvu, závislost radiální síly na řezné rychlosti a závislost tečné síly na kroutícím momentu. Samotné vyhodnocení je zatíženo chybou malého počtu měření. Pro názornou ukázkou funkce a způsobu měření je ovšem dostačující.

3.6.1 Závislost tečné síly na řezné rychlosti

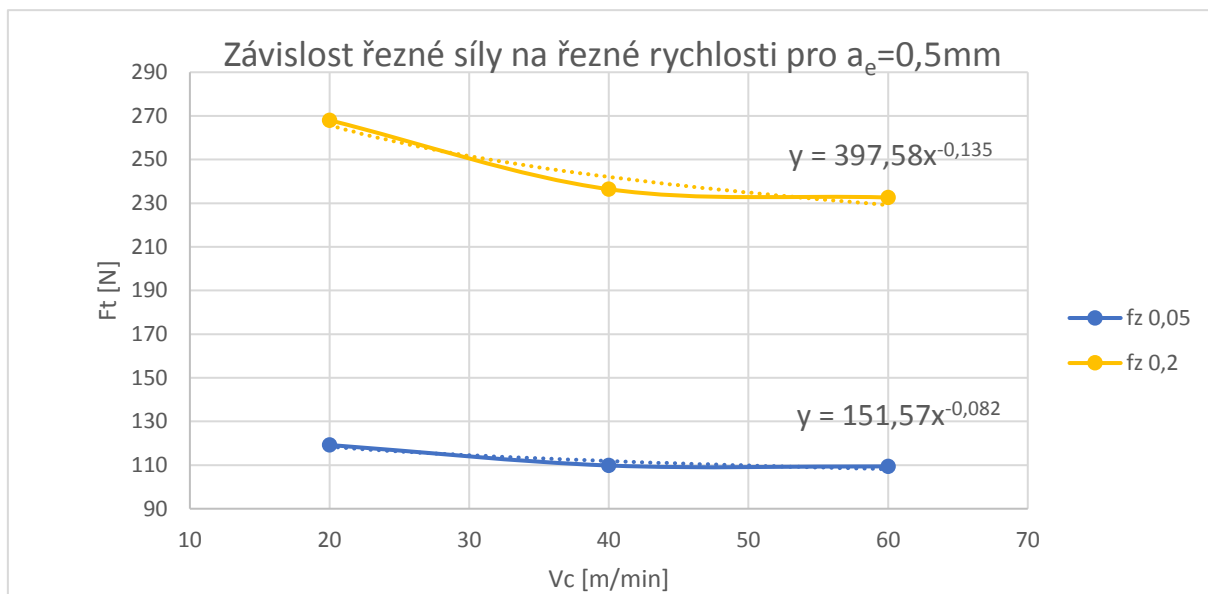


Figure 1 – Graf závislosti tečné síly na řezné rychlosti

Z grafické závislosti (Figure 1) lze pozorovat, že se zvyšující se řeznou rychlostí klesá řezná síla. V grafu může vidět dvě křivky, jedna je pro posuv na zub 0,05 a 0,2 mm/z. Obě křivky mají přibližně stejný průběh.

3.6.2 Závislost tečné síly na posuvu

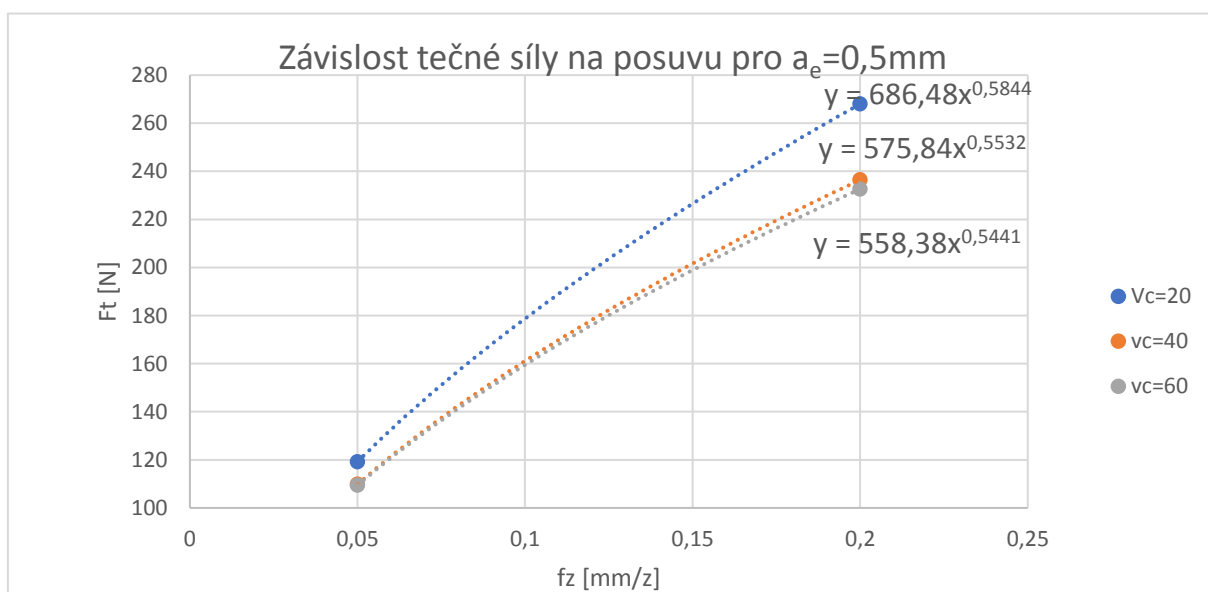


Figure 2 – Závislost tečné síly na posuvu

Zde, (Figure 2) můžeme vidět závislost tečné síly F_t na posuvu. Z grafu je zřejmé, že se zvyšujícím posuvem se zvyšuje řezný odpor, a tedy i sledovaná hodnota F_t . V grafu se nachází tři křivky pro různé řezné rychlosti, které mají přibližně stejný průběh

3.6.3 Závislost radiální síly na řezné rychlosti

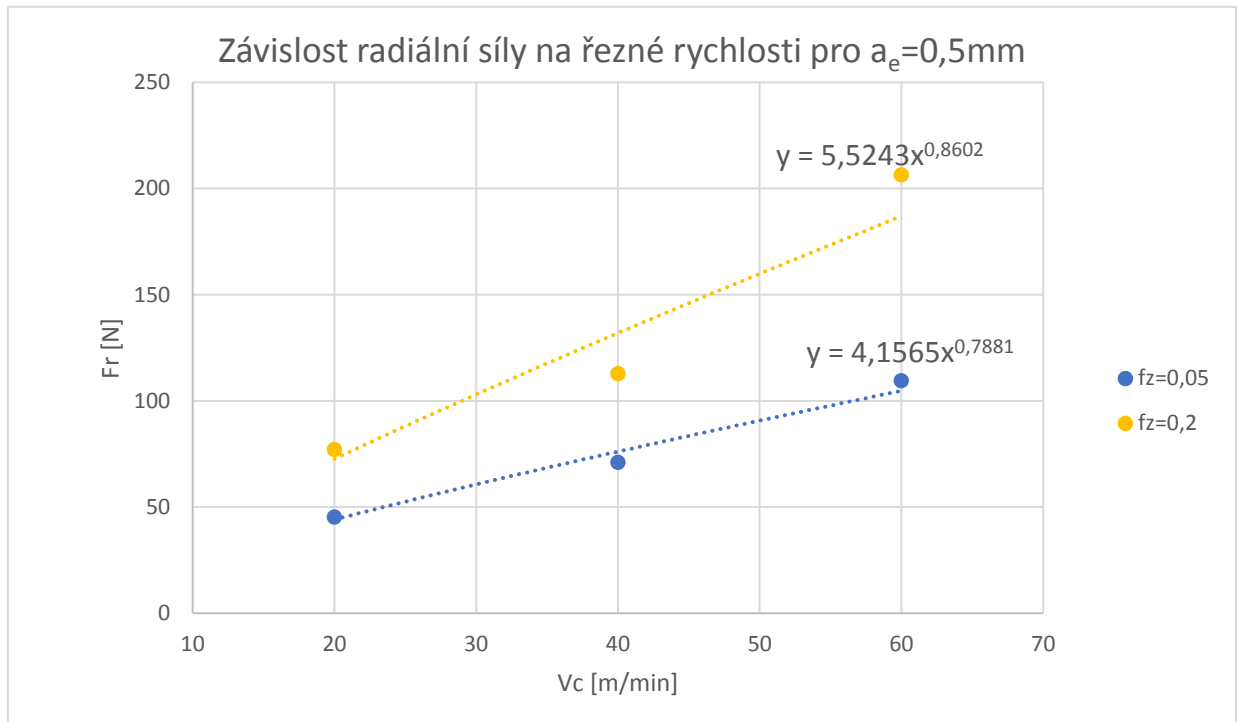


Figure 3 – Závislost radiální síly na řezné rychlosti

Závislost radiální síly na řezné rychlosti značí, že se zvyšující rychlostí se radiální síla zvyšuje. Graf (Figure 3) zobrazuje křivku závislosti jak pro rychlost posuvu 0,05mm/zub a pro posuv 0,2mm/zub.

3.6.4 Závislost radiální síly na posuvu

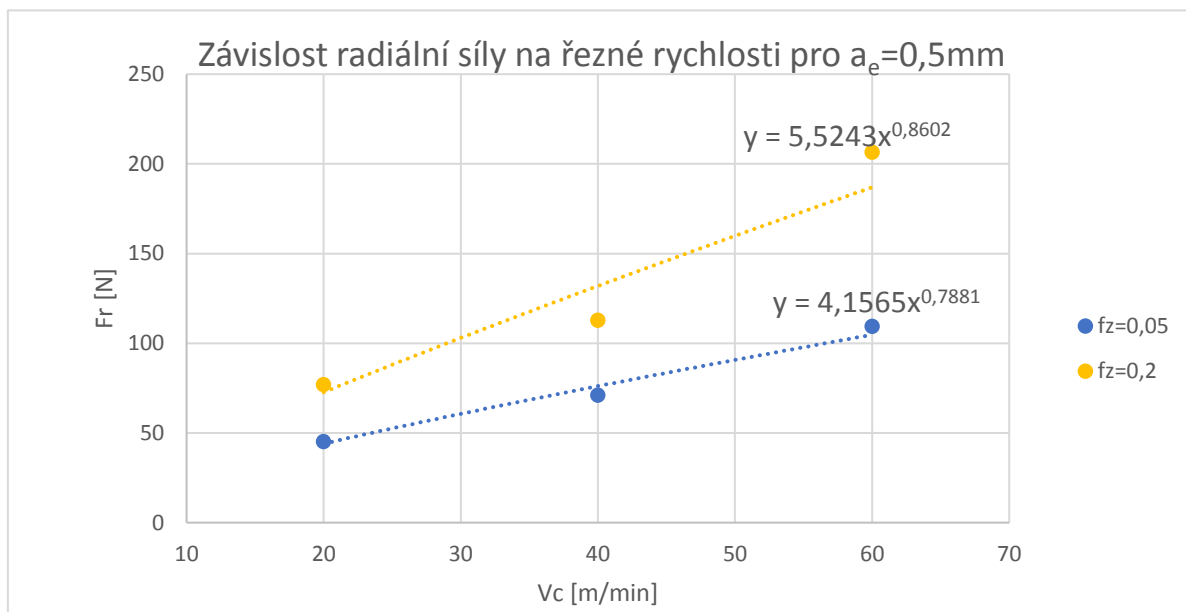


Figure 4 – Závislost radiální síly na posuvu

Z grafu (Figure 4) vyplývá, že s rostoucí řeznou silou stoupá i radiální síla.

3.6.5 Závislost tečné síly na krutícím momentu

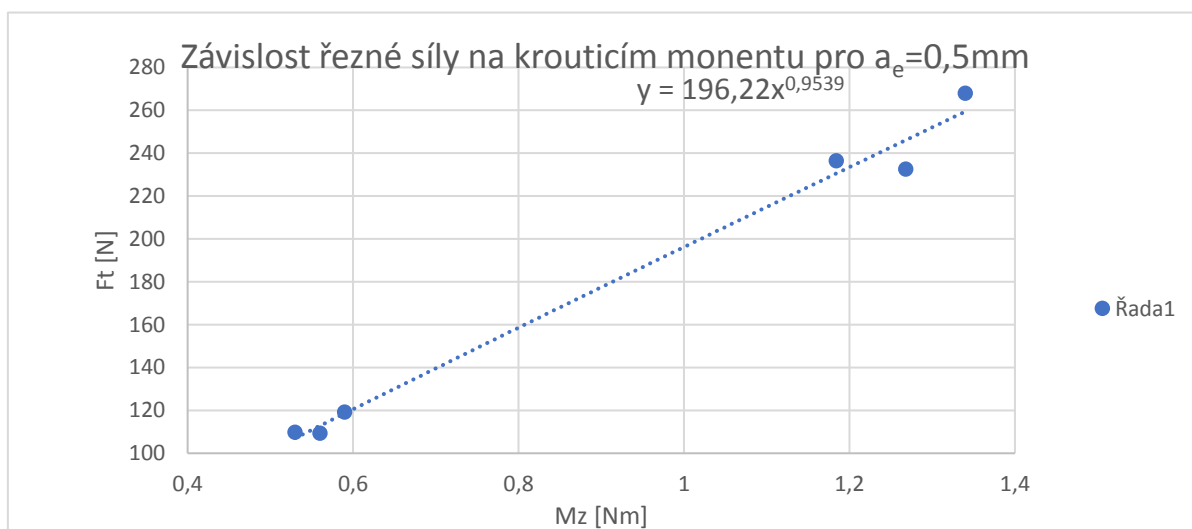


Figure 5 – Závislost tečné síly na krutícím momentu

Vliv tečné síly na krutící moment je zřejmý z grafu (Figure 5). Se zvyšující se tečnou silou se úměrně zvyšuje krutící moment M_z .

3.7 Využití získaných dat pro adaptivní systémy řízení

Pokud máme takto komplexní záznam o průběhu samotného obrábění, je možné využít získaná data pro adaptivní řízení různým způsobem.

3.7.1 Mezní systémy ACC

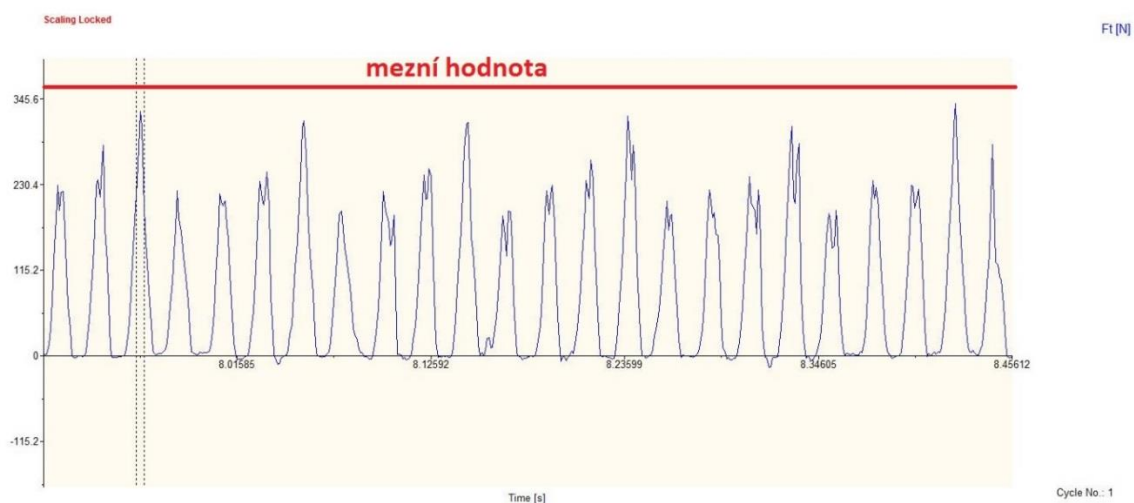
Nejjednodušeji realizovatelný způsob adaptivního řízení je nastavení limitních hodnot. Pokud známe detailní informace o průběhu samotného obrábění, můžeme nastavit maximální hodnoty jednotlivých sil, při kterých bude systém reagovat.

Způsobů reakce může být více. Je možné nastavit, aby nás systém pouze informoval o neočekávané situaci, ale proces obrábění běží dále, nebo se proces při překročení zadaných limitních hodnot vypne.

Limitní funkci je možné nastavit jako pevnou hodnotu, kterou zjistíme z předchozího měření. Případně je možnost využít závislostí a limitních křivek, které byly vypočteny z naměřených dat, podle kterých se bude proces řídit v různých nastavení.

Příklad

Pokud si vezmeme za příklad měření M12, z naměřených hodnot víme, jaké je běžné zatížení například pro sílu F_t a nastavíme mezní hodnotu. Pokud bude tato hodnota překročena systém provede akci, kterou mu určíme viz. (Obrázek 36). Stejným způsobem lze nastavit pro libovolnou sílu.



Obrázek 36 – Příklad mezní hodnoty

3.7.2 Optimalizační systémy ACO/ACG

Tento typ má podobný základ jako systém ACC s tím rozdílem, že se snažíme mít alespoň jednu sledovanou hodnotu na mezní hodnotě a podle toho optimalizujeme nejčastěji řeznou rychlost s návazností na posuv. Snahou je dosáhnout co nejvyššího využití jak stroje, tak i nástroje, ať už nás zajímá maximální úběr nebo maximální životnost.

Pokud tedy víme, že náš obráběcí stroj je schopný obrábět v námi chtěném režimu a systému kvality, do určitých hodnot bude systém zvyšovat řeznou rychlost a posuv, dokud se jedna s měřených hodnot nedostane na mezní hodnotu. Naopak pokud budeme za mezními hodnotami, bude systém ubírat, dokud nezůstane pouze jedna veličina v okolí mezní hodnoty. Nastavení řezné rychlosti, případně rychlosti posuvu bude probíhat podle námi naměřených dat, tedy podle mocninné funkce vypočtené pro danou závislost. Díky tomu může použít naměřená data pro různé hodnoty procesu.

3.7.3 Identifikace opotřebení nástroje

Opotřebení nástroje se vyznačuje zvyšováním sil při obrábění až do okamžiku destrukce nástroje. Jak již bylo řečeno v kapitole Kontinuální měření otupení na stroji 2.2.3 existuje závislost opotřebení na velikosti řezných sil. Dále těsně před destrukcí nástroje se hodnoty sil rychle zvyšují a je tedy třeba takovéto změny zmapovat. Díky tomu je možnost včas stroj odpojit. Pokud máme tedy komplexní data a křivky závislostí, lze nastavit maximální hodnoty, při kterých se nám proces ukončí.

3.7.4 Destrukce nástroje

Destrukce nástroje souvisí s výše uvedenými poznatky na mezní hodnoty a identifikaci opotřebení nástroje. Samozřejmě samotná destrukce nástroje je pro obráběcí proces nežádoucí. Může nám poškodit jak obrobek, tak samotný stroj. Ovšem pokud již k destrukci dojde, je třeba stroj co nejrychleji odpojit. Pokud máme tedy nějaké očekávané hodnoty, které v daný okamžik nepřichází, je možné nechat stroj odpojit, to je ovšem v případě, kdy po destrukci nástroje běží stroj naprázdno. V opačném případě by měli být hodnoty překročeny a stroj by se měl odpojit v každém případě. Kdyby se tak nestalo, hrozí nevratné poškození celého stroje.

3.8 Zhodnocení

Adaptivní systémy jsou převážně určeny pro zvýšení kvality a efektivity obráběcího procesu, případně pro sledování průběhu obrábění a chování daného materiálu. Pomocí monitorovacích systémů obrábění je možné vytvořit závislostní křivky pro konkrétní materiál, podle kterých je možné řízení řezného procesu.

Jednotlivé závislosti jsou vstupní informací pro adaptivní systémy. Podle nich systém řídí jednotlivé řídicí členy, ať už způsobem limitním či optimalizačním, tak aby odpovídal požadovaným kritériím.

Atraktivita adaptivních systémů roste s rostoucími náklady na chod stroje. Snahou je co nejvyšší efektivita a plné vytížení. Stejně tak, pokud je třeba udržení stabilní kvality obrábění a opakovatelnost.

Nevýhodou pro plošné rozšíření může být vysoká počáteční investice a vysoké nároky na instalaci. S tím souvisí potřeba precizní kalkulace nákladů a návratnosti investice.

Naměřená data pomocí rotačního dynamometru Kistler jsou velice komplexní informací o průběhu obráběcího procesu. Z těchto dat je možné vyčíst velké množství informací, které nejsou jinou cestou přesně zjistitelné.

Závěr

Diplomová práce je v úvodu zaměřena na vysvětlení základních principů adaptivních systémů řízení řezného procesu a přibližuje jejich funkci a význam, který nám přináší. Dále popisuje základní rozdělení těchto systémů a jednotlivé druhy. Jsou zde vysvětleny požadavky na stroj a měřicí techniku tak, aby splňovaly funkci potřebnou pro adaptivní systémy.

V další části jsou uvedeny způsoby monitorování řezného procesu, které byly rozděleny na tři části. První se zabývá monitorováním tepelných jevů, druhá monitorováním hodnot otupení a třetí část je zaměřena na monitorování řezných sil a momentů.

Experimentální část se zabývá monitorováním řezných sil a momentů. Konkrétně měřením pomocí rotačního dynamometru Kistler, který spolupracuje s programem DynoWare. Měření spočívalo v obrábění titanové slitiny, pro různé hodnoty řezné rychlosti, rychlosti posuvu a otáček. Sledovanými veličinami byl kroučící moment, síly v ose z, radiální síla a tečná síla. Pomocí programu DynoWare proběhlo vyhodnocení jednotlivých zaznamenaných sil.

Následovalo zhodnocení naměřených hodnot s možnostmi využití dat pro adaptivní řízení řezného procesu. Byly vytvořeny závislosti řezné rychlosti na posuvu, tečné síly na řezné rychlosti, radiální síly na řezné rychlosti a závislost tečné síly na kroučícím momentu. Podle vytvořených závislostí může adaptivní systém nastavovat řídicí členy, ať už se jedná o mezní či optimalizační způsob.

Z práce vyplývá, že adaptivní systémy přinášejí řadu užitečných vlastností, které nejsou jinými metodami dosažitelné. Do budoucna se dá očekávat zvýšený zájem, vzhledem k vyšším pořizovacím cenám speciálních obráběcích strojů, které jsou stále žádanější, kde je efektivita a maximální využití prioritou.

Bibliografie

- [1] MÁDL, J. *Experimentální metody v teorii obrábění*. Praha: CVUT, 1988.
- [2] SCHMID, D. *Řízení a regulace pro strojírenství a mechatroniku*. 2005. Praha: Europa-Sobotáles, 2005. ISBN 80-86706-10-9.
- [3] MARTINEK, R. *Senzory v průmyslové praxi*. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-730-0114-4.
- [4] HÄBERLE, Heinz O. *Průmyslová elektronika a informační technologie*. Praha: Europa-Sobotáles, 2003. ISBN 80-867-0604-4.
- [5] MÁDL, J. *Optimalizace řezných podmínek v teorii obrábění*. 3., přeprac. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1988.
- [6] ŘÍČKA, J. a V. BULLA. *Technologie obrábění*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979. ISBN ISBN 80-214-196-2.
- [7] KOČMAN, K. a J. PROKOP. *Technologie obrábění*. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-214-1996-2.
- [8] NESLUŠAN, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2007. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [9] CZÁN, A. a S. NOVÁK. *Monitoring of temperatures in milling stainless steel*. Krakow: OM, 2000.
- [10] PŘIKRYL, Z. a R. MUSÍLKOVÁ. *Teorie obrábění*. 1.vyd. Praha: ČVUT, 1970.

- [11] AUTOMA: *Termokamery a pyrometry*. [online]. Ústí nad Labem: automa.cz., 2017 [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: <http://automa.cztermokamery-a-pyrometry-52891.html>.
- [12] VOLLMER, M. a K-P. MÖLLMANN. *Infrared thermal imaging: fundamentals, research and applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2010. ISBN 978-3-527-40717-0.
- [13] *Thermis* [online]. Brno: THERMIS spol. s r.o., 2017 [cit. 2018-01-15]. Dostupné z: <http://www.thermis.cz/produkt/24-teplomer-rucni-bezkontaktni-pyrometr/>
- [14] *Termokamery Flir* [online]. Praha: Workswell s.r.o., b.r. [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: <https://www.termokamery-flir.cz/termokamera-flir-e4-flir-e5-flir-e6-flir-e8-prumysl/>
- [15] MINKINA, W. a S. DUDZIK. *Infrared thermography: errors and uncertainties*. Hoboken, NJ: J. Wiley, 2009. ISBN 978-0-470-74718-6.
- [16] JURKO, J. *Opotrebenie rezných nástrojov*. Prešov, 2005. ISBN 80-8073-255-8.
- [17] POPPEOVÁ, V. *Monitorovanie opotrebenia rezných nástrojov*. Žilina: EDIS, 2001. ISBN 80-7100-700-5.
- [18] KREIDL, M. a R. ŠMÍD. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. 2006. Praha: BEN - technická literatura, 2006. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0158-6.
- [19] Lee, KJ., Lee, TM. & Yang, MY. *Int J Adv Manuf Technol* 32: 8. [online]. In: . Springer-Verlag, b.r. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0350-0>. ISSN 1433-3015.

- [20] NAVRÁTIL, M. a O. PLUHARĚ. *Měření a analýza mechanického kmitání: metody a přístroje*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986.
- [21] NAVRÁTIL, M. *Měření mechanického kmitání: úvod do teorie snímačů*. Praha: SNTL, 1981.
- [22] *Technická specifikace dynamometru firmy Kistler*. [online]. Kistler instrument AG, 2004 [cit. 2018-06-18]. Dostupné z: <http://www.kistler.com/ca/en/product/torque/9123C1011>

Seznam obrázků

Obrázek 1 - <i>Základní blokové schéma systému automatického řízení</i>	12
Obrázek 2 - Rozdělení řídicích systémů pro adaptivní optimalizaci	13
Obrázek 3 - Schéma zapojení termočlásku	16
Obrázek 4 - Schéma zapojení umělého termočlásku	17
Obrázek 5 - Schéma zapojení poloumělého termočlásku.....	18
Obrázek 6 - <i>Schéma zapojení přirozeného termočlásku</i>	19
Obrázek 7 - <i>Schéma zapojení termodua</i>	20
Obrázek 8 - Pyrometr.....	22
Obrázek 9 - Termokamera Flir EX	22
Obrázek 10 – Schéma zapojení měřicího zařízení	29
Obrázek 11- Upnutý dynamometr v konzolové frézce FV 25 CNC	30
Obrázek 12 - Rotační dynamometr Kistler.....	31
Obrázek 13 - Průběh frézování titanového bloku.....	33
Obrázek 14 – Průběhy sil a momentů.....	33
Obrázek 15 – M10 celkový náhled.....	34
Obrázek 16 – M10 vybraný úsek	35
Obrázek 17 - M10 detailní záběr jednoho zubu	35
Obrázek 18 – M12 celkový záznam	37
Obrázek 19 – M12 vybraný úsek	38
Obrázek 20 – M12 detailní záběr jednoho zubu.....	38
Obrázek 21 – M21 celkový náhled.....	40
Obrázek 22 – M21 vybraný úsek	41
Obrázek 23 – M21 detailní záběr jednoho zubu.....	41
Obrázek 24 – M13 celkový náhled.....	43

Obrázek 25 – M13 vybraný úsek	44
Obrázek 26 – M13 detailní záběr jednoho zubu.....	44
Obrázek 27 – M15 celkový náhled.....	46
Obrázek 28 – Vybraný úsek	47
Obrázek 29 – Detailní záběr jednoho zubu.....	47
Obrázek 30 – M16 celkový náhled.....	49
Obrázek 31 – M16 vybraný úsek	50
Obrázek 32 – Detailní záběr jednoho zubu.....	50
Obrázek 33 – M18 celkový náhled.....	52
Obrázek 34 – M18 vybraný úsek	53
Obrázek 35 – M18 detailní záběr jednoho zubu.....	53
Obrázek 36 – Příklad mezní hodnoty.....	59

Seznam grafů

Figure 1 – Graf závislosti tečné síly na řezné rychlosti	56
Figure 2 – Závislost tečné síly na posuvu.....	56
Figure 3 – Závislost radiální síly na řezné rychlosti.....	57
Figure 4 – Závislost radiální síly na posuvu.....	58
Figure 5 – Závislost tečné síly na krouticím momentu	58

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Parametry rotačního dynamometru	31
Tabulka 2 – vstupní hodnoty	32
Tabulka 3 – Měření M10.....	34
Tabulka 4 – Tabulka naměřených hodnot M10.....	36
Tabulka 5 – Maximální průměrné zatížení M10	37
Tabulka 6 – Měření M12.....	37
Tabulka 7 – Tabulka naměřených hodnot M12.....	39
Tabulka 8 – Maximální průměrné zatížení M12	40
Tabulka 9 – Měření M21.....	40
Tabulka 10 – Naměřené hodnoty M21.....	42
Tabulka 11 – Maximální průměrné zatížení M21	43
Tabulka 12 – Měření M13.....	43
Tabulka 13 – Naměřené hodnoty M13.....	45
Tabulka 14 – Maximální průměrné hodnoty M13.....	46
Tabulka 15 – Měření M15.....	46
Tabulka 16 – Naměřené hodnoty M15.....	48
Tabulka 17 – Maximální průměrné hodnoty M15.....	49
Tabulka 18 – Měření M16.....	49
Tabulka 19 – Naměřené hodnoty M16.....	51
Tabulka 20 – Maximální průměrné hodnoty M16.....	52
Tabulka 21- Měření M18	52
Tabulka 22 – Naměřené hodnoty M18.....	54
Tabulka 23 – Maximální průměrné hodnoty M18.....	55