

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: **N0715A270011 - Obrábění, aditivní
technologie a zabezpečování kvality**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Hardwarová optimalizace NC programu na systému Heidenhain
iTNC530**

Autor: **Bc. Jakub Sedlák**
Vedoucí práce: **Ing. Aneta Jirásko Ph.D.**

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub SEDLÁK**
Osobní číslo: **S20N0018P**
Studijní program: **N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality**
Téma práce: **Hardwarová optimalizace NC programu na systému Heidenhain ITNC530**
Zadávající katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Analýza současného stavu
3. Experimentální měření
4. Vyhodnocení
5. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- Manuál řídicího systému Heidenhain
- VEVERKOVÁ, Michala. Measurement of vibrations in CNC machine. In: *Elektrotechnika a informatika 2008. Část 1., Elektrotechnika: 9. ročník konference doktorských prací, Zámek Nečtiny, 6. – 7. listopadu 2008*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008. s. 133-136. ISBN 978-80-7043-702-5.
- SMID, Peter. *CNC controlsetupformilling and turning: mastering CNC controlsystems*. New York: IndustrialPress, ©2010. xxii, 286 s. ISBN 978-0-8311-3350-4.
- ALTINTAS, Yusuf. *Manufacturingautomation: metal cuttingmechanics, machinetoolvibrations, and CNC design*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. xii, 366 s. ISBN 978-0-521-17247-9.
- MAREK, Jiří a kol. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha: MM publishing, s.r.o., 2014. 684 stran. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.
- ŠTULPA, Miloslav. *CNC: programování obráběcích strojů*. První vydání. Praha: GradaPublishing, 2015. 240 stran. ISBN 978-80-247-5269-3.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Aneta Jirásko, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Konzultant diplomové práce: **Ing. Jan Hnátík, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2022**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucí práce paní Ing. Anetě Jirásko Ph.D. a konzultantovi panu Ing. Janu Hnátíkovi Ph.D. za jejich rady, připomínky a odborné vedení, které přispěli ke zpracování této diplomové práce.

Bc. Jakub Sedlák

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Sedlák	Jméno Jakub		
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270011 - Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality			
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Jirásko Ph.D.	Jméno Aneta		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Hardwarová optimalizace NC programu na systému Heidenhain iTNC530			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	104	TEXTOVÁ ČÁST	68	GRAFICKÁ ČÁST	20
---------------	-----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce se zaměřuje na funkci AFC na systému Heidenhain iTNC530, její fungování a její přínosy. Přínosem této diplomové práce je pochopení této funkce a vyzkoušení různých nastavení.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	AFC, dynamometr, Heidenhain, iTNC530, optimalizace

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Bc. Sedlák	Name Jakub	
STUDY PROGRAMME	N0715A270011 - Machining, additive technology and quality assurance		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Jirásko Ph.D.	Name Aneta	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Hardware optimization of the NC program on the system Heidenhain iTNC530		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2022
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	104	TEXT PART	68	GRAPHICAL PART	20
----------------	-----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The content of the thesis is the function AFC of the system Heidenhain iTNC530, the functionality and its advantages. The benefit of this thesis is the comprehension of the functionality of the AFC function and trying different settings of the AFC function.
KEY WORDS	AFC, dynamometer, Heidenhain, iTNC530, optimization

Obsah

Seznam obrázků	8
Seznam tabulek	10
Úvod a cíl práce.....	12
1. Analýza současného stavu.....	13
2. Princip adaptivního řízení	14
2.1. Programové adaptivní řízení.....	15
2.2. Hardwarové adaptivní řízení	15
2.2.1. Adaptivní řízení limitní	16
2.2.2. Adaptivní řízení optimalizační – I. Generace.....	16
2.2.3. Adaptivní řízení optimalizační – II. Generace	17
2.2.4. Použití adaptivního řízení.....	18
3. Systém Heidenhain iTNC530.....	18
3.1. Obrazovka.....	19
3.2. Zadávací panel	20
3.3. Možnosti systému	21
4. Funkce AFC	22
4.1. Aktivace a používání AFC	23
4.1.1. AFC.TAB	23
4.1.2. Vložení do programu.....	24
4.1.3. Tabulka zkušebního řezu.....	25
4.1.4. Evaluační tabulka	26
5. Experimentální část	27
5.1. První experiment.....	27
5.1.1. Naplánování experimentu	27
5.1.2. Příprava experimentu	28
5.1.3. Upnutí obrobku	31
5.1.4. Provedení experimentu.....	31
5.1.5. Shrnutí prvního experimentu.....	36
5.2. Druhý experiment	37
5.2.1. Obrobkový dynamometr	37
5.2.2. Nábojový zesilovač	38
5.2.3. Digitalizační karta	39
5.2.4. Software	39

5.2.5	Naplánování experimentu	39
5.2.6	Příprava experimentu	41
5.2.7	Provedení experimentu.....	43
5.2.8	První měření	44
5.2.9	Druhé měření.....	49
5.2.10	Třetí měření	55
5.2.11	Čtvrté měření.....	61
5.2.12	Páté měření	67
5.2.13	Měření kapsy	73
5.2.14	Shrnutí experimentu	78
6	Diskuze.....	79
7	Závěr.....	80
8	Literatura	81
9	Seznam příloh.....	83

Seznam obrázků

Obr. 1: DMU 40 eVo [9].....	13
Obr. 2: Blokové schéma regulace [1].....	14
Obr. 3: Adaptivní řízení optimalizační [3].....	17
Obr. 4: Obrazovka a zadávací panel [6].....	19
Obr. 5: Obrazovka [6].....	20
Obr. 6: Zadávací panel [6].....	21
Obr. 7: Přizpůsobení posuvové rychlosti [7].....	22
Obr. 8: Zapnutí funkce AFC [8].....	23
Obr. 9: AFC.TAB [autor].....	24
Obr. 10: Vložení AFC do programu [8].....	25
Obr. 11: Evaluační tabulka [8].....	26
Obr. 12: Model obrobku [autor].....	28
Obr. 13: Schéma programu [autor].....	29
Obr. 14: Upnutí obrobku [autor].....	31
Obr. 15: Použitá tabulka AFC [autor].....	32
Obr. 16: První naučení AFC [autor].....	32
Obr. 17: Posunutí drážky [autor].....	33
Obr. 18: Tabulka naučení pátého testu [autor].....	34
Obr. 19: Evaluační tabulka pátého pokusu [autor].....	34
Obr. 20: AFC.TAB šestého pokusu [autor].....	34
Obr. 21: Tabulka naučení sedmého testu [autor].....	35
Obr. 22: Evaluační tabulka sedmého testu [autor].....	35
Obr. 23: Výsledný graf [autor].....	35
Obr. 24: 3 výškové úrovně [autor].....	36
Obr. 25: Sestava dynamometru [11].....	37
Obr. 26: Obrobkový dynamometr Kistler 9255C [autor].....	38
Obr. 27: Nábojový zesilovač Kistler 5080A [autor].....	38
Obr. 28: Digitalizační karta Kistler 5697A [autor].....	39
Obr. 29: Polotovary s drážkami [autor].....	40
Obr. 30: Polotovary s kapsou [autor].....	41
Obr. 31: Upevnění dynamometru a polotovaru [autor].....	42
Obr. 32: Součásti měřicího řetězce [autor].....	43
Obr. 33: Parametry AFC pro druhý experiment [autor].....	44
Obr. 34: První graf sil prvního měření [autor].....	44

Obr. 35: První graf momentů prvního měření [autor].....	45
Obr. 36: Druhý graf sil prvního měření [autor].....	46
Obr. 37: Druhý graf momentů prvního měření [autor]	47
Obr. 38: Třetí graf sil prvního měření [autor]	48
Obr. 39: Třetí graf momentů prvního měření [autor].....	49
Obr. 40: První graf sil druhého měření [autor].....	50
Obr. 41: První graf momentů druhého měření [autor]	51
Obr. 42: Druhý graf sil druhého měření [autor]	52
Obr. 43: Druhý graf momentů druhého měření [autor].....	53
Obr. 44: Třetí graf sil druhého měření [autor].....	54
Obr. 45: Třetí graf momentů druhého měření [autor]	55
Obr. 46: První graf sil třetího měření [autor]	56
Obr. 47: První graf momentů třetího měření [autor].....	57
Obr. 48: Druhý graf sil třetího měření [autor].....	58
Obr. 49: Druhý graf momentů třetího měření [autor]	59
Obr. 50: Třetí graf sil třetího měření [autor]	60
Obr. 51: Třetí graf momentů třetího měření [autor].....	61
Obr. 52: První graf sil čtvrtého měření [autor].....	62
Obr. 53: První graf momentů čtvrtého měření [autor]	63
Obr. 54: Druhý graf sil čtvrtého měření [autor]	64
Obr. 55: Druhý graf momentů čtvrtého měření [autor].....	65
Obr. 56: Třetí graf sil čtvrtého měření [autor].....	66
Obr. 57: Třetí graf momentů čtvrtého měření [autor]	67
Obr. 58: První graf sil pátého měření [autor]	68
Obr. 59: První graf momentů pátého měření [autor].....	69
Obr. 60: Druhý graf sil pátého měření [autor].....	70
Obr. 61: Druhý graf momentů pátého měření [autor]	71
Obr. 62: Třetí graf sil pátého měření [autor]	72
Obr. 63: Třetí graf momentů pátého měření [autor].....	73
Obr. 64: Graf sil při prvním měření kapsy [autor]	74
Obr. 65: Graf sil při druhém měření kapsy [autor].....	75
Obr. 66: Graf momentů při prvním měření kapsy [autor].....	76
Obr. 67: Graf momentů při druhém měření kapsy [autor]	77
Obr. 68: Evaluační tabulka obrábění kapsy [autor].....	77

Seznam tabulek

Tab. 1: Technické údaje DMU 40 eVo [10].....	13
Tab. 2: Plánované parametry prvního experimentu	27
Tab. 3: Skutečné parametry prvního experimentu	32
Tab. 4: Plánované parametry druhého experimentu.....	40
Tab. 5: Skutečné parametry druhého experimentu.....	43
Tab. 6: Parametry prvního grafu sil prvního měření	45
Tab. 7: Parametry prvního grafu momentů prvního měření.....	45
Tab. 8: Parametry druhého grafu sil prvního měření	46
Tab. 9: Parametry druhého grafu momentů prvního měření	47
Tab. 10: Parametry třetího grafu sil prvního měření	48
Tab. 11: Parametry třetího grafu momentů prvního měření.....	49
Tab. 12: Parametry prvního grafu sil druhého měření	50
Tab. 13: Parametry prvního grafu momentů druhého měření	51
Tab. 14: Parametry druhého grafu sil druhého měření.....	52
Tab. 15: Parametry druhého grafu momentů druhého měření	53
Tab. 16: Parametry třetího grafu sil druhého měření	54
Tab. 17: Parametry třetího grafu momentů druhého měření	55
Tab. 18: Parametry prvního grafu sil třetího měření	56
Tab. 19: Parametry prvního grafu momentů třetího měření.....	57
Tab. 20: Parametry druhého grafu sil třetího měření	58
Tab. 21: Parametry druhého grafu momentů třetího měření	59
Tab. 22: Parametry třetího grafu sil třetího měření	60
Tab. 23: Parametry třetího grafu momentů třetího měření.....	61
Tab. 24: Parametry prvního grafu sil čtvrtého měření	62
Tab. 25: Parametry prvního grafu momentů čtvrtého měření	63
Tab. 26: Parametry druhého grafu sil čtvrtého měření.....	64
Tab. 27: Parametry druhého grafu momentů čtvrtého měření	65
Tab. 28: Parametry třetího grafu sil čtvrtého měření	66
Tab. 29: Parametry třetího grafu momentů čtvrtého měření	67
Tab. 30: Parametry prvního grafu sil pátého měření.....	68
Tab. 31: Parametry prvního grafu momentů pátého měření	69
Tab. 32: Parametry druhého grafu sil pátého měření	70
Tab. 33: Parametry druhého grafu momentů pátého měření.....	71
Tab. 34: Parametry třetího grafu sil pátého měření.....	72

Tab. 35: Parametry třetího grafu momentů pátého měření	73
Tab. 36: Parametry grafu sil prvního měření kapsy	74
Tab. 37: Parametry grafu sil druhého měření kapsy	75
Tab. 38: Parametry třetího grafu momentů pátého měření	76
Tab. 39: Parametry grafu momentů druhého měření kapsy	77

Úvod a cíl práce

Na obráběcí proces jsou kladeny značné požadavky, především co se efektivity obrábění týče. Z tohoto důvodu výrobci obráběcích strojů implementují různé funkce, které mají za úkol zvýšit efektivitu obrábění. Jednou z těchto funkcí v systému Heidenhain iTNC530 je funkce AFC neboli Adaptive Feed Control (adaptivní řízení posuvu), která má za úkol řídit rychlost posuvu během obrábění v reakci na zatížení vřetene, v konkrétním případě této práce, zatížení vřetene při frézování.

Tato diplomová práce se zabývá hardwarovou optimalizací NC programu na systému Heidenhain iTNC530. Hlavním cílem práce je pochopit princip fungování funkce AFC na systému Heidenhain iTNC530. Jako každý algoritmus, také funkce AFC velmi závisí na hodnotách zadaných uživatele při spuštění. Z tohoto důvodu jsou v diplomové práci popsána různá nastavení této funkce.

Optimalizace obrábění bude prováděna na stroji DMU 40 eVo od společnosti DMG Mori. Toto obráběcí centrum používá řídicí systém Heidenhain iTNC530 se zakoupenou funkcí AFC a je v současné době využíváno pouze pro fakultní účely a cílem bude zefektivnění frézování, ačkoliv je tato optimalizace vhodnější pro výrobu dílů ve větších sériích.

Hlavními cíli práce tedy jsou:

- Pochopení principu fungování funkce AFC
- Popsání ovládání funkce AFC
- Vyzkoušení různých nastavení funkce AFC

V první části diplomové práce bude teoretický popis principu adaptivního řízení a popis fungování modulu AFC v systému Heidenhain iTNC530. V principu se bude jednat o návod k funkci AFC.

Druhou částí diplomové práce bude zprovoznění funkce AFC na stroji DMU 40 eVo a provedení navržených kontrolních experimentů přímo na obráběcím stroji. Tyto experimenty budou obsahovat jednoduché obráběcí strategie, na kterých bude možno dobře pozorovat změny způsobené funkcí AFC nebo jejím nastavením. Při těchto experimentech bude také využit obrobkový dynamometr, aby bylo možno porovnávat přímo naměřené hodnoty. Programy pro tyto experimenty budou připravovány z velké části ručně, protože jsou tak přehlednější a bude snazší provádět jejich úpravy během experimentů.

Díky výsledkům experimentů provedených v rámci této diplomové práce, bude možné použít hodnoty nastavení funkce AFC jako výchozí bod při aplikaci funkce AFC na jiný obrobek nebo dokonce i jiný stroj.

1. Analýza současného stavu

Experimenty s funkcí AFC budou prováděny na 5 osém obráběcím centru DMU 40 eVo (Obr. 10) od výrobce DMG MORI s řídicím systémem Heidenhain iTNC530. Toto univerzální frézovací centrum kombinuje flexibilitu 5 osého obrábění s přesností vertikálních obráběcích center. Této přesnosti napomáhají vysoce přesná ložiska, lineární pohon posuvů a tím přesné polohování vřetene a otočného stolu. Stůl frézky umožňuje plynulé naklápění a rotaci a tím je dosaženo kvalitních povrchů při plynulém 5 osém obrábění a díky velkému zásobníku nástrojů umožňuje obrábění složitých součástí s maximální efektivitou (Tab. 1). Toto obráběcí centrum je proto vhodné pro kusovou i sériovou výrobu a díky propracované ergonomii umožňuje pohodlnou a rychlou obsluhu.



Obr. 1: DMU 40 eVo [9]

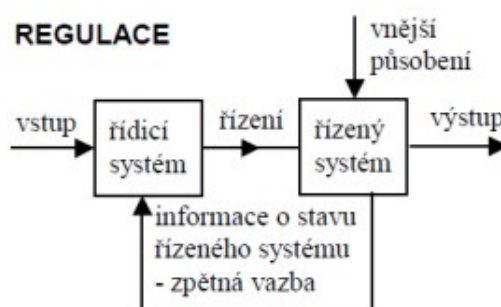
Tab. 1: Technické údaje DMU 40 eVo [10]

Řídicí systém		Heidenhain/Siemens
5 os		Ano
Obrobek	Max. průměr	450 mm
	Max. výška	460 mm
	Max. hmotnost	250 kg
Pracovní prostor	Max. pojezd X	400 mm
	Max pojezd Y	400 mm
	Max pojezd Z	375 mm
	Max. náklon stolu	-5° až +110°
Zásobník nástrojů	Max. kapacita	210

V současné době je obráběcí centrum využíváno pro fakultní účely a speciální funkce řídicího systému nebyly aktivovány. Vzhledem k tomu, že stroj slouží především pro kusovou, nanejvýš malosériovou výrobu prototypů, nebyly přídavné funkce jako například Adaptive Feed Control zapnuty a vyzkoušeny.

2. Princip adaptivního řízení

Základem každého moderního obráběcího stroje je jeho systém řízení. Tento systém zajišťuje zpracování vstupních signálů a programu pro výrobu dílu. Zároveň také vyhodnocuje signály z odměřovacích systémů a z pohonů stroje a přizpůsobuje regulační signály těmto získaným veličinám a upravuje chod stroje na základě těchto veličin (Obr. 2).



Obr. 2: Blokové schéma regulace [1]

Požadavky dnešní doby na produktivitu obrábění však kladou stále větší nároky na systém řízení stroje a je tak nutné tento systém neustále vylepšovat. Tyto inovace jsou umožněny rozvojem senzorů a snímačů. Tyto nové technologie umožňují sběr neustále se zvětšujícího objemu signálů, které je možné transformovat do stále přesnějších informací. Zároveň s rozvojem výpočetní techniky zabudované do obráběcího stroje, je možné zpracovávat velké množství dat v reálném čase.

Díky tomu je nyní možné implementovat optimalizační možnosti procesu obrábění, které zlepšují či zrychlují řezný proces. Hlavním rysem adaptivních systémů řízení je schopnost samo organizace a přizpůsobovat se vnějšímu prostředí v reálném čase. To znamená, že řídicí systém uzpůsobuje řízené veličiny, aby bylo dosaženo požadovaných optimálních podmínek, na základě získaných informací ze senzorů a čidel ve stroji. Mezi optimální podmínky řezného procesu je možno řadit kvalitu povrchu, hospodárnost, opotřebením nástroje, atd.

Hlavním účelem adaptivního řízení je zvýšení hospodárnosti řezného procesu. To znamená snížení rizika vylomení břitu, minimalizace kmitání, optimalizace řezných podmínek a tím dosáhnout minimalizace počtu neshodných kusů a zvýšení produktivity obrábění.

Adaptivní řízení lze rozdělit do několika kategorií, které budou popsány v dalších kapitolách.

Programové adaptivní řízení – možné změny parametrů zavedeny do programu

Hardwarové adaptivní řízení – informace získávány ze stroje a jsou sledovány vybrané parametry

Adaptivní řízení limitní – předem dány limity parametrů

Adaptivní řízení optimalizační I. generace – vyžadováno více informací, možnost nalezení optima ukazatele

Adaptivní řízení optimalizační II. generace – podstatně složitější systém, možnost provádět zkoušky

[3]

Samozřejmě existuje mnohem více variant adaptivního řízení a podle způsobu dělení je možné rozdělit adaptivní řízení na mnoho skupin, ale jako ilustrace vývoje řídicích systémů obráběcích strojů jsou tyto vybrané varianty dostačující. V dalších kapitolách bude popsán princip jejich fungování a zároveň zde také budou uvedeny příklady jejich použití.

2.1. Programové adaptivní řízení

Tento druh adaptivního řízení je založen na předpokládání změny vstupních parametrů, jako je například změna tvrdosti materiálu nebo velikost přídavku určeného k odebrání. Na základě těchto změn je provedena úprava výrobních podmínek, podle kroků, které jsou předem implementovány programu zavedeného do řídicího systému. [3]

V zásadě se tak jedná pouze o zdokonalené programování NC strojů, které umožňuje zahrnout do programu různé varianty, které mohou během obrábění nastat. Program je poté schopen měnit jak rezné podmínky, tak i dráhu nástroje a případně i další parametry.

V současné době je tento druh adaptivního řízení implementován do CAD/CAM systémů v různých podobách. Většinou se však jedná o řešení předpokládaného výskytu zbytkového materiálu po hrubování a následné adaptivní přizpůsobení dráhy nástroje a rezných podmínek těmto změnám. Tímto je zajištěna stabilita řezu, kvalita povrchu a další sledované parametry.

2.2. Hardwarové adaptivní řízení

V případě hardwarového adaptivního řízení se jedná o algoritmus v samotném systému stroje, který sleduje požadovanou veličinu a v závislosti na jejích změnách upravuje podmínky obrábění tak, aby se sledovaná veličina navrátila k požadované hodnotě.

Pro tento druh adaptivního řízení je nutné stroj vybavit různými snímači a čidly, neboť je nutné získávat informace o rezném procesu přímo ze stroje a to v reálném čase. Podle stupně komplexnosti může být stroj vybaven různými druhy snímačů, které monitorují například teplotu při obrábění, otupení břitu nástroje, zatížení vřetena stroje, atd. [4]

Hardwarové adaptivní řízení může být dále děleno na základě několika hledisek, jako například druh použitých snímačů nebo druh použitého algoritmu. V následujících podkapitolách jsou blíže popsány druhy adaptivního řízení s různými stupni komplexnosti, které ilustrují vývoj současných technologií obrábění.

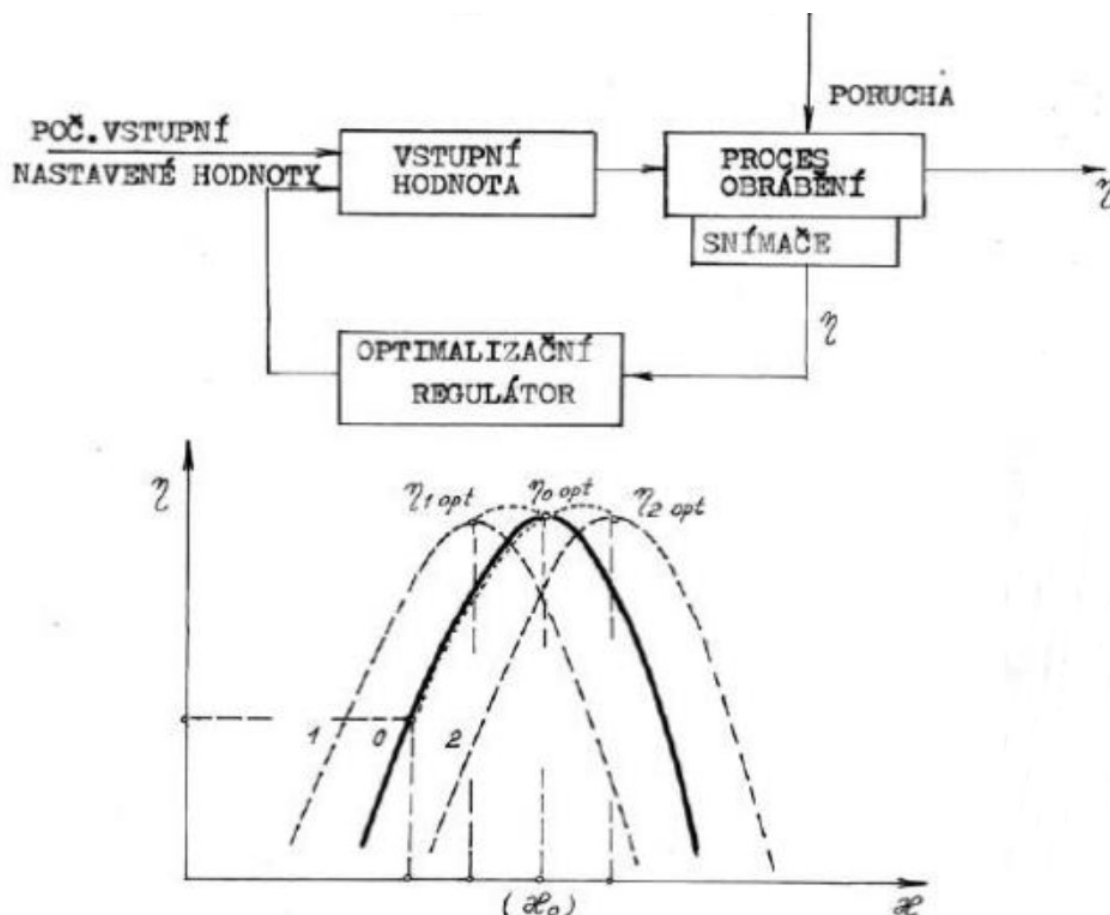
2.2.1. Adaptivní řízení limitní

Jedná se o jednu z jednodušších variant adaptivního řízení. Velmi často se omezuje na regulaci pouze posuvu jakožto jedinou regulovanou akční veličinu. Tyto systémy se také často zaměřují pouze na sledované kritérium maximálního úběru, kdy se systém snaží nastavit takové podmínky, aby bylo ubráno co nejvíce materiálu za co nejkratší čas. Kontrola obráběcího procesu je zajištěna sledováním zatížení vřetene ať už sledováním příkonu stroje nebo jiným způsobem.

Systém udržuje hodnotu zatížení vřetene na předem stanovené úrovni a tomu přizpůsobuje parametry řezného procesu. Pro tyto parametry jsou nastaveny limity, které stroj nemůže překročit, aby nedošlo k neočekávaným komplikacím, jako je například rozvibrování stroje. [5]

2.2.2. Adaptivní řízení optimalizační – I. Generace

Jedná se o složitější systém řízení, který vyžaduje výrazně více informací o průběhu řezného procesu. Těmito informacemi může být například teplota, vibrace, opotřebení nástroje, atd. Pokud není možné zjišťovat danou veličinu přímým snímáním, je dopočítávána empirickými vztahy z ostatních, známých, veličin. Jako sledovaný parametr se nejčastěji volí výrobní náklady nebo výkon obrábění. Tento systém je již schopen měnit více parametrů obrábění tak, aby se sledovaný parametr neměnil, nebo aby bylo dosaženo jeho maxima, pokud již nebylo dosaženo (Obr. 3).



Obr. 3: Adaptivní řízení optimalizační [3]

2.2.3. Adaptivní řízení optimalizační - II. Generace

Dalším pokrokem v oblasti systémů adaptivního řízení je adaptivní řízení optimalizační 2. generace. Tyto systémy jsou schopné provádět během procesu obrábění různé zkoušky, jejichž výsledky následně ovlivní volbu dalších změn parametrů obrábění. Tento systém je schopen samostatného stanovení optimálních hodnot parametrů obrábění. Proto se tento systém neobejde bez výkonného počítače, který je schopen zpracovávat dané množství dat a výpočtů v reálném čase.

Tento počítač lze rozdělit na dvě části a to na **kalkulační počítač** a **optimalizační počítač**.

Kalkulační počítač má za úkol shromažďovat informace z čidel monitorující řezný proces. Tyto informace následně přepočítá na hodnotu sledovaného parametru. Často při tom využívá metody korelační a regresní analýzy.

Optimalizační počítač zjišťuje optimální hodnotu sledovaného parametru a upravuje parametry řezného procesu tak, aby bylo tohoto optima dosaženo. Zároveň také zajišťuje dodržování mezních hodnot všech těchto parametrů. [3]

2.2.4. Použití adaptivního řízení

V současné době se projevuje tendence implementovat tyto adaptivní systémy do systémů řídicích. Řídicí systémy mají za úkol ovládat otáčky vřetena a posuvové motory podle programu, který byl do systému vložen obsluhou. Také má za úkol sběr informací o stavu stroje a jejich interpretaci. Tyto informace jsou zobrazovány na obrazovce řídicího systému. Obsluha následně může upravit program a tím zajišťovat požadované výstupy.

Modul AFC, který je dostupný v systému Heidenhain iTNC530, pracuje na principu limitního adaptivního řízení. To znamená, že je potřeba zadat maximální a minimální hodnoty, mezi kterými systém udržuje sledované parametry.

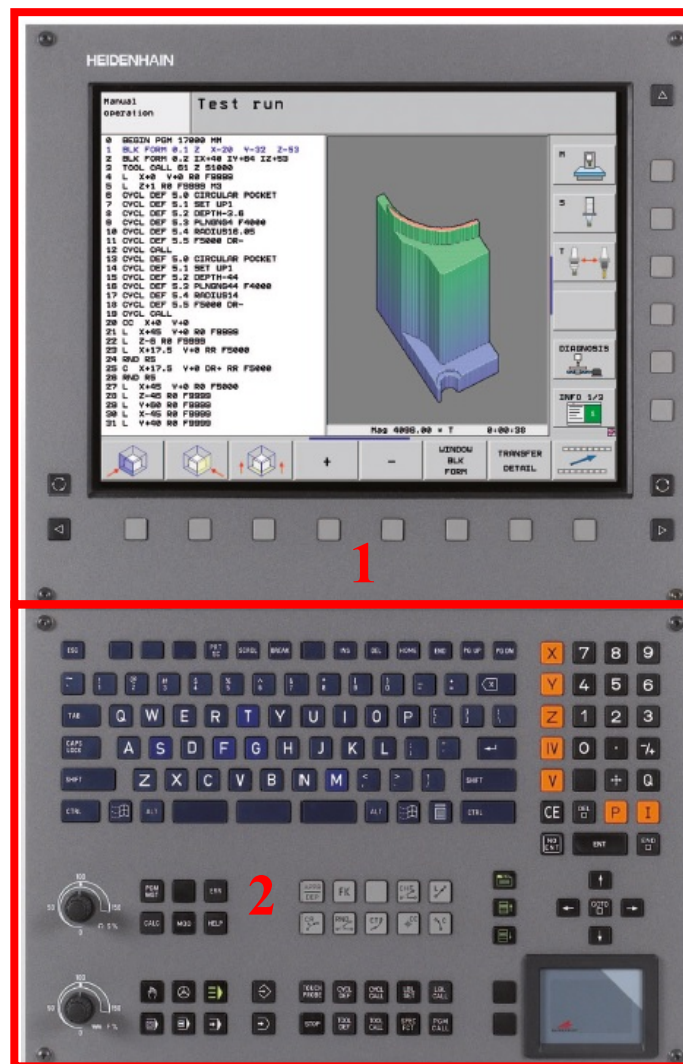
Na trhu dnes existuje mnoho těchto řídicích systémů, jako jsou například systémy od společností Siemens, Heidenhain nebo Mazak. Tyto systémy se dále dají dělit na mnoho verzí obsahující různé funkce. Pro potřeby této diplomové práce bude blíže popsán systém Heidenhain iTNC530.

3. Systém Heidenhain iTNC530

Jedná se o řídicí systém určený pro frézky, vrtačky a obráběcí centra. Tento systém umožňuje ovládání a programování výše uvedených strojů a je možné zde programovat vrtací a frézovací operace. Toto programování je možné provádět přímo na stroji a to buď přímým psaním ISO kódu, nebo za použití dílenského programování, které obsahuje cykly ulehčující programování tím, že není nutné psát celý program, ale pouze se vyplňují potřebné parametry pro danou operaci. Jednoduché a intuitivní prostředí usnadňuje psaní programu, protože na programátora může působit velké množství rušivých vlivů. Výhodou je možnost ukládání programů na disk stroje a jejich zpětné vyvolání.

Ovládací panel (Obr. 4) sestává z několika částí, jako je obrazovka a zadávací panel. Systém umožňuje několik módů práce stejně jako simulaci programu. Tyto části a možnosti systému budou popsány v následujících podkapitolách.

Ačkoliv základ NC programu lze vytvořit pomocí CAM softwaru, téměř vždy je nutné provést úpravy tohoto programu přímo v systému stroje. V případě použití funkce AFC, není možné připravit potřebné tabulky mimo systém stroje a taktéž řádky s příkazy k aktivaci funkce AFC je nutné vložit do NC programu ručně. Z tohoto důvodu je nutné popsat i možnosti ovládání tohoto řídicího systému.



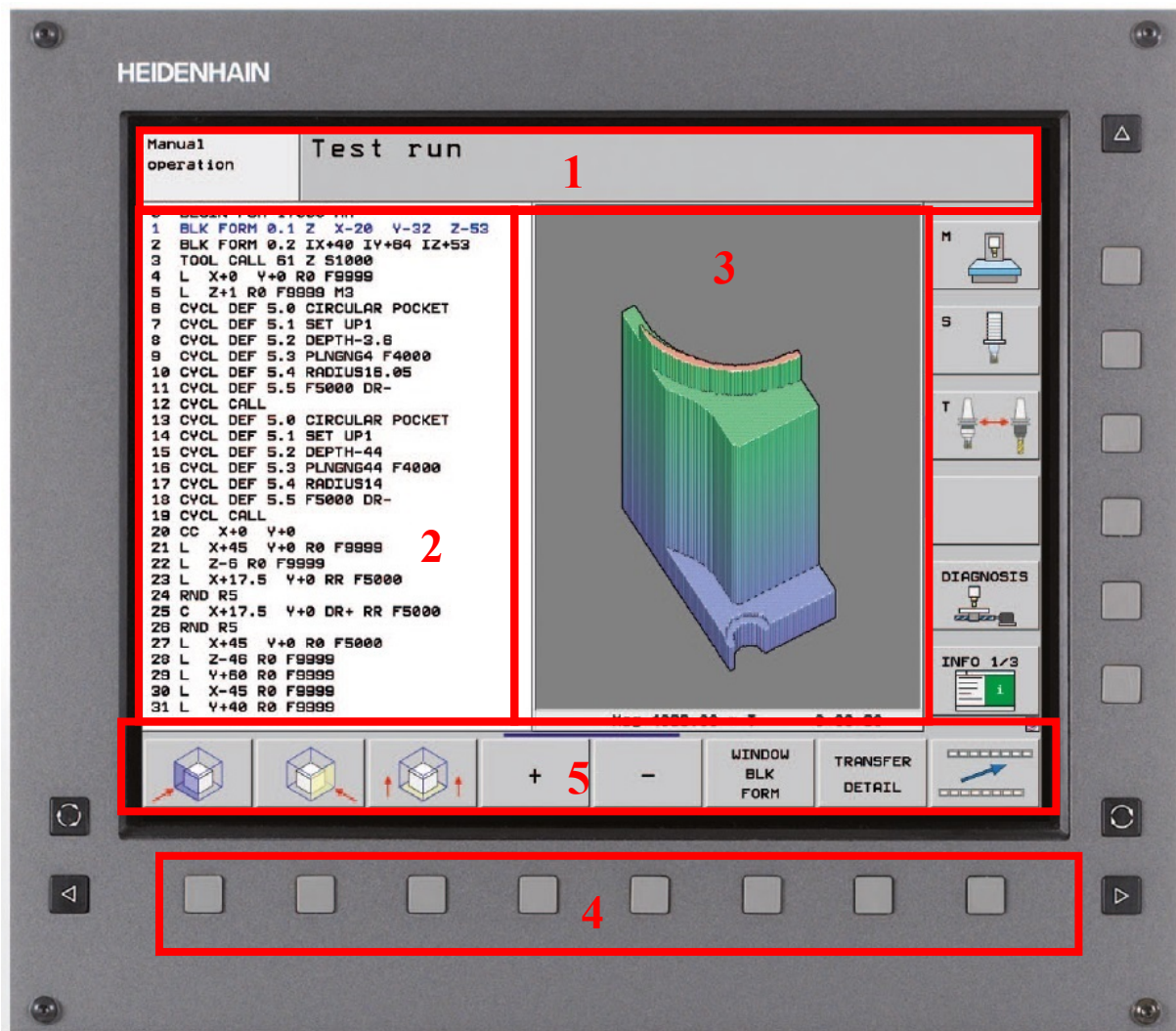
Obr. 4: Obrazovka a zadávací panel [6]

1 – Obrazovka

2 – Zadávací panel

3.1 Obrazovka

Hlavním účelem obrazovky systému Heidenhain iTNC530 je přehledné zobrazení informací o probíhající obrábění, programu nebo simulaci. Dělená obrazovka umožňuje sledovat NC kód se zvýrazněním právě aktivního bloku, a zároveň sledovat grafické znázornění simulace nebo obráběcího procesu (Obr. 5). Při probíhající obrábění je také možné na obrazovce sledovat informace jako je například poloha nástroje, jeho typ, aktivní cyklus a další.



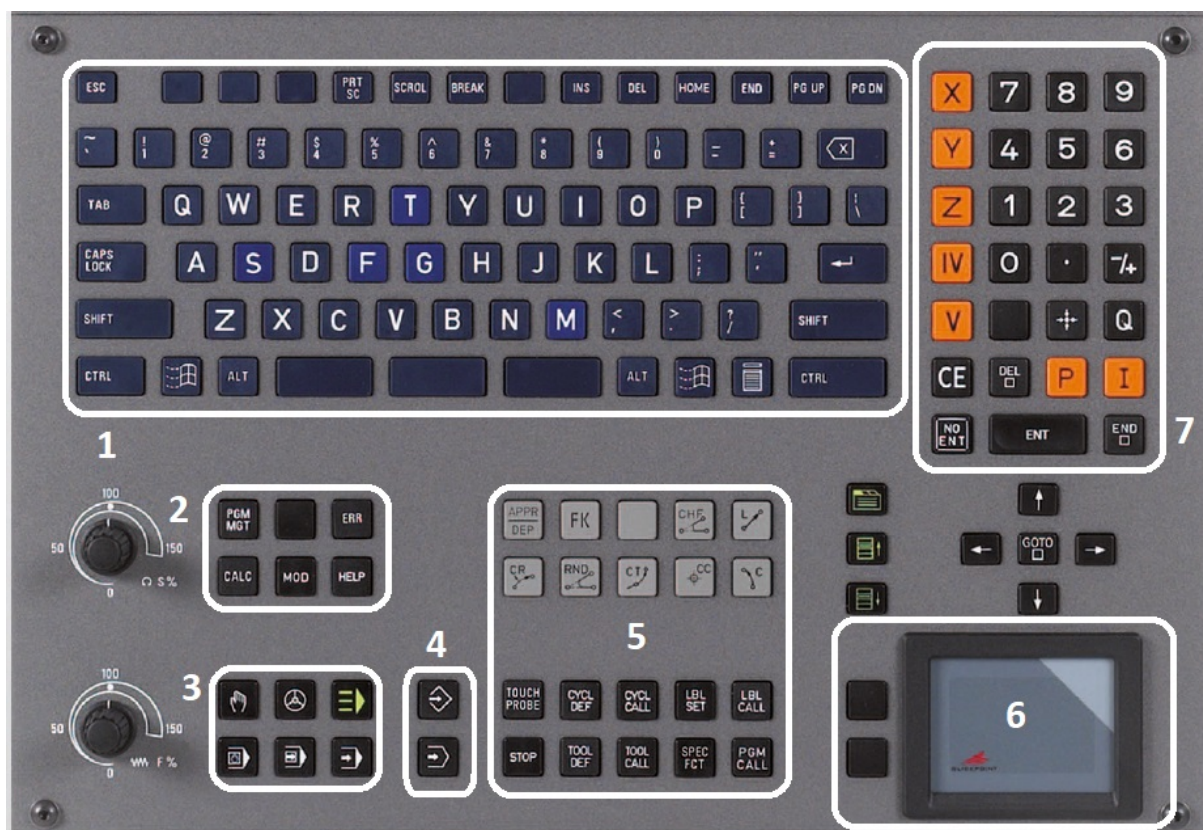
Obr. 5: Obrazovka [6]

- 1 – **Záhlaví** – zobrazuje aktivní režim stroje
- 2 – **NC program** – bloky NC kódu se zvýrazněním aktivního bloku
- 3 – **Grafika** – grafické znázornění programu nebo jeho simulace
- 4 – **Tlačítka volby softwarových kláves**
- 5 – **Softwarová tlačítka**

Při spuštění programu pro výrobu se rozložení obrazovky změní a místo grafiky se zobrazují stavové informace o stroji a nástroji.

3.2 Zadávací panel

Hlavním účelem zadávacího panelu je zprostředkovat komunikaci mezi uživatelem/programátorem a řídicím systémem stroje (Obr. 6). Skrze tento panel je možné zadávat povely řídicímu systému ať už při tvorbě programu, jeho odzkoušení nebo přímo při běhu programu. Obsahuje tlačítka, která usnadňují práci se systémem. Těmito tlačítky je možné vyvolat funkce systému a není tedy nutné je dohledávat přímo v softwaru.



Obr. 6: Zadávací panel [6]

- 1 – **Znaková klávesnice** – umožňuje zadávání názvů souborů a programování v DIN/ISO
- 2 – **Správce souborů, kalkulačka, nápověda, MOD funkce**
- 3 – **Strojní provozní režimy**
- 4 – **Programovací režimy**
- 5 – **Programovací tlačítka** – vkládají bloky NC kódu
- 6 – **Touchpad**
- 7 – **Numerická klávesnice s volbou os**

3.3 Možnosti systému

Systém Heidenhain iTNC530 umožňuje vytváření NC programu přímo na ovládacím panelu stroje nebo jeho import, pokud byl vytvořen v CAM softwaru. Také je možné tyto programy editovat a tím zajišťovat správné fungování stroje.

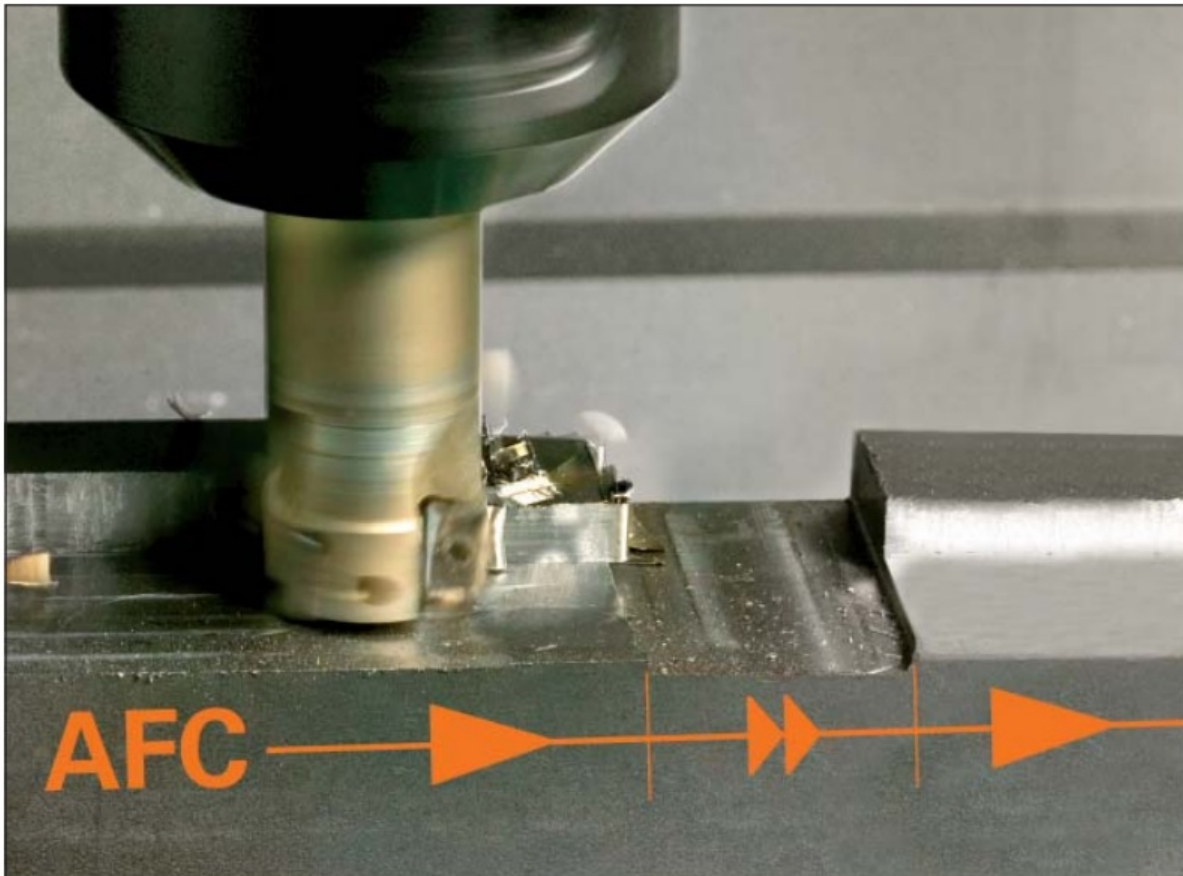
Také je možné systém dovybavit dalšími funkcemi jako je například ovládání otočného stolu, ovládání dotykových sond, opce pro synchronní chod více vřeten a další. V nabídce společnosti Heidenhain jsou také funkce pro adaptivní řízení regulačních parametrů.

Lze tak vytvořit řídicí systém vytvořený na míru danému stroji a způsobu jeho využívání. Mezi tyto opce patří také funkce adaptivního řízení posuvu (AFC). Jedná se o limitní adaptivní systém. Tato funkce bude popsána v další kapitole.

4. Funkce AFC

Funkce Adaptive Feed Control (AFC) se používá při frézování, pro zlepšení řezných podmínek a to především posuvové rychlosti. Rychlost posuvu se volí především s ohledem na obráběný materiál, typu nástroje a tloušťce odebírané vrstvy. Tato zvolená posuvová rychlost se během dané obráběcí operace nemění, i když se mění vnější podmínky obrábění, jako například tvrdost materiálu, hloubka řezu a opotřebení nástroje. Funkce AFC má za úkol zvyšovat či snižovat posuvovou rychlost tak aby byly zajištěny optimální řezné podmínky (Obr. 7).

Hlavní výhodou adaptivního řízení posuvu je zvýšení efektivity zajištěním maximální možné posuvové rychlosti. Toho je docíleno monitorováním výkonu vřetene a dalších procesních parametrů jako je například kolísání rozměrů nebo vad materiálu jako jsou například vměstky s vyšší tvrdostí než základní materiál nebo dutinky. Tyto vady se nejčastěji projevují zejména u odlitků. Systém tak udržuje dříve zjištěný maximální výkon vřetene a buď sníží posuvovou rychlost například v místech s větším úběrem materiálu, nebo ji zvýší v místech s menším řezným odporem a tím se v těchto místech zkrátí doba obrábění.

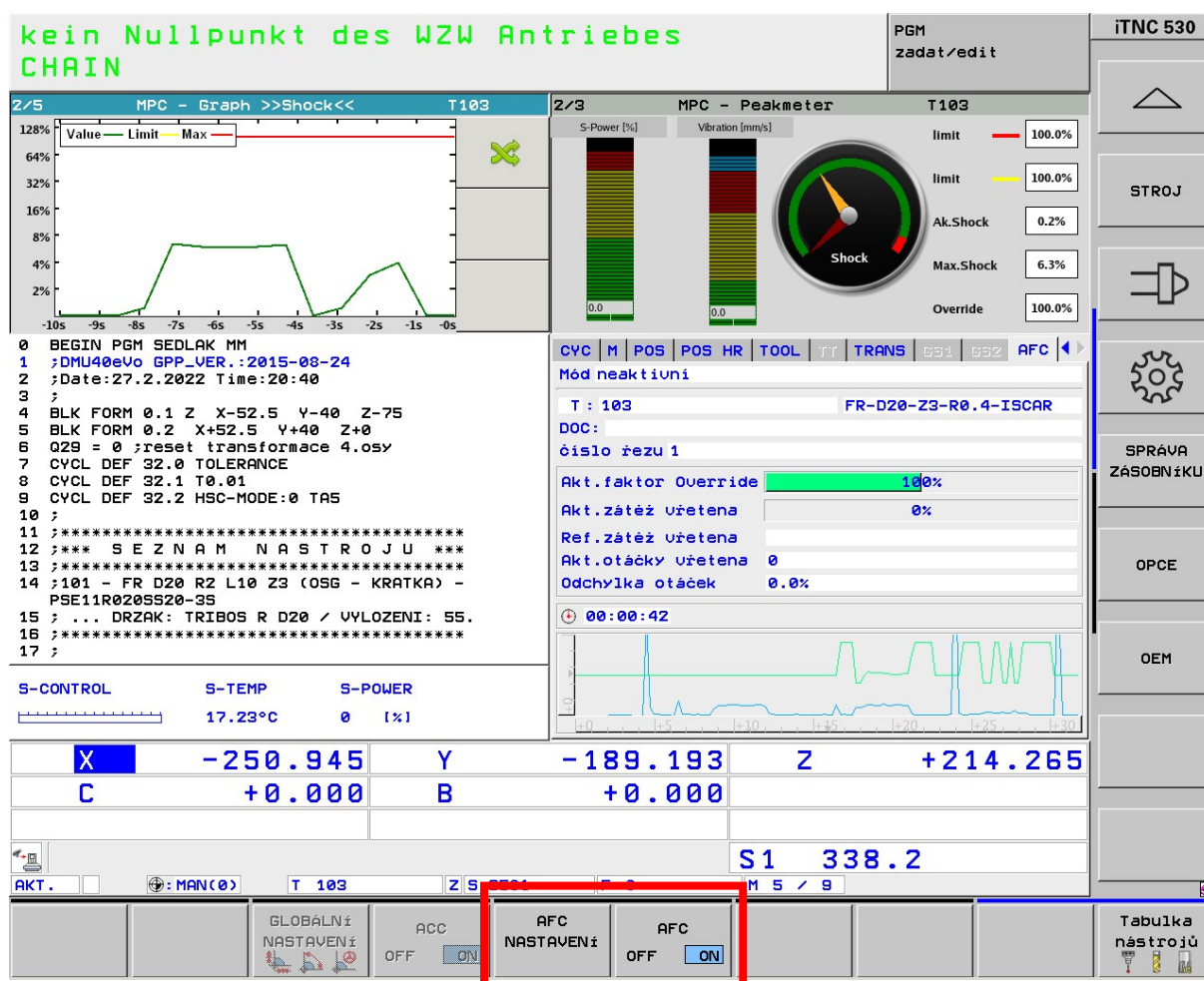


Obr. 7: Přizpůsobení posuvové rychlosti [7]

Principem funkce AFC je soustavné porovnávání aktuálního výkonu vřetena s referenčním výkonem vřetena, který byl strojem zaznamenán. Tento referenční výkon vřetene je zaznamenán při tzv. „teach-in“ režu. K této hodnotě jsou vztahovány přednastavené rozsahy posuvové rychlosti tak, aby nedošlo k překročení maximálního výkonu vřetena. Změna posuvové rychlosti tak napomáhá k optimálnímu využití výkonu vřetena a nižšímu opotřebením řezného nástroje. Také účinně chrání vřeteno před přetížením a snižují celkové namáhání a opotřebením stroje.

4.1. Aktivace a používání AFC

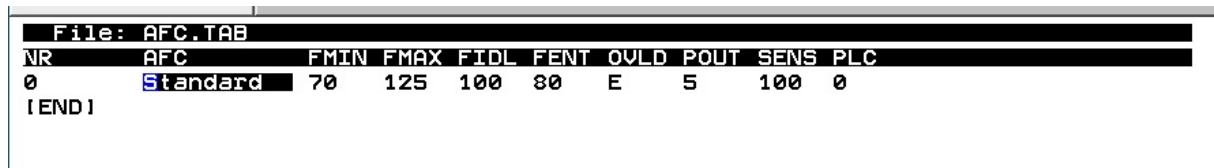
Pro úspěšné spuštění funkce AFC je třeba učinit několik kroků. Následnou aktivaci a deaktivaci AFC je možno provést softwarovým tlačítkem před spuštěním programu (Obr. 8).



Obr. 8: Zapnutí funkce AFC [8]

4.1.1. AFC.TAB

Před spuštěním programu s aktivní funkcí AFC je nutné připravit ve správci souborů tabulku AFC.TAB (Obr. 9), která udává strategii adaptivního řízení posuvu. V této tabulce je možné navolit několik limitů parametrů, ze kterých bude následně systém čerpat informace o přípustných mezích obráběcího procesu. Těchto strategií je možno nastavit celou řadu a následně je přiřazovat k jednotlivým nástrojům používaným při obrábění podle daného programu.



```
File: AFC.TAB
NR   AFC      FMIN FMAX FIDL FENT OVL D POUT SENS PLC
0    Standard 70   125 100  80   E   5   100  0
[END]
```

Obr. 9: AFC.TAB [autor]

V této tabulce jsou následující parametry, z nichž některé je možné nastavit pro danou strategii:

NR – číslo řádku

AFC – název strategie

FMIN – minimální posuv při kterém má systém zareagovat na přetížení. Zadává se v procentech nominální posuvové rychlosti

FMAX – maximální hodnota posuvu, do kterého může systém automaticky zvyšovat posuvovou rychlost. Zadává se v procentech nominální posuvové rychlosti

FIDL – rychlost posuvu pro pojíždění nástrojem mimo řez. Zadává se v procentech nominální posuvové rychlosti

FENT – rychlost posuvu pro vjíždění nebo vyjíždění do a z materiálu. Zadává se v procentech nominální posuvové rychlosti. Maximální hodnota je však 100%

OVL D – reakce systému na přetížení. Systém provede jednu z následujících možností

M – spuštění makra definovaného výrobcem stroje

S – okamžitý NC-stop

F – NC- stop po odjetí nástroje

E – zobrazit pouze chybové hlášení

- - neprovádět žádnou akci

POUT – výkon vřetene, při kterém má systém rozpoznat výjezd z materiálu. Zadává se v procentech naučené referenční zátěži vřetene

SENS – rychlost reakce systému na změnu. Rozsah hodnot je 50 (pomalá reakce) až 200 (rychlá reakce). Doporučená hodnota je 100.

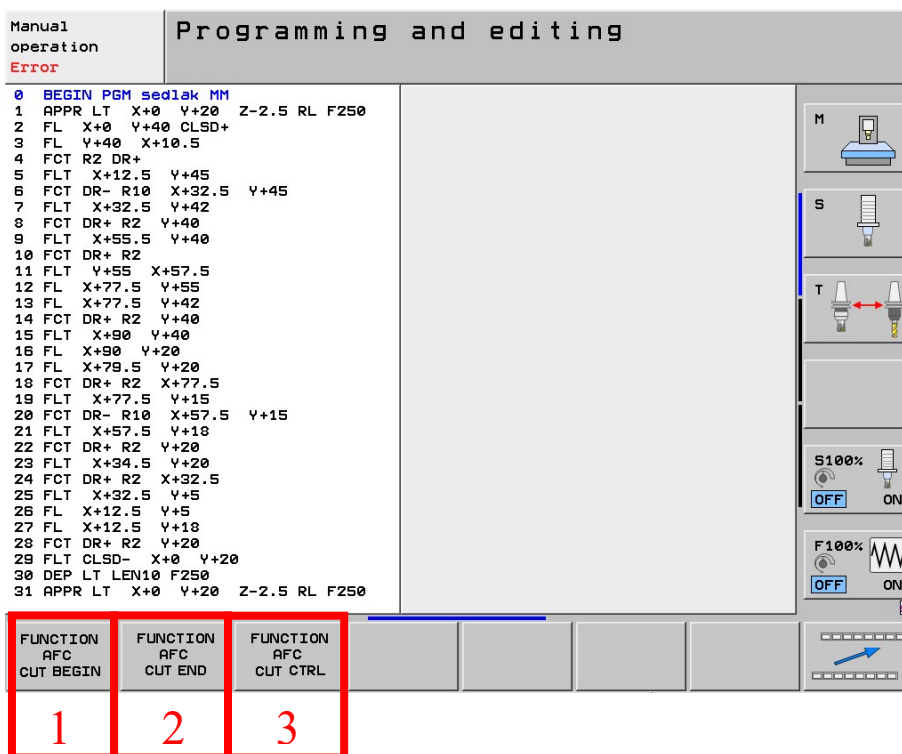
PLC – hodnota kterou má systém přenést do programovatelného automatu. Funkci definuje výrobce stroje a je třeba dbát pokynů v příručce.

Dále je nutné tuto strategii přiřadit k použitým nástrojům. Toto přiřazení se provádí v tabulce nástrojů v kolonce AFC. Ke každému nástroji je možné přiřadit pouze jednu strategii AFC. V případě, že je potřeba přiřadit více strategií k jednomu nástroji, musí být v tabulce nástrojů vytvořeno více identických nástrojů a ke každému z nich pak může být přidána jiná strategie AFC.

4.1.2. Vložení do programu

Funkce AFC musí být také přímo součástí programu pro obrábění. Tyto bloky označují počátek a konec účinnosti funkce AFC. Těmito bloky je možné nastavit způsob

učení referenčních hodnot a rozsah působení adaptivního řízení posuvu. Tyto bloky je možné vložit specializovanými softwarovými tlačítky při editaci programu (Obr. 10). Tato tlačítka se nalézají pod softwarovým tlačítkem Funkce AFC, které je pod tlačítkem Programové funkce. Toto menu je možné otevřít tlačítkem SPEC FCT na ovládacím panelu.



Obr. 10: Vložení AFC do programu [8]

1 - FUNCTION AFC CUT BEGIN – vloží počáteční blok AFC. Je možné vybrat z několika možností učení nominálních hodnot

TIME – nastavení délky učícího řezu v sekundách

DIST – nastavení délky učícího řezu v mm

LOAD – ruční nastavení procentuálního zatížení vřetena

V případě nezadání těchto možností je možné přerušit učení ručně a nadále nechat funkci AFC řídit rychlost posuvu.

2 - FUNCTION AFC CUT END – vloží konečný blok AFC. Tímto se ukončí rozsah funkce AFC

3 - FUNCTION AFC CUT CTRL – vloží blok AFC ukončující učící řez a přepne tak funkci to automatického řízení posuvu

4.1.3. Tabulka zkušebního řezu

Při zkušebním řezu je vytvořena tabulka <název>.H.AFC.DEP obsahující informace překopírované z tabulky AFC.TAB. Zároveň do této tabulky systém zaznamenává informace, které zjistí během zkušebního řezu jako je například maximální výkon vřetena.

V této tabulce jsou uvedeny následující údaje:

NR – číslo obráběcího úseku

TOOL – číslo nebo název nástroje pro daný obráběcí úsek

IDX – index nástroje, který provedl obráběcí úsek

N – rozlišení, jak byl nástroj vyvolán

0 – vyvolání číslem

1 – vyvolání názvem

PREF – referenční zátěž vřetena. Vyjádřena v procentech vztažených ke jmenovitému výkonu vřetena

ST – stav obráběcího úseku

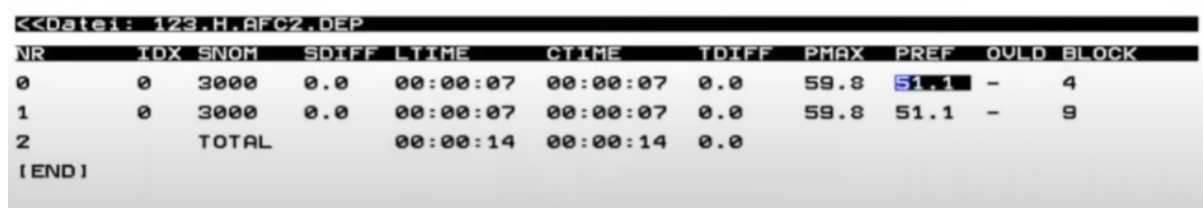
L – při dalším obrábění tohoto úseku se opět provede zkušební řez a informace bude přepsána

C – zkušební řez byl úspěšně proveden. Při dalším zpracování se využijí již zjištěné hodnoty

AFC – název nastavení regulace

4.1.4. Evaluační tabulka

Během používání AFC ukládá systém informace o průběhu řezu do tabulky <název>.H.AFC2.DEP (Obr. 11). Tato tabulka slouží k následnému vyhodnocení efektivity funkce AFC. V této tabulce jsou uloženy informace jak o „teach-in“ řezu tak i o následných řezích prováděných při zapnutém AFC v daném programu. V této tabulce lze nalézt informace jako například zatížení vřetena, časy obrábění a další.



NR	IDX	SNOM	SDIFF	LTIME	CTIME	TDIFF	PMAX	PREF	OULD	BLOCK
0	0	3000	0.0	00:00:07	00:00:07	0.0	59.8	51.1	-	4
1	0	3000	0.0	00:00:07	00:00:07	0.0	59.8	51.1	-	9
2		TOTAL		00:00:14	00:00:14	0.0				

Obr. 11: Evaluační tabulka [8]

NR – číslo obráběcího úseku

IDX – index nástroje, který prováděl daný obráběcí úsek

SNOM – cílové otáčky vřetena

SDIF – maximální rozdíl otáček vřetena od cílových otáček. Vyjadřuje se v procentech.

LTIME – doba obrábění zkušebního řezu

CTIME – doba obrábění regulovaného řezu

TDIFF – časový rozdíl LTIME a CTIME. Vyjadřuje se v procentech

PMAX – maximální výkon vřetena, kterého bylo dosaženo při obrábění. V tabulce je vyjádřena v procentech vztažených ke jmenovitému výkonu vřetena

PREF – referenční zátěž vřetena vyjádřena v procentech vztažených ke jmenovitému výkonu vřetena

OVLD – reakce systému při přetížení, pokud taková situace nastala

M – spuštění makra definovaného výrobcem stroje

S – okamžitý NC-stop

F – NC- stop po odjetí nástroje

E – zobrazeno pouze chybové hlášení

'-' – neprovedena žádná akce

BLOCK – číslo bloku kde začíná obrábění regulované AFC

5. Experimentální část

V této části diplomové práce jsou popsány provedené experimenty a vyhodnoceny jejich výsledky. Experimenty jsou navrženy především ke zprovoznění funkce AFC v systému Heidenhain iTNC530 na stroji DMU 40 eVo a také pro měření skutečných působících sil a tím i zatížení nástroje obrobkovým dynamometrem. Jsou zde také popsány problémy, které vyvstaly při zprovožňování této funkce a při měření sil obrobkovým dynamometrem. Stejně tak zde jsou popsány vlivy jednotlivých změn provedených v průběhu jednotlivých kroků experimentu.

5.1. První experiment

Hlavním účelem prvního experimentu bylo zapnutí a nakonfigurování funkce AFC na stroji DMU 40 eVo tak, aby byla tato funkce použitelná. Tento experiment se skládal z několika kroků, při kterých docházelo k úpravám programu nebo nastavení funkce AFC za účelem spuštění nebo zlepšení fungování funkce AFC. Tento první experiment slouží především ke zprovoznění funkce. Během experimentu byla změřena i úspora času.

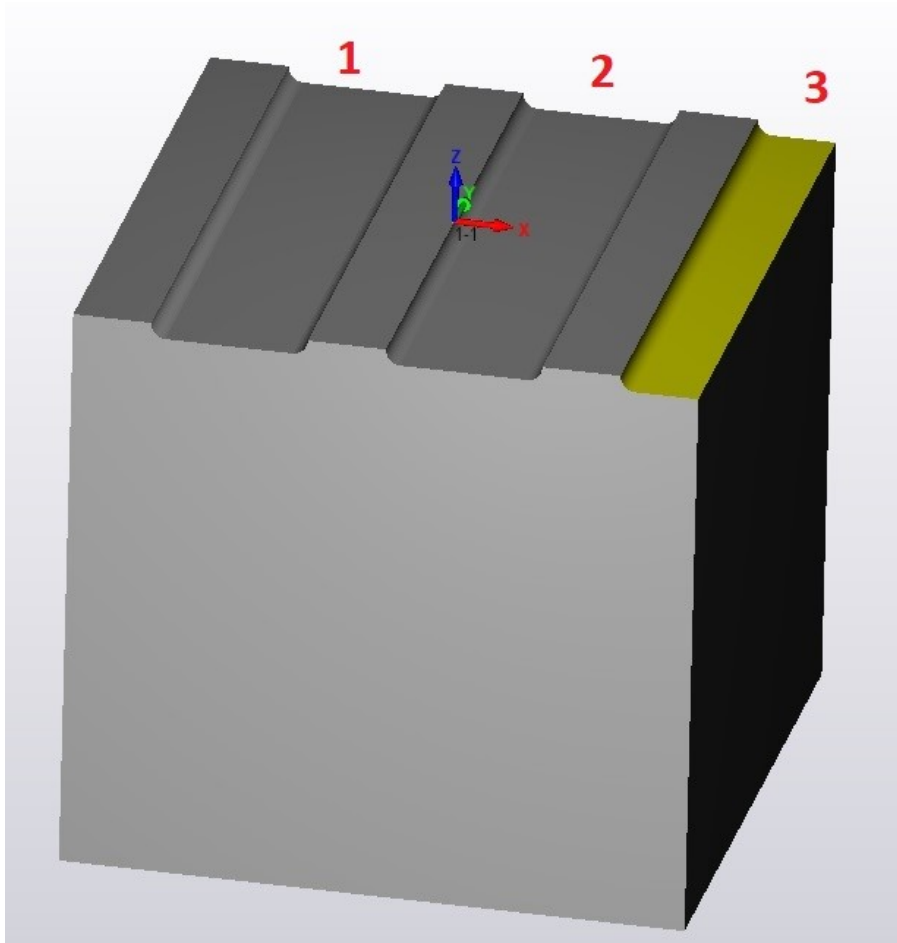
5.1.1 Naplánování experimentu

Naplánování experimentu spočívalo především ve výběru obráběného materiálu, nástroje a strategie drah, kterými se materiál obráběl. Zde jsou uvedeny parametry experimentu (Tab. 2).

Tab. 2: Plánované parametry prvního experimentu

Materiál obrobku	11 700
Rozměry obrobku	80x80x75 mm
Nástroj	Fréza PR20 r2z3
Trvání experimentu	4 hodiny

Pro zkoušení funkce AFC byla zvolena výroba drážek na obrobku (Obr. 12). Jednotlivé drážky jsou popsány dále. Jednotlivé drážky byly navrženy s ohledem na potřebu vyzkoušet funkčnosti modulu AFC a zároveň, aby bylo možné pozorovat chování systému při různých zatíženích.



Obr. 12: Model obrobku [autor]

1 – „teach-in“ drážka

První drážka slouží systému ke zjištění pracovního zatížení vřetene. K tomuto naměřenému zatížení se vztahují limitní hodnoty, které jsou zadané při spuštění funkce AFC.

2 – kontrolní drážka

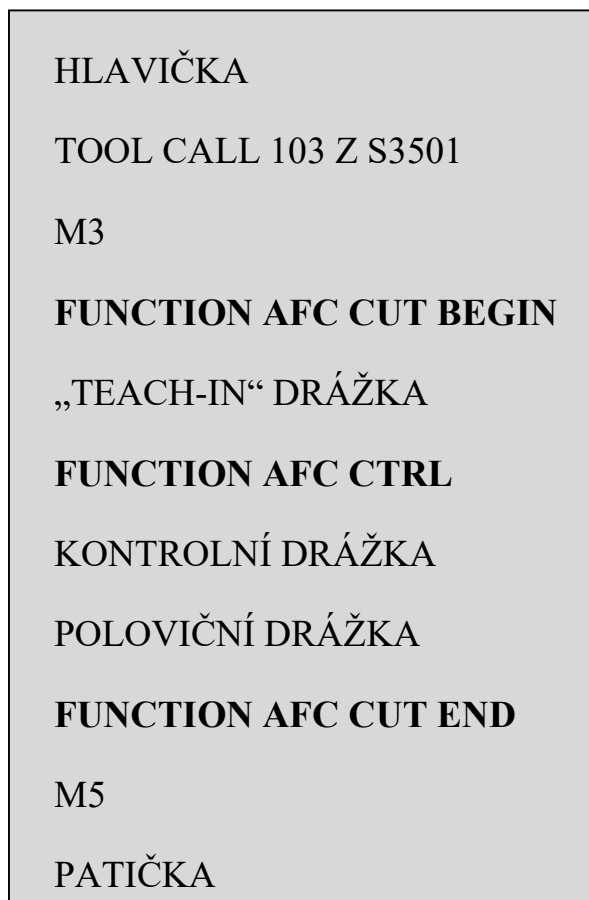
Hlavní účel této drážky je ověření, zda byla funkce AFC spuštěna správně. Protože kontrolní drážka má stejné parametry jako „teach-in“ drážka, je jakákoliv změna posuvové rychlosti projevem funkce AFC.

3 – poloviční drážka

Tato drážka byla do experimentu přidána především z důvodu pozorování chování systému při odlišném zatížení.

5.1.2 Příprava experimentu

Hlavní částí přípravy experimentu bylo vytvoření programu pro obrábění. Tento program byl vytvořen pomocí software SolidCAM na základě modelu obrobku. Tento program je ve své úplnosti uveden v Příloze 1. Zde bude uveden pouze schématicky s vysvětlením funkce jednotlivých bloků programu i s předpokládaným chováním (Obr. 13).



Obr. 13: Schéma programu [autor]

HLAVIČKA

Tato část obsahuje základní informace o programu jako je například název programu a označení stroje, pro který je program vytvořen. Také obsahuje informace o polotovaru, především informace o jeho velikosti a umístění nulového bodu vzhledem k polotovaru. Další částí hlavičky je seznam nástrojů včetně detailů o držáku nástroje včetně vyložení nástroje. Hlavička také obsahuje proměnné Q s uvedenými posuvovými rychlostmi pro jednotlivé druhy obrábění jako je například hrubování či dokončování.

TOOL CALL 103 Z S3501

Tento příkaz v programu vyvolává nástroj naprogramovaný pro danou obráběcí operaci. Obsahuje číslo nástroje podle tabulky nástrojů, osu rotace nástroje a naprogramované otáčky nástroje.

M3

Tento příkaz slouží k roztočení vřetene stroje. Řádek, který obsahuje tento příkaz tak lze považovat za samotný počátek obrábění. Tento příkaz je možné zaměnit za příkaz M4, který roztočí vřeteno proti směru hodinových ručiček. Kromě tohoto rozdílu je tento příkaz pro funkci AFC shodný jako příkaz M3.

FUNCTION AFC CUT BEGIN

Jedná se o příkaz uvádějící do provozu funkci AFC. Tento příkaz je nutné umístit až za řádek obsahující příkaz M3, tedy za počátek obrábění. V tomto řádku je možné nastavit další parametry funkce AFC. Mezi tyto parametry patří možnost DIST, která určuje délku učicí dráhy v milimetrech, možnost TIME, který určuje délku trvání učicí dráhy v sekundách, nebo možnost LOAD, kterou je možné nastavit referenční zatížení vřetena přímo v procentech. Pokud nejsou tyto parametry zadány, je nutné ukončit učicí dráhu ručně, nebo vložit příkaz k ukončení učení přímo do programu.

„TEACH-IN“ DRÁŽKA

V tomto bloku je naprogramovaná dráha učicí drážky, která slouží k určení referenční zátěže vřetena. Je tedy nutné zajistit, že v tomto bloku dojde k maximálnímu projektovanému zatížení vřetene. Tuto drážku není nutné programovat v případě, že je na stroji vyráběno více kusů stejné součásti nebo pokud je známo referenční zatížení vřetene.

FUNCTION AFC CTRL

Tento příkaz nemusí být uveden v programu, pokud bylo v příkazu FUNCTION AFC CUT BEGIN nadefinováno omezení učicí dráhy nebo přímo referenční zátěže vřetena. Další možnosti, kdy nemusí být tento příkaz uveden, je v případě, že obsluha přerušil učicí proces ručně. Při všech výše uvedených způsobech je funkce AFC přepnuta z učicího módu do módu řízení.

KONTROLNÍ DRÁŽKA

Tento blok obsahuje naprogramovanou dráhu pro provedení kontrolní drážky, která je shodná s „TEACH-IN“ DRÁŽKOU a je tak možné porovnat změny rychlosti posuvu, které jsou vyvolány řídicím módem funkce AFC.

POLOVIČNÍ DRÁŽKA

Poloviční drážka byla do programu vložena, aby bylo možné porovnat zatížení vřetene v případě, že není celý průměr frézy v řezu. Z tohoto důvodu byla tato drážka naprogramována tak, aby byla v řezu pouze polovina frézy, tedy 10mm.

FUNCTION AFC CUT END

Tento příkaz funkce AFC ukončuje funkcionalitu adaptivního řízení posuvu. Je nutné jej vložit na konec obráběcího procesu, pro který byla funkce AFC vyžadována. Za tímto příkazem již není funkce AFC aktivní a nedochází tak ke změnám posuvové rychlosti. Tento příkaz musí být vložen před poslední příkaz M5 obráběcího procesu.

M5

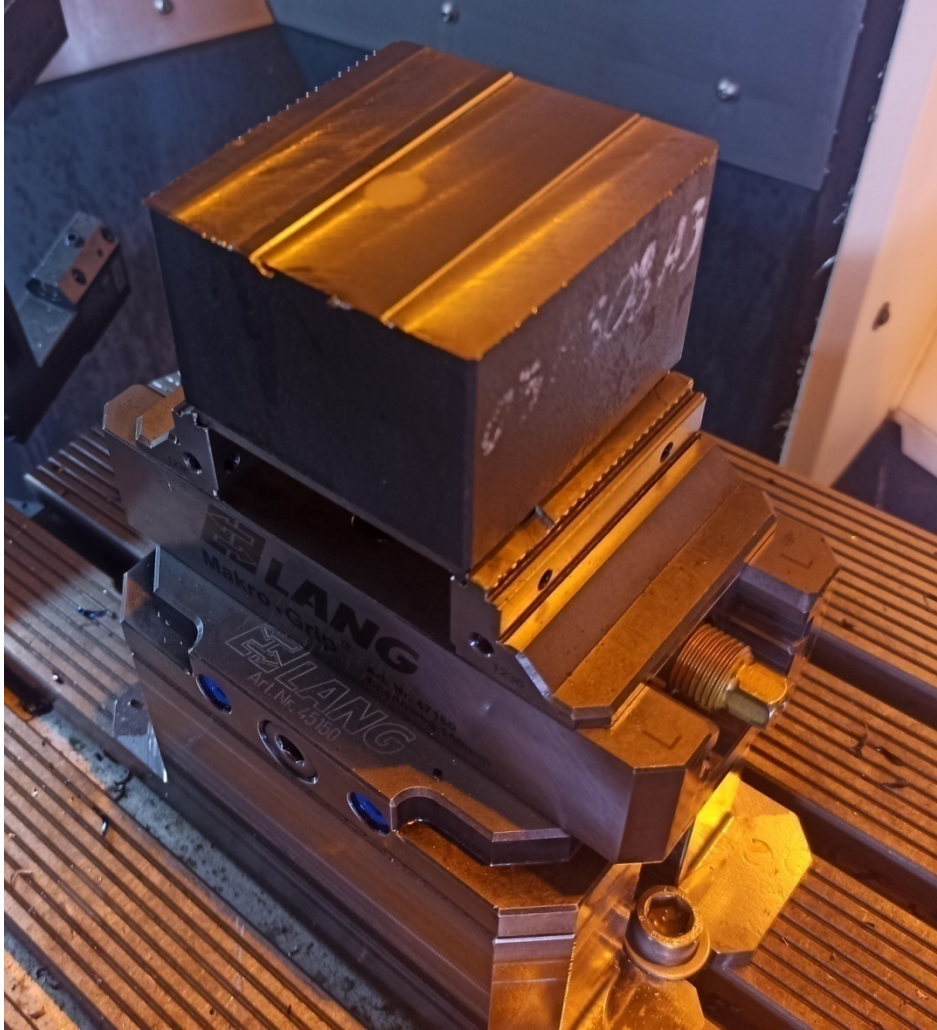
Příkaz M5 slouží k zastavení vřetene a řádek který obsahuje tento příkaz je tak považován za konec obrábění.

PATIČKA

Samotný závěr programu je zde označován jako PATIČKA. V tomto bloku je odjezd k referenčnímu bodu stroje a ukončení programu. Obsahuje také části programu, které jsou do hlavního programu volány pomocí funkce LBL.

5.1.3 Upnutí obrobku

Při jakémkoliv obrábění je důležité dostatečně tuhé upnutí obrobku. V případě nedostatečně tuhého upnutí se zhoršuje přesnost obrábění a může také způsobovat nadměrné vibrace, které mohou způsobovat nerovnoměrné zatěžování nástroje. Tím by mohli být zkresleny i výsledky experimentu. Z tohoto důvodu je nutné zajistit dostatečně tuhé upnutí obrobku, jednak aby nedocházelo k posouvání obrobku a také z důvodu přesnějšího měření zatížení vřetene. Pro upnutí obrobku pro tento experiment byl zvolen strojní svěrák (Obr. 14).



Obr. 14: Upnutí obrobku [autor]

5.1.4 Provedení experimentu

Při úvodní diskuzi před zahájením experimentu byly provedeny drobné změny a upřesnění parametrů (Tab. 3). Tyto změny nijak neovlivnily základní podstatu experimentu a jednalo se především o změny provedené z praktických důvodů. Zároveň byly upřesněny řezné podmínky pro první test. Tyto podmínky se však měnili v určitých fázích experimentu. Všechny změny budou uvedeny v popisech příslušných fází experimentu.

Tab. 3: Skutečné parametry prvního experimentu

Nástroj	Fréza PR20 r08 z4	
	Číslo 103 v tabulce nástrojů	
Řezné podmínky	Řezná rychlost	220 m/min
	Hloubka řezu	1 mm
	Posuvová rychlost	0,2 mm/ot

Před prvním testem byla v adresáři s programem vytvořena tabulka AFC.TAB, obsahující pouze standardní strategii AFC, která je v této tabulce vytvořena automaticky systémem. Údaje o standardní strategii jsou uvedeny v tabulce AFC.TAB (Obr. 15). Také byla v tabulce nástrojů přiřazena standardní strategie AFC k používanému nástroji číslo 103.

```
File: AFC.TAB
NR   AFC   FMIN FMAX FIDL FENT OULD POUT SENS PLC
0    Standard 70  125  100  80  E   5   100  0
{END}
```

Obr. 15: Použitá tabulka AFC [autor]

První test

První test byl proveden s podmínkami uvedenými výše v tabulce AFC.TAB. Při učícím řezu bylo zjištěno zatížení vřetene 6,4% (Obr. 16).

```
<<File: SEDLAK.H.AFC.DEP
NR   IDX N FMIN FMAX FIDL FENT OULD POUT PREF SENS ST PLC AFC
0    0  0 70  125  100  80  E   5   6.4  100 C 0  Standard
{END}
```

Obr. 16: První naučení AFC [autor]

Vzhledem k nízkému zatížení vřetene nebyly výsledky průkazné, protože kolísání rychlosti posuvu bylo minimální.

Druhý test

Při druhém testu byla změněna dráha drážky č. 3 tak, aby byla v řezu pouze čtvrtina frézy (Obr. 17). Šířka drážky tak byla 5 mm a bylo předpokládáno, že bude pozorováno zrychlení během obrábění této drážky.



Obr. 17: Posunutí drážky [autor]

Navzdory předpokladům však ke zrychlení nedošlo a výsledky byly stále neprůkazné a nejsou proto zahrnuty.

Třetí test

Při tomto testu bylo rozhodnuto o provedení nového učení a to změnou parametru ST v tabulce SEDLAK.H.AFC.DEP na hodnotu L. Tato změna umožnila přepsání tabulky novými hodnotami.

Toto nové naučení zatížení vřetene však nemělo vliv na výsledky testu a stále nedocházelo ke zvyšování posuvové rychlosti.

Čtvrtý test

Při tomto testu byly proměnné Q zastupující posuvovou rychlost v programu nahrazeny hodnotou posuvové rychlosti. Ani tato změna však nezměnila výsledky testu.

Pátý test

Pro tento test bylo rozhodnuto o zvýšení zátěže při „teach-in“ řezu. Z tohoto důvodu byla zvýšena hloubka řezu v „teach-in“ drážce na 2 mm a navoleno nové učení funkce AFC (Obr. 18). Na kontrolní drážce však byla ponechána hloubka řezu 1mm, aby byl zajištěn dostatečný rozdíl v zatížení vřetene. Hloubka okrajové drážky byla také zvýšena na 2mm, aby bylo možné pozorovat rozdílné posuvové rychlosti.

```
<<File: SEDLAK.H.AFC.DEP
NR      IDX N  FMIN FMAX FIDL FENT OVL D POUT PREF SENS ST  PLC AFC
0       0   0  70  125 100  80  E   5   11.3 100  C  0  Standard
[END]
```

Obr. 18: Tabulka naučení pátého testu [autor]

Jak je vidět došlo k navýšení zatížení vřeten na 11,3%. Díky tomu došlo při kontrolní drážce k navýšení posuvové rychlosti až na 125%. Při obrábění krajní drážky však nedošlo ke zvýšení posuvové rychlosti.

```
<<File: SEDLAK.H.AFCZ.DEP
NR      IDX SNOM  SDIFF CTIME   FAVG FMIN  PMAX  PREF  OVL D BLOCK
0       0   3501  0.1   00:00:38 102  81   11.3 11.3  --  35
1       1           total 00:00:38 2%  saved
[END]
```

Obr. 19: Evaluační tabulka pátého pokusu [autor]

Z tabulky vyplývá, že došlo k navýšení průměrné posuvové rychlosti FAVG na 102% a tím i tedy ke snížení času obrábění o 2% (Obr. 19).

Šestý test

Na základě výsledků předchozího testu bylo rozhodnuto o vytvoření nové strategie s vyššími limitními hodnotami posuvové rychlosti (Obr. 20). Také byla snížena prahová úroveň zatížení vřetena POUT, které určuje hranici, pod kterou systém předpokládá nástroj mimo řez, z 5% na 2%. Tímto mělo být zajištěno zvýšení posuvové rychlosti i v okrajové drážce.

```
File: AFC.TAB
NR      AFC      FMIN FMAX FIDL FENT OVL D POUT SENS PLC
0       Standard  70  125 100  80  E   5   100  0
1       Sedlak    70  150 130  80  E   2   100  0
[END]
```

Obr. 20: AFC.TAB šestého pokusu [autor]

Tato nová strategie byla přiřazena k danému nástroji v tabulce nástrojů a hloubka řezu byla nastavena na konstantní 2mm ve všech drážkách. Přesto však nedošlo k navýšení posuvové rychlosti. Při otevření tabulky SEDLAK.H.AFC.TAB bylo zjištěno, že funkce AFC nebere v úvahu novou strategii, která byla vytvořena.

V manuálu k systému Heidenhain iTNC530 byla nalezena instrukce, podle které musí být tabulka AFC.TAB umístěna v kořenovém adresáři TNC:\ tak, aby byla přístupná pro všechny programy používané na daném stroji. Jelikož nová strategie byla vytvořena v tabulce AFC.TAB, která byla umístěna v adresáři programu, systém nebyl schopen tuto strategii rozpoznat a používal proto základní hodnoty nastavené v systému.

Sedmý test

Po přepsání nové strategie AFC do tabulky v adresáři TNC:\ byl program spuštěn znovu i s novým „teach-in“ režem, aby byly získány nové hodnoty funkce AFC.

```
<<File: SEDLAK.H.AFC.DEP
NR   IDX N  FMIN FMAX FIDL FENT OVL D POUT PREF  SENS ST  PLC AFC
0    0    0  70  150  130  80  E   2   11.7 100  C  0  Sedlak
[END]
```

Obr. 21: Tabulka naučení sedmého testu [autor]

Z tabulky je patrné, že nové naučení funkce AFC bylo úspěšné a do systému byly zavedeny nové hodnoty (Obr. 21). S těmito novými hodnotami bylo provedeno testování a řez nevykazoval jakékoliv známky nestability či nevhodnosti rezných podmínek.

```
<<File: SEDLAK.H.AFC2.DEP
NR   IDX SNOM  SDIFF CTIME  FAVG FMIN  PMAX  PREF  OVL D BLOCK
0    0    3501  0.1  00:00:40  116  81   11.7  11.7  --  35
1    1                total 00:00:40  14%  saved
[END]
```

Obr. 22: Evaluační tabulka sedmého testu [autor]

Evaluační tabulka ukazuje navýšení průměrné posuvové rychlosti FAVG na 116% a tím byl čas obrábění snížen o 14% (Obr. 22). Posuvová rychlost byla měněna ve všech třech drážkách a díky tomu bylo dosaženo nezanedbatelné úspory času.



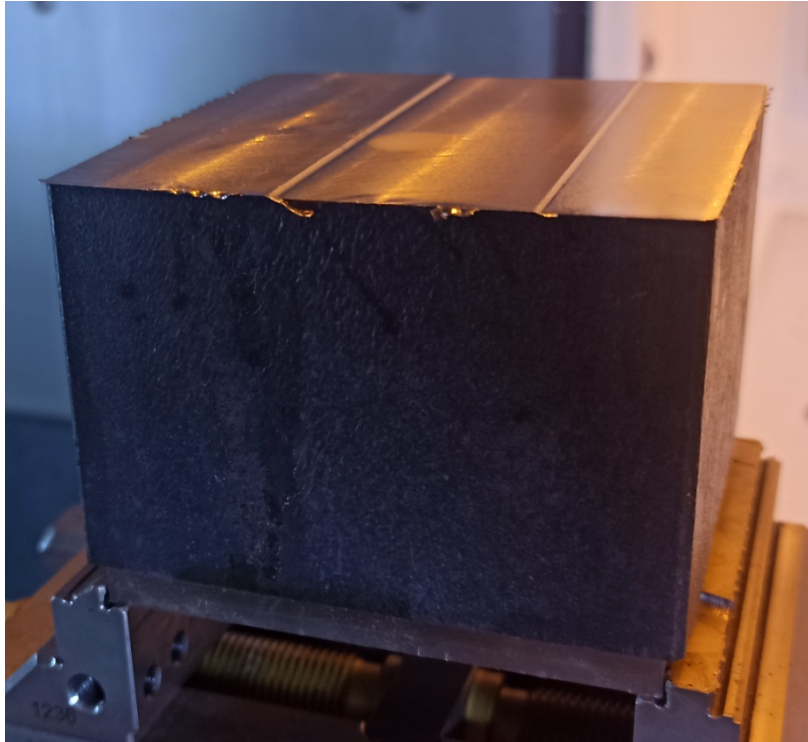
Obr. 23: Výsledný graf [autor]

Výsledný graf (Obr. 23) zobrazuje modrou čarou zatížení vřetene a zelenou čarou posuvovou rychlost. Tento graf je možné rozdělit do několika částí.

- 1 – nájezd k obrobku a vjezd do materiálu
- 2 – „teach-in“ řez
- 3 – přejezd mezi drážkami a vjezd do materiálu
- 4 – kontrolní drážka
- 5 – přejezd mezi drážkami a vjezd do materiálu
- 6 – krajní drážka a výjezd z materiálu

Osmý test

Pro tento test byly na obrobku vytvořeny tři různé výškové úrovně orientované kolmo na testovací drážky. První výšková úroveň se nacházela na úrovni nulového bodu, druhá o 0,5mm hlouběji než byl umístěn nulový bod a třetí o 0,7mm níže než nulový bod. Při tomto testu se však neprojevil žádná změna rychlosti posuvu (Obr. 24).



Obr. 24: 3 výškové úrovně [autor]

Devátý test

Při tomto testu byly v programu nahrazeny parametry posuvové rychlosti proměnnými Q . Tím bylo zjištěno že funkce AFC je schopna pracovat i s těmito proměnnými. Došlo však ke zvýšení zatížení vřetene na 11,8% a zvýšení úspory času na 19%. Rozdíl v naučeném zatížení vřetene je možné vysvětlit opotřebením nástroje. Zvýšení úspory času byla způsobena stabilizací posuvové rychlosti při obrábění krajní drážky.

5.1.5 Shrnutí prvního experimentu

Účelem tohoto experimentu bylo zprovoznění funkce AFC na stroji DMU 40 eVo. Zároveň bylo nutné pochopit princip fungování a význam nastavení funkce AFC. Při tomto experimentu byly zjištěny skutečnosti, které jsou potřebné pro správné fungování adaptivního řízení posuvu.

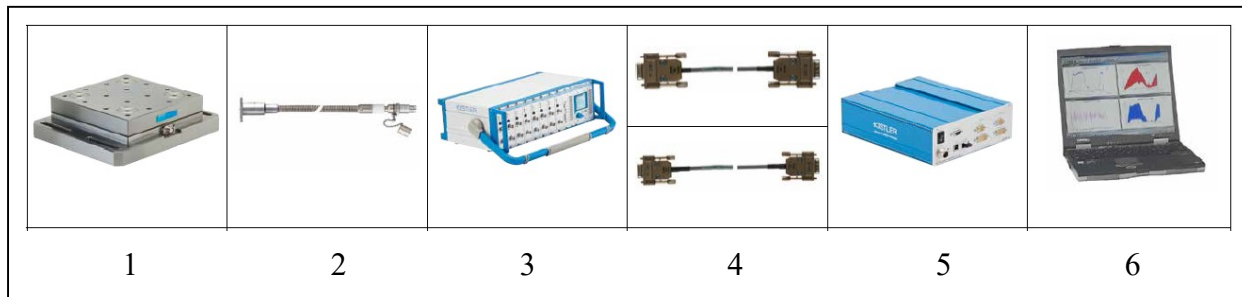
Při sedmém testu byla zabezpečena funkčnost systému a docházelo tak k pozorovatelnému zvyšování posuvové rychlosti.

Další experiment se bude týkat analýzy reakce systému na změnu zatížení vřetena, především hodnocení stability řezu a zjištění, zda-li se výrazněji změni působící síly. K tomuto účelu bude použit obrobkový dynamometr, který bude popsán v dalších kapitolách.

5.2. Druhý experiment

Druhým experimentem na stroji DMU 40 eVo bylo měření sil působících na obrobek za pomoci obrobkového dynamometru. Následně také bude analyzován průběh naměřených dat z dynamometru při zapnuté funkci AFC a jeho porovnání oproti obrábění bez této funkce.

Pro měření byl využit obrobkový dynamometr Kistler 9255C v sestavě se zesilovačem náboje Kistler 5080A, digitalizační kartou Kistler 5697A a notebookem s nainstalovaným softwarem DynoWare (Obr. 25).



Obr. 25: Sestava dynamometru [11]

- 1 – Dynamometr
- 2 – Vysokoimpedační vodič mezi dynamometrem a nábojovým zesilovačem
- 3 – Nábojový zesilovač
- 4 – Propojovací vodiče mezi nábojovým zesilovačem a digitalizační kartou
- 5 – Digitalizační karta
- 6 – Počítač se softwarem DynoWare

5.2.1 Obrobkový dynamometr

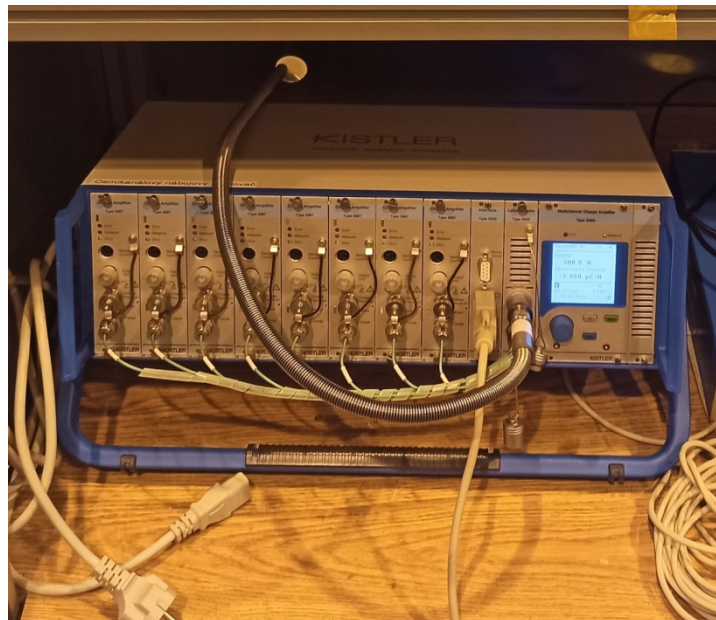
Obrobkový dynamometr Kistler 9255C (Obr. 26) se skládá ze čtyř piezoelektrických tří směrových snímačů sil. Každý z těchto snímačů umožňuje snímat síly ve všech třech osách (X, Y a Z) a díky tomu je možné kromě sil také změřit momenty působící na obrobek, který je upevněn na desce dynamometru. [11]



Obr. 26: Obrobkový dynamometr Kistler 9255C [autor]

5.2.2 Nábojový zesilovač

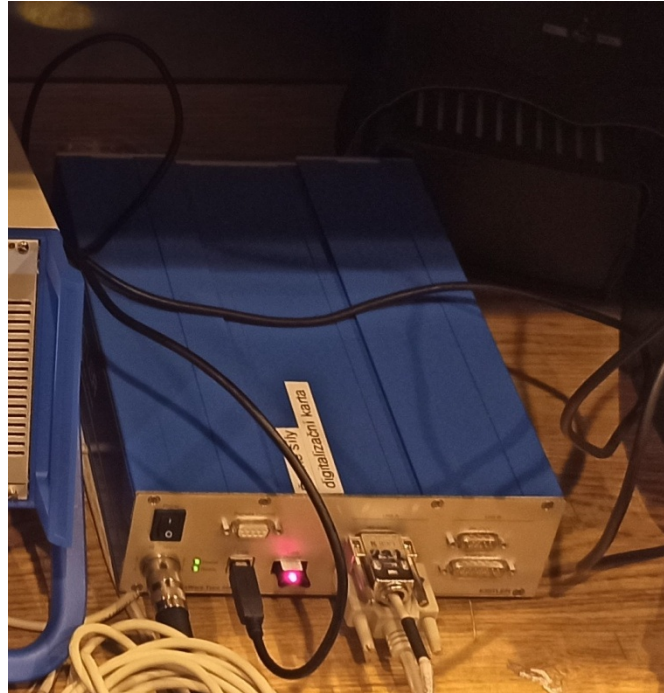
V sestavě s obrobkovým dynamometrem je nutné použít i nábojový zesilovač jako je například Kistler 5080A (Obr. 27). Tento zesilovač má za úkol převádět náboj generovaný jednotlivými piezoelektrickými snímači v obrobkovém dynamometru na odpovídající hodnotu napětí, kterou je možné dále zpracovávat. [12]



Obr. 27: Nábojový zesilovač Kistler 5080A [autor]

5.2.3 Digitalizační karta

Hlavním účelem digitalizační karty Kistler 5697A (Obr. 28) je převod analogového signálu z nábojového zesilovače na digitální signál, který je možné zpracovat počítačem. Také umožňuje ovládání nábojového zesilovače počítačem. Tyto změny mohou zahrnovat například změnu rozsahu měřených sil. [13]



Obr. 28: Digitalizační karta Kistler 5697A [autor]

5.2.4 Software

Software DynoWare je univerzální program použitelný pro různé typy dynamometrů a různé kombinace měřících řetězců. Především zpracovává informace získané z měřícího řetězce a převádí je do podoby, kterou je možné analyzovat. Především se jedná o grafy průběhů sil a momentů působících na obrobek. Tyto grafy je následně možné převádět do zpráv o měření.

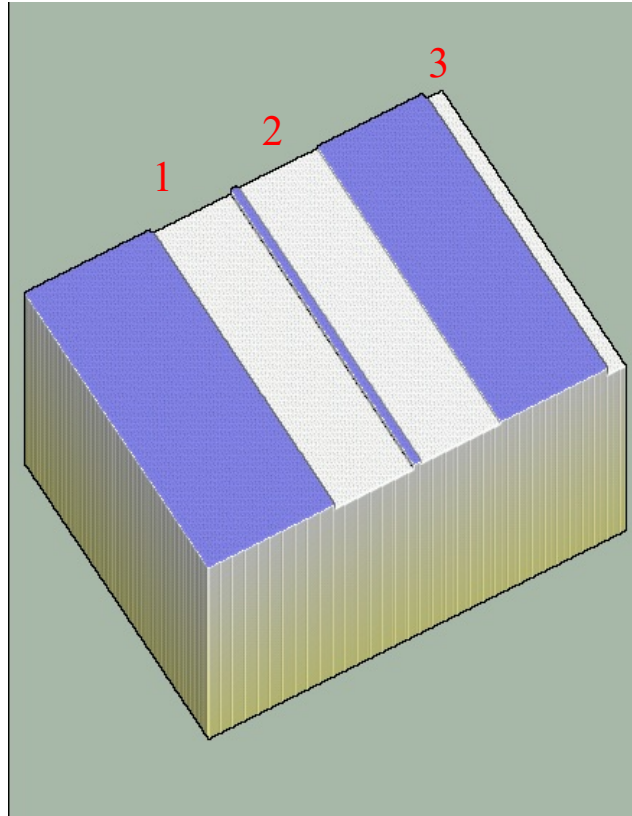
5.2.5 Naplánování experimentu

Při plánování experimentu byl nejdříve vybrán polotovar, na kterém bude experiment proveden a také byl pro tento experiment vybrán nástroj (Tab. 4). Bylo rozhodnuto, že v první části experimentu bude využit program z předcházejícího experimentu s drobnými úpravami, které zahrnují především úpravu rozměrů polotovaru a umístění jednotlivých drážek (Obr. 29). Upravený NC program pro výrobu drážek je uveden v Příloze 2.

Parametry experimentu

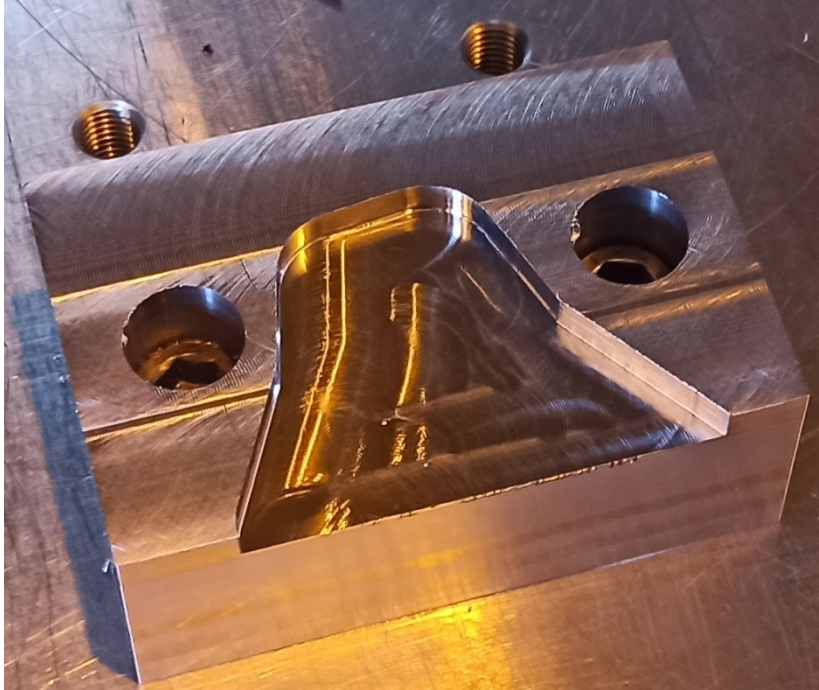
Tab. 4: Plánované parametry druhého experimentu

Materiál obrobku	12 050
Rozměr obrobku	105x80x75 mm
Nástroj	Fréza PR20 r0,8 z4



Obr. 29: Polotovar s drážkami [autor]

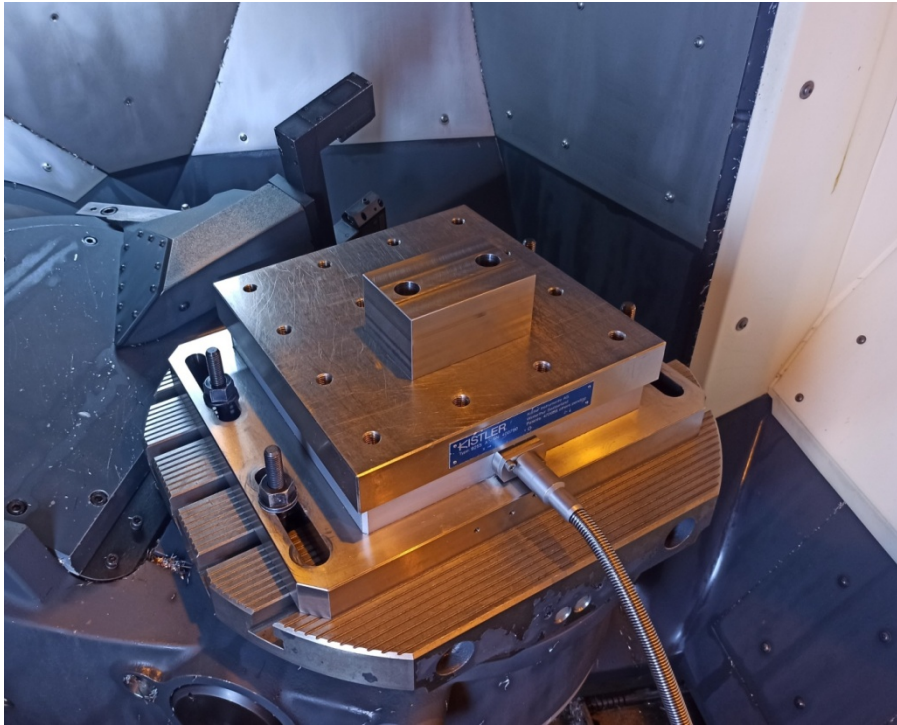
Pro druhou část experimentu byl vytvořen program pro vytvoření kapsy v polotovaru (Obr. 30). NC program této kapsy je uveden v Příloze 3. Cílem této části bylo zjištění chování systému při změnách směru během obrábění. Při obrábění této kapsy se také bude měnit tloušťka odřezávané vrstvy, která má také vliv na zatížení vřetene.



Obr. 30: Polotovár s kapsou [autor]

5.2.6 Příprava experimentu

Prvním krokem při přípravě experimentu bylo upnutí desky dynamometru k otočnému stolu stroje DMU 40 eVo pomocí šroubů a vyrovnání souřadnicových systémů dynamometru a obráběcího stroje (Obr. 31). Také bylo nutné upnout polotovár k desce dynamometru tak, aby nedocházelo k nežádoucímu vychýlení polotováru a zároveň aby bylo možné tento polotovár obrábět dle požadavků experimentu. K tomuto účelu byly do polotováru vyvrtány díry pro šrouby. Tyto šrouby upnuly polotovár k desce dynamometru, protože na desce jsou díry se závitem.



Obr. 31: Upevnění dynamometru a polotovaru [autor]

Dalším krokem bylo připojení dynamometru do měřícího řetězce s nábojovým zesilovačem, digitalizační kartou a počítačem s nainstalovaným systémem DynoWare od společnosti Kistler (Obr. 32).

Po zapojení všech komponent bylo nutné nastavit měřící rozsah. Tento rozsah byl určen na základě odhadu sil, které budou působit na obrobek. Také byla nastavena délka měření od jeho spuštění. Tato hodnota se však v průběhu experimentu měnila.



Obr. 32: Součásti měřícího řetězce [autor]

5.2.7 Provedení experimentu

Po zapojení a zprovoznění dynamometru byly přímo na stroji provedeny úpravy NC programu pro první část experimentu. Tyto úpravy zahrnovaly především úpravu umístění drážek, řezné rychlosti, rychlosti posuvu a hloubky řezu (Tab. 5). Hloubka řezu se však v průběhu experimentu měnila, aby bylo možno pozorovat chování systému při různých zatíženích.

Tab. 5: Skutečné parametry druhého experimentu

Nástroj	Fréza PR20 r0,8 z4	
	Číslo 103 v tabulce nástrojů	
Řezné podmínky	Řezná rychlost	220 m/min
	Hloubka řezu	2 mm
	Posuvová rychlost	0,2 mm/ot

Druhý experiment byl proveden s využitím strategie AFC z předchozího experimentu. V tabulce jsou uvedeny parametry použité strategie s názvem „Sedlak“ (Obr. 33).

```
File: AFC.TAB
NR   AFC      FMIN FMAX FIDL FENT OULD POUT SENS PLC
0    Standard  70   125  100  80   E    5   100  0
1    Sedlak   70   150  130  80   E    2   100  0
(END)
```

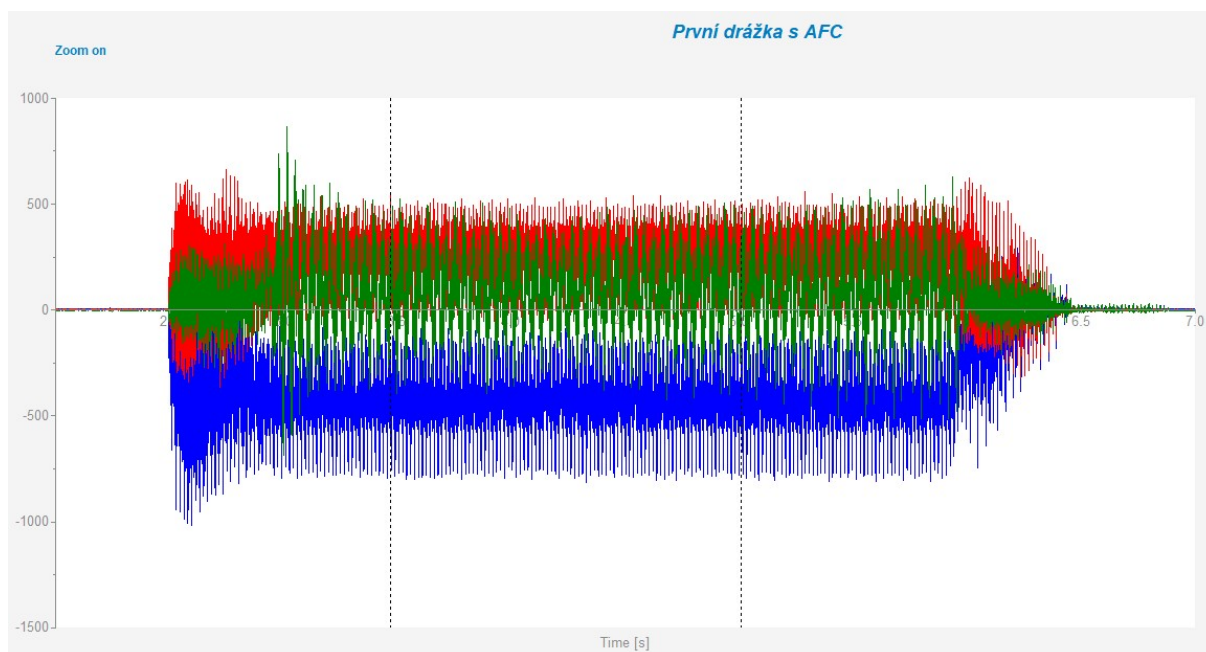
Obr. 33: Parametry AFC pro druhý experiment [autor]

Jeden z důležitých parametrů FIDL, určující posuvovou rychlost mimo materiál, byl navýšen na 130% nominální hodnoty posuvu. Kvůli tomu je možné, že hodnoty sil na počátku měření budou ovlivněny touto hodnotou. Funkce AFC totiž rozeznává přítomnost materiálu pouze podle zatížení vřetene a je tedy možné, že došlo ke zpoždění reakce stroje a navýšení hodnot naměřených sil při vnikání nástroje do materiálu.

5.2.8 První měření

Při prvním měření byly využity hodnoty funkce AFC získané při předcházejícím experimentu. Díky čemuž bylo zjištěno chování systému, když se změní materiál obrobku, ale nezmění se hodnoty v nastavení funkce AFC. Toto měření také sloužilo k ověření nastavení rozsahu sil měřených dynamometrem.

První drážka

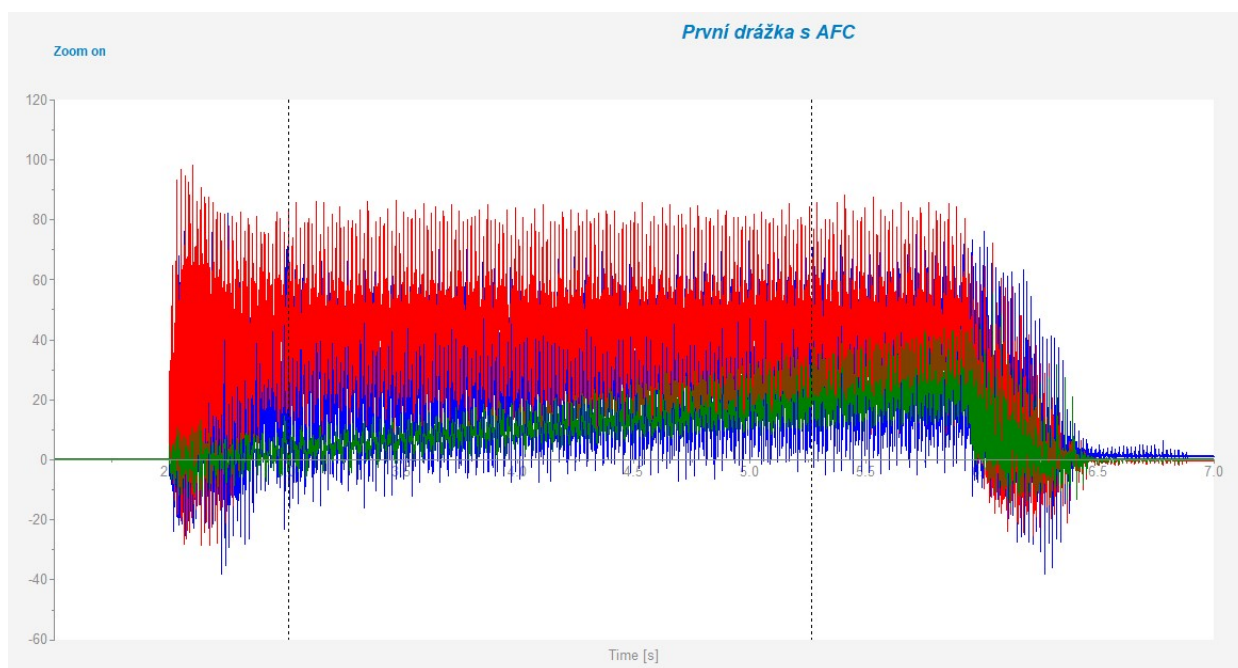


Obr. 34: První graf sil prvního měření [autor]

Tab. 6: Parametry prvního grafu sil prvního měření

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
F_x [N]	-301,6	-1038	430,7	-1378	437,2
F_y [N]	170,0	-383,5	691,4	776,9	243,3
F_z [N]	67,5	-762,1	892,8	308,5	185,2

Jelikož se nejednalo o diametrálně rozdílné materiály, nedocházelo k velkým výkyvům (Obr. 34). Jak bylo možno předpokládat, maximum naměřených sil se nachází v oblasti vniknutí nástroje do materiálu, kde maximální síla dosahovala 1000 N ve směru osy X. Nejvyšší průměrná hodnota sil byla 437 N taktéž ve směru osy X (Tab. 6).



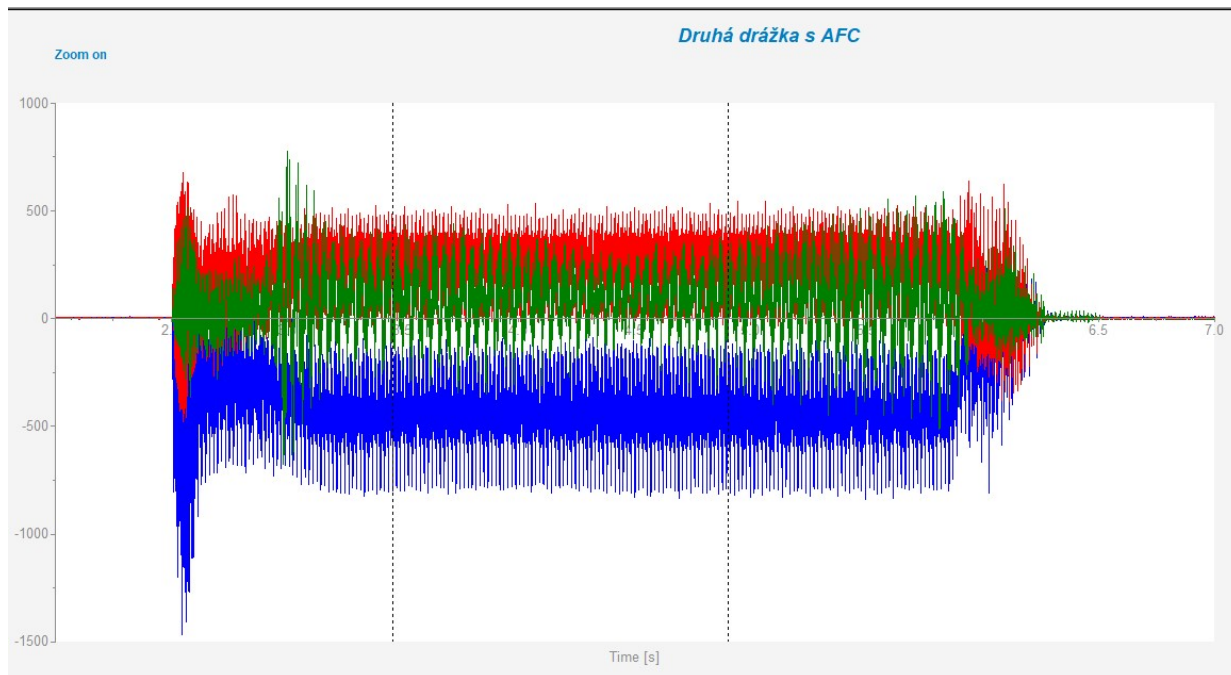
Obr. 35: První graf momentů prvního měření [autor]

Tab. 7: Parametry prvního grafu momentů prvního měření

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
M_x [Nm]	24,69	-40,53	81,87	106,4	32,29
M_y [Nm]	35,25	-33,64	100,3	151,1	42,37
M_z [Nm]	10,46	-18,87	55,50	45,1	14,5

Stejně tak naměřené momenty nevykazovaly žádné známky nestability řezu (Obr. 35). Nejvyšší naměřený moment byl okolo osy Y a dosahoval 100 Nm. Průměrná hodnota však byla 42 Nm (Tab. 7).

Druhá drážka

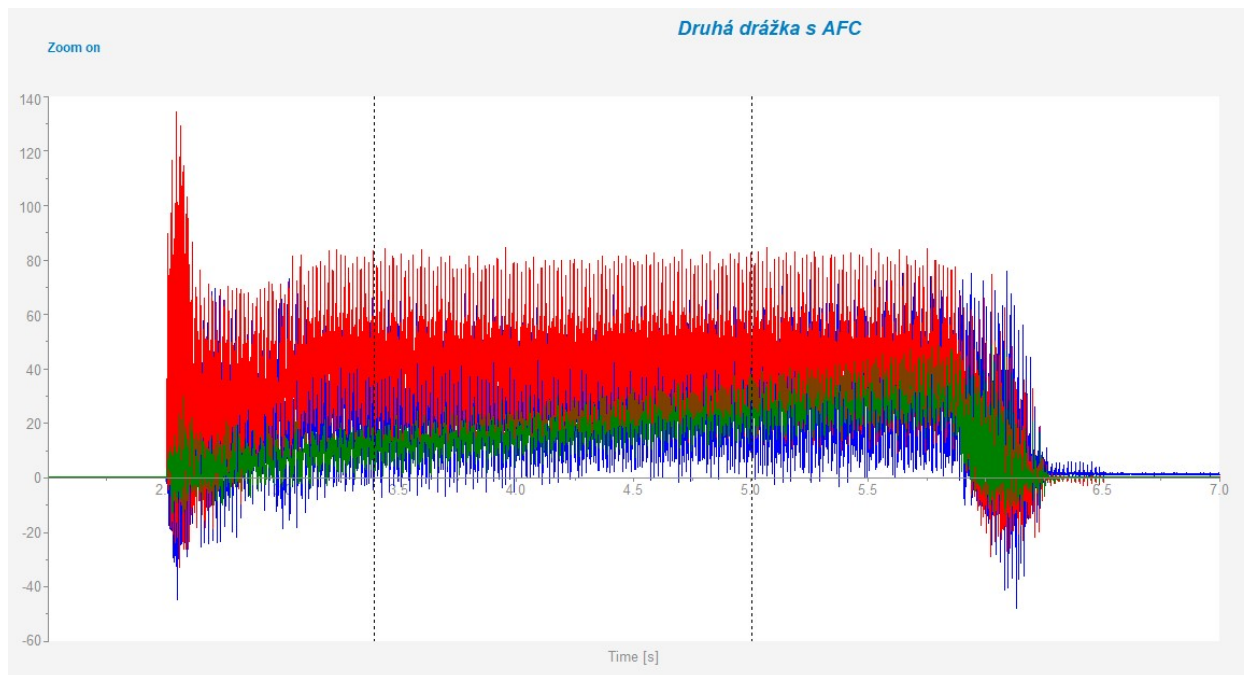


Obr. 36: Druhý graf sil prvního měření [autor]

Tab. 8: Parametry druhého grafu sil prvního měření

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
F_x [N]	-342,1	-1472	425,1	1375	413,7
F_y [N]	192,3	-520,5	724,2	772,9	253,9
F_z [N]	76,8	-730,2	965,1	308,7	174,6

U druhé drážky však při měření sil došlo k většímu výkyvu na počátku měření (Obr. 36). Maximální síla ve směru osy X dosahovala hodnot téměř 1500 N. Po tomto výkyvu, ale měřené síly klesly na podobné průměrné hodnoty jako u první drážky (Tab. 8).



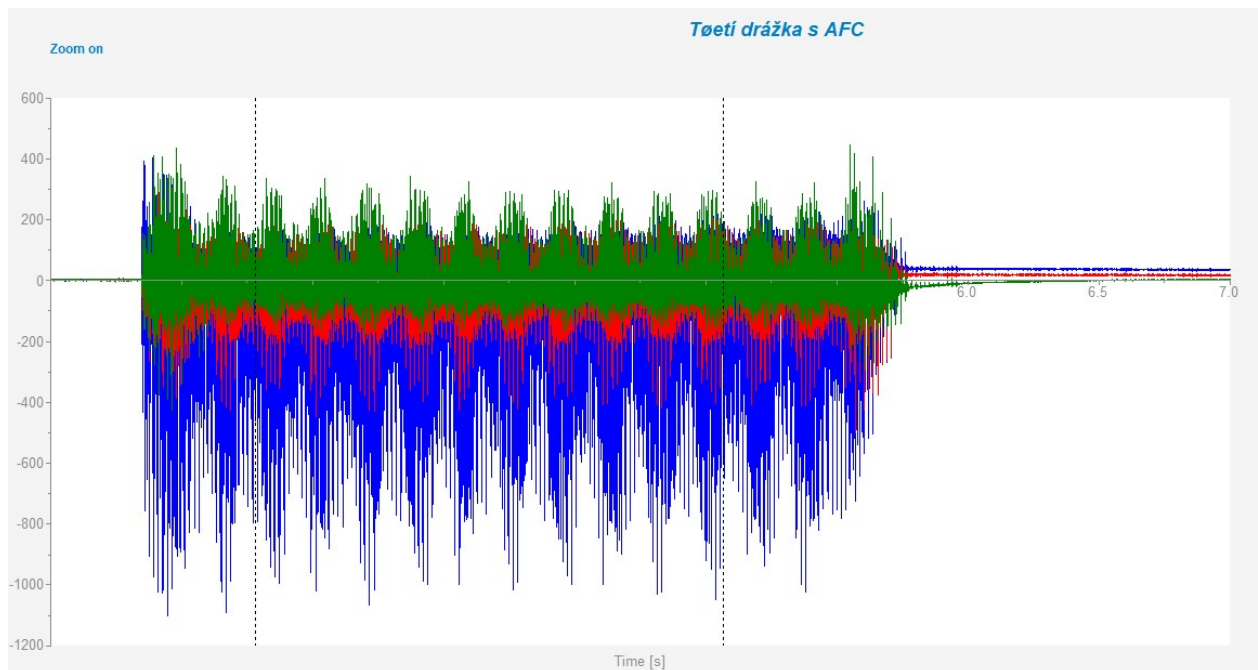
Obr. 37: Druhý graf momentů prvního měření [autor]

Tab. 9: Parametry druhého grafu momentů prvního měření

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
Mx [Nm]	24,99	-56,60	77,82	105,5	32,06
My [Nm]	33,87	-34,54	137,7	143,0	41,14
Mz [Nm]	14,52	-14,68	53,77	61,28	18,41

Stejný výkyv na počátku měření vykazují i naměřené momenty (Obr. 37). Nejvyšší naměřená hodnota dosahuje 137 Nm okolo osy Y. Průměrné hodnoty naměřených momentů jsou však téměř totožné s momenty naměřenými u první drážky (Tab. 9).

Třetí drážka

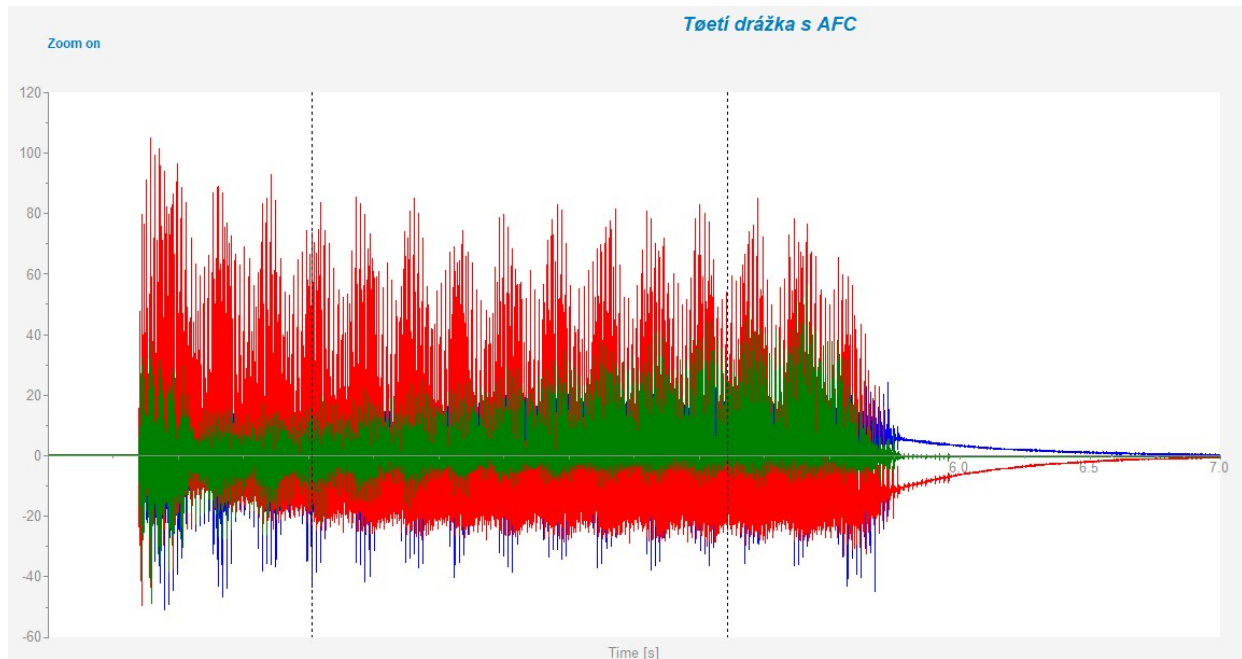


Obr. 38: Třetí graf sil prvního měření [autor]

Tab. 10: Parametry třetího grafu sil prvního měření

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
F_x [N]	122,1	-1166	487,8	-383,9	293,3
F_y [N]	59,22	-499,5	322,2	-186,1	115,2
F_z [N]	1,654	-431,5	493,3	5,198	99,08

Při obrábění této drážky nebyla fréza v materiálu celou svou šířkou a zatížení vřetena tedy bylo výrazně menší. Kvůli tomu ale systém nebyl schopen rozlišit, zda je nástroj v řezu nebo zda je mimo materiál (Obr. 38). Tím docházelo k výrazným změnám posuvové rychlosti a tomu odpovídá i graf naměřených sil, kdy v téměř pravidelných intervalech docházelo k nárůstu a následnému poklesu působících sil. Maximální výkyvy dosahovaly až 1166 N, ale průměrná hodnota zatížení ve směru osy X byla 316 N (Tab. 10).



Obr. 39: Třetí graf momentů prvního měření [autor]

Tab. 11: Parametry třetího grafu momentů prvního měření

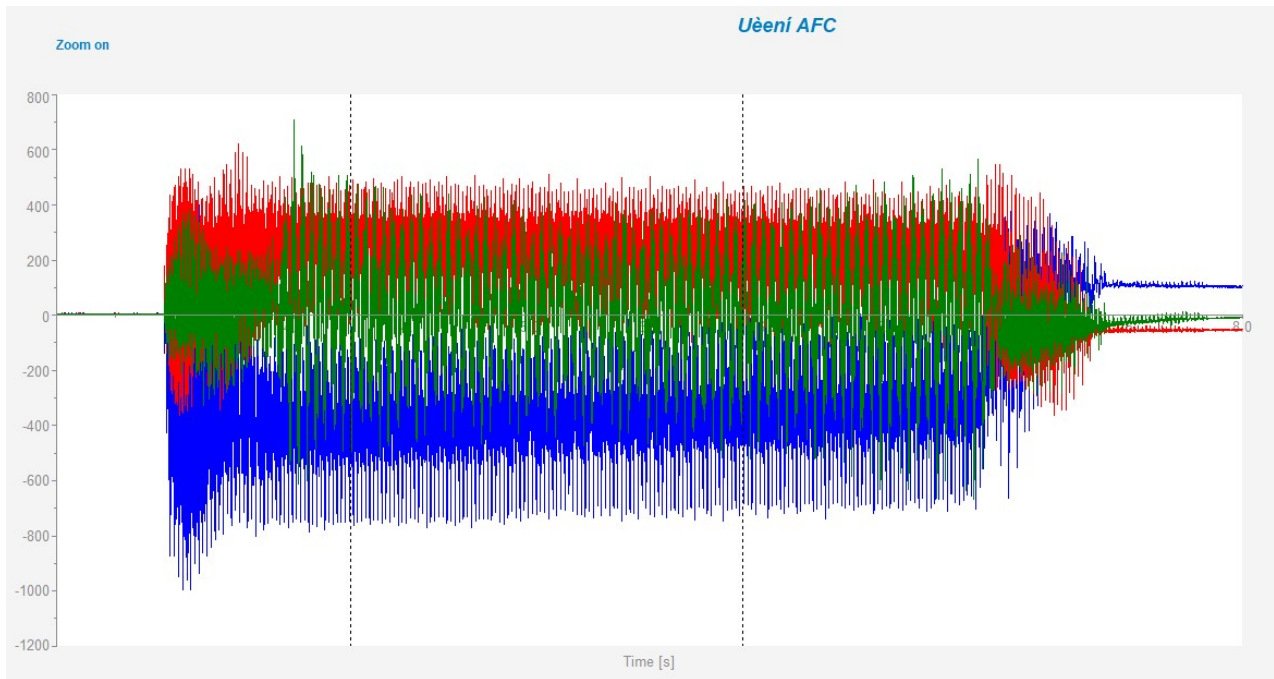
	Mean	Min	Max	Integral	RMS
Mx [Nm]	-0,838	-51,59	34,53	-2,476	10,01
My [Nm]	1,728	-54,06	107,4	5,099	25,5
Mz [Nm]	1,590	-48,83	56,00	4,693	9,06

Stejně periodické výkyvy lze nalézt i v záznamu měření momentů (Obr. 39), kdy nejvyšší naměřený moment dosahuje 107 Nm a průměrný moment na ose Y dosahuje hodnoty 25,5 Nm (Tab. 11).

5.2.9 Druhé měření

Při tomto měření byly vymazány předchozí hodnoty funkce AFC, aby bylo možno uzpůsobit tento systém novému materiálu obrobku a opotřebením nástroje. Z tohoto důvodu se systém při obrábění první drážky choval jako by byla funkce AFC vypnutá.

První drážka

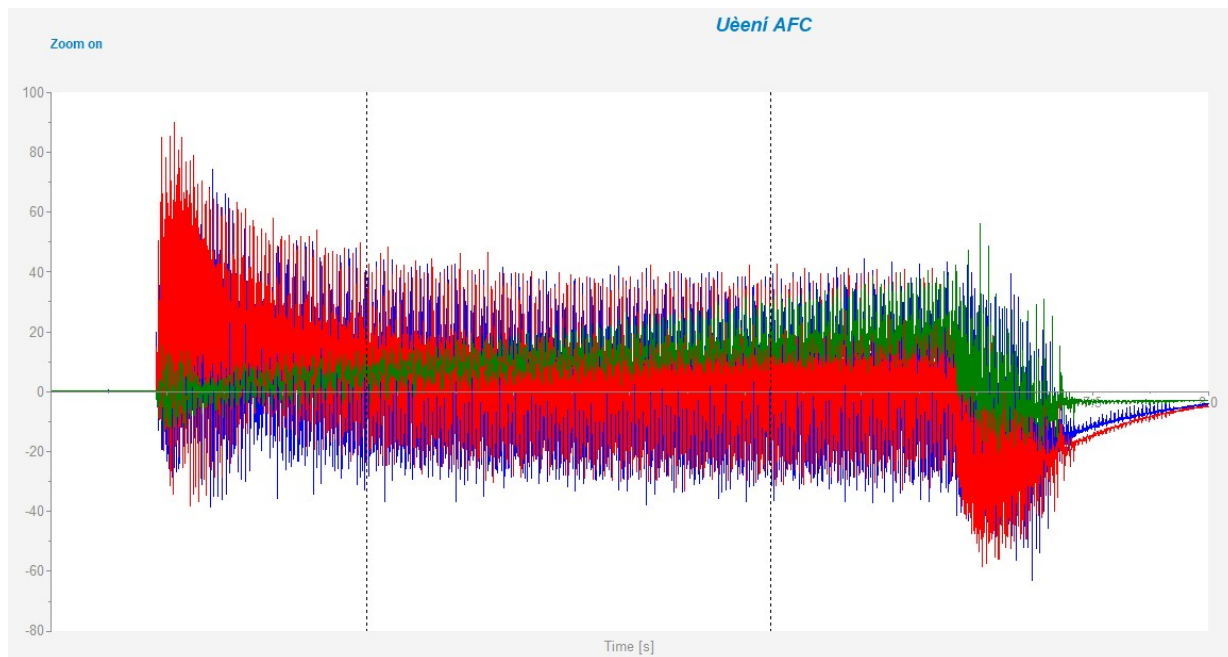


Obr. 40: První graf sil druhého měření [autor]

Tab. 12: Parametry prvního grafu sil druhého měření

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
F_x [N]	-278,4	-1088	403,5	-1125	364,6
F_y [N]	160,9	-445,9	647,8	650,2	233,7
F_z [N]	4,023	-686,6	705,0	16,26	191,0

Na první drážce, která byla obrobena konstantní posuvovou rychlostí (Obr. 40), dosahovala nejvyšší naměřená síla 1088 N ve směru osy X. Tato síla měla také nejvyšší průměrnou hodnotu po ustálení počátečních výkyvů a to 364,6 N (Tab. 12).



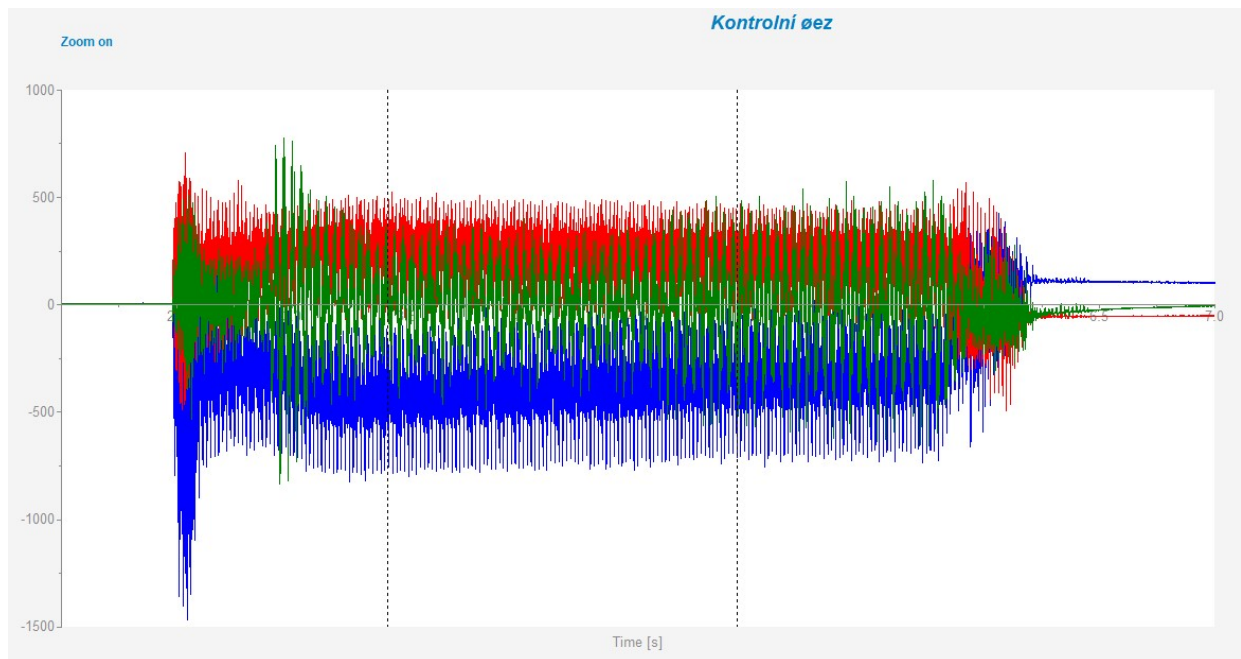
Obr. 41: První graf momentů druhého měření [autor]

Tab. 13: Parametry prvního grafu momentů druhého měření

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
Mx [Nm]	1,365	-67,04	77,2	5,644	19,25
My [Nm]	1,518	-62,37	97,97	6,274	21,36
Mz [Nm]	9,473	-20,6	56,03	39,16	13,59

V případě momentů (Obr. 41) dosahoval nejvyšších hodnot točivý moment okolo osy Y a to téměř- 100 Nm. Nejvyšší průměrnou hodnotu měl také točivý moment okolo osy X a to 21,36 Nm (Tab. 13). Je však pozoruhodné, že průměrné hodnoty naměřených momentů Mx a My jsou velmi vyrovnané a nejsou mezi nimi velké rozdíly.

Druhá drážka



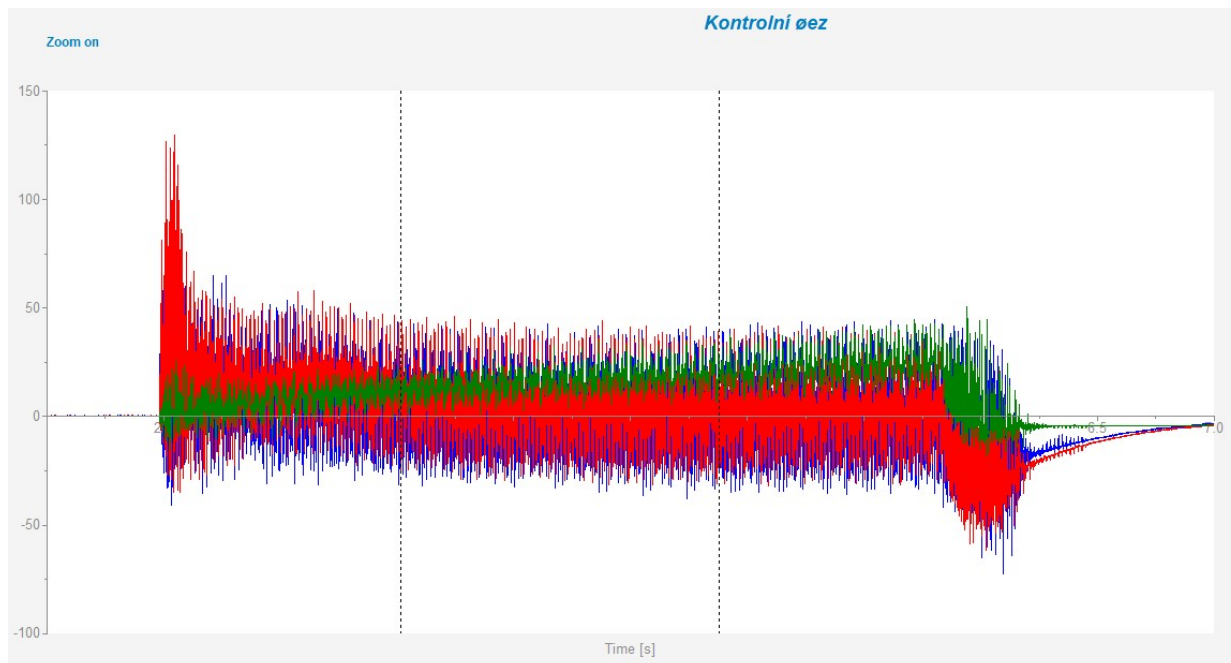
Obr. 42: Druhý graf sil druhého měření [autor]

Tab. 14: Parametry druhého grafu sil druhého měření

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
F_x [N]	-297,6	-1491	450,3	-1138	377,3
F_y [N]	170,1	-543,9	723	650,7	237,3
F_z [N]	5,785	-833,8	898,7	22,13	203,9

Na rozdíl od sil působících při vytváření první drážky, byl při druhé drážce naměřen velký výkyv sil při vnikání nástroje do obrobku, dosahující až 1500 N ve směru osy X (Obr. 42). V tomto směru má síla i nejvyšší průměrnou hodnotu 377 N, která je téměř shodná s naměřenou silou z první drážky. Tato hodnota je však nižší než hodnoty sil naměřené při prvním měření (Tab. 14).

Počáteční výkyv lze přisuzovat zvýšené hodnotě posuvové rychlosti, když je nástroj mimo materiál. Tento výkyv bude následkem opožděné reakce stroje, který materiál rozezná pouze podle zatížení vřetene a při vniknutí nástroje do materiálu má tedy nástroj vyšší posuvovou rychlost. Když řídicí systém stroje zjistí navýšení zatížení vřetene, zareaguje stroj snížením posuvové rychlosti a to vede ke snížení působících sil.



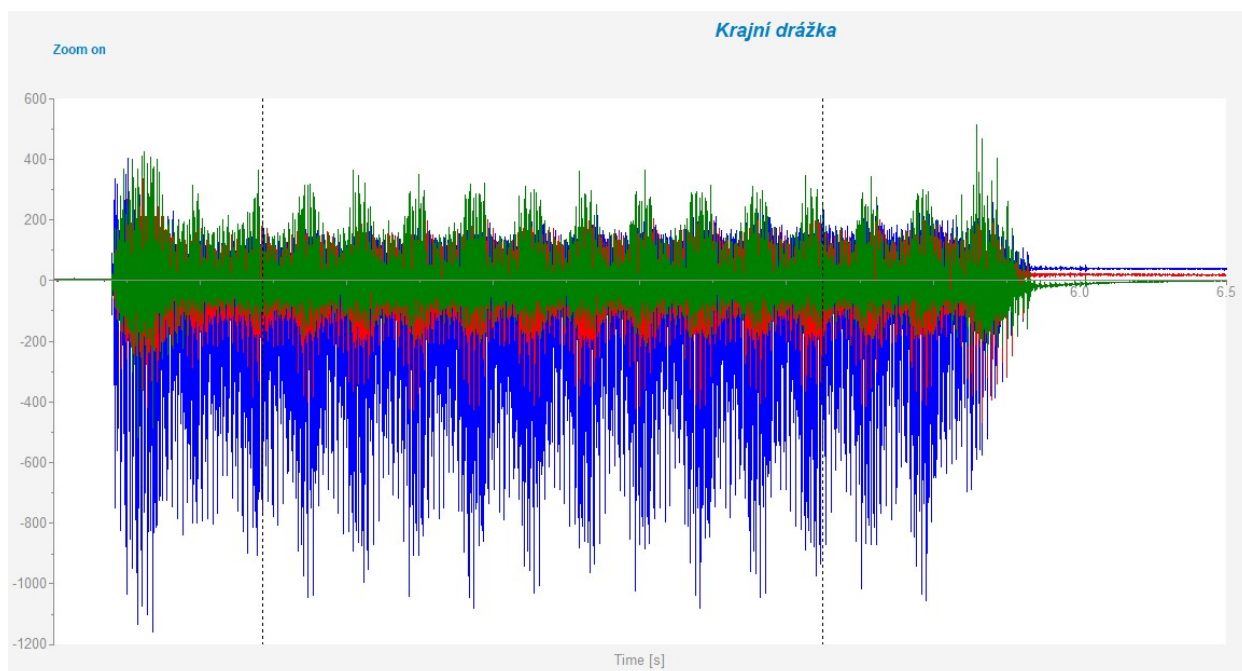
Obr. 43: Druhý graf momentů druhého měření [autor]

Tab. 15: Parametry druhého grafu momentů druhého měření

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
Mx [Nm]	2,641	-74,33	85,66	9,898	19,61
My [Nm]	3,009	-66,45	129,4	11,28	21,55
Mz [Nm]	14,35	-18,5	51,45	53,75	17,6

Graf naměřených točivých momentů je velmi vyrovnaný (Obr. 43). Nejvyšší hodnota dosahuje hodnoty 129 Nm okolo osy Y. Po ustálení tohoto přechodového jevu jsou však hodnoty velmi vyrovnané a nejvyšší průměrná hodnota je My a to 21,55 Nm (Tab. 15). Stojí za povšimnutí, že oproti momentům působícím při prvním měření jsou tyto hodnoty nižší více než o polovinu.

Třetí drážka

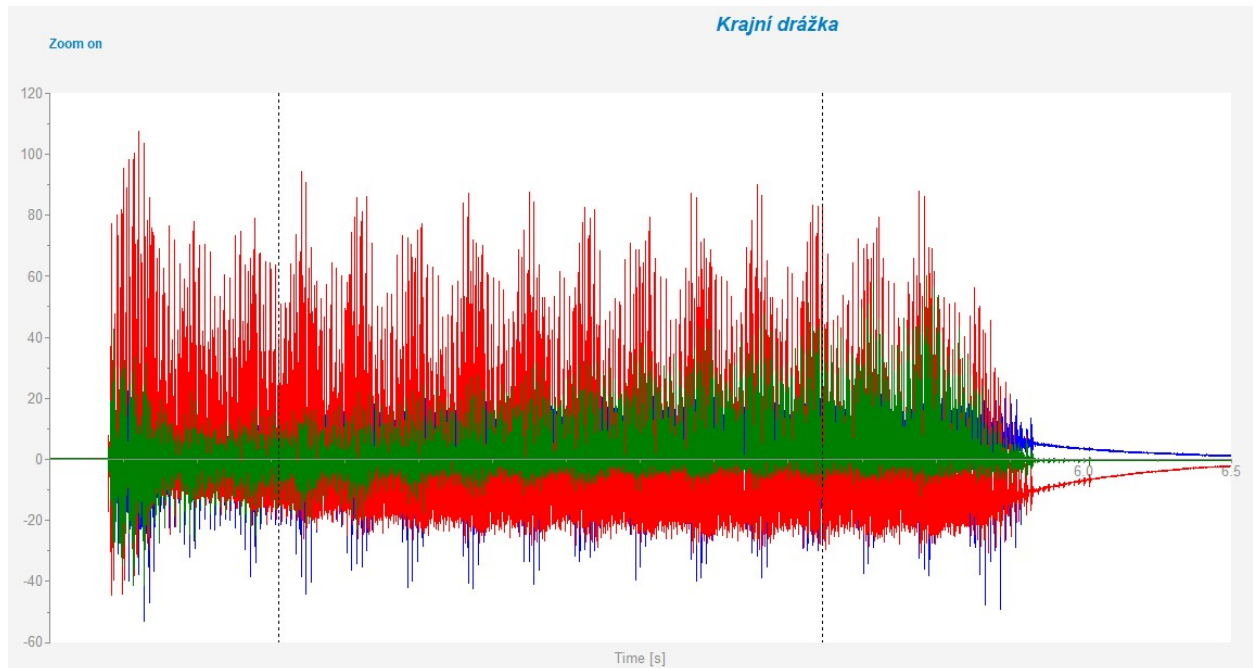


Obr. 44: Třetí graf sil druhého měření [autor]

Tab. 16: Parametry třetího grafu sil druhého měření

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
Fx [N]	-127,4	-1162	521,1	-402,9	293,9
Fy [N]	-58,84	-499,2	336,7	-186,1	112,8
Fz [N]	2,431	-518,7	520,4	7,686	99,37

Při výrobě krajní drážky se opět objevily periodické výkyvy přesahující v maximech 1100 N (Obr. 44). Ani při nových hodnotách funkce AFC systém nedokáže rozlišit, zda je nástroj v materiálu nebo ne. Nejvyšší průměrná hodnota dosahuje 294 N ve směru osy X (Tab. 16).



Obr. 45: Třetí graf momentů druhého měření [autor]

Tab. 17: Parametry třetího grafu momentů druhého měření

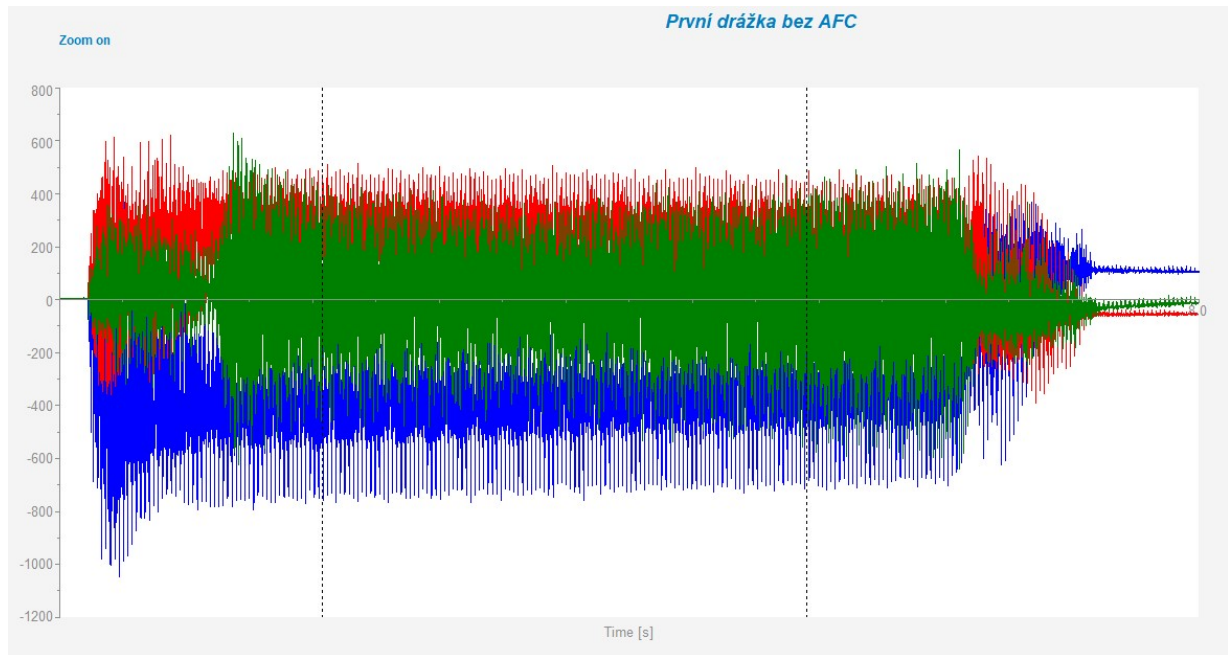
	Mean	Min	Max	Integral	RMS
Mx [Nm]	-0,6464	-53,21	33,92	-2,064	9,313
My [Nm]	1,412	-52,29	107,5	4,509	24,08
Mz [Nm]	1,629	-41,31	63,38	5,201	9,206

Naměřené momenty odrážejí výkyvy v silách (Obr. 45), kdy největší výkyvy přesahují 100 Nm a nejvyšší průměrná hodnota je 24 Nm okolo osy Y (Tab. 17).

5.2.10 Třetí měření

Třetí měření představuje měření sil a momentů s vypnutou funkcí AFC, konstantní hloubkou řezu 2 mm a konstantní posuvové rychlosti. Takto je možné porovnat působící síly a momenty jak při adaptivním řízení posuvu tak při konstantní hodnotě posuvu.

První drážka

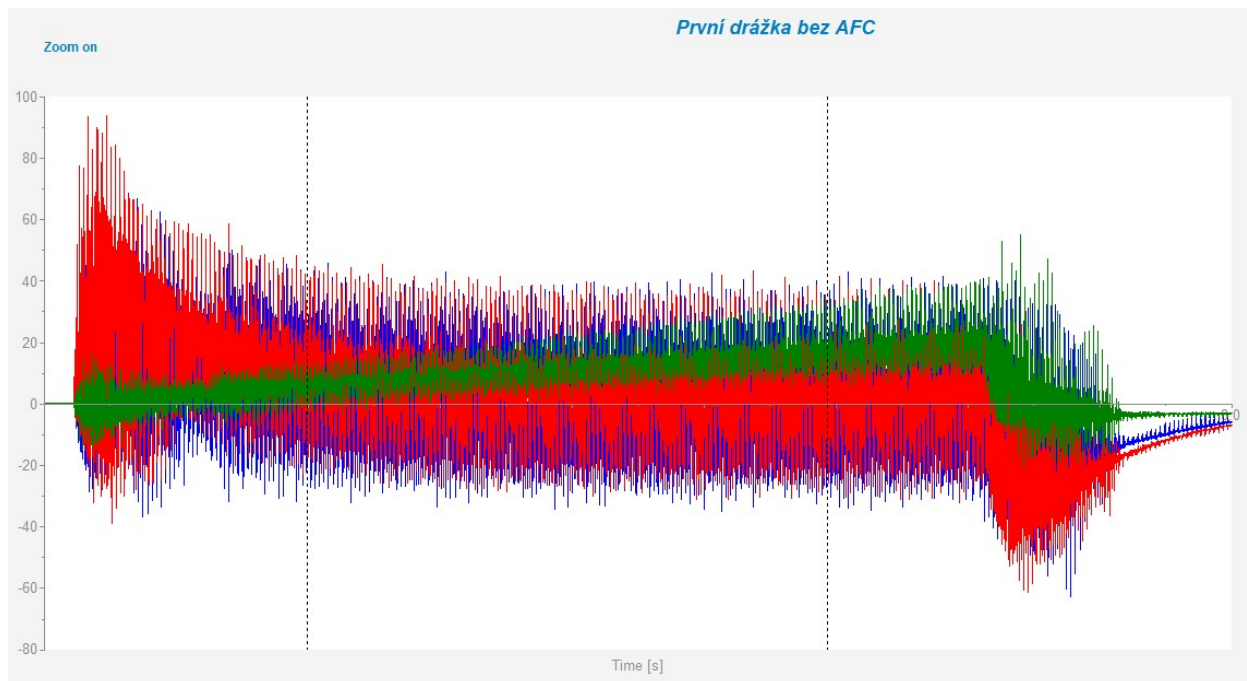


Obr. 46: První graf sil třetího měření [autor]

Tab. 18: Parametry prvního grafu sil třetího měření

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
F_x [N]	-279,1	-1072	425	-1132	364
F_y [N]	160,7	-438,3	650,1	651,7	231,8
F_z [N]	4,192	-660,0	687,5	17	187,3

Vzhledem k faktu, že při druhém měření byla první drážka určena k aktualizaci hodnot funkce AFC, byla obrobena jako kdyby byla tato funkce vypnuta (Obr. 46) a proto jsou naměřené hodnoty v obou případech téměř totožné (Tab. 18).



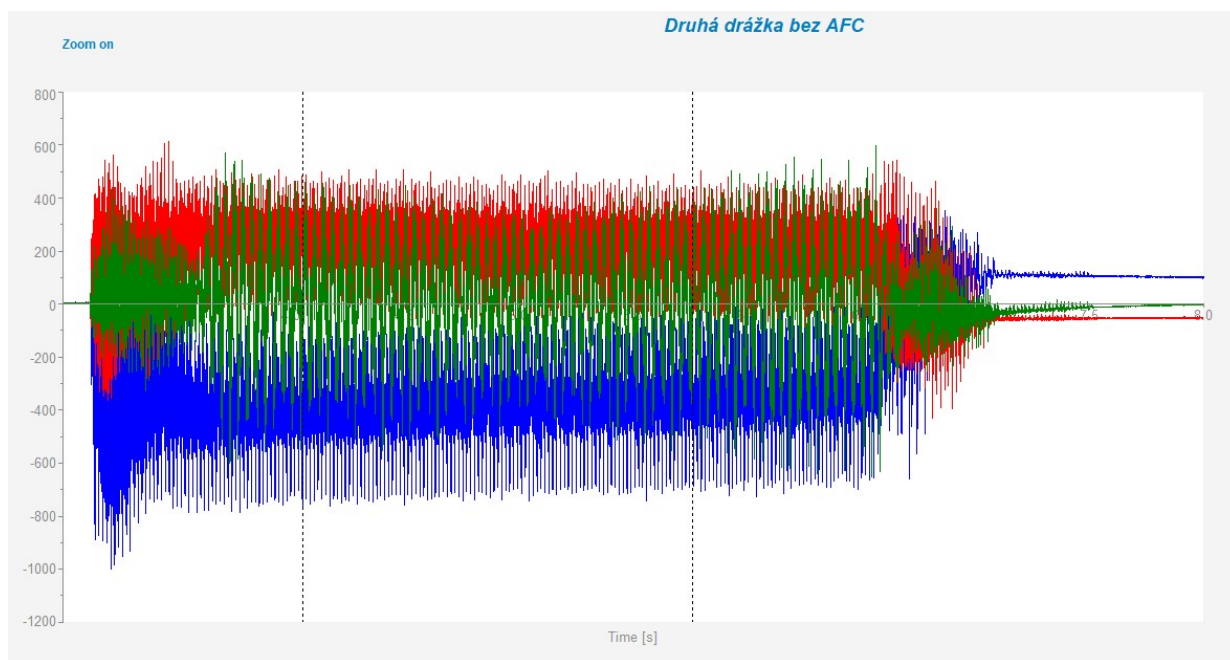
Obr. 47: První graf momentů třetího měření [autor]

Tab. 19: Parametry prvního grafu momentů třetího měření

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
Mx [Nm]	1,596	-64,02	71,05	6,473	18,69
My [Nm]	1,794	-61,32	94,15	7,275	20,91
Mz [Nm]	9,773	-21,82	55,83	39,64	13,78

I graf naměřených momentů má téměř totožný průběh jako graf naměřených momentů působících při obrábění první drážky druhého měření (Obr. 47). Naměřené hodnoty se také shodují s hodnotami naměřenými při obrábění první drážky druhého měření (Tab. 19). Tato shoda dokazuje, že při kalibraci funkce AFC je nutné počítat s tím, že stroj nebude reagovat na zvýšení zatížení a je proto větší šance poškození nástroje než při dalším obrábění.

Druhá drážka

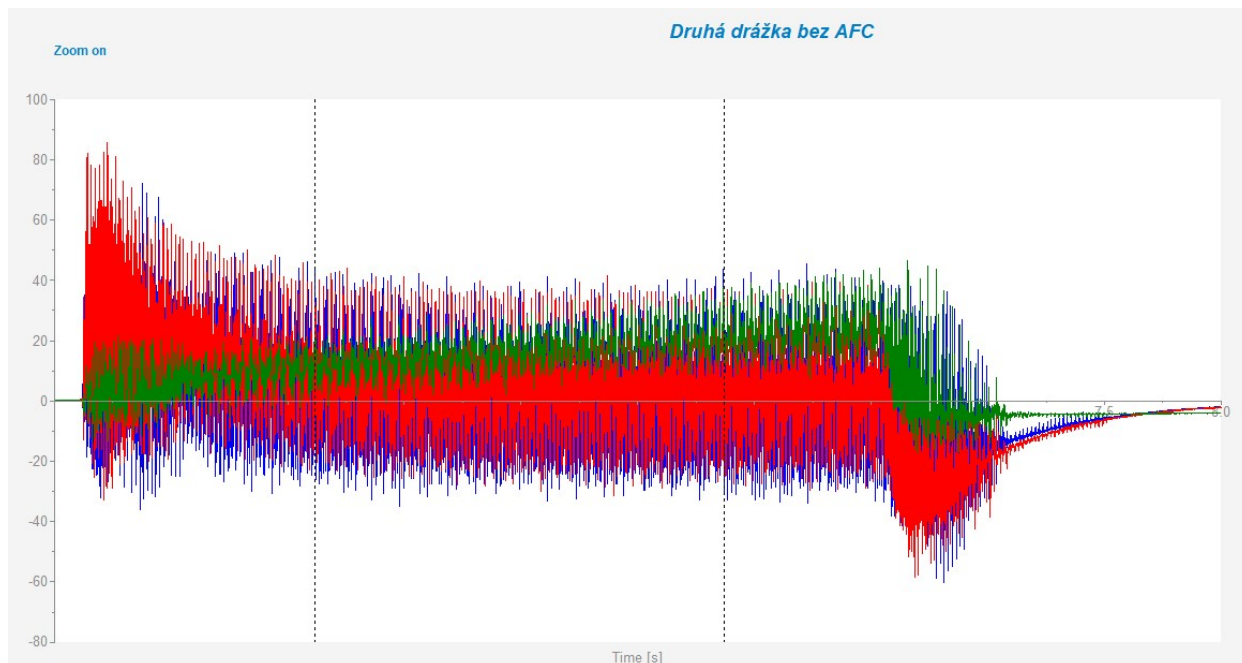


Obr. 48: Druhý graf sil třetího měření [autor]

Tab. 20: Parametry druhého grafu sil třetího měření

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
F _x [N]	-272,5	-1079	410	-1127	360,4
F _y [N]	157,1	-438,3	678,8	649,6	229,3
F _z [N]	3,641	-676,1	597,3	15,05	195,9

Při vypnuté funkci AFC samozřejmě nedochází k tak velkému počátečnímu výkyvu jako při zapnuté funkci AFC (Obr. 48), protože stroj nenajíždí do materiálu vyšší posuvovou rychlostí, na rozdíl od druhého měření. Průměrné hodnoty naměřených sil jsou však téměř totožné (Tab. 20).



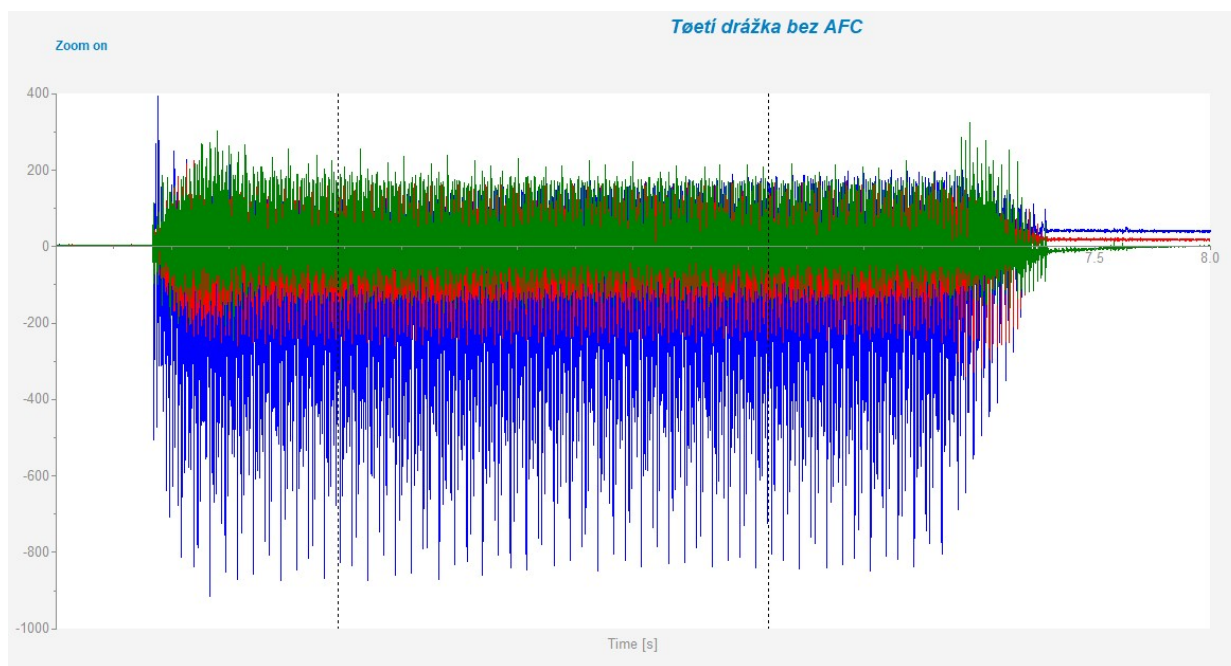
Obr. 49: Druhý graf momentů třetího měření [autor]

Tab. 21: Parametry druhého grafu momentů třetího měření

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
Mx [Nm]	1,886	-65,81	72,18	7,479	18,83
My [Nm]	2,031	-60,05	94,24	8,052	20,36
Mz [Nm]	13,58	-18,17	46,97	53,83	17,12

I v případě naměřených momentů v grafu není patrný počáteční výkyv (Obr. 49). Dokonce jsou průměrné hodnoty momentů přibližně o 1 Nm nižší než v případě zapnuté funkce AFC (Tab. 21).

Třetí drážka

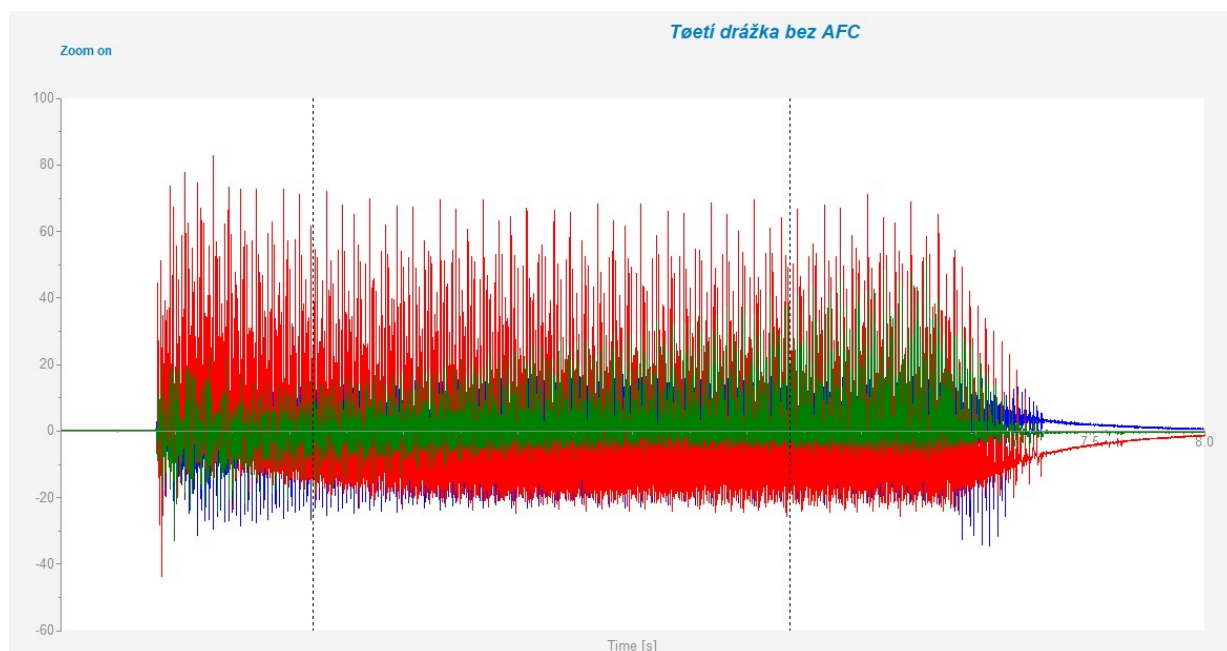


Obr. 50: Třetí graf sil třetího měření [autor]

Tab. 22: Parametry třetího grafu sil třetího měření

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
F_x [N]	-110,3	-916,7	392,4	-428,7	263,3
F_y [N]	-46,28	-342,8	238,4	-179,9	92,1
F_z [N]	1,623	-324,4	362,1	6,310	83,52

V případě krajní drážky vykazuje graf naměřených sil stabilnější řez (Obr. 50). Chybí zde periodické výkyvy působících sil, protože posuvová rychlost je konstantní a řídicí systém proto nemusí reagovat na změny v zatížení vřetena, protože to je také téměř konstantní. Průměrné hodnoty sil jsou však pouze o maximálně několik desítek newtonů než průměrné hodnoty sil při vypnuté funkci AFC (Tab. 22).



Obr. 51: Třetí graf momentů třetího měření [autor]

Tab. 23: Parametry třetího grafu momentů třetího měření

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
Mx [N]	-0,3502	-36,13	25,27	-1,350	7,417
My [N]	0,8533	-43,77	83,23	3,290	21,35
Mz [N]	1,730	-33,15	51,74	6,669	8,459

To stejné platí i o naměřených momentech (Obr. 51). Pokud je funkce AFC vypnuta, maxima dosahují 80 Nm, kdežto se zapnutou funkcí AFC maximum přesahuje 100 Nm. Průměrné hodnoty momentů jsou ovšem opět téměř shodné (Tab. 23).

5.2.11 Čtvrté měření

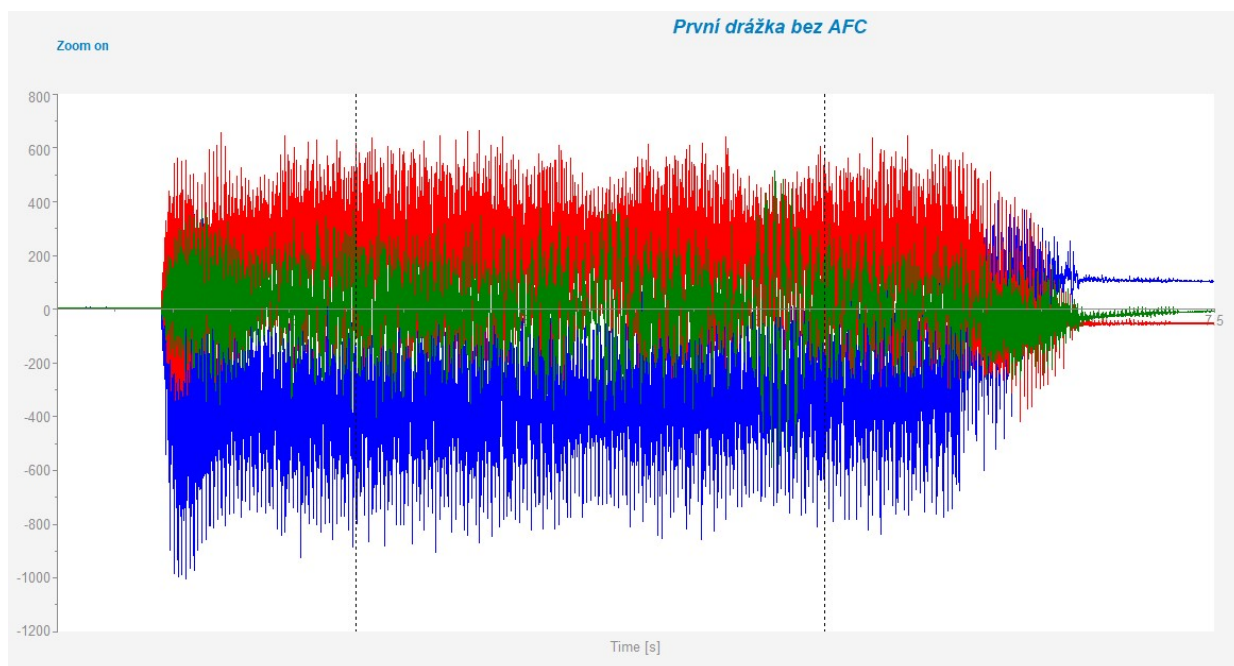
Pro čtvrté měření bylo rozhodnuto o úpravě hloubky řezu, kdy pro každou drážku byla stanovena odlišná hloubka řezu. Tím bylo možné pozorovat, zda systém začne lépe reagovat především u krajní drážky.

Pro první drážku byla ponechána hloubka řezu 2 mm, protože při této drážce najíždí nástroj do plného materiálu a pokud by byla hloubka řezu navýšena, mohlo by dojít k poškození nástroje.

U druhé drážky byla hloubka řezu snížena na 1 mm, čímž bylo možné zjistit rozdíl v působících silách při menším zatížení, a zda systém stále dokáže správně reagovat.

Hloubka krajní drážky byla naopak zvýšena na 3 mm. Tím bylo možno zjistit, zda se při větší hloubce řezu stabilizuje hodnota posuvové rychlosti.

První drážka

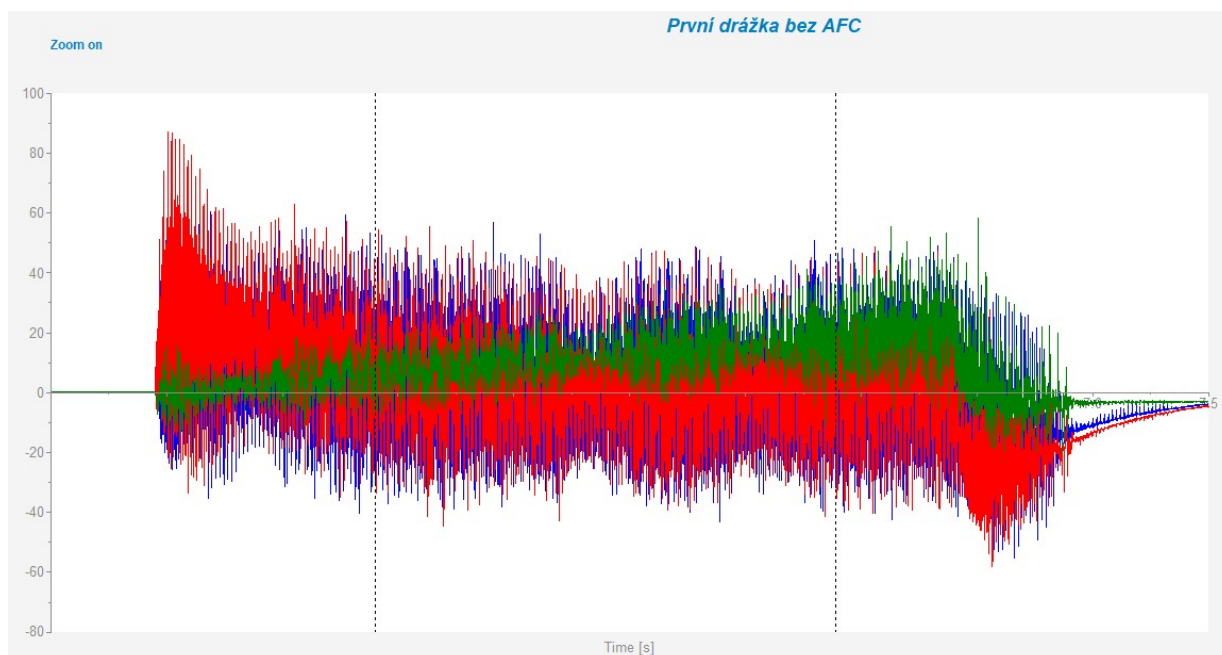


Obr. 52: První graf sil čtvrtého měření [autor]

Tab. 24: Parametry prvního grafu sil čtvrtého měření

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
F_x [N]	-291,5	-1059	400,4	-1133	375,2
F_y [N]	166,5	-444,1	677	647,4	248,7
F_z [N]	5,454	-630,9	513,8	21,2	128,2

Protože u první drážky se nezměnila hloubka řezu a funkce AFC byla vypnuta, jsou naměřené hodnoty sil prakticky totožné jako hodnoty z předchozího měření (Obr. 52) (Tab. 24).



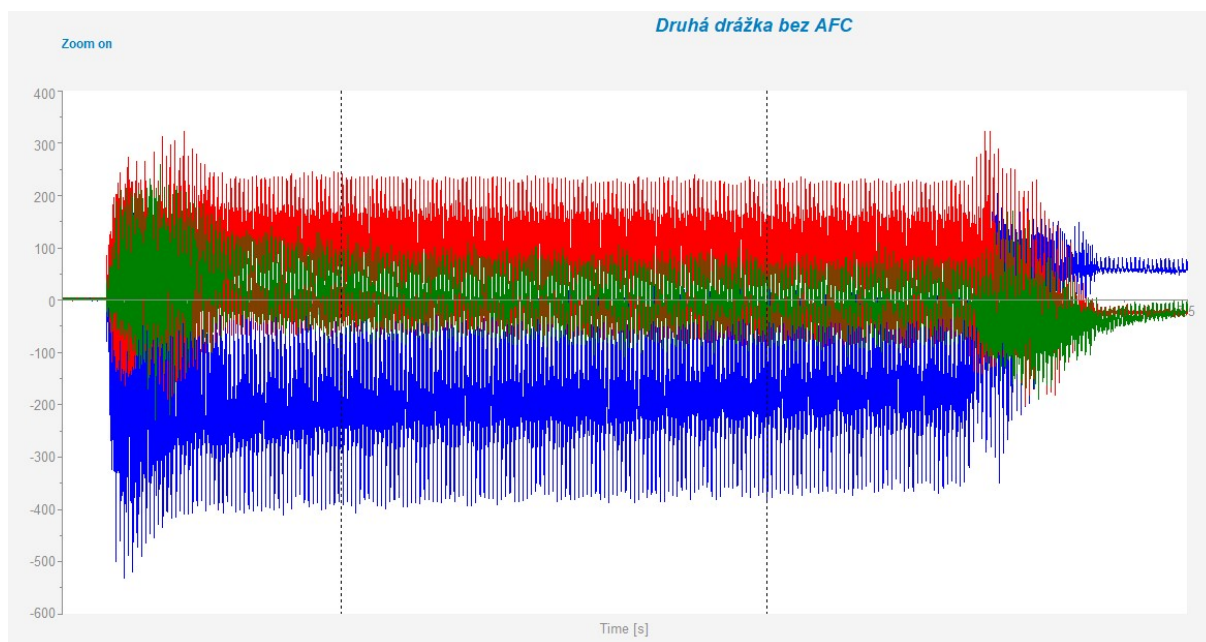
Obr. 53: První graf momentů čtvrtého měření [autor]

Tab. 25: Parametry prvního grafu momentů čtvrtého měření

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
Mx [Nm]	1,783	-60,42	68,59	7,065	19,3
My [Nm]	1,964	-58,12	86,98	7,783	21,38
Mz [Nm]	9,922	-21,74	59,45	39,32	14,44

Stejně jako naměřené síly, i naměřené momenty jsou shodné s naměřenými hodnotami v předchozím měření (Obr. 53) (Tab. 25).

Druhá drážka

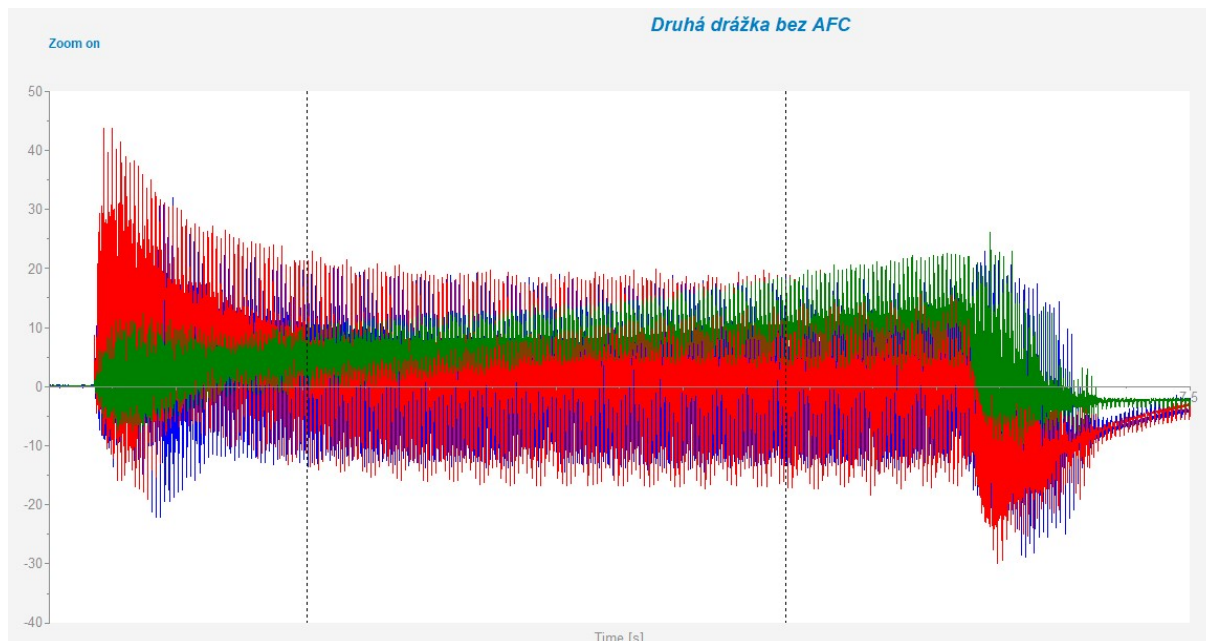


Obr. 54: Druhý graf sil čtvrtého měření [autor]

Tab. 26: Parametry druhého grafu sil čtvrtého měření

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
F_x [N]	-149,9	-531,4	231,7	-594,4	195,2
F_y [N]	72,4	-231,8	345,2	287,1	117,8
F_z [N]	6,759	-230	281,5	26,8	54,44

U druhé drážky je již pozorovatelná změna v naměřených hodnotách. Oproti předcházejícím hodnotám jsou maxima i průměrné hodnoty výrazně nižší (Obr. 54). Maximum naměřené síly je 531 N ve směru osy X a nejvyšší průměrná hodnota působící síly je 195 N taktéž ve směru osy X (Tab. 26).



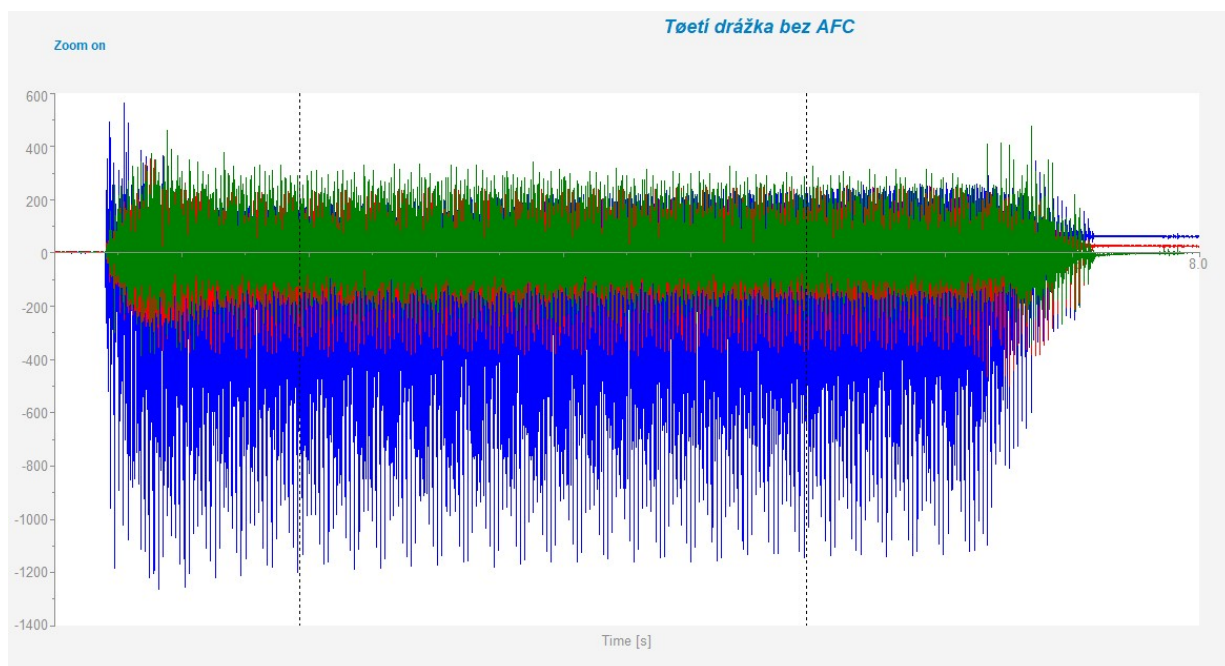
Obr. 55: Druhý graf momentů čtvrtého měření [autor]

Tab. 27: Parametry druhého grafu momentů čtvrtého měření

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
Mx [Nm]	1,240	-34,05	34,12	4,875	9,746
My [Nm]	1,032	-29,92	43,72	4,057	10,55
Mz [Nm]	7,013	-10,59	26,1	27,58	8,913

Odpovídající pokles hodnot lze pozorovat i u naměřených momentů (Obr. 55). Maxima 44 Nm dosahoval moment okolo osy Y a nejvyšší průměrná hodnota z těchto tří momentů dosahuje 10,5 Nm (Tab. 27).

Třetí drážka

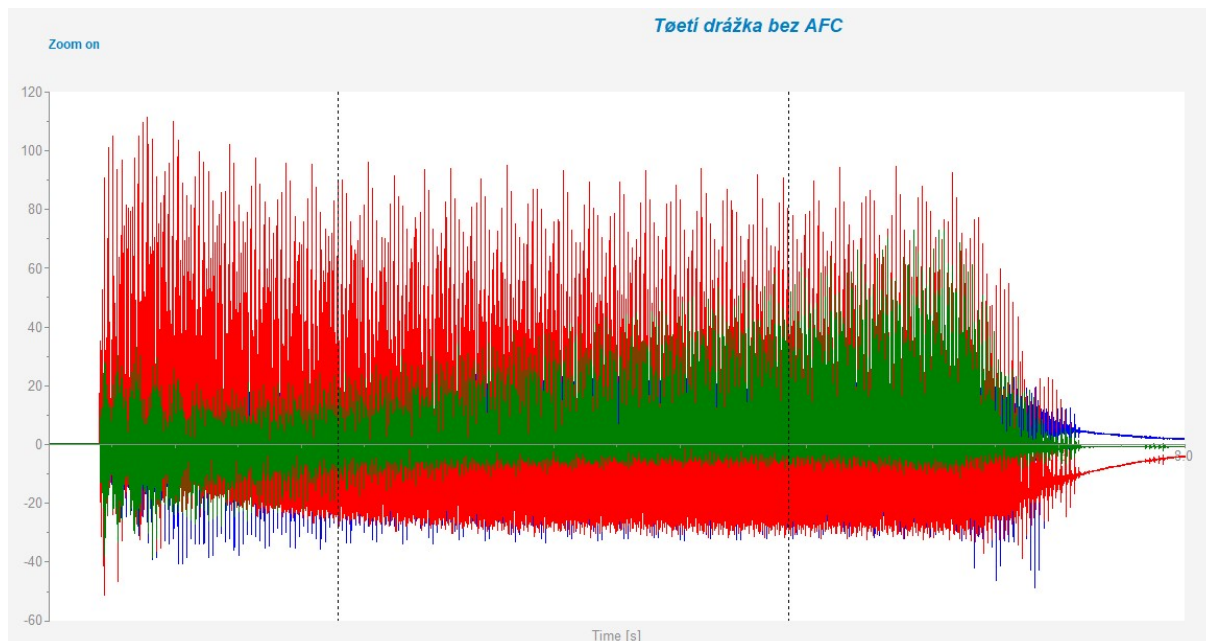


Obr. 56: Třetí graf sil čtvrtého měření [autor]

Tab. 28: Parametry třetího grafu sil čtvrtého měření

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
F_x [N]	-170,7	-1284	591	-650,3	374,3
F_y [N]	-67,18	-501,9	351,9	-255,9	135,7
F_z [N]	1,076	-533,4	474,9	4,098	118,4

Kvůli zvýšení hloubky řezu u třetí drážky, došlo k navýšení působících sil (Obr. 56). Maximum přesahovalo 1200 N ve směru osy X a v tomto směru byla naměřena i nejvyšší průměrná hodnota 390 N (Tab. 28). Protože byla funkce AFC vypnuta, nedocházelo k výrazným výkyvům působících sil.



Obr. 57: Třetí graf momentů čtvrtého měření [autor]

Tab. 29: Parametry třetího grafu momentů čtvrtého měření

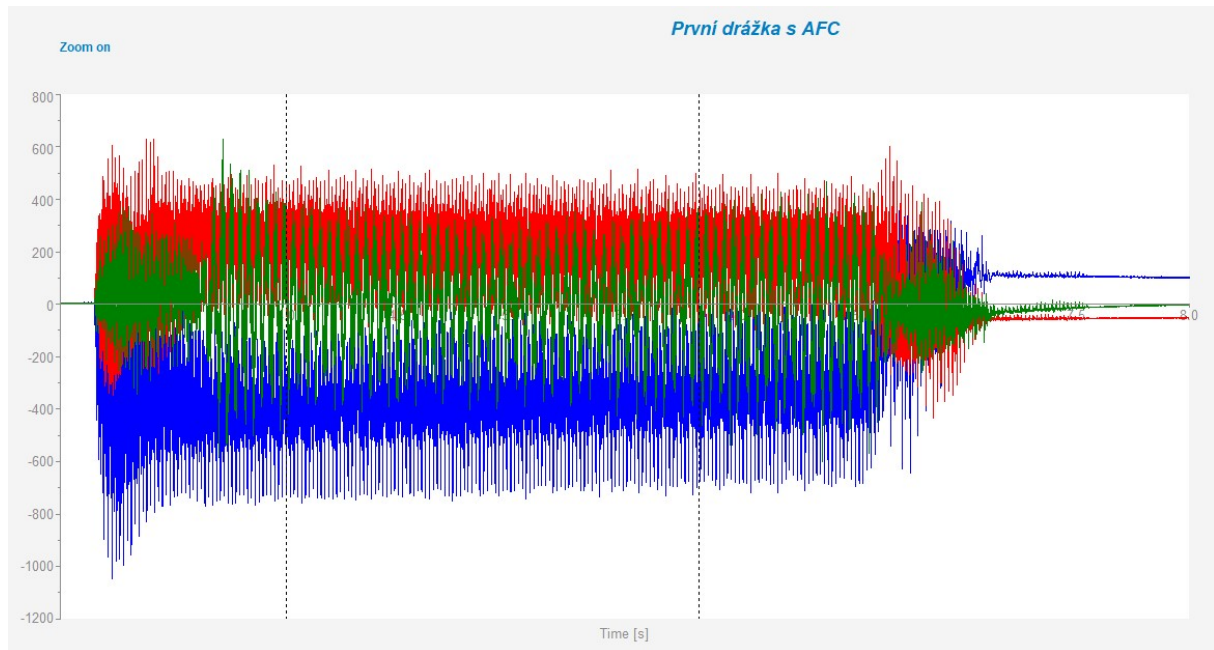
	Mean	Min	Max	Integral	RMS
Mx [Nm]	-0,6789	-49,55	36,25	-2,523	10,44
My [Nm]	1,711	-49,39	119,1	6,359	29,28
Mz [Nm]	2,945	-44	78,26	10,94	12,41

Stejný nárůst lze pozorovat i u působících momentů (Obr. 57). Maximum dosahovalo hodnoty 119 Nm a nejvyšší průměrná hodnota byla 29,3 Nm. Obě tyto hodnoty byly naměřeny okolo osy Y (Tab. 29).

5.2.12 Páté měření

Pro páté měření byly zachovány stejné hloubky řezů jako u čtvrtého měření, ale v tomto případě byla zapnuta funkce AFC. Při obrábění první drážky byly opět zaváděny nové hodnoty funkce AFC, a proto se systém choval, jako kdyby byla tato funkce vypnuta.

První drážka

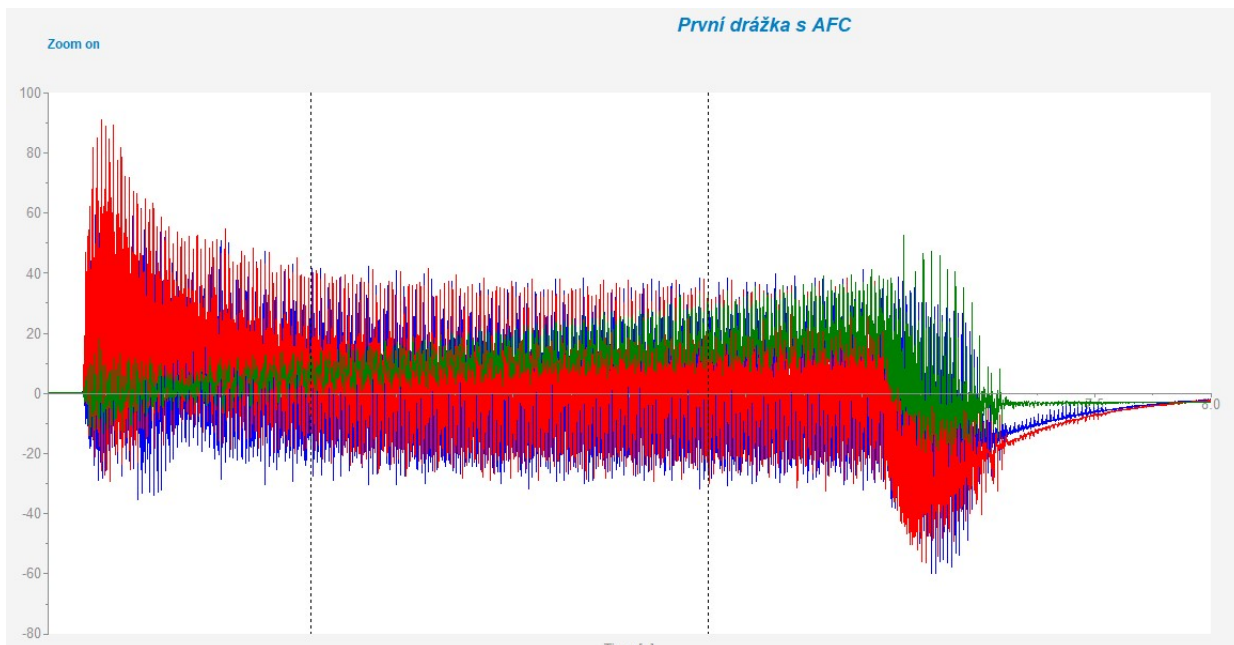


Obr. 58: První graf sil pátého měření [autor]

Tab. 30: Parametry prvního grafu sil pátého měření

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
F _x [N]	-283,3	-1059	396,8	-1132	364,8
F _y [N]	163,7	-436,2	657,4	653,9	233,4
F _z [N]	4,433	-618,4	626,8	17,71	167,6

Naměřené síly se téměř shodují s naměřenými silami z předchozího měření, protože systém se choval, jako kdyby byla funkce AFC vypnuta (Obr. 58) (Tab. 30).



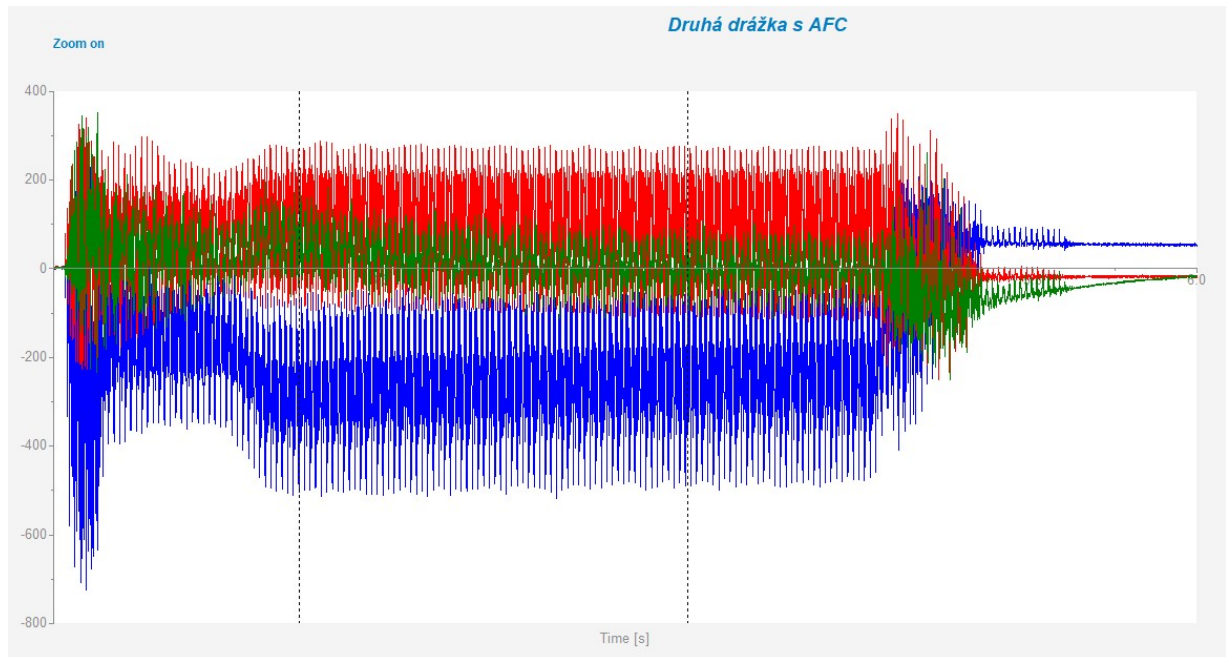
Obr. 59: První graf momentů pátého měření [autor]

Tab. 31: Parametry prvního grafu momentů pátého měření

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
F _x [N]	1,821	-61,57	68,23	7,218	18,1
F _y [N]	2,055	-59,25	90,76	8,144	20,45
F _z [N]	10,04	-21,93	55,9	39,77	13,87

To samé jako u naměřených sil platí i u naměřených hodnot momentů (Obr. 59) (Tab. 31).

Druhá drážka

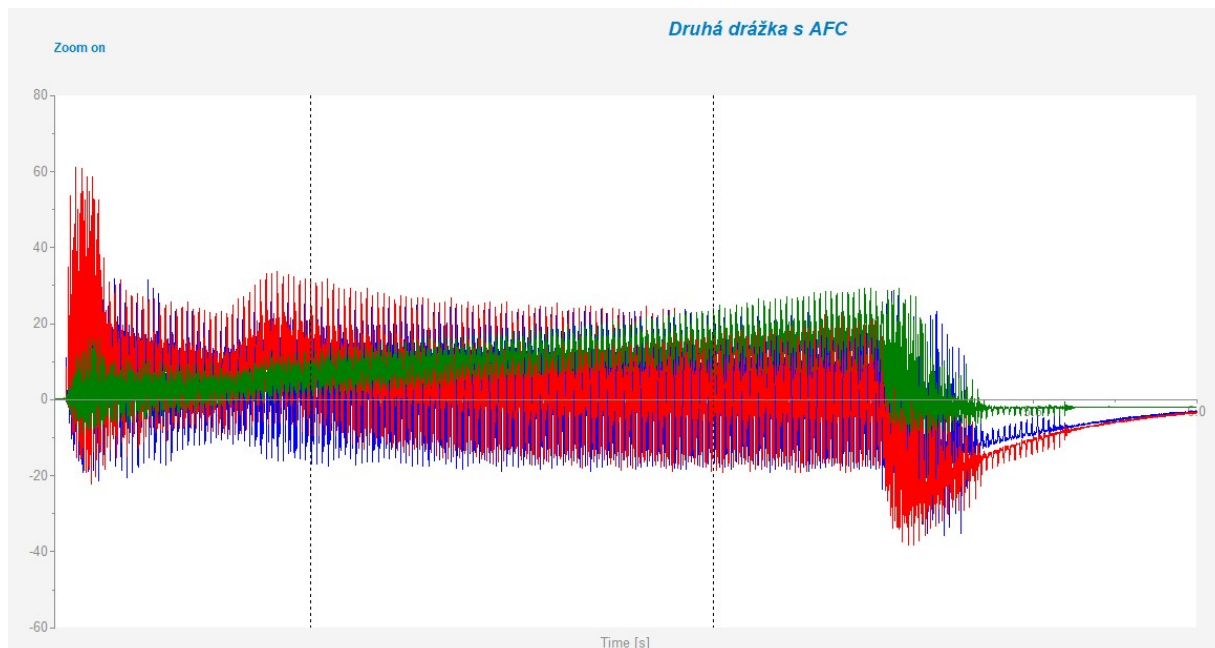


Obr. 60: Druhý graf sil pátého měření [autor]

Tab. 32: Parametry druhého grafu sil pátého měření

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
F_x [N]	-200	-744,6	278,1	-580,8	252,8
F_y [N]	78,41	-261,6	376	227,6	133,5
F_z [N]	11,73	-288,6	393,1	34,99	66,13

V případě druhé drážky došlo na počátku obrábění se zapnutou funkcí AFC, k většímu výkyvu síly než když byla tato funkce vypnuta (Obr. 60). Maximální hodnota dosahovala 744 N ve směru osy X. Ve stejném směru byla naměřena i nejvyšší průměrná hodnota 253 N. Tato hodnota je téměř o 80 N vyšší než u předchozího měření (Tab. 32).



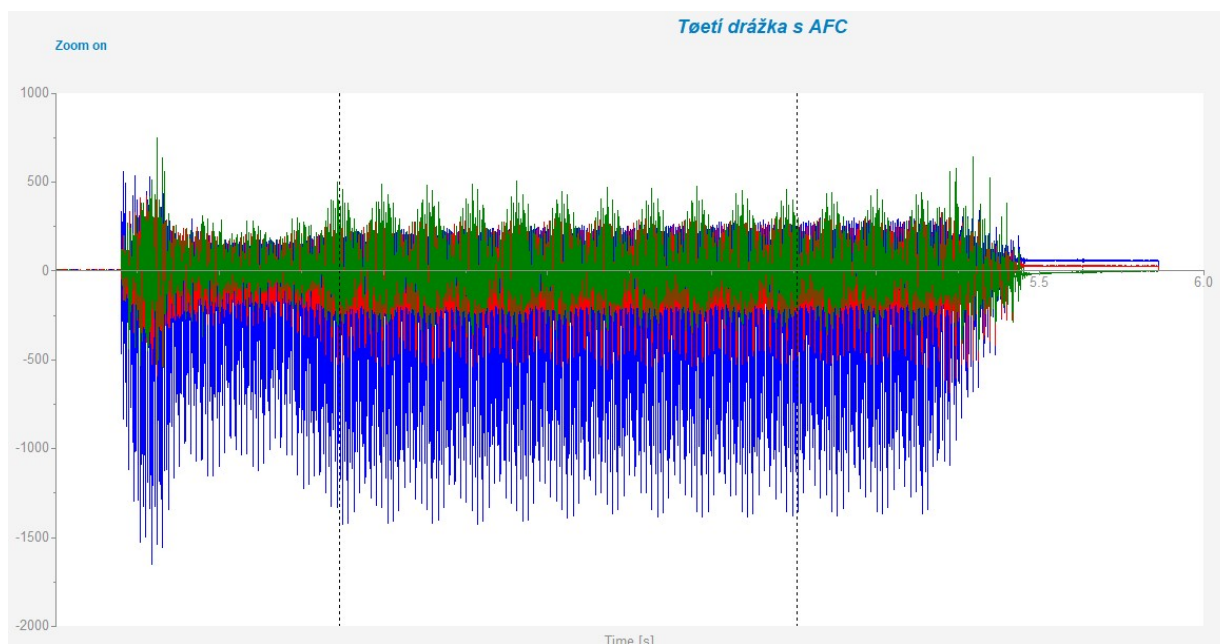
Obr. 61: Druhý graf momentů pátého měření [autor]

Tab. 33: Parametry druhého grafu momentů pátého měření

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
Mx [Nm]	2,047	-40,39	38,73	5,809	12,03
My [Nm]	2,283	-39,9	62,01	6,48	13,87
Mz [Nm]	9,012	-10,04	31,48	25,58	11,57

Podobné navýšení bylo možno pozorovat i u naměřených momentů (Obr. 61). Moment okolo osy Y dosahoval v maximu hodnoty přes 60 Nm a průměrné hodnoty momentů dosahovaly 13,87 Nm, což je přibližně o 4,5 Nm více než u předchozího měření (Tab. 33).

Třetí drážka

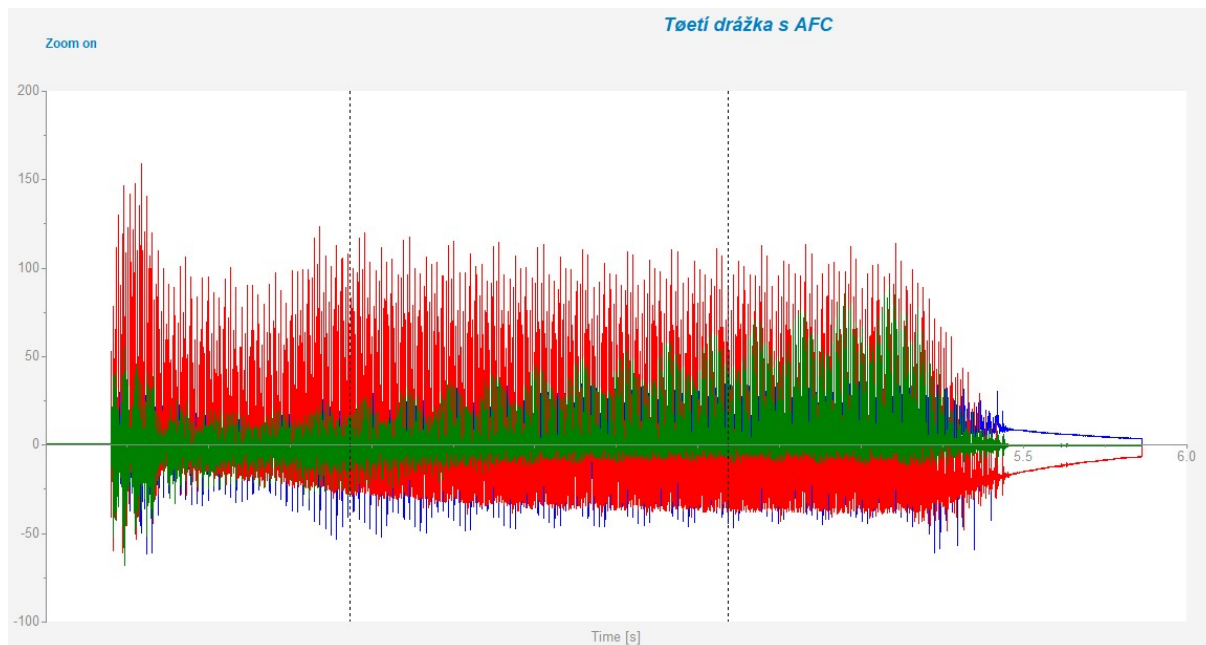


Obr. 62: Třetí graf sil pátého měření [autor]

Tab. 34: Parametry třetího grafu sil pátého měření

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
F_x [N]	-213,2	-1688	754,6	-591,8	447,2
F_y [N]	-98,06	-693	483,5	-272,2	179,7
F_z [N]	1,253	-666	746,6	3,479	152

Již na první pohled došlo ke stabilizaci řezu a posuvové rychlosti při obrábění krajní drážky (Obr. 62). Navzdory tomuto faktu došlo opět k navýšení působících sil oproti předcházejícímu měření. Maximum přesahovalo 1650 N a nejvyšší průměrná hodnota dosahovala 447 N ve směru osy X (Tab. 34).



Obr. 63: Třetí graf momentů pátého měření [autor]

Tab. 35: Parametry třetího grafu momentů pátého měření

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
Mx [Nm]	-1,53	-73,15	46,66	-4,151	13,98
My [Nm]	3,179	-69,17	158,9	8,625	35,84
Mz [Nm]	2,727	-68,6	93,47	7,4	14,25

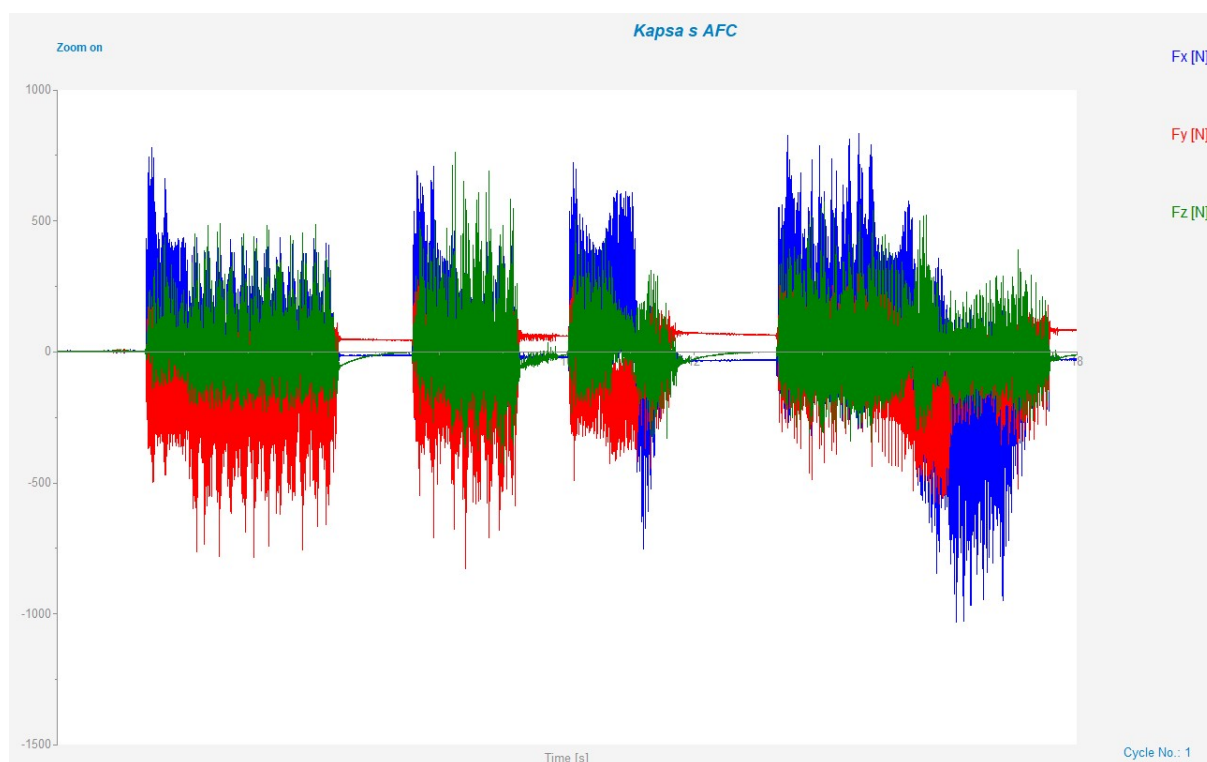
Působící momenty se zvýšily odpovídajícím způsobem vzhledem k vyšším silám (Obr. 63). Maximální moment byl okolo osy Y a byl více než 150 Nm. U stejného momentu byla zaznamenána i nejvyšší průměrná hodnota 35,8 Nm (Tab. 35).

5.2.13 Měření kapsy

Tato část experimentu byla navržena tak, aby bylo možné porovnat působící síly a momenty při složitějším obrábění než jsou prosté rovné drážky. K tomuto účelu byla navržena kapsa nepravidelného tvaru.

Zároveň bylo možné porovnat časy obrábění při zapnuté a při vypnuté funkci AFC. Jednalo se tedy o komplexní zkoušku tohoto systému, která obsahovala všechny aspekty funkce AFC.

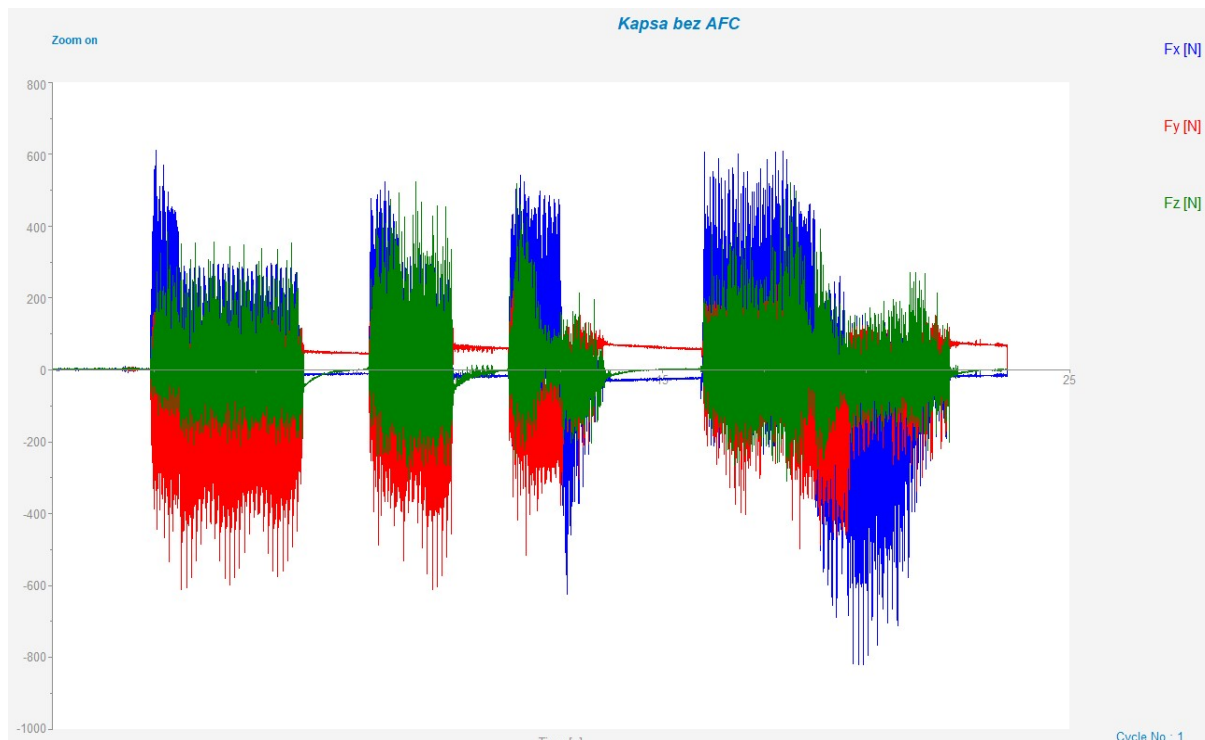
Naměřené síly



Obr. 64: Graf sil při prvním měření kapsy [autor]

Tab. 36: Parametry grafu sil prvního měření kapsy

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
F _x [N]	25,49	-1033	869,3	364	210,2
F _y [N]	-65,83	-831,7	329,6	-939,9	185,1
F _z [N]	1,786	-479,3	829,3	25,5	125



Obr. 65: Graf sil při druhém měření kapsy [autor]

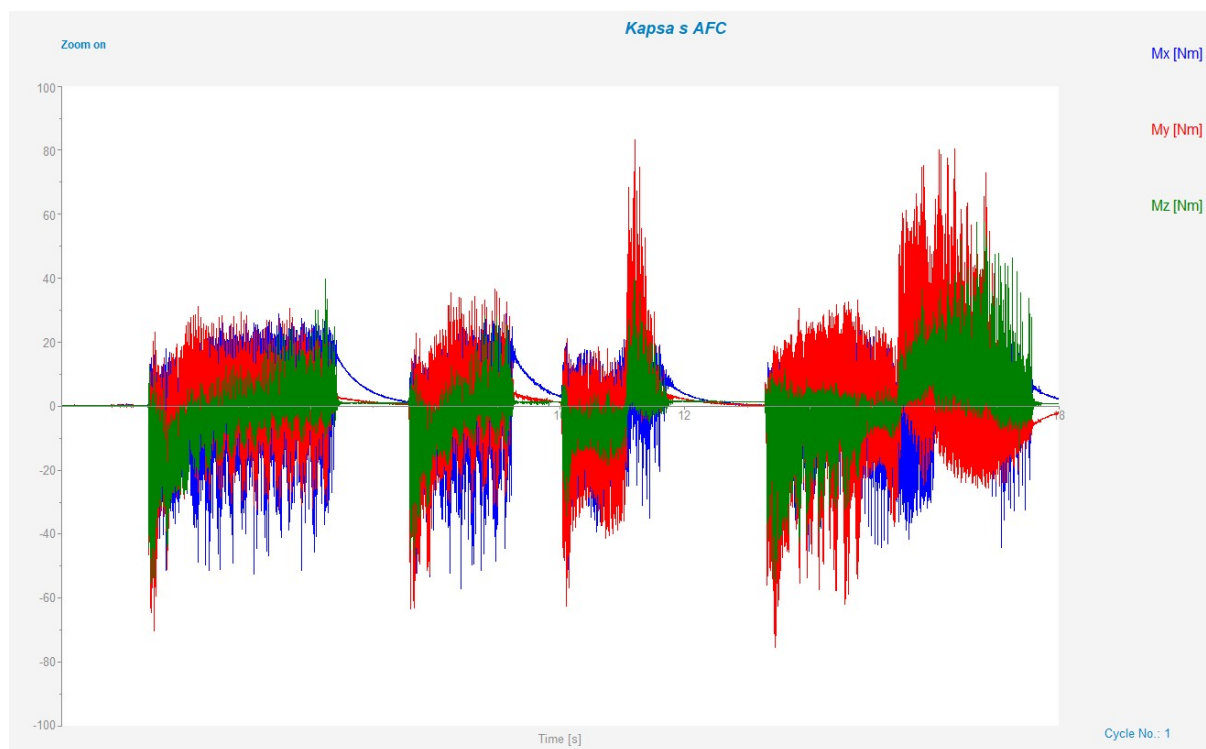
Tab. 37: Parametry grafu sil druhého měření kapsy

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
Fx [N]	11,64	-847,7	628,9	233,6	171
Fy [N]	-40,95	-619,8	264	-821,6	151,9
Fz [N]	1,2	-359	614,5	24,07	101,4

Oba grafy naměřených působících sil vykazují stejné vzorce, ale vykazují také rozdíly (Obr. 64.) (Obr. 65). Základním rozdílem byla velikost maximálních výkyvů sil, kdy při vypnuté funkci AFC nepřesáhly 600 N, ale při zapnuté funkci AFC byly maximální síly více než 1000 N (Tab. 36) (Tab. 37).

I přes zvýšené výkyvy naměřených sil, se průměrné hodnoty působících sil příliš neliší a nedochází tak k dlouhodobému vyššímu zatížení vřetene.

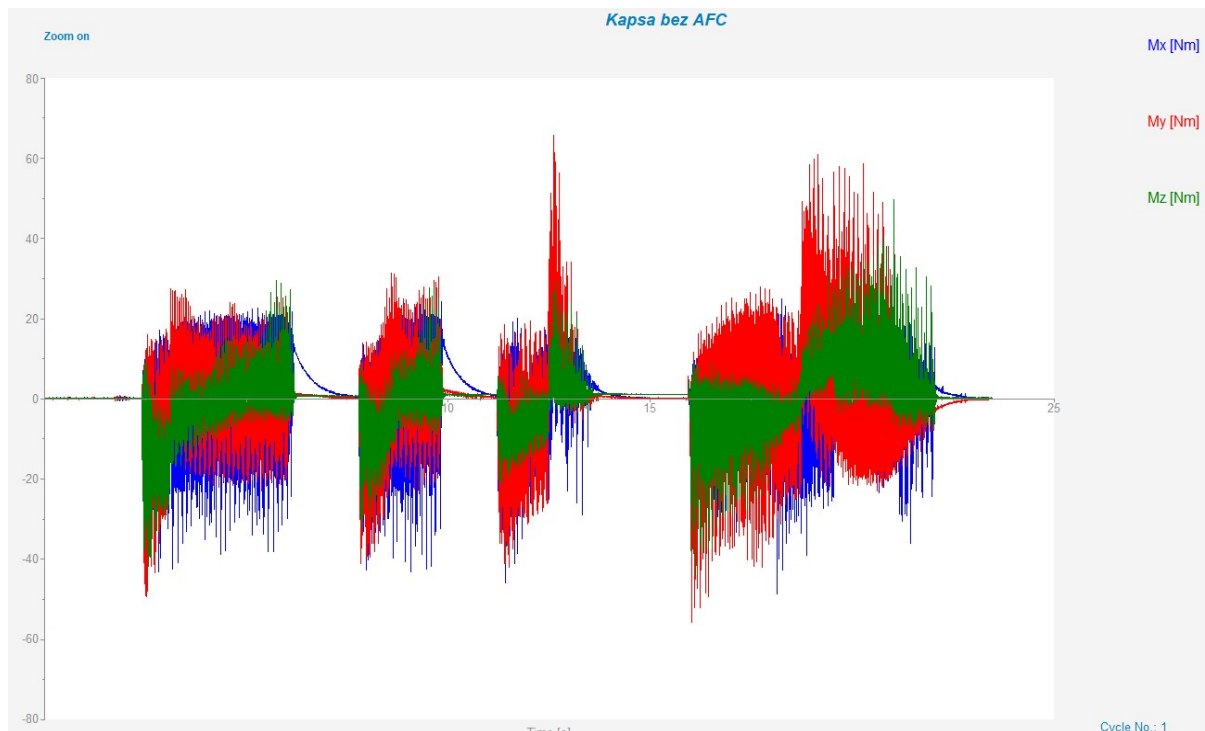
Naměřené momenty



Obr. 66: Graf momentů při prvním měření kapsy [autor]

Tab. 38: Parametry třetího grafu momentů pátého měření

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
Mx [Nm]	-0,1425	-70,84	39,25	-2,069	13,31
My [Nm]	0,1393	-84,16	87,02	2,023	16,22
Mz [Nm]	-0,5874	-65,44	62,4	-8,529	9,653



Obr. 67: Graf momentů při druhém měření kapsy [autor]

Tab. 39: Parametry grafu momentů druhého měření kapsy

	Mean	Min	Max	Integral	RMS
Mx [Nm]	-0,4712	-54,05	36,77	-0,9375	10,93
My [Nm]	0,4594	-60,12	73,03	0,9141	12,85
Mz [Nm]	-0,1692	-47,37	50,09	-3,365	7,905

V případě naměřených momentů se jedná o změny odpovídající naměřeným silám (Obr. 66) (Obr. 67). Nejvyšší naměřené hodnoty se proto liší až o 20 Nm (Tab. 38) (Tab. 39).

Evaluační tabulka AFC

Při obrábění kapsy se zapnutou funkcí AFC vytvořil řídicí systém i tabulku, ve které byl uveden předpokládaný čas obrábění bez AFC a skutečný čas obrábění. Zároveň byla vypočtena úspora času na daný obráběcí program. Pro vyhodnocení úspory času byly použity hodnoty z řídicího systému, které se mohou lišit od hodnot odečtených z grafů měření sil a momentů.

```

<<File: SEDLAK.H.AFCZ.DEP
NR  IDX SNOM  SDIFF CTIME  FAUG FMIN  PMAX  PREF  OVLB  BLOCK
0   0   3501   0.1  00:00:37  116  81   13.7  13.7  --   85
1   1           total 00:00:26  29%  saved
[END]
    
```

Obr. 68: Evaluační tabulka obrábění kapsy [autor]

Podle hodnot z řídicího systému stroje tedy bylo ušetřeno 29% času obrábění. Ačkoliv projektovaný čas 37 vteřin byla pouze odhadovaná hodnota, a výpočet úspory času je proto velmi nepřesný, bylo možné pozorovat zvýšení posuvové rychlosti a tím i zkrácení času obrábění (Obr. 68).

5.2.14 Shrnutí experimentu

Důvodem provedení tohoto experimentu bylo zjištění, zda se při použití funkce AFC změni síly působící na obrobek a vřeteno stroje.

Při tomto experimentu bylo dokázáno, že při použití funkce AFC dochází k navýšení extrémů působících sil a točivých momentů při navýšení parametru FIDL. Díky tomu dosahuje stroj vyšších posuvových rychlostí mimo materiál, ale kvůli rychlosti reakce stroje dochází při vnikání nástroje do materiálu k výraznému navýšení působících sil. Zároveň také dochází k výraznému zkrácení času obrábění i při složitějších tvarech obrobku než jsou jen prosté rovné drážky.

6 Diskuze

Při prvním experimentu bylo možno pozorovat zvyšování posuvové rychlosti a tím i zkracování času obrábění. Zároveň se také ukázala nutnost důkladné kontroly nastavení funkce AFC, protože například při nesprávném přiřazení strategie AFC k nástroji, použije stroj výchozí hodnoty, a znehodnotí tak výsledky měření. Při správném nastavení funkce AFC dochází k úspoře času obrábění, jak dokazují evaluační tabulky, které byly vytvořeny přímo řídicím systémem. Tyto tabulky ovšem také naznačují nepřesnosti stroje při měření času obrábění, protože při použití stejného materiálu, nástroje a řezných podmínek, naměřil řídicí systém rozdílné hodnoty úspory času. Po zprovoznění funkce AFC však všechny tyto hodnoty přesahovaly 14%.

Druhý experiment se zaměřoval na síly působící při obrábění. Při tomto experimentu bylo možno pozorovat zajímavé rozdíly mezi silami působícími při zapnuté funkci AFC a při vypnuté funkci AFC. Při analýze hodnot naměřených dynamometrem, byl zjištěn velký počáteční výkyv působících sil při použití funkce AFC. Tento výkyv byl způsoben především zvýšením posuvové rychlosti mimo materiál a způsobem jakým stroj rozeznává, zda je nástroj v řezu či nikoliv. Stroj totiž rozpozná přítomnost polotovaru pouze podle zatížení vřetene a kvůli omezené reakční rychlosti stroje začne zpomalovat až po vniknutí nástroje do materiálu. Průměrné hodnoty působících sil jsou ale téměř totožné se zapnutou i s vypnutou funkcí AFC. Zároveň také došlo k výraznému zkrácení času obrábění drážek i kapsy a to až 29%.

Výsledky obou experimentů poukazují na nutnost správného nastavení funkce AFC pro danou konkrétní operaci, nástroj a materiál. Při nesprávném nastavení může docházet ke krátkodobým nárůstům působících sil a může tedy hrozit poškození nástroje. Zároveň se však ukázalo, že při příliš nízkém zatížení vřetena není stroj schopen rozlišit, zda dochází k obrábění nebo nikoliv a může využít navýšenou rychlost určenou pro přejezdy mimo materiál a tím poškodit nástroj. Z tohoto důvodu se nedoporučuje používat funkci AFC s menším průměrem frézy než je 6 mm a hloubka řezu menší než 1 mm.

7 Závěr

V této diplomové práci byly popsány jednotlivé principy adaptivních systémů, kterými je možné optimalizovat procesy. Tato diplomová práce zároveň obsahuje popis systému Heidenhain iTNC530, který řídí univerzální frézovací centrum DMU 40 eVo. Bylo rozhodnuto, že na tomto stroji budou provedeny experimenty k pochopení principu fungování funkce AFC během frézování.

Také zde byly popsány jednotlivé kroky, potřebné ke spuštění funkce AFC, která následně adaptivně reguluje posuvovou rychlost. Za tímto účelem byly v řídicím systému stroje vytvořeny tabulky s výchozími informacemi pro funkci AFC.

V teoretické části byl popsán princip fungování adaptivních systémů, včetně limitního adaptivního řízení, na jehož principu funguje AFC. V kombinaci s popisem postupu přípravy stroje a NC programu na spuštění funkce AFC, bylo možné pochopit způsob a princip fungování AFC. Následně bylo popsáno ovládání funkce AFC, díky kterému je možné upravovat fungování této funkce za účelem vyšší efektivity.

V experimentální části této práce byly provedeny experimenty, při kterých byla vyzkoušena různá nastavení funkce AFC a zaznamenáno její chování.

V prvním experimentu byly odstraněny problémy se zprovozněním funkce AFC a upřesněny možnosti vyhodnocování za pomoci evaluačních tabulek, které jsou vytvořeny strojem. Problémy, které se vyskytly během experimentu, se týkaly především zavedení základních nastavení a strategií pro funkci AFC, kdy záleží na umístění tabulek s výchozími hodnotami. Také byla vyzkoušena různá nastavení hodnot limitů posuvové rychlosti a popsáno chování stroje při těchto změnách. V evaluačních tabulkách byly patrné rozdíly v úspoře času obrábění za použití různých nastavení funkce AFC.

Při druhém experimentu byly měřeny síly působící na obrobek během obrábění. Tento experiment především porovnával působící síly při zapnuté a při vypnuté funkci AFC. Během experimentu se ukázala důležitost jednotlivých parametrů funkce AFC. Z grafů zaznamenaných sil vyplývá, že obráběcí stroj má jistou reakční prodlevu, než zareaguje na změnu zatížení vřetene. Během této prodlevy dochází k navýšení působících sil, protože posuvová rychlost pro přejezd mezi řezy byla nastavena maximální hodnota 130%. Při obrábění složitějších tvarů, jako byla například otevřená kapsa, docházelo k opakovaným nárůstům působících sil, právě kvůli této nastavené hodnotě. Zároveň, ale nedocházelo k nárůstu průměrných působících sil.

Při teoretickém popisu funkce AFC byl pochopen princip jejího fungování a také možnosti jejího ovládání. Byly zde popsány jednotlivé parametry, které je možné nastavit při přípravě NC programu a stroje, a jak ovlivňují fungování AFC. Při provádění experimentů byla zjištěna důležitost správného chápání jednotlivých parametrů, a jak ovlivňují chod stroje. Také zde byla vyzkoušena různá nastavení funkce AFC a byly také popsány rozdíly ve výsledcích.

Během druhého experimentu ale vyvstala otázka opotřebení nástroje. Výrobce systému Heidenhain uvádí, že při použití funkce AFC by měla být prodloužena životnost nástroje. Při druhém experimentu však nebyly zaznamenány výrazné rozdíly mezi průměrnými silami působícími na obrobek. Nabízí se tedy provedení dlouhodobé zkoušky životnosti nástroje, protože výsledky druhého experimentu nenasvědčují, že by docházelo ke snížení řezných sil a tím i prodloužení životnosti nástroje.

8 Literatura

- [1] SVOBODA, Ing. Rostislav. Osvěžte si základy automatizace! Znáte definici regulace?. *Factory Automation* [online]. Praha: FANUC Czech, 2015, 21.3.2015 [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/osvezte-si-zaklady-automatizace-znate-definici-regulace/>
- [2] KOBLASA PH.D, Ing. František. Adaptivní výrobní systémy. *ResearchGate* [online]. Liberec: Technická universita v Liberci, 2018, 18.7.2018 [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/326461727_ADAPTIVNI_VYROBNI_SYSTE_MY
- [3] KOUKAL, Petr. Automatické řízení výrobních strojů. *SlidePlayer* [online]. 2011, 2011 [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3010196/>
- [4] SCHMID, D. Řízení a regulace pro strojírenství a mechatroniku. 2005. Praha: Europa-Sobotáles, 2005. ISBN 80-86706-10-9.
- [5] MÁDL, J. Optimalizace řezných podmínek v teorii obrábění. 3., přeprac. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1988.
- [6] KOLEKTIV. Příručka uživatele: Popisný dialog Heidenhain iTNC530. *Heidenhain* [online]. Praha: Heidenhain, 2010, 9.2010 [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: https://content.heidenhain.de/doku/tnc_guide/pdf_files/iTNC530/34049x-06/bhb/670_387-C1.pdf
- [7] KOLEKTIV. Dynamická výkonnost: Efektivní práce a spolehlivost procesu. *Heidenhain* [online]. Praha: Heidenhain, 2014, 5.2014 [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: https://www.heidenhain.cz/fileadmin/pdb/media/img/1081192-C0_Dynamic_Efficiency_cs.pdf
- [8] WIENDL, Michael. Webinar Heidenhain: AFC - Adaptive feed control. *Youtube* [online]. Dublin: Heidenhain, 2017, 12.2.2017 [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=i2G7kl0FU-A>
- [9] KOLEKTIV. DMU eVo SERIES. *DMG MORI* [online]. Wernau, Německo: DMG MORI, 2021, 2021 [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/resource/blob/44922/3fa4436ace757499dace1e4ac434d166/pm0uk-dmu-evo-series-pdf-data.pdf>
- [10] KOLEKTIV. DMU eVo SERIES. *DMG MORI* [online]. Wernau, Německo: DMG MORI, 2022, 2022 [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/frezovani/petiose-frezovani/dmu-evo/dmu-40-evo-linear>
- [11] KISTLER GROUP. *Multicomponent Dynamometer*. Winterthur, Switzerland, 2018, 5 s. Dostupné také z: <https://www.kistler.com/files/document/003-051e.pdf>

- [12] KISTLER GROUP. *Charge amplifier*. Winterthur, Switzerland, 2018, 5 s. Dostupné také z: <https://www.kistler.com/files/document/000-744e.pdf>

- [13] KISTLER GROUP. *DAQ-System for DynoWare*. Winterthur, Switzerland, 2018, 5 s. Dostupné také z: <https://www.kistler.com/files/document/000-745e.pdf>

9 Seznam příloh

Příloha 1: NC program prvního experimentu

Příloha 2: NC program drážek druhého experimentu

Příloha 3: NC program kapsy druhého experimentu

PŘÍLOHA č.1

NC program prvního experimentu

```
0 BEGIN PGM SEDLAK MM
1 ;DMU40eVo GPP_VER.:2015-08-24
2 ;Date:27.2.2022 Time:20:40
3 ;
4 BLK FORM 0.1 Z X-40 Y-40 Z-75
5 BLK FORM 0.2 X+40 Y+40 Z+0
6 Q29 = 0 ;reset transformace 4.osy
7 CYCL DEF 32.0 TOLERANCE
8 CYCL DEF 32.1 T0.01
9 CYCL DEF 32.2 HSC-MODE:0 TA5
10 ;
11 ;*****
12 ;*** SEZNAM NASTROJU ***
13 ;*****
14 ;101 - FR D20 R2 L10 Z3 (OSG - KRATKA) - PSE11R020SS20-3S
15 ; ... DRZAK: TRIBOS R D20 / VYLOZENI: 55.
16 ;*****
17 ;
18 ;=====
19 * - TEACH-IN
20 ;=====
21 L M5 M9
22 * - FR D20 R2 L10 Z3 (OSG - KRATKA) - PSE11R020SS20-3S
23 TOOL CALL 103 Z S3501
/ 24 TOOL DEF 104
25 Q1 = 2101 ;hrubovaci
26 Q2 = 1200 ;dokoncovaci
27 Q3 = 2101 ;posuv v Z
28 ;
29 CALL LBL 201 ;Mac 1 Position 1
30 CALL LBL 254 ;Odjezd XYZ k referenci
31 CALL LBL 251 ;Nastavit polohu
32 L M26 ;Proud vzduchu vretenem
33 L M23
34 L X-24.98 Y+82 R0 FMAX M3
```

```
35 FUNCTION AFC CUT BEGIN
36 L Z+25 R0 FMAX
37 L Z+2 FMAX
38 L Z-2 FQ3
39 L X-35 RL F1200 M110
40 L Y-82
41 L X-24.98 R0
42 FUNCTION AFC CTRL
43 L Z+25 FMAX
44 ;
45 L M1
46 ;=====
47 * - KONTROLNI-REZ
48 ;=====
49 * - FR D20 R2 L10 Z3 (OSG - KRATKA) - PSE11R020SS20-3S
50 TOOL CALL 103 Z S3501
51 Q1 = 2101 ;hrubovaci
52 Q2 = 1200 ;dokoncovaci
53 Q3 = 2101 ;posuv v Z
54 ;
55 CALL LBL 201 ;Mac 1 Position 1
56 ;Stejna poloha
57 CALL LBL 251 ;Nastavit polohu
58 L M26 ;Proud vzduchu vretenem
59 L M23
60 L X+5.02 Y+82 R0 FMAX M3
61 L Z+25 R0 FMAX
62 L Z+2 FMAX
63 L Z-1 FQ3
64 ;Puvodni hodnota Z-1
65 L X-5 RL F1200 M110
66 L Y-82
67 L X+5.02 R0
68 L Z+25 FMAX
69 ;
```


70 L M1
71 ;=====

72 * - PUL-REZ
73 ;=====

74 * - FR D20 R2 L10 Z3 (OSG - KRATKA) - PSE11R020SS20-3S
75 TOOL CALL 103 Z S3501
76 Q1 = 2101 ;hrubovací
77 Q2 = 1200 ;dokončovací
78 Q3 = 2101 ;posuv v Z
79 ;

80 CALL LBL 201 ;Mac 1 Position 1
81 ;Stejna poloha
82 CALL LBL 251 ;Nastavit polohu
83 L M26 ;Proud vzduchu vretenem
84 L M23
85 L X+40.02 Y+82 R0 FMAX M3
86 L Z+25 R0 FMAX
87 L Z+2 FMAX
88 L Z-2 FQ3
89 L X+35 RL F1200 M110
90 ;Puvodni hodnota X+30
91 L Y-82
92 L X+40.02 R0
93 L Z+25 FMAX
94 FUNCTION AFC CUT END
95 ;

96 L M5
97 L M23
98 L Z-1 R0 FMAX M91
99 L X-450 Y-375 FMAX M91
100 CALL LBL 252 ;Reset roviny obrabeni
101 PLANE RESET TURN FMAX
102 L M30
103 ;=====

104 ;= K O N E C P R O G R A M U =

```
105 ;=====
106 ;=====
107 ;= DATA POLOH NULOVEHO BODU =
108 ;=====
109 ;Mac 1 Position 1
110 LBL 201 ;Mac 1 Position 1
111 Q23 = 0 ;Posun X
112 Q24 = 0 ;Posun Y
113 Q25 = 0 ;Posun Z
114 Q20 = - 0 ;rotace SS kolem osy X
115 Q21 = 0 ;rotace SS kolem osy Y
116 Q22 = - 0 ;rotace SS kolem osy Z
117 ;-----
118 ;Lokalni posun NB
119 Q26 = 0 ;Posun X
120 Q27 = 0 ;Posun Y
121 Q28 = 0 ;Posun Z
122 ;Osa C: +0
123 ;Osa B: +0
124 LBL 0
125 ;=====
126 ;
127 ;Nastavit polohu
128 LBL 251 ;Nastavit polohu
129 CALL LBL 252 ;Reset roviny obrabeni
130 CYCL DEF 7.0 NULOVY BOD
131 CYCL DEF 7.1 X+Q23
132 CYCL DEF 7.2 Y+Q24
133 CYCL DEF 7.3 Z+Q25
134 Q32 = Q22 + Q29 ;C osa + transform 4x
135 M126
136 PLANE SPATIAL SPA+Q20 SPB+Q21 SPC+Q32 TURN FMAX SEQ+ TABLE ROT
137 CYCL DEF 7.0 NULOVY BOD
138 CYCL DEF 7.1 IX+Q26
139 CYCL DEF 7.2 IY+Q27
```

140 CYCL DEF 7.3 IZ+Q28
141 L M11 M23
142 LBL 0
143 ;Reset roviny obrabeni
144 LBL 252
145 FUNCTION RESET TCPM
146 PLANE RESET STAY
147 CYCL DEF 10.0 OTACENI
148 CYCL DEF 10.1 ROT+0
149 CYCL DEF 7.0 NULOVY BOD
150 CYCL DEF 7.1 X+0
151 CYCL DEF 7.2 Y+0
152 CYCL DEF 7.3 Z+0
153 L M10 M22
154 LBL 0
155 ;-----
156 ;
157 ;Odjezd Z k referenci
158 LBL 253
159 L Z-1 FMAX M91
160 LBL 0
161 ; [...] !
162 ;-----
163 ;
164 ;Odjezd k referenci XYZ
165 LBL 254
166 L Z-1 FMAX M91
167 L X-450 Y-375 FMAX M91
168 LBL 0
169 ; [...] !
170 END PGM SEDLAK MM

PŘÍLOHA č.2

NC program drážek druhého experimentu

```
0 BEGIN PGM SEDLAK MM
1 ;DMU40eVo GPP_VER.:2015-08-24
2 ;Date:27.2.2022 Time:20:40
3 ;
4 BLK FORM 0.1 Z X-52.5 Y-40 Z-75
5 BLK FORM 0.2 X+52.5 Y+40 Z+0
6 Q29 = 0 ;reset transformace 4.osy
7 CYCL DEF 32.0 TOLERANCE
8 CYCL DEF 32.1 T0.01
9 CYCL DEF 32.2 HSC-MODE:0 TA5
10 ;
11 ;*****
12 ;*** S E Z N A M N A S T R O J U ***
13 ;*****
14 ;101 - FR D20 R2 L10 Z3 (OSG - KRATKA) - PSE11R020SS20-3S
15 ; ... DRZAK: TRIBOS R D20 / VYLOZENI: 55.
16 ;*****
17 ;
18 ;=====
19 * - TEACH-IN
20 ;=====
21 L M5 M9
22 * - FR D20 R2 L10 Z3 (OSG - KRATKA) - PSE11R020SS20-3S
23 TOOL CALL 103 Z S3501
/ 24 TOOL DEF 104
25 Q1 = 2101 ;hrubovaci
26 Q2 = 1200 ;dokoncovaci
27 Q3 = 2101 ;posuv v Z
28 ;
29 CALL LBL 201 ;Mac 1 Position 1
30 CALL LBL 254 ;Odjezd XYZ k referenci
31 CALL LBL 251 ;Nastavit polohu
32 L M26 ;Proud vzduchu vretenem
33 L M23
34 L X-11 Y+82 R0 FMAX M3
```

```
35 FUNCTION AFC CUT BEGIN
36 L Z+25 R0 FMAX
37 L Z+2 FMAX
38 STOP
39 L Z-2 FQ3
40 L X-1 RR FQ2 M110
41 L Y-82
42 L X-11 R0
43 FUNCTION AFC CTRL
44 L Z+25 FMAX
45 ;
46 L M1
47 ;=====
48 * - KONTROLNI-REZ
49 ;=====
50 * - FR D20 R2 L10 Z3 (OSG - KRATKA) - PSE11R020SS20-3S
51 TOOL CALL 103 Z S3501
52 Q1 = 2101 ;hrubovaci
53 Q2 = 1200 ;dokoncovaci
54 Q3 = 2101 ;posuv v Z
55 ;
56 CALL LBL 201 ;Mac 1 Position 1
57 ;Stejna poloha
58 CALL LBL 251 ;Nastavit polohu
59 L M26 ;Proud vzduchu vretenem
60 L M23
61 L X+11 Y+82 R0 FMAX M3
62 L Z+25 R0 FMAX
63 L Z+2 FMAX
64 STOP
65 L Z-1 FQ3
66 ;Puvodni hodnota Z-1
67 L X+21 RR FQ2 M110
68 L Y-82
69 L X+11 R0
```

70 L Z+25 FMAX
71 ;
72 L M1
73 ;=====

74 * - PUL-REZ
75 ;=====

76 * - FR D20 R2 L10 Z3 (OSG - KRATKA) - PSE11R020SS20-3S
77 TOOL CALL 103 Z S3501
78 Q1 = 2101 ;hrubovaci
79 Q2 = 1200 ;dokoncovaci
80 Q3 = 2101 ;posuv v Z
81 ;
82 CALL LBL 201 ;Mac 1 Position 1
83 ;Stejna poloha
84 CALL LBL 251 ;Nastavit polohu
85 L M26 ;Proud vzduchu vretenem
86 L M23
87 L X+52.5 Y+82 R0 FMAX M3
88 L Z+25 R0 FMAX
89 L Z+2 FMAX
90 STOP
91 L Z-3 FQ3
92 L X+47.5 RL FQ2 M110
93 ;Puvodni hodnota X+30
94 L Y-82
95 L X+52.5 R0
96 L Z+25 FMAX
97 FUNCTION AFC CUT END
98 ;
99 L M5 M9
100 L M23
101 L Z-1 R0 FMAX M91
102 L X-450 Y-375 FMAX M91
103 CALL LBL 252 ;Reset roviny obrabeni
104 PLANE RESET TURN FMAX

```
105 L M30
106 ;=====
107 ;= K O N E C   P R O G R A M U   =
108 ;=====
109 ;=====
110 ;= DATA POLOH NULOVEHO BODU =
111 ;=====
112 ;Mac 1 Position 1
113 LBL 201 ;Mac 1 Position 1
114 Q23 = 0 ;Posun X
115 Q24 = 0 ;Posun Y
116 Q25 = 0 ;Posun Z
117 Q20 = - 0 ;rotace SS kolem osy X
118 Q21 = 0 ;rotace SS kolem osy Y
119 Q22 = - 0 ;rotace SS kolem osy Z
120 ;-----
121 ;Lokalni posun NB
122 Q26 = 0 ;Posun X
123 Q27 = 0 ;Posun Y
124 Q28 = 0 ;Posun Z
125 ;Osa C: +0
126 ;Osa B: +0
127 LBL 0
128 ;=====
129 ;
130 ;Nastavit polohu
131 LBL 251 ;Nastavit polohu
132 CALL LBL 252 ;Reset roviny obrabeni
133 CYCL DEF 7.0 NULOVY BOD
134 CYCL DEF 7.1 X+Q23
135 CYCL DEF 7.2 Y+Q24
136 CYCL DEF 7.3 Z+Q25
137 Q32 = Q22 + Q29 ;C osa + transform 4x
138 M126
139 PLANE SPATIAL SPA+Q20 SPB+Q21 SPC+Q32 TURN FMAX SEQ+ TABLE ROT
```


140 CYCL DEF 7.0 NULOVY BOD
141 CYCL DEF 7.1 IX+Q26
142 CYCL DEF 7.2 IY+Q27
143 CYCL DEF 7.3 IZ+Q28
144 L M11 M23
145 LBL 0
146 ;Reset roviny obrabeni
147 LBL 252
148 FUNCTION RESET TCPM
149 PLANE RESET STAY
150 CYCL DEF 10.0 OTACENI
151 CYCL DEF 10.1 ROT+0
152 CYCL DEF 7.0 NULOVY BOD
153 CYCL DEF 7.1 X+0
154 CYCL DEF 7.2 Y+0
155 CYCL DEF 7.3 Z+0
156 L M10 M22
157 LBL 0
158 ;-----
159 ;
160 ;Odjezd Z k referenci
161 LBL 253
162 L Z-1 FMAX M91
163 LBL 0
164 ; [...] !
165 ;-----
166 ;
167 ;Odjezd k referenci XYZ
168 LBL 254
169 L Z-1 FMAX M91
170 L X-450 Y-375 FMAX M91
171 LBL 0
172 ; [...] !
173 END PGM SEDLAK MM

PŘÍLOHA č.3

NC program kapsy druhého experimentu

```
0 BEGIN PGM DP_SEDLAK_HRUB MM
1 ;DMU40eVo GPP_VER.:8
2 ;Date:11.4.2022 Time:09:34
3 ;
4 BLK FORM 0.1 Z X-52.5 Y-34.5 Z-40
5 BLK FORM 0.2 X+52.5 Y+34.5 Z+0
6 Q29 = 0 ;reset transformace 4.osy
7 CYCL DEF 32.0 TOLERANCE
8 CYCL DEF 32.1 T0.02
9 CYCL DEF 32.2 HSC-MODE:0 TA5
10 ;
11 ;*****
12 ;*** S E Z N A M N A S T R O J U ***
13 ;*****
14 ;129 - FR-D20 Z3 R0.8-ISCAR - H690 E90AX D20-2-C20-10
15 ; ... DRZAK: HYDRO KFH 20x90 / VYLOZENI: 60.
16 ;*****
17 ;
18 ;=====
19 * - HSR-R-CONT-OBROBEK
20 ;=====
21 L M5 M9
22 * - FR-D20 Z3 R0.8-ISCAR - H690 E90AX D20-2-C20-10
23 TOOL CALL 129 Z S3501
24 TOOL DEF 129
25 Q1=1050 ;pracovni
26 Q2=1050 ;najezdovy
27 Q3=1050 ;odjezdovy
28 ;
29 CALL LBL 201 ;Mac 1 Position 1
30 CALL LBL 254 ;Odjezd XYZ k referenci
31 CALL LBL 251 ;Nastavit polohu
32 L M26 ;Proud vzduchu vretenem
33 L M23
34 L X+36.188 Y-47.168 R0 FMAX M3
```

35 L Z+13 R0 FMAX
36 L Z+0.5 FMAX
37 L X+36.166 Y-47.137 Z+0.11 F+Q2
38 L X+36.102 Y-47.043 Z-0.265
39 L X+35.997 Y-46.89 Z-0.611
40 L X+35.856 Y-46.685 Z-0.914
41 L X+35.685 Y-46.436 Z-1.163
42 L X+35.489 Y-46.151 Z-1.348
43 L X+35.276 Y-45.842 Z-1.462
44 L X+35.055 Y-45.52 Z-1.5
45 L X+27.493 Y-34.517
46 L Y-34.52
47 L X-22.833
48 CC X-22.833 Y-36.82
49 C X-25.133 Y-36.82 DR+
50 L Y-37.21 Z-1.462
51 L Y-37.585 Z-1.348
52 L Y-37.931 Z-1.163
53 L Y-38.234 Z-0.914
54 L Y-38.483 Z-0.611
55 L Y-38.668 Z-0.265
56 L Y-38.782 Z+0.11
57 L Y-38.82 Z+0.5
58 L Z+3.505
59 L X-25.098 Z+4.018
60 L X-24.996 Y-38.816 Z+4.522
61 L X-24.827 Y-38.811 Z+5.008
62 L X-24.595 Y-38.804 Z+5.467
63 L X-24.304 Y-38.795 Z+5.891
64 L X-23.959 Y-38.784 Z+6.273
65 L X-23.567 Y-38.773 Z+6.605
66 L X-23.133 Y-38.759 Z+6.881
67 L X-22.697 Y-38.746 Z+7.086 FMAX
68 L X-22.239 Y-38.732 Z+7.235 FMAX
69 L X-21.765 Y-38.718 Z+7.325 FMAX

70 L X-21.284 Y-38.703 Z+7.355 FMAX
71 L X+20.817 Y-37.427 FMAX
72 L X+21.298 Y-37.412 Z+7.325 FMAX
73 L X+21.771 Y-37.398 Z+7.235 FMAX
74 L X+22.23 Y-37.384 Z+7.086 FMAX
75 L X+22.666 Y-37.37 Z+6.881 FMAX
76 L X+23.099 Y-37.357 Z+6.605 F+Q2
77 L X+23.492 Y-37.345 Z+6.273
78 L X+23.837 Y-37.335 Z+5.891
79 L X+24.128 Y-37.326 Z+5.467
80 L X+24.36 Y-37.319 Z+5.008
81 L X+24.528 Y-37.314 Z+4.522
82 L X+24.631 Y-37.311 Z+4.018
83 L X+24.665 Z+3.505
84 L Z+0.5
85 L X+24.638 Y-37.283 Z+0.11
86 L X+24.557 Y-37.202 Z-0.265
87 L X+24.427 Y-37.072 Z-0.611
88 L X+24.251 Y-36.896 Z-0.914
89 L X+24.036 Y-36.681 Z-1.163
90 L X+23.792 Y-36.437 Z-1.348
91 L X+23.527 Y-36.172 Z-1.462
92 L X+23.251 Y-35.896 Z-1.5
93 L X+14.811 Y-27.456
94 CC X+8.631 Y-33.636
95 C X+8.631 Y-24.896 DR+
96 L X-9.228
97 CC X-9.228 Y-26.046
98 C X-10.377 Y-25.988 DR+
99 C X-9.343 Y-27.19 DR+
100 L X+6.772 Y-28.808
101 CC X+7.002 Y-26.519
102 C X+8.631 Y-24.896 DR+
103 CC X+26.011 Y-7.57
104 C X+3.464 Y-17.26 DR-

105 CC X+39.01 Y+1.798
106 C X-0.655 Y-5.51 DR-
107 CC X-1.321 Y-5.733
108 C X-2.004 Y-5.568 DR+
109 CC X-71.442 Y+9.371
110 C X-9.228 Y-24.896 DR-
111 CC X-7.214 Y-26.005
112 C X-8.323 Y-28.02 DR+
113 L X-7.981 Y-28.208 Z-1.462
114 L X-7.653 Y-28.389 Z-1.348
115 L X-7.35 Y-28.556 Z-1.163
116 L X-7.084 Y-28.702 Z-0.914
117 L X-6.867 Y-28.822 Z-0.611
118 L X-6.705 Y-28.911 Z-0.265
119 L X-6.605 Y-28.966 Z+0.11
120 L X-6.571 Y-28.985 Z+0.5
121 L Z+3.505
122 L X-6.541 Y-29.001 Z+4.018
123 L X-6.451 Y-29.049 Z+4.522
124 L X-6.302 Y-29.129 Z+5.008
125 L X-6.097 Y-29.238 Z+5.467
126 L X-5.841 Y-29.376 Z+5.891
127 L X-5.537 Y-29.539 Z+6.273
128 L X-5.19 Y-29.724 Z+6.605
129 L X-4.808 Y-29.928 Z+6.881
130 L X-4.423 Y-30.134 Z+7.086 FMAX
131 L X-4.019 Y-30.351 Z+7.235 FMAX
132 L X-3.601 Y-30.574 Z+7.325 FMAX
133 L X-3.177 Y-30.801 Z+7.355 FMAX
134 L X+24.622 Y-45.678 FMAX
135 L X+25.046 Y-45.905 Z+7.325 FMAX
136 L X+25.464 Y-46.129 Z+7.235 FMAX
137 L X+25.868 Y-46.345 Z+7.086 FMAX
138 L X+26.253 Y-46.551 Z+6.881 FMAX
139 L X+26.635 Y-46.756 Z+6.605 F+Q2

140 L X+26.981 Y-46.941 Z+6.273
141 L X+27.286 Y-47.104 Z+5.891
142 L X+27.542 Y-47.241 Z+5.467
143 L X+27.747 Y-47.351 Z+5.008
144 L X+27.895 Y-47.43 Z+4.522
145 L X+27.986 Y-47.479 Z+4.018
146 L X+28.016 Y-47.495 Z+3.505
147 L Z+0.5
148 L X+28.022 Y-47.457 Z+0.11
149 L X+28.04 Y-47.345 Z-0.265
150 L X+28.069 Y-47.162 Z-0.611
151 L X+28.108 Y-46.917 Z-0.914
152 L X+28.156 Y-46.617 Z-1.163
153 L X+28.211 Y-46.276 Z-1.348
154 L X+28.27 Y-45.905 Z-1.462
155 L X+28.331 Y-45.52 Z-1.5
156 L X+29.048 Y-41.023
157 CC X+20.417 Y-39.647
158 C X+27.493 Y-34.517 DR+
159 L X+13.303 Y-14.944
160 L X+12.215 Y-13.253
161 L X+11.529 Y-11.583
162 L X+5.432 Y+6.619
163 CC X+4.484 Y+6.302
164 C X+4.839 Y+7.236 DR+
165 L X+4.195 Y+7.364
166 L X-8.399 Y+5.984
167 CC X-8.29 Y+4.99
168 C X-9.127 Y+5.537 DR+
169 L X-9.322 Y+5.133
170 L X-13.12 Y-10.602
171 L X-13.653 Y-12.369
172 L X-24.917 Y-34.339
173 CC X-24.807 Y-34.396
174 C X-24.856 Y-34.51 DR+

175 L X-24.833 Y-34.52
176 CC X-23.918 Y-32.41
177 C X-21.807 Y-33.325 DR+
178 L X-21.652 Y-32.967 Z-1.462
179 L X-21.503 Y-32.623 Z-1.348
180 L X-21.365 Y-32.305 Z-1.163
181 L X-21.245 Y-32.027 Z-0.914
182 L X-21.146 Y-31.799 Z-0.611
183 L X-21.072 Y-31.629 Z-0.265
184 L X-21.027 Y-31.525 Z+0.11
185 L X-21.012 Y-31.49 Z+0.5
186 L Z+13 FMAX
187 ;
188 L M5 M9
189 L M23
190 L Z-1 R0 FMAX M91
191 L X-450 Y-375 FMAX M91
192 CALL LBL 252 ;Reset roviny obrabeni
193 PLANE RESET TURN FMAX
194 L X-450 Y-2 FMAX M91
195 L M30
196 ;=====

197 ;= K O N E C P R O G R A M U =

198 ;=====

199 ;=====

200 ;= DATA POLOH NULOVEHO BODU =

201 ;=====

202 ;Mac 1 Position 1
203 LBL 201 ;Mac 1 Position 1
204 Q23=0 ;Posun X
205 Q24=0 ;Posun Y
206 Q25=0 ;Posun Z
207 Q20=-0 ;rotace SS kolem osy X
208 Q21=0 ;rotace SS kolem osy Y
209 Q22=-0 ;rotace SS kolem osy Z

210 ;-----
211 ;Lokalni posun NB
212 Q26=0.000 ;Posun X
213 Q27=0.000 ;Posun Y
214 Q28=0.000 ;Posun Z
215 ;Osa C: +0
216 ;Osa B: +0
217 LBL 0
218 ;=====

219 ;
220 ;Nastavit polohu
221 LBL 251 ;Nastavit polohu
222 CALL LBL 252 ;Reset roviny obrabeni
223 CYCL DEF 7.0 NULOVY BOD
224 CYCL DEF 7.1 X+Q23
225 CYCL DEF 7.2 Y+Q24
226 CYCL DEF 7.3 Z+Q25
227 Q32=Q22+Q29 ;C osa + transform 4x
228 M126
229 PLANE SPATIAL SPA+Q20 SPB+Q21 SPC+Q32 TURN FMAX SEQ+ TABLE ROT
230 CYCL DEF 7.0 NULOVY BOD
231 CYCL DEF 7.1 IX+Q26
232 CYCL DEF 7.2 IY+Q27
233 CYCL DEF 7.3 IZ+Q28
234 L M11 M23
235 LBL 0
236 ;Reset roviny obrabeni
237 LBL 252
238 FUNCTION RESET TCPM
239 PLANE RESET STAY
240 CYCL DEF 10.0 NATOCENI
241 CYCL DEF 10.1 ROT+0
242 CYCL DEF 7.0 NULOVY BOD
243 CYCL DEF 7.1 X+0
244 CYCL DEF 7.2 Y+0

245 CYCL DEF 7.3 Z+0
246 L M10 M22
247 LBL 0
248 ;-----
249 ;
250 ;Odjezd Z k referenci
251 LBL 253
252 L Z-1 FMAX M91
253 LBL 0
254
255 ;-----
256 ;
257 ;Odjezd k referenci XYZ
258 LBL 254
259 L Z-1 FMAX M91
260 L X-450 Y-375 FMAX M91
261 LBL 0
262
263 END PGM DP_SEDLAK_HRUB M