



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ  
UNIVERZITA V BRATISLAVE  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A INFORMATIKY

**Ing. Michal Maťuga**

**Autoreferát dizertačnej práce**

# **Riadenie kmitavých mechatronických systémov**

**na získanie akademického titulu:** „doktor“ („philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“)

**v doktorandskom študijnom programe:** Automatizácia a riadenie

**v študijnom odbore:** 5.2.14 automatizácia

**Forma štúdia:** externá forma

**Miesto a dátum:** Bratislava 2019



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ  
UNIVERZITA V BRATISLAVE  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A INFORMATIKY

Dizertačná práca bola vypracovaná na:

MicroStep spol. s r.o.  
Vajnorská 158, 831 02 Bratislava

Predkladateľ:

Ing. Michal Maťuga  
MicroStep spol. s r.o.  
Vajnorská 158, 831 02 Bratislava

Školiteľ:

prof. Ing. Peter Hubinský, PhD.  
Ústav robotiky a kybernetiky  
Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita  
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti:

prof. Ing. Aleš Janota, PhD.  
Katedra riadiacich a informačných systémov  
Fakulta elektrotechniky a informačných technológií, Žilinská univerzita  
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

prof. Ing. Stanislav Žiaran, CSc.  
Ústav výrobných systémov, environmentálnej techniky a manažmentu kvality  
Strojnícka fakulta, Slovenská technická univerzita  
Námestie slobody 17, 812 31 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa: .....

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa 15.11.2019 o 10:00 h na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU, Ilkovičova 3, Bratislava.

.....  
prof. Dr. Ing. Miloš Oravec  
dekan fakulty  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Slovenská technická univerzita

# 1 Abstrakt

Táto práca sa venuje zlepšeniu kvality rezania na CNC strojoch, ktoré dosahujú veľkosti rádovo v desiatkach metrov. Na týchto strojoch sa zlepšením algoritmov generujúcich žiadanú trajektóriu pohybov (interpolátor) snaží dosiahnuť kvalitnejšie polohovanie. Na dosiahnutie cieľa sa snaží vytvoriť rýchlu a efektívnu metódu identifikácie dominantných dynamických vlastností mechaník strojov – vlastnú frekvenciu a tlmenie kmitania problémových komponentov.

Na základe týchto vlastností práca popisuje správanie pokročilého viacosového interpolátora, ktorý zaradením tangenciálneho ZVD filtra zrýchlenia generuje rozbehové impulzy tak, aby nedošlo k vybudeniu kmitania mechaniky. To znamená, že vo frekvenčnom spektre daného impulzu nedochádza v oblasti vlastnej frekvencie kmitania pohybovanej mechaniky k prenosu energie.

Ďalším zvýšením kvality polohovania je upravenie generovania prechodu medzi rohmi dvoch pohybov tak, že dochádza k upraveniu generovanej trajektórie v povolených odchýlkach od ideálnej trajektórie tak, aby efektor takýmto rohom prešiel oblúčikom bez zastavenia. Tým efektor prejde rohom rýchlejšie, čo šetrí čas, no hlavne nedôjde k poškodeniu rezaného materiálu v dôsledku prílišného odovzdania tepla z energolúčovej rezacej technológie na jedno miesto kvôli spomaleniu pohybu efektora.

## 2 Abstract

This paper is dedicated to improving the cutting quality on CNC machines which dimensions reach the order of tens of meters. The paper tries to achieve better positioning on machines of this type by development of better algorithms for movement interpolation. To achieve this goal, author tries to create a fast and cost efficient method to identify the dynamic properties of machine mechanics, in particular the oscillation frequency and damping characteristic of the machine mechanics.

Based on these properties, the paper describes the behavior of an advanced multi-axis interpolator, with implemented tangential ZVD filter, and generates advanced acceleration impulses trying to avoid mechanical oscillations.

Another increase in positioning quality is to optimize the transition on the corners in desired trajectory. Trajectory is deformed in defined tolerances in order to move through desired corner on arc trajectory. The cutting torch will move through the corner faster, saving time, but in particular, the cut material will not be burnt – there will be no excessive heat transferred from the cutting technology to one place due to slowing down the movement of the torch.

### 3 Obsah

1	Abstrakt.....	1
2	Abstract.....	2
3	Obsah.....	3
4	Úvod.....	4
5	Tézy dizertačnej práce.....	5
6	Mechatronicke systémy a ich vlastnosti.....	5
6.1	Vlastnosti kmitov a ich matematický opis.....	8
6.2	Dynamická analýza vlastností strojov.....	9
6.2.1	Meranie MEMS akcelerometrom.....	10
6.2.2	Filtrácia šumu z priebehu nameraného akcelerometrom.....	11
6.2.3	Zladienie súradnicového systému akcelerometra a stroja.....	12
6.2.4	Identifikácia vlastnej frekvencie kmitania mechaniky.....	13
6.2.5	Identifikácia koeficientu tlmenia sústavy.....	15
7	Pokročilé riadenie mechatronických systémov.....	18
7.1	ZVD filter ako tvarovací algoritmus pre pohyb jednotlivých osí.....	18
7.1.1	Implementácia diskretného ZVD filtra.....	20
7.1.2	Simulačné vyšetrenie návrhu tvarovača so ZVD filtrom.....	21
8	Vzájomné riadenie viacerých osí - interpolátor.....	23
8.1	Tangenciálny interpolátor pohybov pre viacero osí.....	24
8.1.1	Určenie prírastku ubehnutej dráhy.....	24
8.2	Interpolátor s tangenciálnym ZVD tvarovačom.....	25
8.3	Optimalizácia interpolátora na rýchlejší prechod rohmi.....	26
8.4	Vyšetrenie prínosu riadenia implementovaného interpolátora v reálnych podmienkach.....	30
8.4.1	Vyšetrované spôsoby riadenia (interpolácie).....	32
9	Praktické overenie činnosti pracoviska.....	38
10	Záver.....	39
11	Zoznam použitej literatúry.....	41
12	Publikované práce autora.....	42
12.1	ADM - Vedecké práce v zahraničných časopisoch registrované v databázach Web of Science alebo SCOPUS.....	42
12.2	ADF - Vedecké práce v ostatných domácich časopisoch.....	43
12.3	AGI - Správy o vyriešených vedeckovýskumných úlohách.....	44

## 4 Úvod

Obrábacie CNC stroje sú už dlhé roky neoddeliteľnou súčasťou sveta automatizácie. Postupným vývojom sa na tieto zariadenia kladú čoraz väčšie nároky na kvalitu obrábania, čas obrábania, výrobné náklady či rozmerové možnosti.

Firma MicroStep sa sústredila na výrobu CNC rezacích strojov, ktoré sú určené na delenie materiálov pomocou plynu, plazmy, alebo laserového lúča – energolúčovými technológiami. Tieto technológie sa na rozdiel od klasického obrábania (napr. frézovanie) vyznačujú minimálnou mechanickou interakciou s obrábaným materiálom a ich lúč je pružný.

Požiadavky na veľkosť rezaných komponentov sú čoraz väčšie, takže aj vyrábané stroje sa zákonite zväčšujú. Zvyšujúci sa výkon technológií umožňuje za účelom zvýšenia produktivity deliť materiály čoraz vyššími rýchlosťami. S takýmto vývojom prichádzajú problémy, ktoré menšie a pomalšie stroje nemajú. Mechanika dosahuje rozmery, kedy sa pri vyšších zrýchleniach výrazne prejavuje pružnosť materiálu. Pri pohyboch majú nosníky tendenciu kmitať, čo znižuje presnosť polohovania efektoru, ktorý delí materiál. Výsledkom je zníženie kvality rezu a vyrezaného komponentu.

Preto je potrebné doterajšie rozbehové krivky pohybov nahradiť takými, ktoré zohľadňujú dynamické vlastnosti mechaniky a polohujú stroj tak, aby sa efektor nerozkmital. Pri hľadaní takýchto algoritmov je potrebné zohľadniť finančné aj časové náklady. Samotný stroj sa musí pohybovať čo najrýchlejšie, aby zákazník používajúci stroj dosiahol maximálnu efektivitu prevádzky. Nasadenie takejto technológie nesmie byť veľmi finančne náročné, inak by to predražilo výrobu strojov, ktoré by mohli stratiť konkurencieschopnosť.

Ďalšie požiadavky na polohovanie efektoru kladie samotná technológia, ktorá pracuje optimálne len pri vhodnej (žiadanej) rýchlosti pohybov a každá zmena rýchlosti počas rezania (napr. zastavenie v rohoch) znižuje kvalitu výrobku.

Táto práca sa venuje vývoju spôsobu efektívnej identifikácie dynamických vlastností mechaniky pomocou akcelerometra, na základe ktorých je následne možné uplatniť pokročilé riadenie polohovania rezacieho pracoviska pomocou implementácie prechodov rohmi cez oblúčky a implementáciou tangenciálneho ZVD filtra. Ďalej sa venuje implementácii pokročilého interpolátora do existujúceho riadiaceho systému pracovísk vyrábaných firmou MicroStep tak, aby sa zlepšila rýchlosť a kvalita polohovania efektoru energolúčových technológií, čím sa zvýši kvalita rezania.

## 5 Tézy dizertačnej práce

Táto práca má za cieľ naplniť nasledovné ciele:

1. Vytvoriť jednoduchú a finančne dostupnú metódu na identifikáciu dynamických vlastností mechaník konkrétnych strojov tak, aby ju bolo ľahké použiť pri inštalácii konkrétneho rezacieho pracoviska.  
Zamerat' sa má hlavne na frekvenčné vlastnosti mechaniky (dominantné kmitavé módy), kde je potrebné určiť frekvenciu a tlmenie kmitania.
2. Vytvoriť vhodné typy rozbehových kriviek (tvarovačov), ktoré pri pohyboch zohľadňujú identifikované frekvenčné vlastnosti mechaniky konkrétneho stroja.
3. Algoritmy generujúce rozbehové krivky pre jednotlivé osi medzi sebou previazať a zohľadniť zmeny, ktoré môže tento krok vyvolať. Tým sa vytvorí komplexný viacosový interpolátor, vhodný pre riadenie viacerých (XYZ) osí stroja.
4. Optimalizovať polohovanie energolúčovej technológie tak, aby bola čo najlepšie dodržaná žiadaná rezná rýchlosť technológie, teda navrhnuť metódu na optimalizáciu pohybu pri zmene smeru.
5. Vytvorený interpolátor implementovať do súčasného riadiaceho systému stroja.
6. Meraním a praktickým použitím overiť vlastnosti a účinnosť nasadeného interpolátora. Z hľadiska rýchlosti a kvality ho porovnať s pôvodnými algoritmami generujúcimi rozbehové krivky.

## 6 Mechatronické systémy a ich vlastnosti

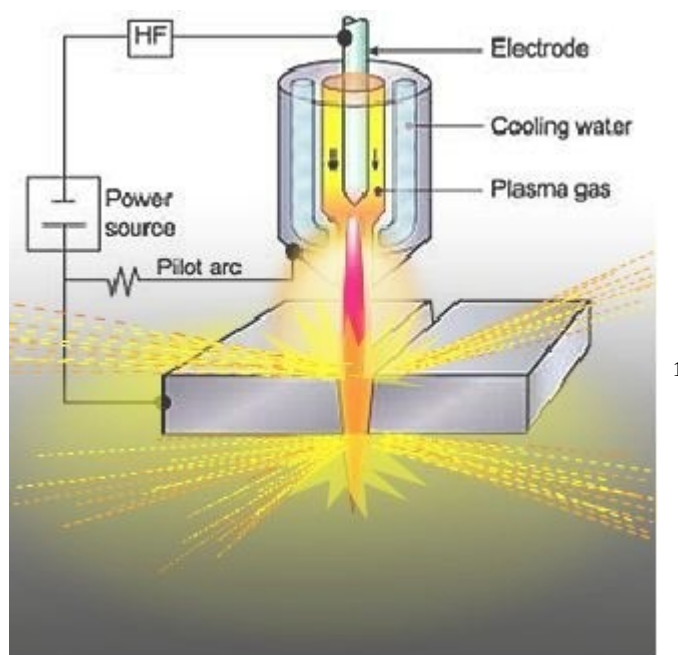
Firma MicroStep sa primárne venuje výrobe plynových, plazmových, vodných a laserových rezacích strojov. Veľkosť rezacieho stola sa pohybuje rádovo v metroch, najmenšie stroje majú reznú plochu cca 1x1 m. Najväčšie stroje obsahujú rezací stôl o veľkosti 50x18 metrov. Najčastejšie používaná technológia rezania je plazmová technológia. Ňou je možné dosiahnuť rezanie s presnosťou lepšou ako 0,1 mm. Rezanie plazmovým lúčom má svoje špecifiká, ktoré sú v tejto kapitole bližšie popísané. V záujme maximalizovania kvality rezu vyžaduje pokročilé metódy polohovania rezacieho efektora (horáka), ktorým sa venuje táto práca.

Pracoviská sú používané na rezanie dielcov napríklad pre automobilový, letecký a lodný priemysel. Takisto nachádzajú využitie pri výrobe vojenských strojov a rakiet.

Každá termická rezacia technológia vytvára súvislý usmernený prúd rezných plynov. Tie vytláčajú, alebo priamo spaľujú roztavený materiál a vzniká štrbina – rez. Materiál je zahrievaný v závislosti od použitej technológie.

Rezanie vodným lúčom, ktorý nie je termická technológia, je špecifické tým, že rez vytvára prúd vody vytlačanej z trysky pod extrémnym tlakom niekoľko tisíc barov.

Rez teda vzniká pod vyústením horáka, ktorý je nutné polohovať čo najpresnejšie.



Obrázok 1: Náčrt rezania plazmovým horákom

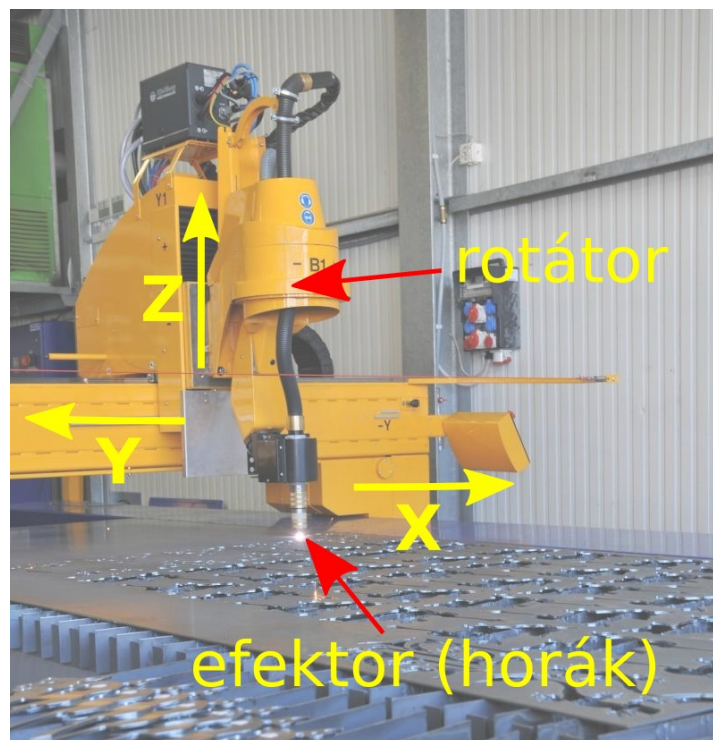
Väčšina strojov produktového radu MicroStep používa pravouhlú karteziánsku XYZ koncepciu polohovania – motory spôsobujú pohyb efektora priamo v osiach karteziánskej sústavy. Stroje sa skladajú z niekoľkých hlavných súčastí, ktoré sú zobrazené na obrázku 2:

- rezací stôl, ktorý je statický. Na tomto stole je položený poloprodukt, z ktorého stroj opracovaním (rezaním) vyrába žiadané diely
- portál, ktorý sa po statických vedeniach upevnených na zemi horizontálne pohybuje v smere osi X
- Y suporty, ktoré sa horizontálne pohybujú po portáli v smere osi Y

1 Dostupné na <http://www.ustudy.in/sites/default/files/images/plasma%20arc%20cutting%20torch.JPG>



- hlavy, ktoré sú upevnené na Y suportoch, sa vertikálne pohybujú v smere osi Z a nesú efektor technológie, ktorý reže do poloproduktu, tzv. horák
- efektor nemusí byť na hlavách upevnený priamo. Môže byť upevnený cez rotátor, ktorý zabezpečuje nakláňanie technológie (horáka) a tým umožňuje úkosové rezanie. Rotátor prináša do koordinačného systému ďalšie dve riadené osi pre náklon a azimut efektora (osi A, B). Zmena polohy počas rezu v týchto osiach je zriedkavá a má nízku dynamiku. Preto v dôsledku tuhosti mechaniky tieto osi vnášajú do výslednej polohy zanedbateľnú chybu



*Obrázok 2: Hlavné časti stroja, detail na rotátor zabezpečujúci polohovanie pri úkosovom rezaní*

Zaručiť presné a relatívne rýchle polohovanie po plochách s rozmermi v rádoch desiatok metrov vyžaduje masívnu mechaniku. Tým samozrejme stúpa hmotnosť a zotrvačnosť, čo ešte výrazne zosilňuje pákový efekt. Dochádza ku kmitaniu efektora, ktoré spôsobuje neželanú odchýlku polohy, čo má za následok znížené kvality (presnosti) rezu. Kmitanie býva spôsobené zmenou rýchlosti pri prechode rohom, kedy musí efektor v rohu úplne zastat' a znovu sa rozbehnúť iným smerom.

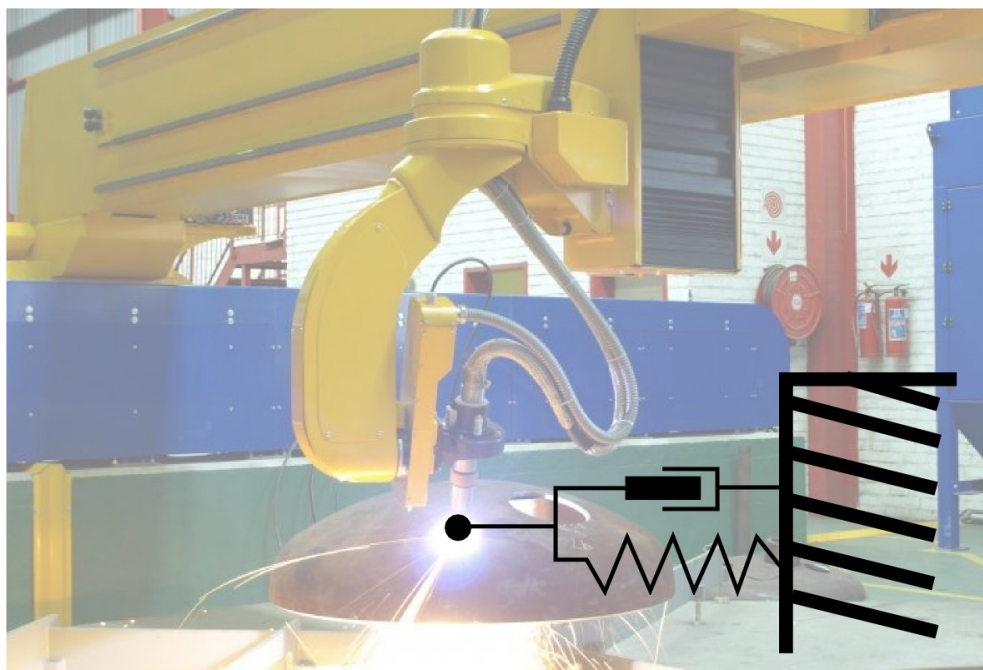


*Obrázok 3: Pri zložitých 3D rezoch je pákový efekt výrazný a je problém dosiahnuť žiadanú kvalitu rezu pri zrýchleniach a rýchlostiach vyžadovaných technológiou*

## **6.1 Vlastnosti kmitov a ich matematický opis**

Počas brzdenia a zrýchlenia v danej osi pôsobí na mechaniku sila  $F=m.a$ . Tá spôsobí napnutie materiálu, z ktorého je mechanika stroja vyrobená. Po ukončení fázy, kedy sa mení rýchlosť stroja a teda zrýchlenie je nenulové, táto sila na mechaniku prestane pôsobiť. Dôjde k uvoľneniu napnutého materiálu, následkom čoho sa pružná mechanika rozkmitá.

Materiál je pružný, teda ide o rovnaký princíp, ako keď impulzom sily rozkmitáme predmet pripevnený na pružine, ktorá je na druhom konci uchytená v pevnom bode. Tuhosť mechaniky tieto kmity tlmí. Teda správanie mechaniky sa dá aproximovať sústavou pružiny a tlmiča.



Obrázok 4: Náčrt modelu horáka na stroji

Tento jednoduchý model dostatočne reprezentuje zložitý mechanizmus stroja, ktorý by inak bolo potrebné zložito matematicky opísať – opísať sériu nosníkov so zohľadnením ich pružností. Navyše tieto nosníky podľa polohy stroja menia svoje vlastnosti, napríklad body podopretia.

Model načrtnutý na obrázku 4 opisuje kmitanie špičky horáku v **jednej osi** a nie je zložité matematicky opísať a nájsť jeho prenosovú funkciu. Bod, ktorý sa nachádza v špičke horáku je hmotný a jeho pozícia je matematicky opísaná dobre simulovateľnou prenosovou funkciou druhého rádu vyjadrenou v rovnici 6.1.  $U(s)$  – vstup do systému je sila, vytvorená pôsobením motorov pri zmene žiadanej polohy.  $Y(s)$  je skutočná poloha špičky horáku v danej osi voči žiadanej polohe, teda odchýlka od žiadanej polohy spôsobená pružnosťou mechaniky.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\omega_0^2 G}{s^2 + 2\zeta \omega_0 s + \omega_0^2} \quad (6.1)$$

## 6.2 Dynamická analýza vlastností strojov

V kapitole 6.1 sa nachádza opis systému obsahujúci konštanty, ktoré je potrebné získať meraním na skutočnej mechanike. Sú to vlastná frekvencia mechaniky -  $\omega_0$  a koeficient tlmenia mechaniky -  $\zeta$ .

Vlastná frekvencia mechaniky je frekvencia, ktorou sa po počiatočnom impulze sily mechanika rozkmitá. Túto frekvenciu je teda možné získať

meraním polohy konca horáku v čase. Koniec horáku je totožný s hmotným bodom zjednodušenej sústavy.

Koeficient tlmenia sústavy, ktorý vyjadruje schopnosť sústavy tlmiť kmitanie, je takisto možné odvodiť z časového priebehu kmitajúcej sústavy – porovnaním poklesu amplitúdy jednotlivých kmitov.

Prvým krokom pri identifikácii je teda nameranie časového priebehu polohy konca horáku po vstupnom impulze sily – napríklad úderu kladivom, poprípade samotným pohybom stroja.

### 6.2.1 Meranie MEMS akcelerometrom

Akcelerometer sníma akceleráciu v jednotlivých osiach, z ktorej je možné dvojitou integráciou získať časový priebeh polohy horáka. Keďže meriame tlmené kmitanie, ktoré má sínusový priebeh a amplitúda priebehu pre nás nie je zaujímavá, následné spracovanie dát si môžeme výrazne uľahčiť.

Aby sme získali polohu efektora, pre sínusový priebeh nameraného zrýchlenia s nulovými počiatočnými podmienkami platí:

$$\iint a_{max} \sin(\omega t) dt = -\frac{a_{max}}{\omega} \int \cos(\omega t) dt = -\frac{a_{max}}{\omega^2} \sin(\omega t) \quad (6.2)$$

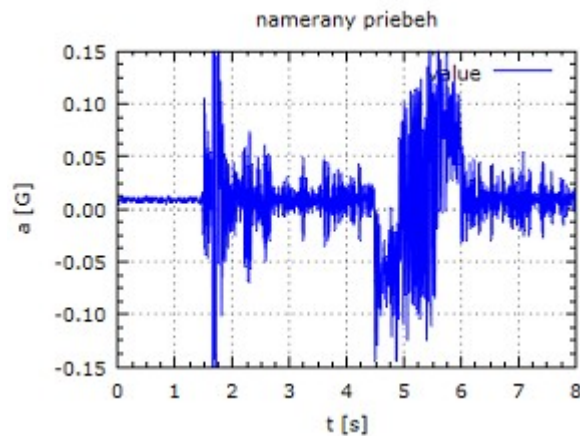
Koeficient z rovnice 6.2 je možné rozdeliť na tri časti, ako je uvedené v rovnici 6.3.

$$-\frac{a_{max}}{\omega^2} = (-1) \frac{1}{\omega^2} a_{max} \quad (6.3)$$

Hodnota pôvodnej amplitúdy priebehu kmitania zrýchlenia  $a_{max}$  je zmenená koeficientom  $1/\omega^2$ . Ďalší koeficient  $(-1)$  spôsobuje fázový posun o  $180^\circ$ .

Z toho vyplýva, že dvojitá integrácia sínusového priebehu akcelerácie nemení dynamiku priebehu sústavy, ktorá zostáva daná časťou  $\sin(\omega t)$ . Koeficient tlmenia priebehu (pomer amplitúd jednotlivých kmitov) aj frekvencia kmitania priebehu zostane rovnaká, preto je postačujúca identifikácia priebehu akcelerácie a nie je potrebné priebeh integrovať zrýchlenie, aby sme získali polohu efektora.

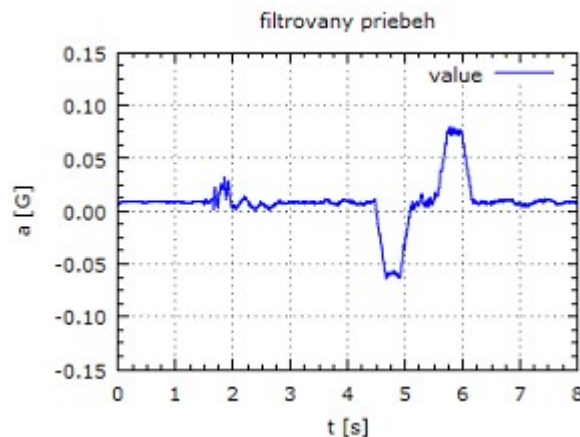
## 6.2.2 Filtrácia šumu z priebehu nameraného akcelerometrom



Obrázok 5: Nameraný priebeh z akcelerometra

Šum na priebehu z obrázku 5 je spôsobený vibráciami počas pohybu stroja. Tie sú spôsobené napríklad polohovým riadením motorov (to bolo na priebehu z obrázku 5 zapnuté v čase  $\sim 1,6$ s) alebo pohybom pastorkov po ozubených hrebeňoch. Majú rádovo vyššiu frekvenciu ako vlastná frekvencia kmitania mechaniky. Pre to je na nameraný priebeh vhodné uplatniť dolnopriepustný filter, ktorý šum vysokej frekvencie odfiltruje. V tomto prípade bol zvolený číslicový FIR (Finite Impulse Response) filter typu „plávajúci priemer“ (moving average).

Šírka filtra je v nepriamo úmernom vzťahu s medznou frekvenciou filtra. Zvyšovaním šírky plávajúceho priemeru, teda počtu vzoriek z ktorého sa priemer počíta, znižujeme medznú frekvenciu dolnopriepustného filtra. Počas skúšok sme volili čo najužší plávajúci priemer (najvyššiu medznú frekvenciu) tak, aby sme odfiltrovali nežiadané šumy, no čo najmenej ovplyvnili nižšie frekvencie. Výsledný filtrovaný priebeh zrýchlenia sa nachádza na obrázku 6.

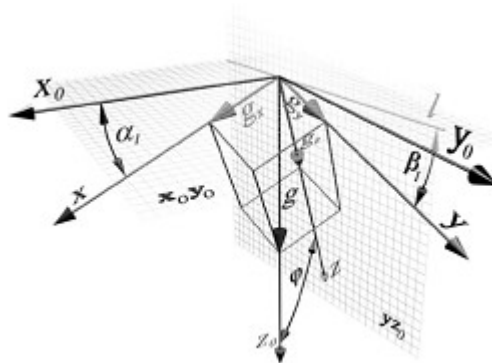


Obrázok 6: Priebeh z obrázku 5 vyfiltrovaný dolnopriepustným filtrom

### 6.2.3 Zladienie súradnicového systému akcelerometra a stroja

Ďalšie problémy pri meraní spôsobuje konštrukcia stroja a nemožnosť mechanicky zosúladiť osi, v ktorých akcelerometer meria, s osami, v ktorých sa stroj pohybuje. Pokiaľ osi nie sú paralelné, pohyb a kmitanie v jednej osi stroja sa rozloží a nasníma viacerými osami akcelerometra.

Zosúladienie je potrebné vykonať po meraní a na to je potrebné nájsť koeficienty transformačnej matice, ktorá transformuje súradnicový systém (ďalej SS) akcelerometra do SS stroja. Nie je potrebné robiť transláciu (posunutie), no je nutné vykonať rotáciu okolo všetkých osí tak, aby boli osi stroja a akcelerometra navzájom paralelné. Je teda potrebné zistiť hodnotu čiastkových uhlov natočenia SS, ako sú zobrazené na obrázku 7.



Obrázok 7: Natočenie súradnicového systému a jeho čiastkové uhly

Na to nám veľmi dobre poslúži vektor gravitačnej sily. Gravitačná sila vytvára zrýchlenie, ktoré akcelerometer nameria ako každé iné zrýchlenie. Stroj je pevne uložený vo vodorovnej polohe, os Z stroja je rovnobežná s vektorom gravitačnej sily. Pokiaľ teda osi Z stroja a akcelerometra nie sú rovnobežné, teda čiastkový uhol  $\varphi$  je nenulový, gravitačný vektor sa rozloží aj medzi osi X a Y. Z toho je možné určiť čiastkové uhly  $\alpha$  a  $\beta$ , podľa rovníc 6.4, ktoré vychádzajú z rozkladu vektora. Konštanty  $g_x$ ,  $g_y$  a  $g_z$  vyjadrujú veľkosti zložiek zrýchlenia nameraného v jednotlivých osiach akcelerometra, ktorý sa nachádza v pokoji, teda naňho pôsobí len gravitačné zrýchlenie.

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{g_y}{g_z}\right) \quad \beta = \tan^{-1}\left(\frac{g_x}{g_z}\right) \quad (6.4)$$

Tretí chýbajúci čiastkový uhol  $\varphi$  potrebný na úplnú transformáciu SS je možné získať tak, že vytvoríme zrýchlenie, ktorého vektor je rovnobežný s jednou z X alebo Y osí stroja, teda so strojom pohneme a vzniknuté zrýchlenie nameriame akcelerometrom. Tento vektor sa tak isto ako gravitačný vektor rozloží medzi niekoľko osí.

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{g_x}{g_y}\right) \quad (6.5)$$

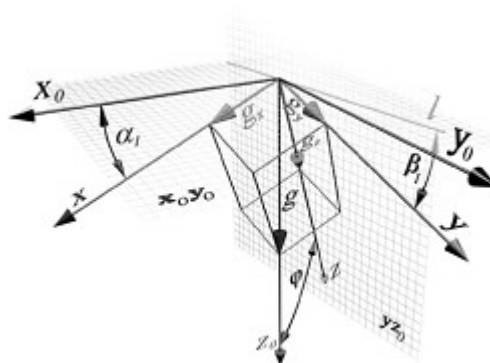
Na základe uhlov získaných v rovniciach 6.4 a 6.5 môžeme vytvoriť rotačnú maticu súradného systému *rotXYZ* popísanú v rovnici 6.9.

$$\text{rotX} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

$$\text{rotY} = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

$$\text{rotZ} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0 \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

$$\text{rotXYZ} = \text{rotX} * \text{rotY} * \text{rotZ} \quad (6.9)$$



Obrázok 8: Natočenie súradného systému a jeho čiastkové uhly

#### 6.2.4 Identifikácia vlastnej frekvencie kmitania mechaniky

Najjednoduchším spôsobom, ako získať frekvenciu kmitania mechaniky by bolo priamo odmerať periódu jednotlivých kmitov. Tento postup by ale do výsledku vniesol niekoľko chýb, ktoré by ho výrazne skreslili.

- frekvencia vzorkovania akcelerometra skresľuje aktuálny čas. Časový priebeh nie je spojitý, ale diskretný
- rôzne šумы, ktoré sú stále nasuperponované na priebeh, skresľujú amplitúdu

- mechanika môže mať viacero komponentov. Každý z komponentov môže mať rozdielnú frekvenciu kmitania. Tieto frekvencie sú navzájom nasuperponované, teda je nemožné odčítať ich periódu

Hlavne kvôli poslednému bodu nie je možné priamo odčítať frekvenciu kmitania mechaniky. V tomto prípade veľmi dobre poslúži Fourierova transformácia.

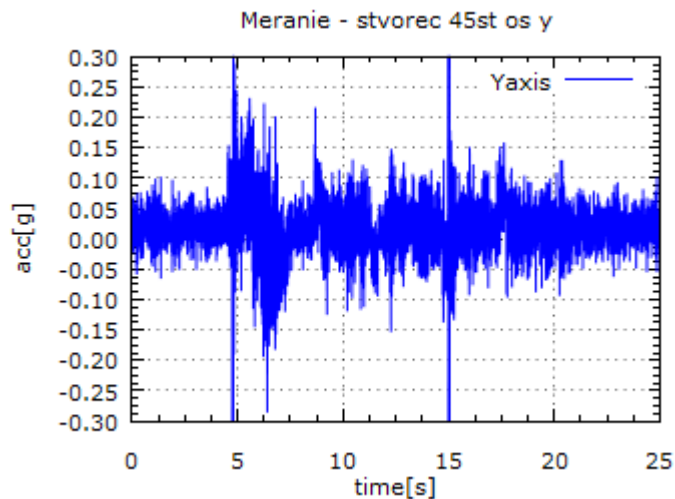
Nameraný priebeh zrýchlenia bude po Fourierovej transformácii opísaný sumou harmonických funkcií s rôznymi frekvenciami a amplitúdami. Keďže najvýraznejšia zložka meraného priebehu je zrýchlenie vyvolané kmitaním mechaniky vo vlastnej frekvencii (po odmyslení šumov je to jediná zložka meraného priebehu), členy Fourierovho rozvoja s najvyššou amplitúdou budú práve členy, ktoré budú opisovať kmitanie mechaniky. Ich frekvencia nám po transformácii bude známa, čím sa dostaneme k presnej frekvencii (poprípade viacerým frekvenciám) vlastného kmitania mechaniky.

Vzhľadom na to, že vo frekvenčnom spektre nám namerané vysokofrekvenčné šумы nijak neskresľujú výsledok, pri hľadaní vlastnej frekvencie mechaniky nefiltrujeme priebeh dolnopriepustným filtrom popísaným v kapitole 6.2.2 *Filtrácia šumu z priebehu nameraného akcelerometrom*.

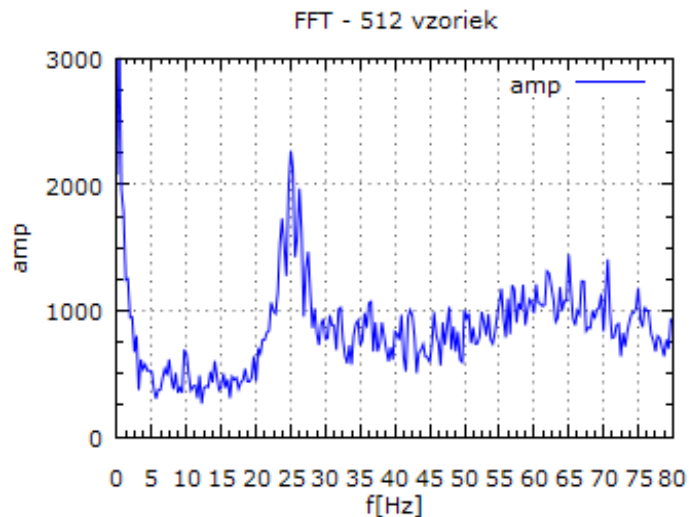
Obrázok 9 zobrazuje nameraný priebeh zrýchlenia v rámci rezného programu štvorca, na ktorom bolo identifikované frekvenčné spektrum mechaniky – vstupné dáta do Fourierovej transformácie.

Výsledok Fourierovej transformácie vidno na obrázku 10. Špičku v blízkosti nuly ignorujeme, pretože sú to frekvencie spôsobené zrýchlením počas samotných pohybov stroja. Po transformácii priebehu nameraného po impulze sily (údere kladivom) sa v obraze nenachádza. Ďalej vidno jasnú špičku na hodnote 25 Hz, čo je identifikovaná vlastná frekvencia mechaniky. Špička nie je ideálne úzka, bude vhodné navrhnuť riadiaci algoritmus, ktorý filtruje frekvencie v intervale 22 - 27 Hz.





Obrázok 9: Nameraný priebeh rezného programu

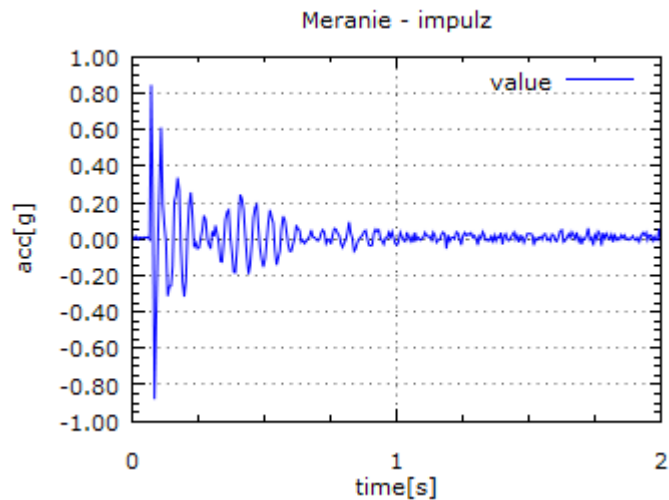


Obrázok 10: Namerané frekvenčné spektrum mechaniky

### 6.2.5 Identifikácia koeficientu tlmenia sústavy

Koeficient tlmenia sústavy vyjadruje schopnosť sústavy tlmiť kmity. Inak povedané, vyjadruje pokles amplitúd jednotlivých kmitov v časovom priebehu. Sústava s koeficientom tlmenia rovným nule po začiatočnom impulze kmitá donekonečna, hovoríme že má nulové tlmenie.

Tento koeficient je teda možné v našom prípade zistiť nameraním priebehu po vstupnom impulze sily, napríklad údere kladivom. Tento priebeh vidno na obrázku 11.

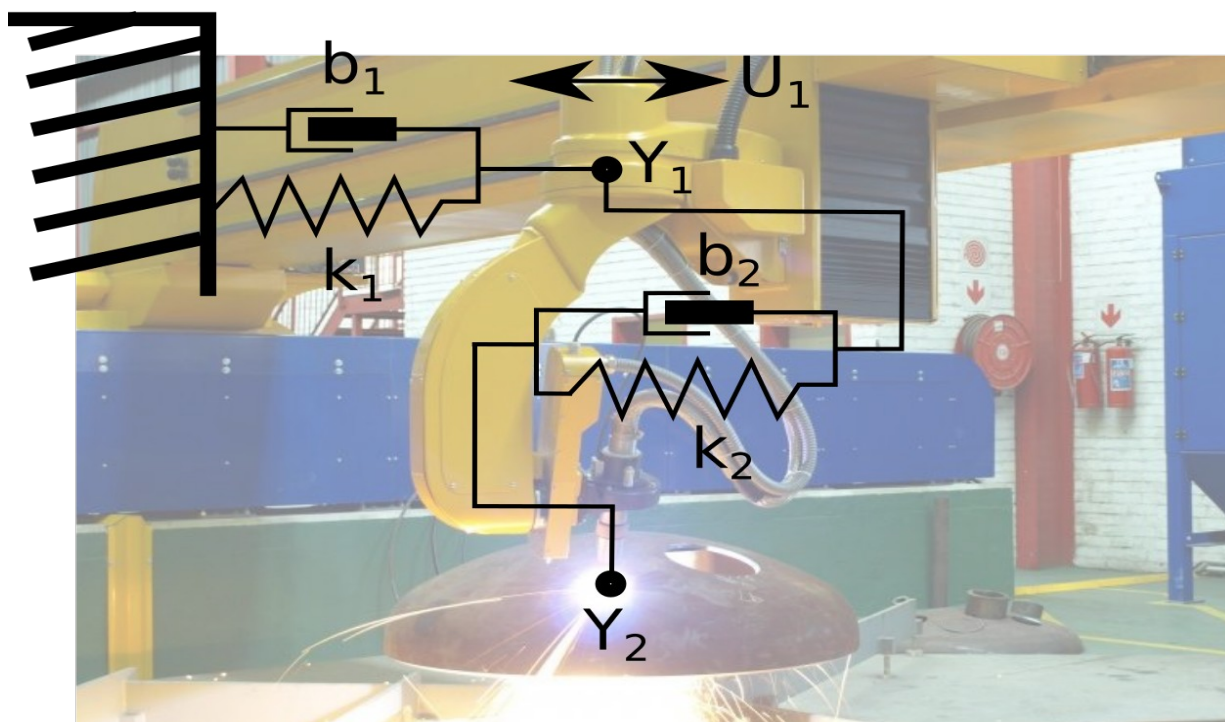


Obrázok 11: Odozva sústavy na impulz sily - úder kladivom

Po rozkmitaní systému dôjde k útlmu amplitúdy kmitania, no neskôr (cca v čase 0,25s) sa amplitúda opäť zvýši. Tento jav môžeme pozorovať, keď máme viacero vzájomne pružne prepojených hmotných kmitajúcich bodov. Tie sa navzájom ovplyvňujú, pretože kinetická energia cez pružné spoje prechádza medzi jednotlivými bodmi. Z pohľadu dynamiky teda ide o viachmotový kmitavý systém.

Na priebehu pozorujeme jedno také zvýšenie amplitúdy, teda určujeme, že systém sa správa ako dvojhmotový. V skutočnosti je viachmotový, no vplyv ďalších hmôt nevieme namerať, preto ho považujeme za zanedbateľne malý.

Takýto systém je možné opísať podobne ako sme plánovali v kapitole 6.1 *Vlastnosti kmitov a ich matematický opis*, v tomto je však hmotných bodov viacero a sú vzájomne prepojené. Každý hmotný bod má svoje vlastnosti, teda môže mať inú vlastnú frekvenciu kmitania a iný koeficient tlmenia. Náčrt takéhoto dvojhmotového systému sa nachádza na obrázku 12.



Obrázok 12: Model viachmotového mechanického systému

Prenosové funkcie opisujúce pohyb jednotlivých bodov sú dané rovnicami 6.10 a 6.11.

$$G_1(s) = \frac{Y_1(s)}{U_1(s)} = \frac{1}{s^2 + 2\zeta_1\omega_{01}s + \omega_{01}^2} \quad (6.10)$$

$$G_2(s) = \frac{Y_2(s)}{U_2(s)} = \frac{1}{s^2 + 2\zeta_2\omega_{02}s + \omega_{02}^2} \quad (6.11)$$

Tlmenie systému v praxi znamená logaritmický dekrement útlmu amplitúdy kmitov v čase ( $\delta$ ), teda sa dá vyjadriť rovnicou ( 6.12) .

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{x(t)}{x_{(t+nT)}} \quad (6.12)$$

Kde  $x(t)$  je amplitúda kmitania v čase  $t$ , a  $x_{(t+nT)}$  je amplitúda kmitania v čase o  $n$  periód kmitania neskôr.  $T$  označuje hodnotu periódy kmitania.

Z dekrementu útlmu kmitania  $\delta$  je možné určiť koeficient tlmenia systému podľa vzorca 6.13. Pre dva kmity idúce bezprostredne po sebe je možné vzorec zjednodušiť na 6.14.

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{\delta}\right)^2}} \quad (6.13)$$

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{\ln\left(\frac{x_0}{x_1}\right)}\right)^2}} \quad (6.14)$$

Kde  $x_0$  je maximálna amplitúda zvoleného kmitu a  $x_1$  je maximálna amplitúda nasledovného kmitu v časovej závislosti meraného priebehu.

Pokiaľ je koeficient tlmenia príliš veľký, no stále nižší ako 1, kmitanie je aperiodické. Dôjde len k jednému prekmitu mechaniky. Hodnota identifikovaných koeficientov tlmenia mechaník sa pohybuje rádovo do hodnoty 0,1. Kmitanie teda môžeme pri návrhu riadenia pokladať za periodické.

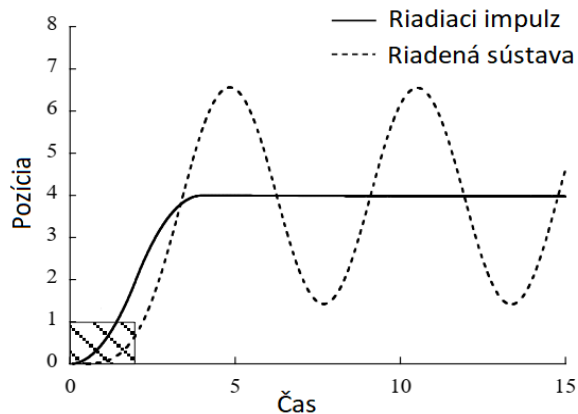
## 7 Pokročilé riadenie mechatronických systémov

Pokročilosť riadiacich algoritmov spočíva vo fakte, že zohľadňujú identifikované dynamické vlastnosti konkrétnej mechaniky a potláčajú nežiaduce efekty počas polohového riadenia, teda potláčajú kmity mechaniky.

### 7.1 ZVD filter ako tvarovací algoritmus pre pohyb jednotlivých osí

ZV (Zero Vibration) tvarovač je algoritmus, ktorý funguje ako filter zrýchlenia, generovaný všeobecným rozbehovým členom. Zrýchlenie je filtrované tak, aby boli zohľadnené dynamické mechanické vlastnosti riadenej sústavy, teda jej vlastná frekvencia kmitania a tiež jej tlmenie.

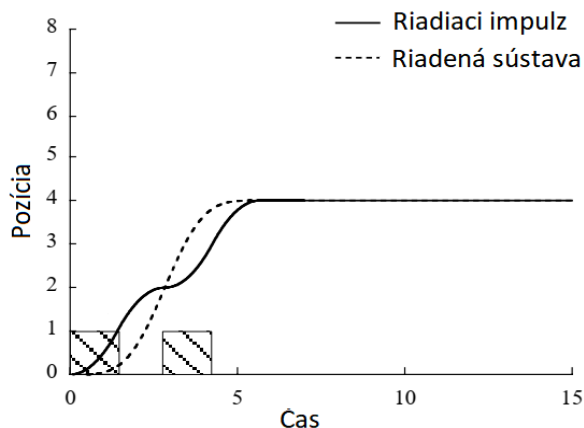
Vhodne umiestnené riadiace impulzy môžu potlačiť vybudenie kmitov riadenej sústavy. Na obrázkoch 13 a 14 sa nachádza porovnanie odozvy sústavy na rozdielne riadiace impulzy, ktorých plocha je rovnako veľká.



1

Obrázok 13: Odozva kmitavej sústavy na riadiaci impulz

2



Obrázok 14: Odozva kmitavej sústavy na vhodne umiestnené riadiace impulzy

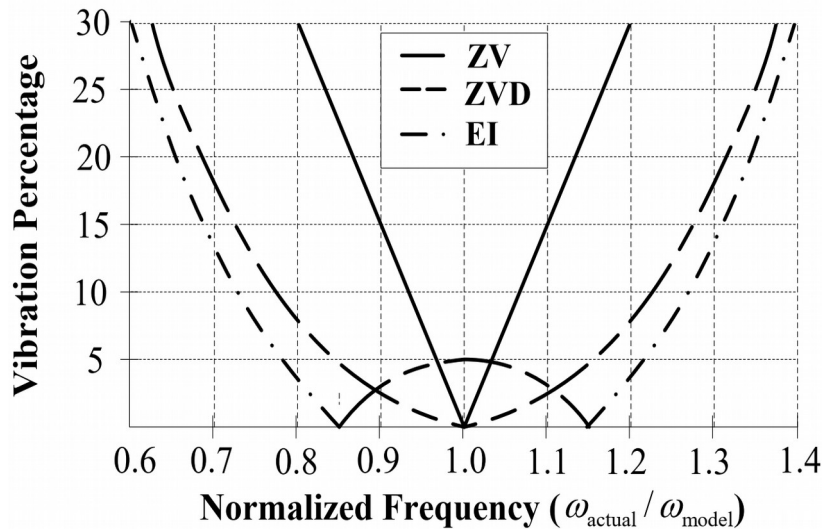
Algoritmus ZV filtra je zapísaný rovnicami 7.1. V algoritme vystupuje tlmenie riadeného systému (výpočet  $K$ ) a tiež vlastná frekvencia riadeného systému (oneskorenie  $T_d/2$ , kde  $T_d$  je perióda vlastnej frekvencie kmitania riadeného systému). Dopravné oneskorenie riadiaceho signálu je pevné, s hodnotou  $T_d/2$ .

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & K \\ 1+K & 1+K \\ 0 & \frac{T_d}{2} \end{bmatrix}, \quad K = e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (7.1)$$

- 1 Tarunraj Singh, William Singhose, Tutorial on Input Shaping/Time Delay Control of Maneuvering Flexible Structures, Anchorage 2002. ISBN 0-7803-7298-0
- 2 Tarunraj Singh, William Singhose, Tutorial on Input Shaping/Time Delay Control of Maneuvering Flexible Structures, Anchorage 2002. ISBN 0-7803-7298-0

Nevýhoda ZV algoritmu je zjavná v jeho vysokej citlivosti na zmenu vlastnej frekvencie kmitania riadenej sústavy, zobrazená na grafe na obrázku 15. Už zmena vlastnej frekvencie o 10 % spôsobí nárast amplitúdy kmitania riadeného systému na 15 % z pôvodnej hodnoty.

1



Obrázok 15: Prenos kmitania riadeného systému pri zmene vlastnej frekvencie riadeného systému voči frekvencii pre ktorú bol navrhnutý tvarovač

Preto je vhodnejším algoritmom na tvarovanie riadiaceho signálu ZVD (Zero Vibration Derivative) filter, ktorý je vyjadrený nasledovným zápisom:

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+K} & \frac{K}{1+K} & \frac{K^2}{(1+K)^2} \\ 0 & \frac{T_d}{2} & T_d \end{bmatrix}, \quad K = e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (7.2)$$

ZVD filter je rádovo menej citlivý na zmenu vlastnej frekvencie riadenej sústavy. Nevýhodou je dvojnásobne dopravné oneskorenie riadiaceho impulzu oproti ZV filtru (veľkosti  $T_d$ ).

### 7.1.1 Implementácia diskretného ZVD filtra

ZVD filter bude z podstaty riadiaceho systému pracovať s diskretnými veličinami, teda sám bude diskretný, vyjadrený vzorcami 7.3, ktoré vychádzajú z výsledku odvodu 7.2.

1 Ing. Khanh Duong Quang, Motion control of multi-axial vibrational mechatronic systems, Bratislava 2015, FEI-104364-11437

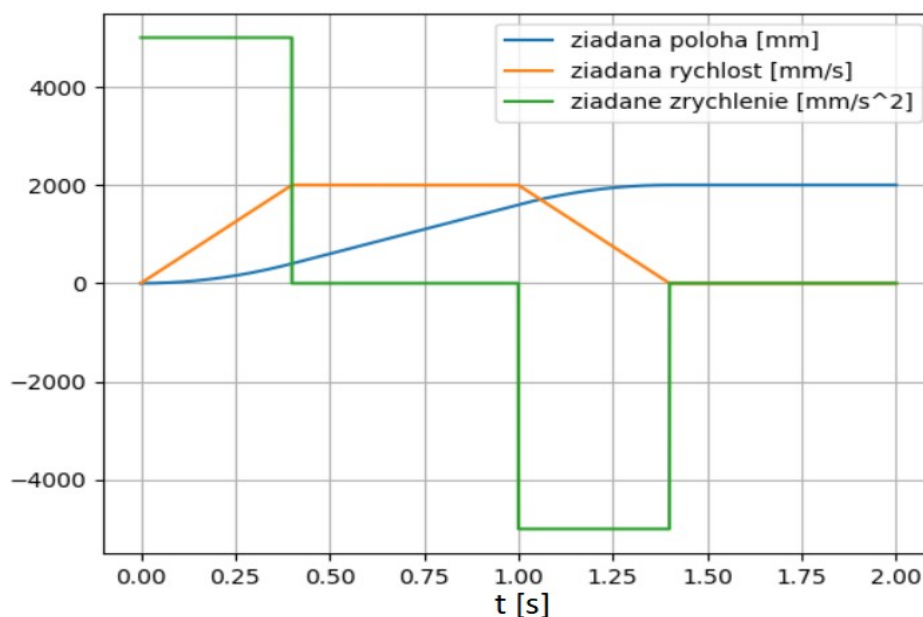
$$\begin{aligned}
 [A] &= \left[ \frac{1}{1+K}, \frac{K}{1+K}, \frac{K^2}{(1+K)^2} \right], \quad K = e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \\
 [t] &= \left[ 0, \frac{T}{2}, T \right], \quad T = T_d / T_{vz} \\
 y_n &= A_0 u_{t_0} + A_1 u_{t_1} + A_2 u_{t_2}
 \end{aligned}
 \tag{7.3}$$

Kde  $T_d$  je perióda vlastného kmitania riadenej sústavy,  $T_{vz}$  je vzorkovacia frekvencia riadiaceho systému a  $\zeta$  je tlmenie kmitania riadenej sústavy. Hodnoty vektora  $[t]$  sú zaokrúhlené na celé čísla a vyjadrujú polohu jednotlivých vstupov v posuvnom vstupnom registri ZVD filtra, teda ak  $t_0 = 0$ ,  $u_{t_0} = u_n$ , ak  $t_1 = T/2$ ,  $u_{t_2} = u_{n-T/2} \dots$

Zo zápisu vidno nízke nároky implementácie na výkon procesora riadiaceho systému, kedy je potrebné všetky konštanty vypočítať pri inicializácii filtra.

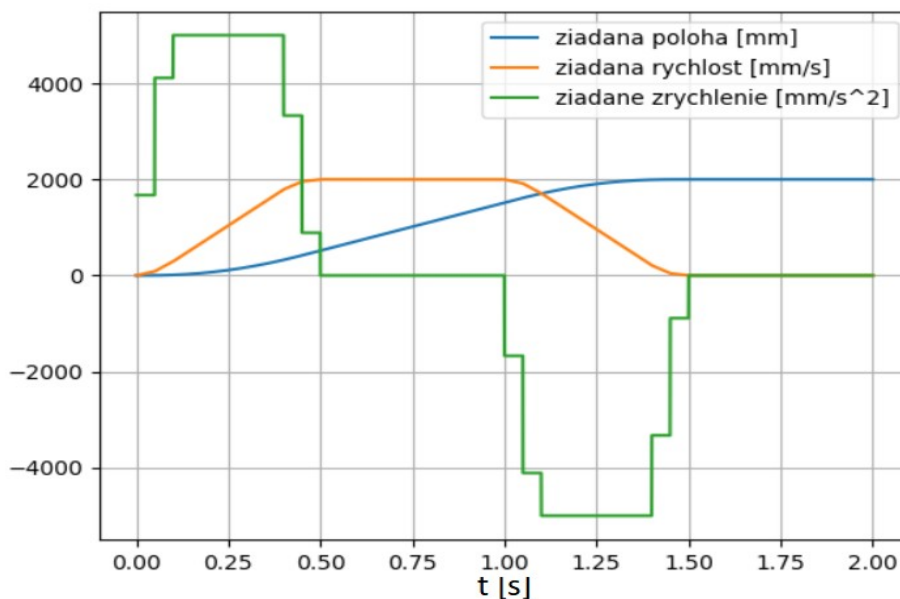
### 7.1.2 Simulačné vyšetrenie návrhu tvarovača so ZVD filtrom

Generátor netvarovaného riadiaceho signálu môže byť realizovaný ako jednoduchý jednoosý rozbehový člen bez spätnej väzby, ktorý pri zmene žiadanej polohy generuje zmenu žiadanej rýchlosti a zrýchlenia. Zohľadňuje maximálnu rýchlosť a zrýchlenie ako zadané dynamické parametre riadenia. Generuje fázu rozbehu, ustálenej rýchlosti a dobehu tak, aby bola žiadaná rýchlosť v momente dosiahnutia žiadanej polohy (na obrázku 16 2000 mm) nulová.



Obrázok 16: Netvarovaná rozbehová krivka generovaná jednoduchým rozbehovým členom

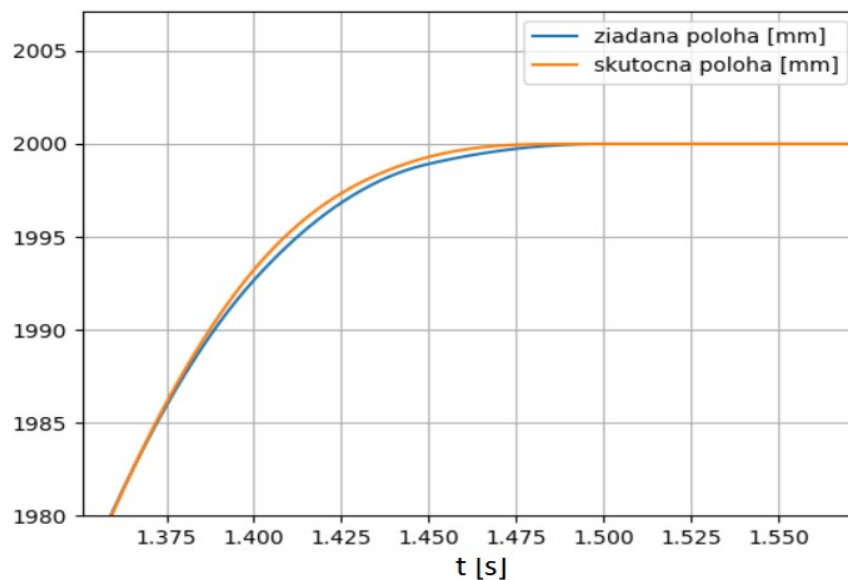
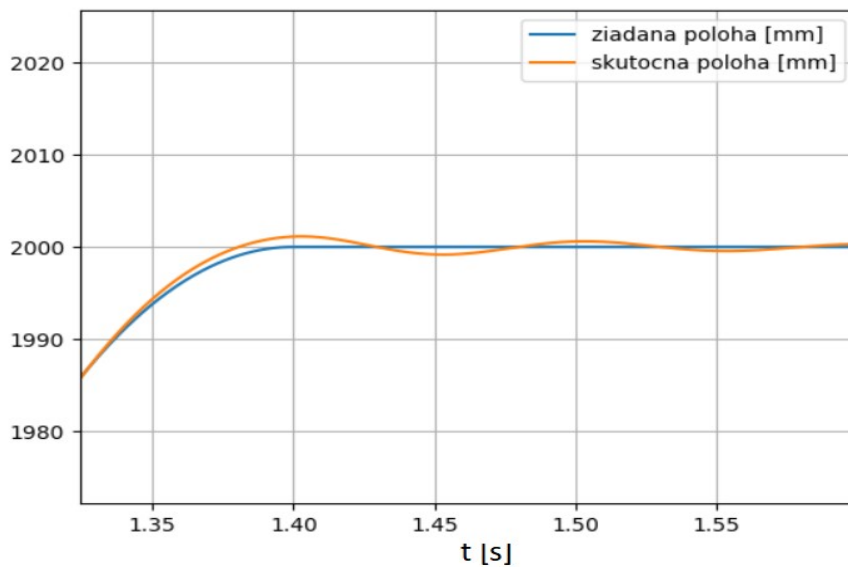
Na obrázku 17 sa nachádza vygenerovaný priebeh pohybu po zaradení ZVD tvarovača na výstup zrýchlenia rozbehového člena.



Obrázok 17: Tvarovaná rozbehová krivka generovaná jednoduchým rozbehovým členom so zaradeným ZVD filtrom zrýchlenia

Zaradením kmitavej diskkrétnej sústavy, teda sústavy s prenosovou funkciou druhého rádu popísanej v kapitole 6.1 je možné simulovať odozvu mechaniky na vygenerovaný pohyb, ktorá je znázornená na obrázku 18 hore. Z priebehu polohy vidno, že v čase brzdenia začína odchýlka narastať a sústava zostáva po ustálení žiadanej polohy rozkmitaná. Zaradením ZVD filtra zrýchlenia dochádza k zmene profilu zrýchlenia, výsledkom čoho po ukončení presunu riadená sústava nevykazuje kmity (obrázok 18 dole).





Obrázok 18: Detail na žiadanú a skutočnú (simulovanú) polohu mechaniky po vygenerovanom presune bez ZVD filtra (hore) a so zaradeným filtrom (dole)

## 8 Vzájomné riadenie viacerých osí - interpolátor

Na X, Y a Z os stroja sa pozeráme ako na vzájomne spojené sústavy, medzi ktorým môže dochádzať k prenosu energie, pokiaľ je v sústave požiadavka na zrýchlenie. Ak by došlo k situácii, že v smere osi X je potrebné filtrovať inú frekvenciu ako v smere osi Y, je potrebné zabezpečiť, aby bolo oneskorenie filtrovania v oboch osiach rovnaké. To sa dá zabezpečiť tým, že do série nasadíme filtre pre filtrovanie oboch frekvencií do oboch osí. Obe osi X, aj Y teda budú filtrované dvojicou filtrov. Prvý je navrhnutý pre dynamické vlastnosti osi X, druhý pre vlastnosti osi Y.

Myšlienka rovnakého tvarovača vo všetkých osiach otvára dvere inému prístupu k tvarovaniu riadiaceho signálu – jedinému tangenciálnemu tvarovaču nasadenému priamo v interpolátore pohybov.

## 8.1 Tangenciálny interpolátor pohybov pre viacero osí

Hlavnými úlohami interpolátora pohybov pre rezacie stroje firmy MicroStep sú:

- zabezpečiť lineárny presun koncového bodu (efektora rezacieho stroja) medzi dvoma žiadanými polohami v 6 osiach
- rešpektovanie limitov jednotlivých pohybových osí
- rešpektovanie žiadanej dynamiky koncového bodu
- vyrovnávacia pamäť na žiadané pohyby. Žiadanú dráhu pozostávajúcu z viacerých (tisíce) pohybov musí byť možné definovať vopred aj pre účely optimalizácie prechodov medzi jednotlivými pohybmi
- informácia o ubehnutej dráhe efektora dostupná v reálnom čase, aby bolo možné na správnu polohu naviazať technologické operácie aj vo vysokých rýchlostiach

V nasledovných častiach tejto práce sú často porovnané tri spôsoby riadenia pohybov:

- pôvodný interpolátor existujúceho riadiaceho systému, označovaný ako „*ipol*“
- nový interpolátor meniaci smer pohybu cez oblúčiky. Maximálna dovolená odchýlka generovanej dráhy od žiadanej je nastavená na 0,5 mm. Označovaný ako „*ipolV2*“
- nový interpolátor meniaci smer pohybu cez oblúčiky so ZVD tvarovačom zrýchlenia, navrhnutým podľa identifikácie kmitavých vlastností riadenej mechaniky (frekvencia kmitania a tlmenie sústavy). Označovaný ako „*ipolV2-ZVD*“

### 8.1.1 Určenie prírastku ubehnutej dráhy

Tangenciálny rozbehový člen počas presunu medzi dvoma žiadanými polohami pracuje v rozmere dĺžky pohybu. Počíta prejdenú vzdialenosť od vzdialenosti 0 (východisková poloha) po vzdialenosť rovnú dĺžke pohybu (cieľová poloha). Prejdená vzdialenosť sa v každom takte počíta na základe žiadanej tangenciálnej rýchlosti a tangenciálneho zrýchlenia. Ak by niektorá

pohybová os svojou dynamikou nedokázala naplniť podmienky žiadanej dynamiky, tieto veličiny musia byť znížené.

Úlohou rozbehového člena je dosiahnuť nulovú aktuálnu rýchlosť v momente, keď sa prejdená vzdialenosť rovná dĺžke žadaného pohybu a počas pohybu neprekročiť žiadanú rýchlosť a zrýchlenie pohybu.

Žiadaná poloha v jednotlivých pohybových osiach sa následne počíta ako priemet vzdialenosti prejdenej tangenciálnym rozbehovým členom do jednotlivých samostatných osí.

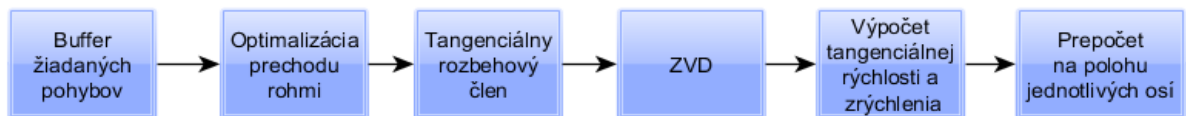
## 8.2 Interpolátor s tangenciálnym ZVD tvarovačom

Výsledná rovnica ZVD tvarovača môže byť nasadená priamo do tangenciálneho rozbehového člena.

$$y_n = \frac{1}{1+K} u_n + \frac{K}{1+K} u_{n-\frac{T}{2}} + \frac{K^2}{(1+K)^2} u_{n-T}, \quad K = e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}, \quad (8.1)$$

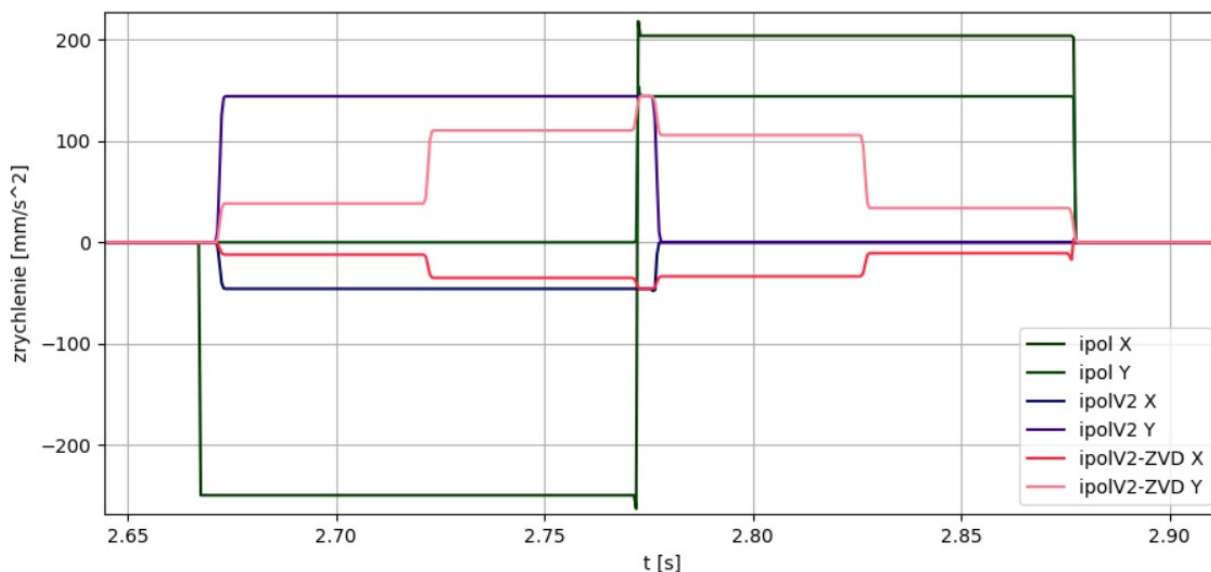
$$T = T_d / T_{vz}$$

Tvarované zrýchlenie, ktoré sa vo výsledku prenesie do samotných osí bude vďaka pomeru proporcionál tangenciálnej dynamiky do dynamiky jednotlivých osí úplne rovnaké, akoby boli tvarované jednotlivé osi samostatne rovnakou sériou filtrov.



Obrázok 19: Bloková schéma interpolátora so vstavaným ZVD filtrom tangenciálneho zrýchlenia

Výrazným prínosom riešenia rozbehového člena so vstavaným tvarovačom je ale presná aktuálna poloha a rýchlosť, čo sú jedny z hlavných požiadaviek riadiaceho systému na interpolátor, popísané na začiatku kapitoly 8. Navyše za interpolátorom nedochádza ku skresleniu dráhy koncového bodu a polohu nie je potrebné spätne rekonštruovať.



Obrázok 20: Zrýchlenia generované porovnávanými interpolátormi pri prechode rohom s uhlom  $35^\circ$

### 8.3 Optimalizácia interpolátora na rýchlejší prechod rohmi

Vždy keď sa mení smer pohybu (mení sa vektor pohybu XYZ) musí z fyzikálneho hľadiska rýchlosť efektora na konci pohybu klesnúť na nulu a efektor sa až následne rozbehne iným smerom. Zachovaním konštantnej tangenciálnej rýchlosti by v momente zmeny smeru pohybu došlo ku skoku rýchlosti v pohybových osiach. Tento skok by bol v spojitom čase vyjadrený nekonečne veľkým zrýchlením, ktorého dĺžka by sa limitne blížila k nule.

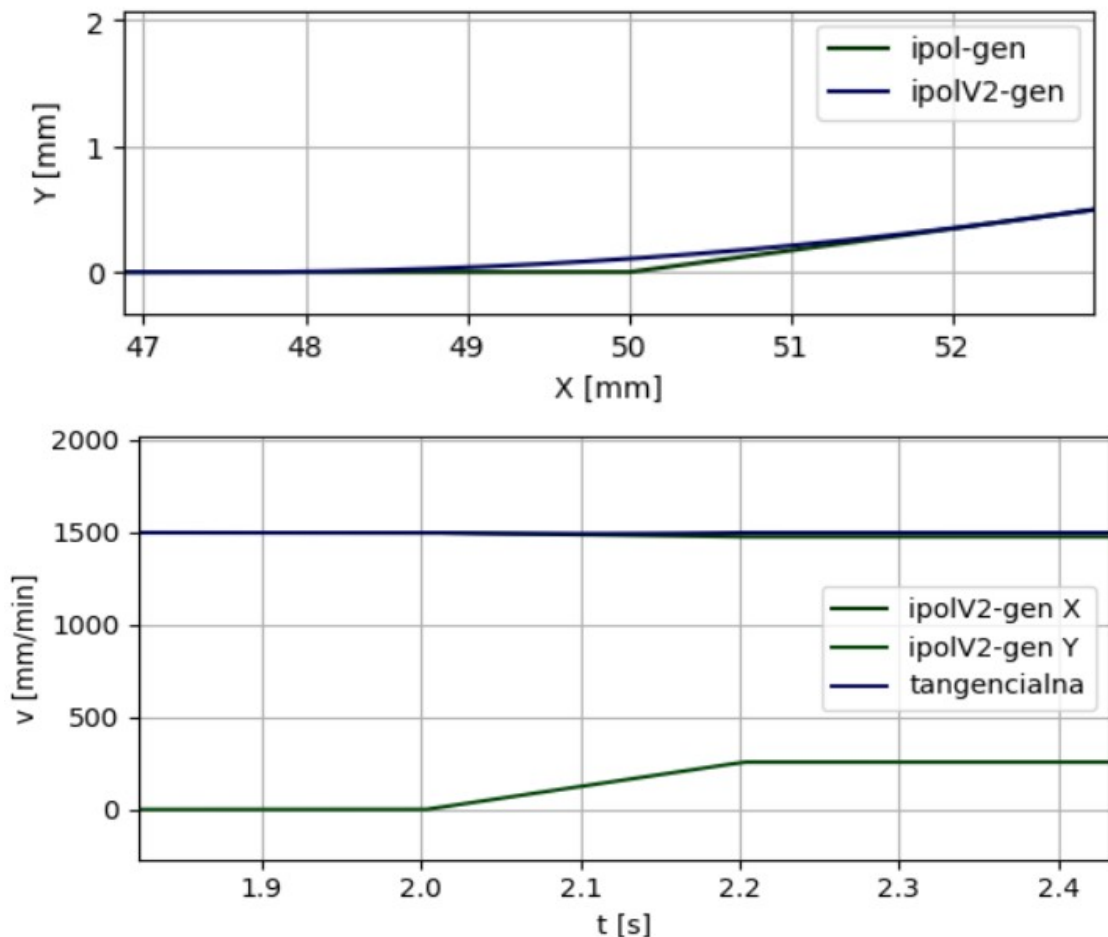
Na opačnej strane, napríklad kvôli potrebe priamych a inverzných kinematických prepočtov s dostatočne jemným rozlíšením sa do interpolátora môže dostať séria krátkych pohybov (dĺžka 1 mm) a je úplne nežiaduce, aby efektor rezacej technológie zastavil každý milimeter.

Preto je nutná potreba optimalizácie prechodu medzi jednotlivými pohybmi tak, aby koncová tangenciálna rýchlosť pohybu bola čo najbližšia k žiadanej rýchlosti pohybu.

Riešením môže byť definovanie maximálnej vzdialenosti, o ktorú sa môže generovaná dráha odlišiť od tej žiadanej. V takom prípade neprejde koncový bod priamo cez cieľovú polohu, ale vo vzdialenosti, ktorá je nižšia ako definovaná tolerancia. Tým je možné modifikovať žiadanú dráhu tak, aby si koncový bod udržal čo najvyššiu možnú tangenciálnu rýchlosť.

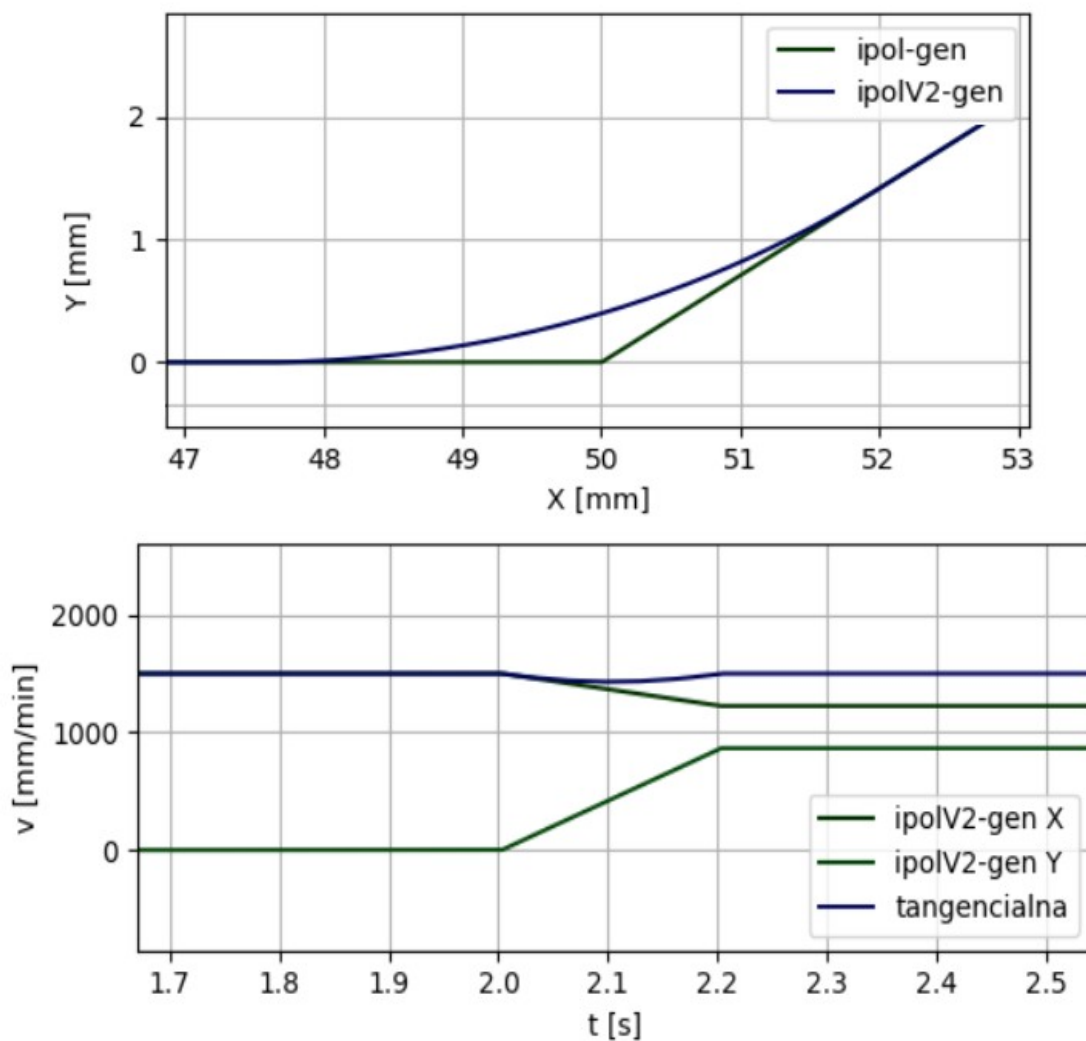
Obrázok 21 zobrazuje porovnanie generovanej dráhy pôvodného (ipol) a navrhovaného (ipolV2) interpolátora, ktorý využíva definovanú toleranciu na

to, aby zachoval tangenciálnu rýchlosť čo najvyššiu. Vidno, že pri  $10^\circ$  zmene smeru pohybu je možné dodržať plnú tangenciálnu rýchlosť aj bez toho, aby odchýlka skutočnej a žiadanej dráhy dosiahla definované maximum (0,5 mm). Odchýlka v maxime dosahuje 0,1 mm.



Obrázok 21: XY poloha interpolátorov (hore) a rýchlosti počas prechodu oblúčikom (dole) pri zmene smeru pohybu o  $10^\circ$

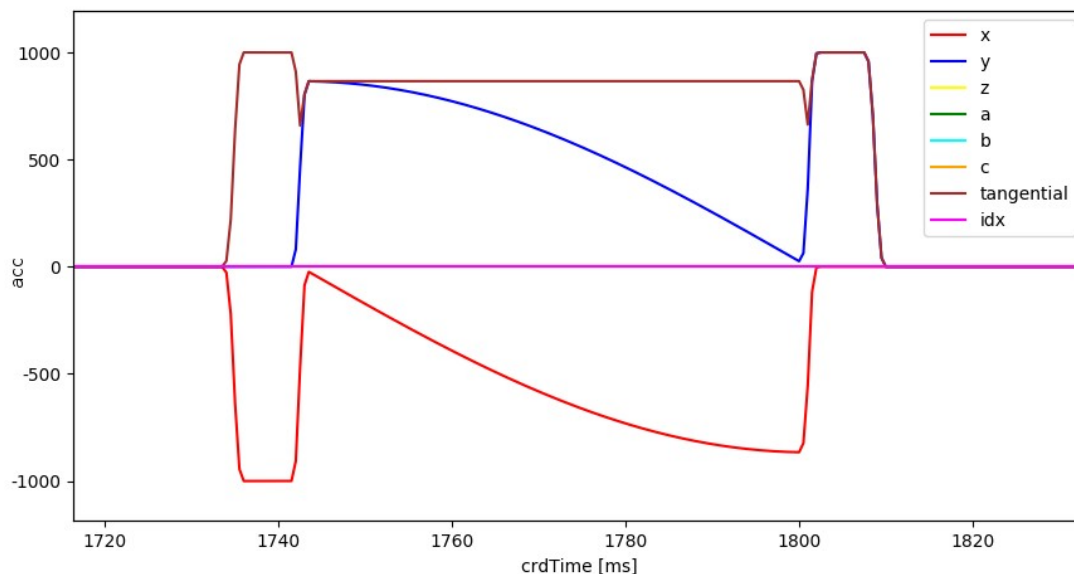
Obrázok 22 zobrazuje porovnanie pôvodného a navrhovaného interpolátora pri zmene smeru pohybu o  $35^\circ$ . Odchýlka polohy dosahuje maximálnu toleranciu 0,5 mm, no tangenciálna rýchlosť stále zostáva takmer nezmenená.



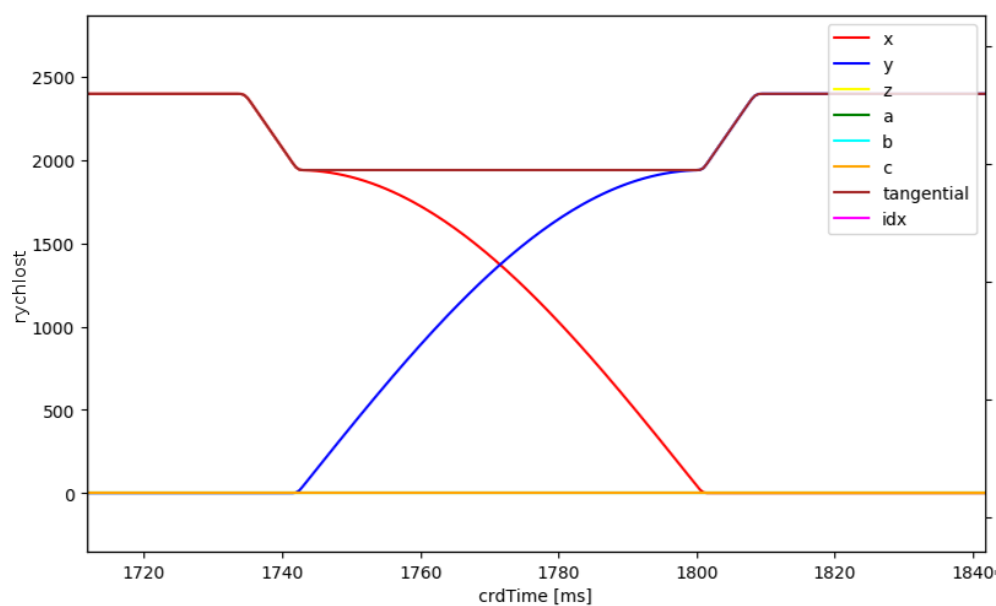
Obrázok 22: XY poloha interpolátorov (hore) a rýchlosti počas prechodu oblúčikom (dole) pri zmene smeru pohybu o  $35^\circ$

To, že generovaná tangenciálna rýchlosť zostáva v rohoch bližšie k žiadanej tangenciálnej rýchlosti pohybov prináša aj ďalšiu výhodu – presun po celej žiadanej dráhe trvá kratšie.

V prípade, že je tolerancia interpolovanej dráhy od žiadanej dráhy príliš prísna a po oblúčiku nie je možné prejsť plnou tangenciálnou rýchlosťou, ešte počas lineárneho pohybu, pred napojením sa na oblúčik je potrebné zbrzdiť na takú tangenciálnu rýchlosť, ktorá neprekročí zadané maximálne radiálne zrýchlenie. Túto situáciu vidno na obrázkoch 23 a 24.

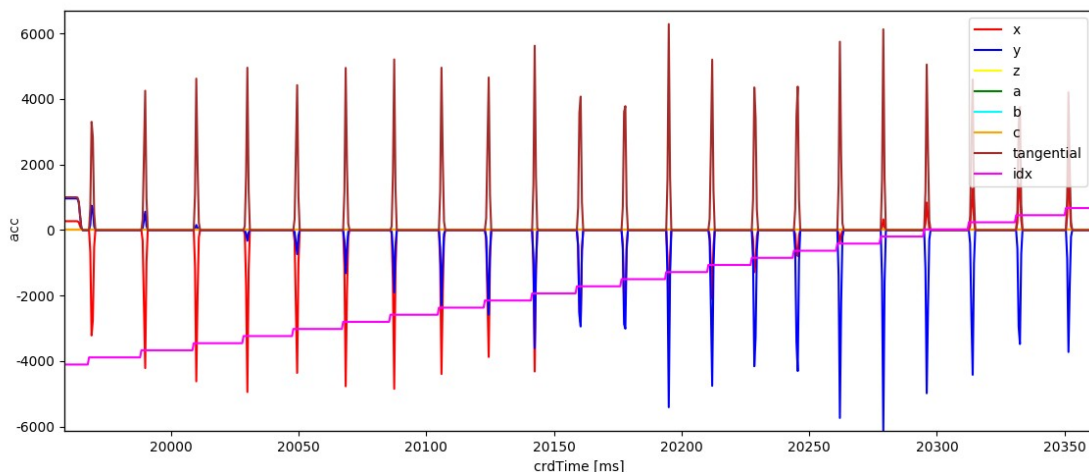


Obrázok 23: Časový priebeh zrýchlenia pri prechode oblúkom s obmedzenou tangenciálnou rýchlosťou

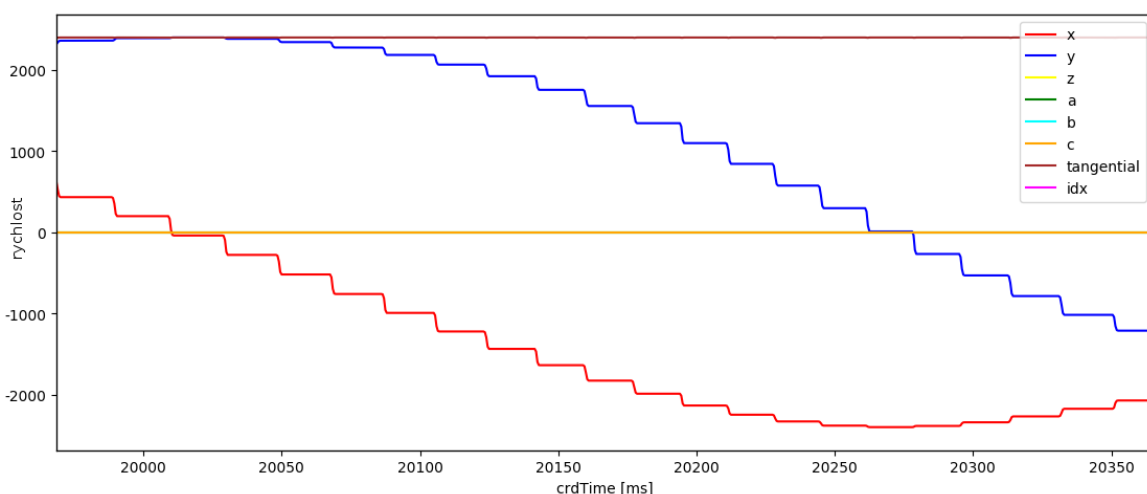


Obrázok 24: Časový priebeh rýchlosti pri prechode oblúkom s obmedzenou tangenciálnou rýchlosťou

Špeciálne je vhodné ošetriť situáciu, kedy vzájomne nadväzujúce pohyby majú voči sebe tak malý uhol, že pri prechode medzi pohybmi je impulz zrýchlenia široký len jednu vzorku. Táto situácia v praxi nastáva často. Medzi týmito pohybmi je možné prejsť plnou tangenciálnou rýchlosťou.



Obrázok 25: Časový priebeh zrýchlenia v jednotlivých osiach pri prechode medzi pohybmi s malým vzájomným rozdielom vektorov



Obrázok 26: Časový priebeh rýchlosti v jednotlivých osiach pri prechode medzi pohybmi s malou zmenou smeru pohybu

#### 8.4 Vyšetrenie prínosu riadenia implementovaného interpolátora v reálnych podmienkach

Riadiaci systém s interpolátorom prechádzajúcim cez rohy oblúčikmi, ktorý na zmenu rýchlosti používa ZVD tvarovač zrýchlenia (*ipolV2-ZVD*) bol nasadený na taký typ stroja, ktorý má sklon ku kmitaniu mechaniky a prínos tohto riešenia by bol významný.

Vyšetrenie prínosu navrhnutého riešenia nie je možné bez kvalitných meracích zariadení, ktoré v meracích odchýlkach nestrácajú dôležité informácie. Použitý

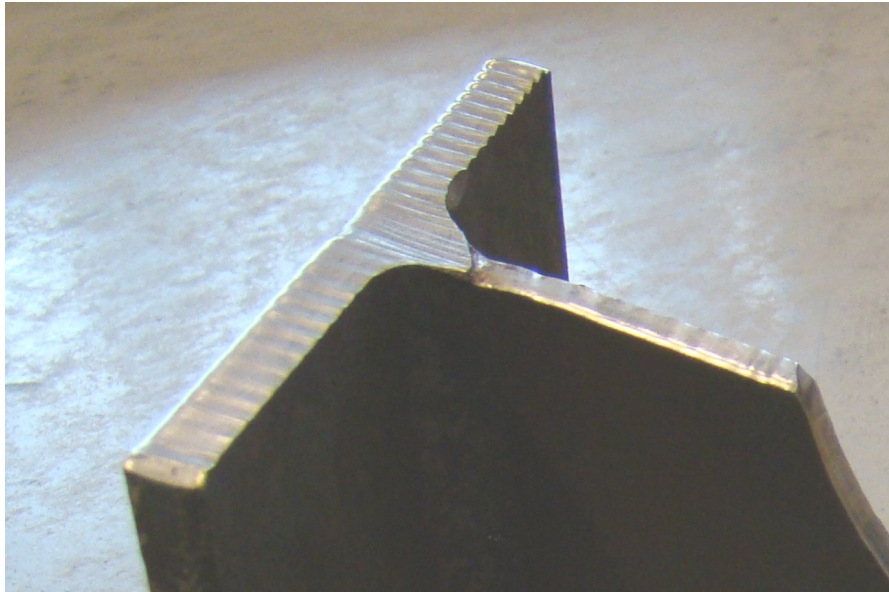


grid-enkodér sníma polohu koncového bodu v pevnom takte 20 kHz a presnosťou  $\pm 2 \mu\text{m}$ .

Pre účely návrhu ZVD regulátora bola metódami popísanými v tejto práci určená vlastná frekvencia kmitania mechaniky na 12 Hz (všetky merania spadali do intervalu 11,9 – 12,05 Hz), s koeficientom tlmenia 0,05 (merania spadali do intervalu 0,01 – 0,09). Meranie koeficientu tlmenia kmitavej sústavy sa pri takomto rozptyle nedá považovať za presné. Na základe tohto výsledku je do vyšetrenia vplyvu riadenia zahrnutý aj vplyv nepresne určených parametrov kmitavej sústavy. V praxi je neskôr možné odladiť takú frekvenciu a koeficient tlmenia sústavy, aby sa na pracovisku dosiahli čo najlepšie praktické výsledky.



*Obrázok 27: Konkrétne rezacie pracovisko v činnosti, na ktorom bude vyhodnotený vplyv upraveného riadenia*



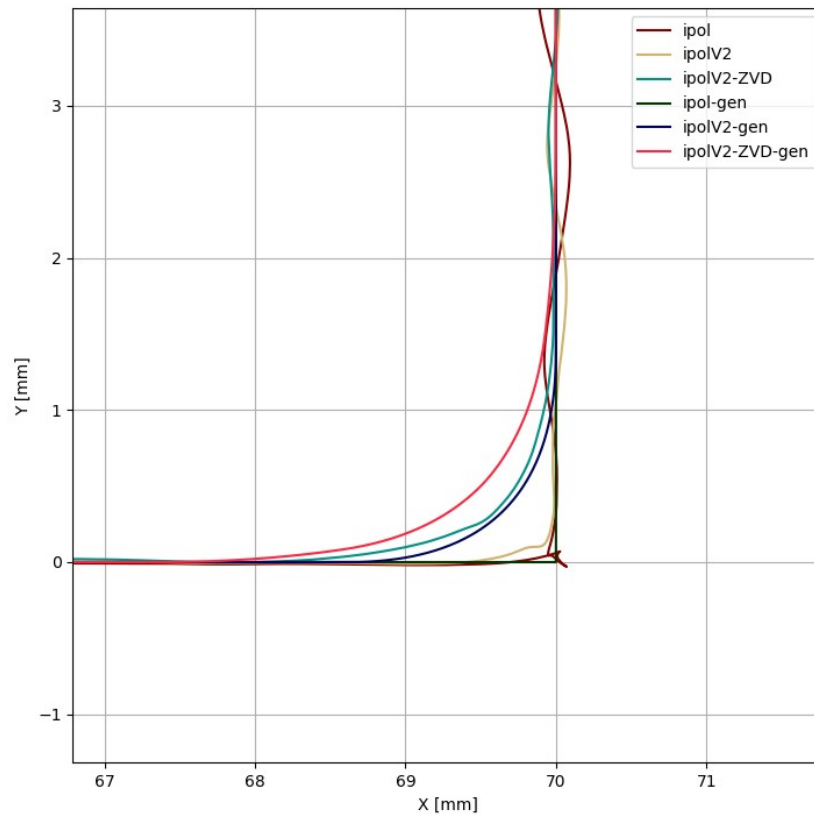
*Obrázok 28: Detail na neakceptovateľnú kvalitu rezu pri neodladených parametroch na konkrétnom pracovisku na rezanie profilov*

#### **8.4.1 Vyšetrované spôsoby riadenia (interpolácie)**

Nastavenie dynamiky pohybov, teda zrýchlenia a žiadané rýchlosti vychádzajú z nastavení pracoviska z praxe. Žiadané rýchlosti sú rovnaké ako vyžaduje technológia rezania plazmou, teda rezná rýchlosť je 1574 mm/min a presuvová rýchlosť je 37 m/min. Tangenciálne zrýchlenie je nastavené na 250 mm/s<sup>2</sup>.

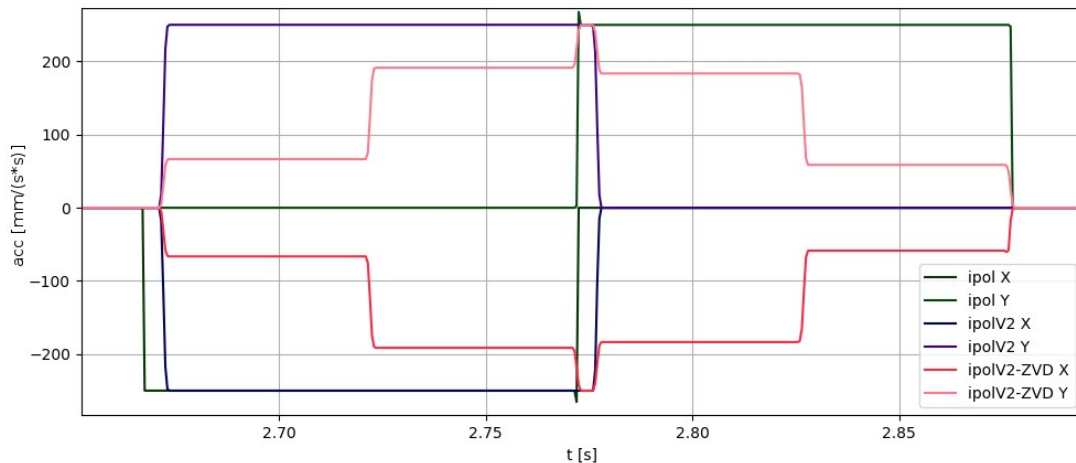
##### ***Prechod rohom s uhlom 90°***

Keďže je mechanika pružná, dochádza k veľmi zaujímavému javu. Odstredivá sila počas prechodu rohom po oblúčku modifikovanej dráhy spôsobí, že skutočná poloha efektora sa nachádza bližšie k ideálnej žiadanej polohe. Modifikovaná dráha ipolV2 sa odlišovala od žiadanej o 0,5 mm, no skutočná dráha bola voči ideálnej vzdialená maximálne o 0,1 mm.



Obrázok 29: Porovnanie generovanej a skutočnej dráhy pri prechode 90° rohom

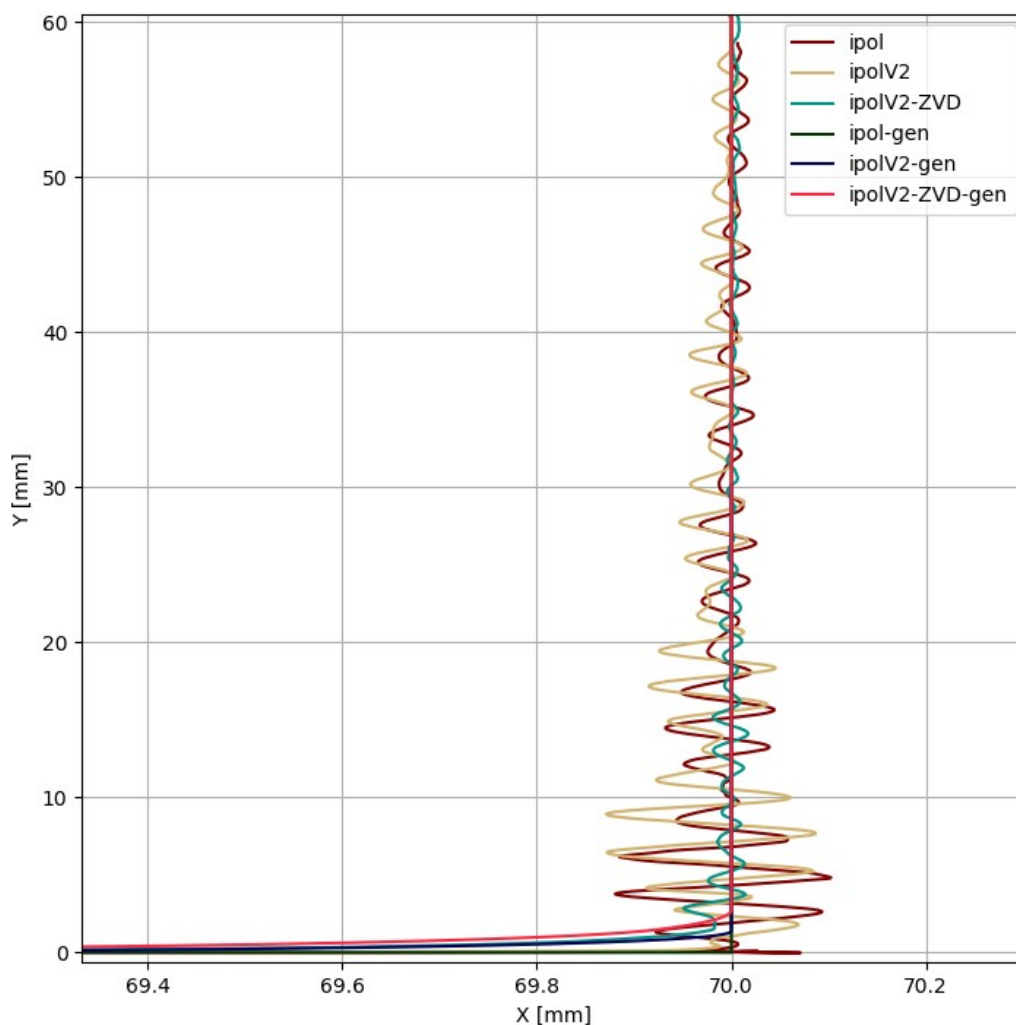
Na obrázku 30 je zobrazený priebeh vygenerovaného zrýchlenia počas prechodu rohom. Vidno, že ipolV2 prechádzajúci rohom oblúčikom generuje zrýchlenie v osi X aj Y naraz a samotný prechod rohom trvá polovičný čas. IpolV2-ZVD impulz zrýchlenia opäť natiahne na cca pôvodný čas prechodu rohom ako generuje ipol, no s potenciálnou výhodou utlmenia kmitov mechaniky a nenulovou tangenciálnou rýchlosťou efektora počas celého pohybu.



Obrázok 30: Priebeh zrýchlenia počas pohybu 90° rohom

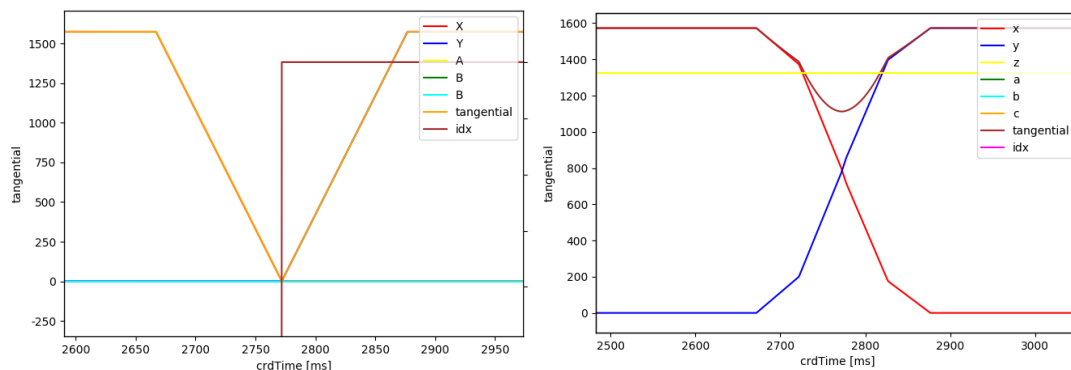
Vybudenie kmitov po prechode rohom vidno po priblížení priebehu v osi X, ktoré sa nachádza na obrázku 31. Samotné pridanie prechodu oblúčikom nespôsobilo výraznú zmenu z hľadiska potlačenia amplitúdy kmitania, no je dôležité pripomenúť, že samotný prechod rohom trvá polovičný čas, takže by bolo možné použiť nižšie zrýchlenia osí, čo by pravdepodobne viedlo k zníženiu amplitúdy kmitov.

Pridanie ZVD tvarovača ale amplitúdu kmitov potlačilo výrazne, takmer o 80 %, čo je veľmi pozitívny výsledok.



Obrázok 31: Vybudené kmitanie po prechode 90° rohom

Aj keď samotný prechod oblúčikom bez ZVD tvarovača nespôsobil merateľný rozdiel v amplitúde a charaktere kmitania po prechode oblúčikom, výhoda sa prejaví v tangenciálnej rýchlosti a teda kvalite rezu z technologického hľadiska. Pri prechode 90° rohom nedôjde s novým riešením k poklesu tangenciálnej rýchlosti voči žiadanej pod 75 %, čo je oproti úplnému zastaveniu v pôvodnom riešení výrazná zmena. Pôvodné riešenie strávi s tangenciálnou rýchlosťou pod 75 % žiadanej viac ako dve tretiny času prechodu rohom.

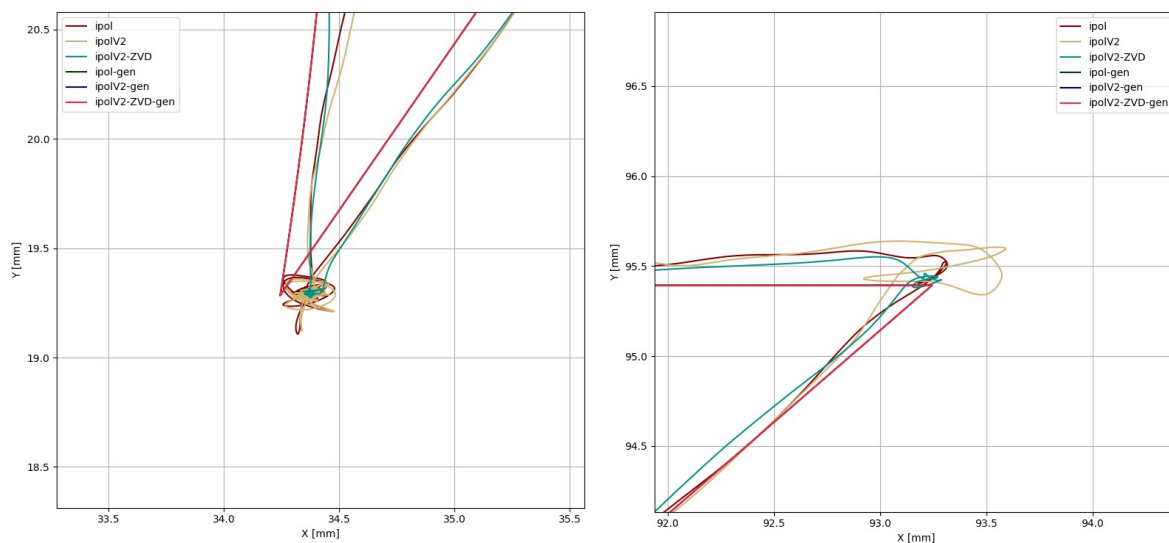


Obrázok 32: Rýchlosť v jednotlivých osiach a tangenciálna rýchlosť pri prechode 90°rohom ipol (vľavo) a ipolV2 prechádzajúcim rohom oblúčikom (vpravo)

### Správanie sa mechaniky po rýchlo pohyboch

IpolV2 a ipolV2-ZVD majú nastavené dvojnásobné zrýchlenia oproti algoritmom ipol, aby impulzy zrýchlenia generované algoritmi ipolV2-ZVD trvali rovnako dlho, ako algoritmy ipol.

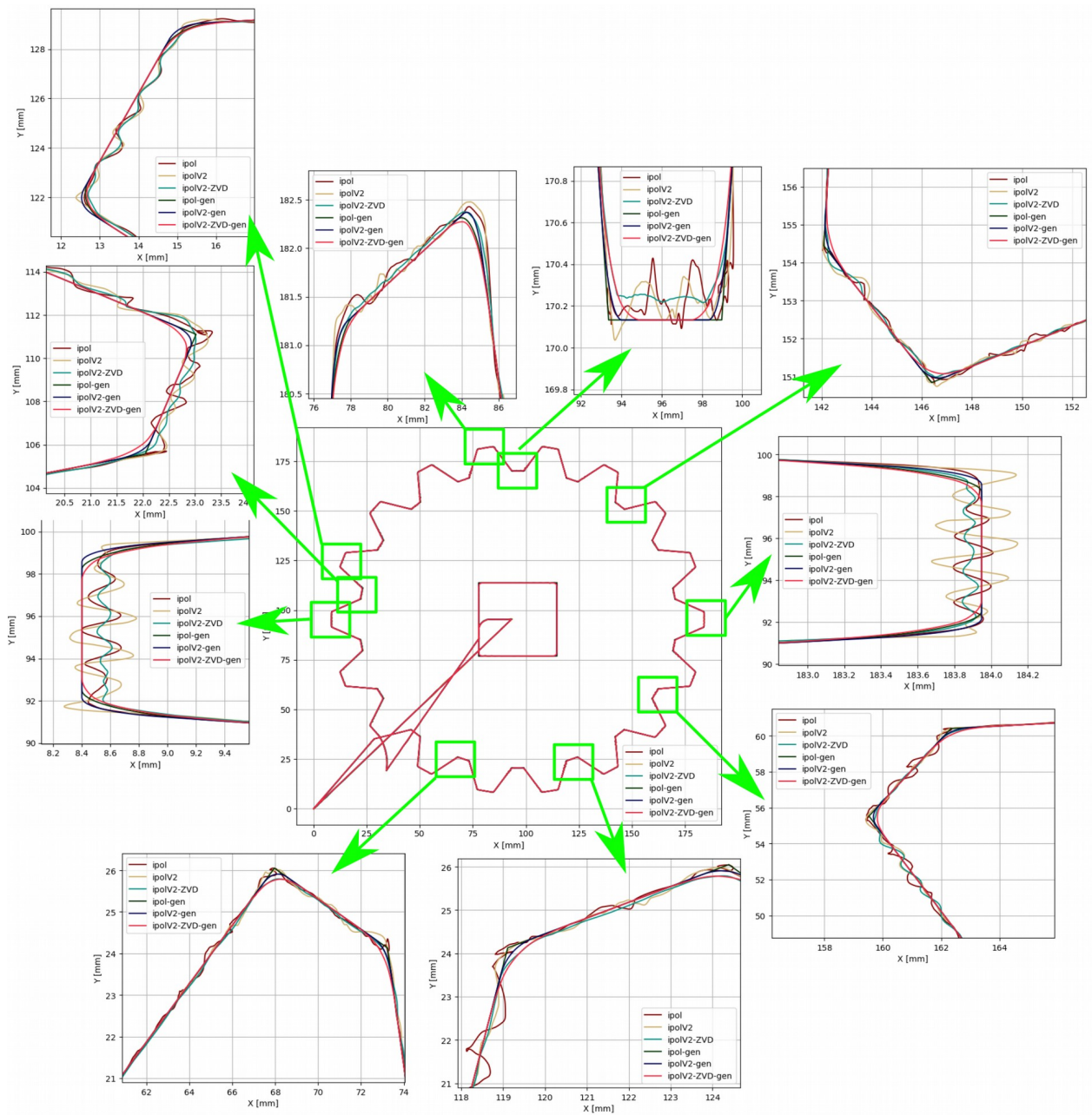
Po zastavení presunu vidno na skutočnej polohe na obrázku 33 výrazné kmity s amplitúdou cca 0,5 mm, no riešenie interpolátora so ZVD tvarovačom tieto kmity takmer úplne potláča.



Obrázok 33: Skutočná trajektória efektora pri zastavení po rýchlo pohybe s následným rozbehom na ďalší pohyb

## Žiadaná dráha z praxe - rezanie ozubenia kola, prechody ostrými rohmi a rohmi s vloženými oblúčikmi z kompenzácie reznej štrbiny

V niektorých situáciách dochádza k potlačeniu kmitov už algoritmami ipolV2, no s použitím tvarovača zrýchlenia v algoritmoch ipolV2-ZVD sa situácia výrazne vylepší, kedy kmity potlačí buď úplne, alebo je v najhorších prípadoch amplitúda potlačená o cca 80 %. Zmena smeru pohybu v X osi (napríklad ľavý horný roh na obrázku 34) spôsobuje rovnaké vybudenie kmitov bez rozdielu od použitého interpolátora, čo je mechanický problém konkrétneho pracoviska.



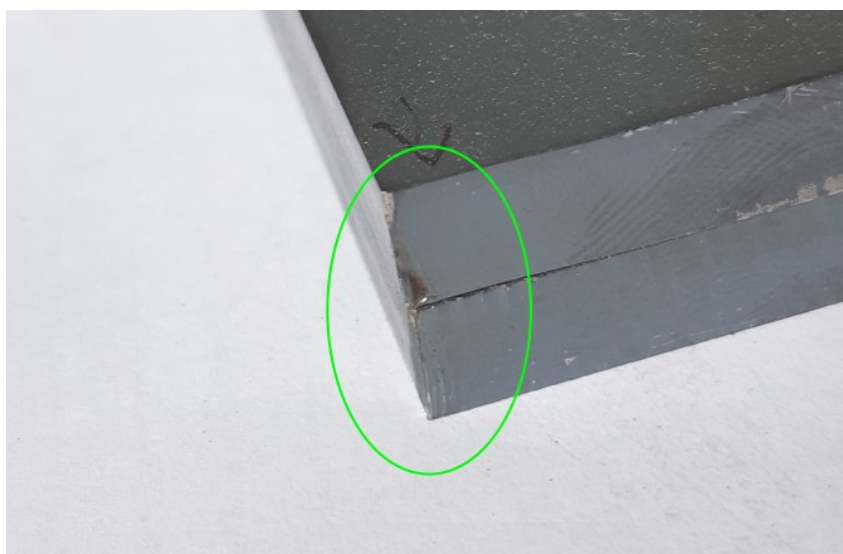
Obrázok 34: Vyšetrenie prechodov vnútorných aj vonkajších rohov v jednotlivých častiach ozubeného kola, teda v rozdielnych priemetoch rýchlosti do osí X a Y

## 9 Praktické overenie činnosti pracoviska

Pokusy s rezaním boli vykonané na rezacom pracovisku s laserovou rezacou technológiou umožňujúcou priame rezanie, ktorá je tuhá a jej riadenie nevybudzuje kmitanie znižujúce kvalitu technologickej operácie. Vplyv ZVD filtra teda nie je markantný. Špecifiká rezania čiernej ocele a nerezovej ocele sú rozdielne v tom, že počas rezania sa čierna oceľ priamo spaľuje na oxidy železa, no roztavená nerezová oceľ sa pod vysokým tlakom vytláča dusíkom z reznej štrbiny. Vplyv prechodu rohom na tieto technológie je teda rozdielny.

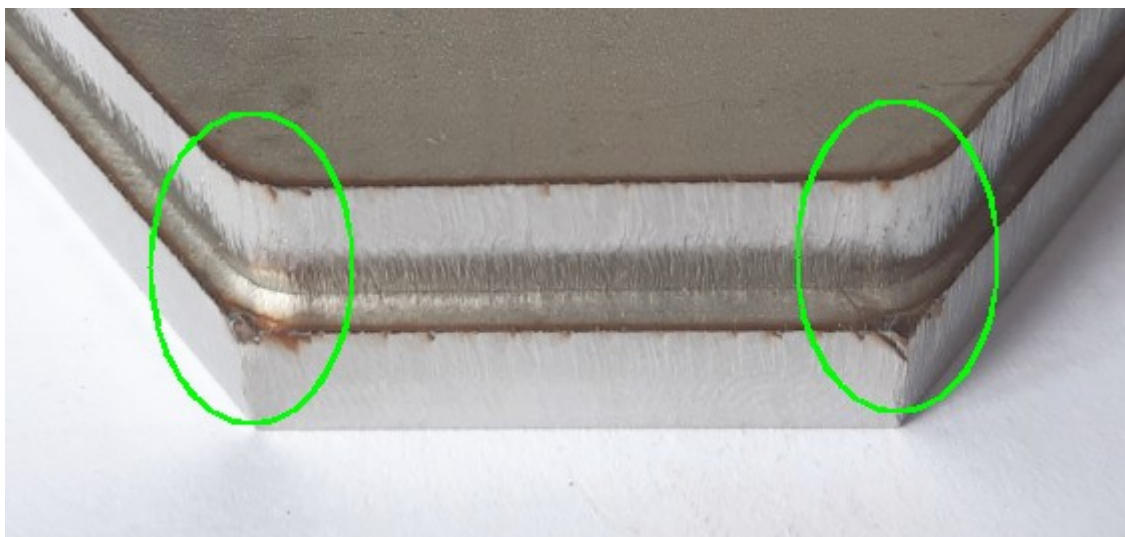
Ako vidno na obrázku 35, algoritmy ipol svojím zastavením v rohu spôsobia lokálnu koncentráciu tepelnej energie, čoho výsledkom je spálený celý roh štvorca, pretože efektor laserovej technológie sa nepohyboval žiadanou rýchlosťou. S algoritmi ipolV2 tento problém nenastal.

Na obrázku 36, sú nerezové výpalky pre názornosť otočené, teda problémová spodná hrana rezu sa nachádza na vrchu.



*Obrázok 35: Spálený materiál pri rezaní čiernej ocele laserom v pôvodnom riešení interpolátora „ipol“ (hore) a pri prechode rohom oblúčikom „ipolV2“ (dole)*





*Obrázok 36: Spálený materiál pri rezaní nerezovej ocele laserom v pôvodnom riešení interpolátora „ipol“ (dole) a pri prechode rohom oblúčikom „ipolV2“ (hore)*

## 10 Záver

Bolo simulačne a experimentálne dokázané, že návrhom nového interpolátora so ZVD tvarovačom zrýchlenia je možné prejsť s rezacími pracoviskami MicroStep požadovanú dráhu tak, že budú odchýlky skutočnej dráhy od žiadanej dráhy výrazne menšie ako pri použití pôvodného riešenia interpolátora pohybov. Navyše čas potrebný na prechod po takejto dráhe je kratší.

Povolením tolerancie pôvodne žiadanej dráhy a interpolátorom generovanej dráhy je možné samotný pohyb ďalej vyhladiť a zrýchliť, čo z hľadiska technológie pozitívne vplyva na kvalitu rezu. Prakticky bolo dokázané, že vplyvom odstredivej sily počas prechodu medzi rohmi je rozdiel medzi skutočne prejdenou dráhou efektora a pôvodne žiadanou dráhou menší ako 50 % z hodnoty povolenej tolerancie. Toto číslo sa samozrejme mení sa s veľkosťou tolerancie a zrýchleniami, no je možné tvrdiť, že rozdiel skutočnej dráhy bude vždy menší ako dovoľená tolerancia. Implementáciou prechodu rohov cez oblúčiky dochádza k časovej úspore trvania polohovania do 10 %, čo je v prípade zložitých programov, kedy pohyby trvajú aj niekoľko hodín výrazný rozdiel.

Ďalšou výhodou prechodov rohov cez oblúčiky je menší pokles tangenciálnej rýchlosti, kedy nedochádza k prílišnému odovzdávaniu energie z efektora rezacej technológie do materiálu a nevznikajú tak problematické miesta so spáleným materiálom, ktoré znižujú výslednú kvalitu rezu. V praxi bolo na

laserovom rezacom pracovisku pozitívne dokázané, že stabilita laserového rezu (meniaca sa kvalita rezu) je pri prechode rohom oblúčikom oveľa vyššia. Rez je s nastavenými technologickými parametrami homogénnejší, takže technológovia môžu citlivejšie ladiť technologické parametre a ďalej tak zvyšovať kvalitu rezu.

Nové riešenie s implementovaným ZVD tvarovačom tangenciálneho zrýchlenia výrazne a často úplne potláča kmitanie mechaniky. V najhorších prípadoch je amplitúda kmitania riadeného systému znížená o 50 %, vo väčšine prípadov o 80 % a často je amplitúda potlačená o viac ako 95 %. To má veľmi pozitívny vplyv na kvalitu rezania materiálov, no aj životnosti pracoviska a komponentov, ktoré sú na konštrukcii pracoviska umiestnené. Tiež dochádza k zlepšeniu kvality merania počas plynulých pohybov, nakoľko nesené senzory nie sú rozvibrované, čím majú jednak lepšie podmienky na snímanie a tiež samotné kmity do systému nevňášajú chybu merania, nakoľko sa pri kmitoch senzor nachádza na inom mieste ako je očakávané.

Jednou z podmienok uvedenia riešenia nového interpolátora do praxe je lacná, jednoduchá a dostatočne presná identifikácia kmitavých konkrétnych mechaník strojov, kde bude technológia nasadená. Na to môže dobre poslúžiť identifikácia mechaniky prostredníctvom MEMS akcelerometrov, popísaná v tejto práci. MEMS snímače sú v súčasnosti cenovo dostupné. Vypracovaním postupu identifikácie, ktorý nebude zložitý a bude zrozumiteľný, je možné poveriť identifikáciou mechaniky pracovníkov, ktorí budú stroj inštalovať u zákazníka.

Z výsledkov praktického overenia robustnosti návrhu ZVD tvarovača na zmeny vlastnej frekvencie a tlmenia riadenej sústavy je možno tvrdiť, že takáto identifikácia nebude potrebná na každom konkrétnom modeli. Parametre ZVD filtra na potlačenie kmitania riadenej sústavy môžu byť prednastavené podľa použitých komponentov už pri výrobe pracoviska. To znamená, že nové riešenie neprináša nové nároky na postupy inštalácie nových rezacích pracovísk, čo je veľmi pozitívny fakt.

Rezacie pracoviská vďaka tomu budú pri súčasných rýchlostiach a zrýchleniach pracovať presnejšie. V aplikáciách, kde je presnosť dostačujúca aj pri súčasnom stave, bude možné rezať rýchlejšie zvýšením zrýchlení jednotlivých osí. Je teda možné dosiahnuť kvalitnejší rez a znížiť výrobné náklady, pretože pri vyšších zrýchleniach a pri prechodoch rohov oblúčikmi dôjde k úspore času. Úspora času počas rezania neznamena len zvýšenie produktivity daného pracoviska, ktoré za rovnaký čas dokáže opracovať viac materiálu, no aj úsporu energií a plynov potrebných pre technológie, keďže samotné rezy budú trvať kratšie.

Ďalšou výhodou môže byť fakt, že v súčasnosti musí byť konštrukcia strojov masívna, aby bola tuhšia a potláčala amplitúdu kmitania. Zavedením tvarovačov, ktoré toto kmitanie potlačia bude mať firma MicroStep možnosť znížiť nároky na tuhosť konštrukcie a odľahčiť ju. To by malo za následok zníženie výrobných nákladov, pretože sa na konštrukciu minie menej materiálu. Potom budú dostatočné aj menej výkonné motory, ktoré môžu byť lacnejšie. V neposlednom rade sa uľahčí transport strojov, ktoré sú dodávané do celého sveta. Nižšia hmotnosť by mala v prípade strojov s laserovým lúčom veľkú výhodu, pretože niektoré takéto stroje dosahujú zrýchlenia až 2 g. Pri nižšej váhe by na podobné zrýchlenia stačili menej výkonné motory, nevynímajúc lacnejšie komponenty pohonov, lineárne vedenia, atď.

## 11 Zoznam použitej literatúry

1. **Hubinský Peter**, Riadenie mechatronických systémov s nízkym tlmením, STU Bratislava, 2010. ISBN 978-8022733106
2. **Fornádel' Jakub**, Analýza frekvenčných vlastností pružného mechanického systému, Bratislava 2014. FEI-5382-8749
3. **Maťuga Michal**, Zber a vyhodnotenie údajov z bezdrôtovo pripojených snímačov, Bratislava 2012. FEI-5406-51290
4. **Alexander Varga, a iní.**, Priebežná hodnotiaca správa projektu APVV-0504-12 za rok 2014, 2014
5. **Šutek L., Varga M.** Experimentálne metódy identifikácie. Bratislava: VEDA, 1981
6. Tlmený harmonický pohyb. [Online] [Dátum: 12. Január 2014.] [http://kf.lin.elf.stuba.sk/~ballo/STU\\_online/Fyzika%20I/VI%20kapitola/kmity-vlny1-6.htm](http://kf.lin.elf.stuba.sk/~ballo/STU_online/Fyzika%20I/VI%20kapitola/kmity-vlny1-6.htm)
7. An Introduction To System Dynamics - Second Order Systems. [Online] [Dátum: 12. Január 2014.] <http://www.facstaff.bucknell.edu/mastascu/econtrolhtml/sysdyn/sysdyn2.html>
8. **Huba, M., Hubinský, P. a Žáková, K.** Teória automatického riadenia 1. Bratislava: STU v Bratislave, 2008. ISBN 978-80-227-3000-6
9. **Press William H., a iní.** Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing. s.l.: Cambridge University Press, 1992. ISBN 978-0521431088
10. **Smith Steven W.** The Scientist & Engineer's Guide to Digital Signal Processing. ISBN 978-0966017632
11. **Beeby S., a iní.** MEMS mechanical sensor. s.l.: Artech house inc., 2004. ISBN 978-1580535366
12. **Vukosavić Slobodan N., a iní**, Power Electronics and Power Systems, Springer Science+Business Media, 2007. ISBN 978-0387485980
13. **Pham D.T., a iní**, Theory and Design of CNC Systems, Springer Series in Advanced Manufacturing, 2008. ISBN 978-1848003354

14. **Ellis George, a iní**, Control System Design Guide, Elsevier Academic Press, 2004. ISBN 0-122374614
15. **Nakamura Masatoshi, a iní**, Mechatronic Servo System Control, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1998. ISBN 3-540210962
16. Dokumentácia k programovaciemu jazyku Python. [Online] [Dátum: 7. Január 2014] <https://www.python.org/doc/>
17. Dokumentácia k programu Maxima, [Online] [Dátum: 5. Január 2015] [http://maxima.sourceforge.net/docs/manual/maxima\\_toc.html#SEC\\_Contents](http://maxima.sourceforge.net/docs/manual/maxima_toc.html#SEC_Contents)
18. **Khanh Duong Quang**, Motion control of multi-axial vibrational mechatronic systems, Dizertačná práca, Bratislava 2015. FEI-104364-11437
19. **Tarunraj Singh, William Singhose**, Tutorial on Input Shaping/Time Delay Control of Maneuvering Flexible Structures, Anchorage 2002. ISBN 0-7803-7298-0
20. Fotogaléria produktu ProfileCut, [Online] [Dátum: 20. Apríl 2019] <https://www.microstep.sk/galeria/stroje/profilecut/>
21. Marketingové materiálu produktu ProfileCut, [Online] [Dátum: 20. Apríl 2019] <https://www.microstep.sk/stroje/rurorezy-a-profilorezy/profilecut/>
22. Špecifikácia grid-enkódera Heidenhein KGM 182, [Online] [Dátum: 20. Apríl 2019] [https://www.heidenhain.com/en\\_US/products/grid-encoder/kgm/specifications/](https://www.heidenhain.com/en_US/products/grid-encoder/kgm/specifications/)

## 12 Publikované práce autora

### 12.1 ADM - Vedecké práce v zahraničných časopisoch registrované v databázach Web of Science alebo SCOPUS

1. MAŤUGA, Michal. Control and Positioning of Robotic Arm on CNC Cutting Machines and Their Applications in Industry. International Conference 2018 Cybernetics & Informatics (K&I). 2018. s. 214-219. ISBN (Online) 978-1-5386-4421-8. DOI: 10.1109/CYBERI.2018.8337568

Citované v:

- PRIBLUDA, B. - UGLOVSKIY, A. - KOROL, V. Development and design of the intellectual bionic robotic arm control system. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. 2019. ISBN 978-1-5386-4308-2
- SALMAN, S.M. - STRUHAR, V. - PAPADOPOULOS, A.V. - BEHNAM, M. - NOLTE, T. Fogification of industrial robotic

systems: Research challenges. Fog Computing and the IoT. 2019. s. 41-45. ISBN 978-1-4503-6698-4

2. DUONG QUANG, Khanh - CHOVANEC, Ľuboš - HUBINSKÝ, Peter - VOZÁK, Daniel - MAŤUGA, Michal - VARGA, Pavol. Comparison of input shaper based on genetic algorithms with analytical approach. International Journal of Artificial Intelligence. č. 15, Vyd. 1 (2017). s. 21-32. ISSN 0974-0635. EID: 2-s2.0-85015326520

Citované v:

- DUONG QUANG, - HUBINSKÝ, Peter. Shaping nurbs curve based on genetic algorithms for vibration reduction. International Journal of Mechanics and Control. 2017. ISSN 15908844.
- POZNA, C. - PRECUP, R. An Approach to the Design of Nonlinear State-Space Control Systems. Studies in Informatics and Control č. 27 (2018). s. 5-14. ISSN 1220-1766. DOI: 10.24846/v27i1y201801

## 12.2 ADF - Vedecké práce v ostatných domácich časopisoch

1. VARGA, Alexander – MAŤUGA, Michal – VARGA, Pavol. Kombinované rezacie systémy na rezanie plechov a rúr vláknovým laserom. Strojárstvo-Strojírenství. Vyd. 5, 2015. Str. 72-74. ISSN 1335-2938
2. KOVÁČ, Michal - MAŤUGA, Michal - TODERIŠKA, Matúš. CNC rezacie stroje s robotickým ramenom. Zvárač. Vyd. XV/3, 2018. Str. 32 – 34. ISSN 1336-5045
3. KOVÁČ, Michal - MAŤUGA, Michal - TODERIŠKA Matúš. Rezanie rúr robotom. Strojárstvo-Strojírenství. Vyd. 5, 2018. Str. 108 - 109. ISSN 1335-2938
4. VARGA, Alexander - MAŤUGA, Michal. CNC stroje na rezanie 3D dielov. Strojárstvo-Strojírenství. Vyd. 9, 2016, Str. 108 – 109. ISSN 1335-2938
5. MAŤUGA, Michal – MIŠOTA, Branislav. Malé vodné elektrárne. Posterus – portál pre odborné publikovanie. Vyd. 11, Roč. 2 (2009). ISSN 1338-0087

### **12.3 AGI - Správy o vyriešených vedeckovýskumných úlohách**

1. VARGA, Alexander - a spol. Výskum a vývoj technologických uzlov CNC strojov na priestorové delenie materiálov energolúčovými technológiami. Ministerstvo školstva, vedy, výskumu a športu SR, Sekcia vedy a techniky. 2013. Číslo projektu: 2010-18101/40963:1-11
2. VARGA, Alexander - a spol. Riadiace systémy pre energolúčové rezacie centrá. Ministerstvo školstva, Agentúra na podporu výskumu a vývoja. 2015. Číslo projektu: APVV-0504-12
3. VARGA, Alexander - a spol. Výskum technologických uzlov CNC strojov na delenie materiálov energolúčovými technológiami. Ministerstvo školstva, vedy, výskumu a športu SR. 2018. Číslo projektu: 2015-10962/19795:1-15AA