

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

Konstrukce modulu řízeně přeladitelného hltiče vibrací

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Karas** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **466693**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní stroje a zařízení**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Konstrukce modulu řízeně přeladitelného hltiče vibrací

Název diplomové práce anglicky:

Design of the controllable vibration damper module

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Předmětem diplomové práce je návrh průmyslově uplatnitelného řešení konstrukce modulu pasivního řízeně přeladitelného hltiče vibrací pro obráběcí stroj. Zpracujte rešerši v oblasti v oblasti přeladitelných hltičů vibrací a řízení jejich přeladění. Navrhněte min. 3 konstrukční varianty řešení pro aplikaci na vybraném dílci. Pro zvolenou variantu rozpracujte konstrukční návrh přeladitelného hltiče vibrací, 3D CAD model a návrh řízení. Vytvořte návrhový výpočtový model. Proveďte konstrukční a návrhové výpočty pro dimenzování hltiče podle požadovaných vlastností. Vyřešte rozhraní pro možnost řazení modulů hltičů do větších sestav a pro uchycení sestav. Navrhněte pohon hltiče a způsob jeho řízení. Vytvořte výkresovou dokumentaci. Rozsah grafické části: 3D model sestavy přeladitelného hltiče vibrací, výkres sestavy přeladitelného hltiče vibrací, výrobní výkresy součástí. Rozsah textové části 60 – 80 stran.

Seznam doporučené literatury:

KOPECKÝ, Miloslav a Jaromír HOUŠA, Základy stavby výrobních strojů. Praha: České vysoké učení technické, 1986.; STEJSKAL, Vladimír. Kmitání s Matlabem. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02435-0.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jaroslav Červenka, ústav výrobních strojů a zařízení FS

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

Datum zadání diplomové práce: **21.10.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **03.01.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **20.02.2022**

Ing. Jaroslav Červenka
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 2.1.2022

.....

podpis

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu práce panu Ing. Jaroslavovi Červenkovi a konzultantovi panu Ing. Lukášovi Novotnému, Ph.D. za vedení, odborné rady a podnětné připomínky při konzultacích v průběhu tvorby této diplomové práce.

Poděkovat bych chtěl také svým rodičům, kteří mě v průběhu celého studia podporovali. Dále patří velký dík mé přítelkyni, která mi dokázala být podporou a motivací v těch nejtěžších chvílích po dobu celého magisterského studia.

Anotace

Autor:	Martin Karas
Název DP:	Konstrukce modulu řízeně přeladitelného hltiče vibrací
Rozsah práce:	103 str., 86 obr., 3 tab.
Školní rok vyhotovení:	2021/2022
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí DP:	Ing. Jaroslav Červenka
Konzultant DP:	Ing. Lukáš Novotný, Ph.D.
Zadavatel:	ČVUT FS
Využití:	Tlumení vibrací dílčích částí obráběcích strojů
Klíčová slova:	Řízeně přeladitelný hltič vibrací, pasivní tlumení vibrací, hlcení vibrací, přeladitelnost vlastních frekvencí, řízení elektromotoru
Anotace:	Diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem modulu řízeně přeladitelného hltiče vibrací. Na základě vyhotovené rešerše hledá optimální variantu konstrukčního řešení způsobu pasivního potlačení vibrací tlumené soustavy s proměnlivými vlastními frekvencemi. Frekvencím se zařízení přizpůsobuje změnou aktivní délky své pružiny pomocí mechanismu s řízenými pohony.

Annotation

Author:	Martin Karas
Title of dissertation:	Design of the controllable vibration damper module
Extent:	103 p., 86 fig., 3 tab.
Academic year:	2021/2022
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12135 – Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Jaroslav Červenka
Consultant:	Ing. Lukáš Novotný, Ph.D.
Submitter:	Faculty of Mechanical Engineering
Application:	Vibration damping of machine tool parts
Key words:	Controllable vibration damper, passive vibration damping, vibration absorption, tuneability of the natural frequencies, electric motor control
Annotation:	The thesis is focused on the design of a controllable vibration damper module. Based on the research this thesis aims to find an optimal design solution of the passive vibration damping method of the damped structure with the variable natural frequencies. The device adapts to the frequencies by changing the active length of its spring using a mechanism with controlled drives.

Přehled použitých veličin a jednotek

a_v	$[m/s^2]$	Maximální zrychlení osy Z při zasouvání smykadla
a_p	$[m/s^2]$	Maximální zrychlení příčně působících vibrací
a_h	$[m/s^2]$	Maximální zrychlení vibrací působících kolmo plochu
b	$[N/(m/s)]$	Konstanta tlumení
$b_{m,n}$	$[N/(m/s)]$	Tlumení hltičů v Simscape modelu
d	$[m]$	Průměr pružiny
d_k	$[mm]$	Průměr čepu
d_p	$[mm]$	Průměr pružiny
d_v	$[mm]$	Průměr výztuhy
e	$[m]$	Vzdálenost krajního bodu pružiny od středu ohybu
E	$[N/mm^2]$	Youngův modul pružnosti
F	$[N]$	Zatěžující síla
F_v	$[N]$	Tíhová síla hltiče vyvolaná ve vertikálním směru
F_m	$[N]$	Normálová síla magnetů
F_h	$[N]$	Síla magnetického úchytu se závitovým čepem
F_s	$[N]$	Síla vlepených kotoučových magnetů
F_t	$[N]$	Třecí síla magnetů
f	$[Hz]$	Vlastní frekvence
f	$[-]$	Součinitel tření magnetů
g	$[m/s^2]$	Gravitační zrychlení
J	$[m^4]$	Kvadratický moment průřezu pružiny
k	$[N/m]$	Konstanta tuhosti
k	$[-]$	Bezpečnostní součinitel
$k_{m,n}$	$[N/m]$	Tuhost hltičů v Simscape modelu
k_{ξ}	$[-]$	Bezpečnostní koeficient čepu
k_l	$[-]$	Bezpečnostní součinitel ložiska
l	$[m]$	Délka pružiny

m	[kg]	Hmotnost
$m_{m,n}$	[kg]	Hmotnost aktivní hmoty hltičů v Simscape modelu
m_h	[kg]	Hmotnost hltiče
m_a	[kg]	Hmotnost aktivní hmoty
M_o	[N · m]	Ohybový moment pružiny
p_D	[MPa]	Dovolený tlak
p_k	[MPa]	Kontaktní tlak
p_{max}	[MPa]	Maximálně přípustný tlak materiálu
p_p	[MPa]	Kontaktní tlak kluzného elementu pružiny
p_v	[MPa]	Kontaktní tlak kluzného elementu pružiny
u	[m]	Průhyb pružiny
u_{max}	[mm]	Maximální průhyb aktivní hmoty v nádobě
t	[mm]	Výška výztuhy
t	[mm]	Kontaktní délka čepu v nádobě
$W_{o,z,y}$	[m ³]	Modul průřezu v ohybu pružiny
W_o	[m ³]	Modul průřezu
x	[m]	Vzdálenost posuvu dle Schwedlerovi věty
x	[m]	Poloha
\dot{x}	[m/s]	První derivace polohy
\ddot{x}	[m/s ²]	Druhá derivace polohy
σ	[MPa]	Napětí materiálu
σ_o	[MPa]	Ohybové napětí
σ_D	[MPa]	Dovolené napětí
τ_{DS}	[MPa]	Dovolené napětí ve stříhu
τ_{tS}	[MPa]	Vypočtené napětí čepu ve stříhu
τ_S	[MPa]	Napětí ve stříhudle materiálové charakteristiky 11 600
φ_{max}	[°]	Maximální natočení aktivní hmoty v nádobě
φ	[°]	Natočení pružiny

π	[1]	Ludolfovo číslo
ξ	[-]	Poměrný útlum
ω_0	[rad/s]	Počáteční úhlová frekvence
ω	[rad/s]	Úhlová frekvence
ρ	[kg/m ³]	Hustota



Obsah

1	Úvod	12
2	Cíl práce	13
3	Rešerše	14
3.1	Základní rozdělení metod potlačování vibrací	14
3.1.1	Aktivní	14
3.1.2	Polo-aktivní	14
3.1.3	Pasivní	15
3.2	Principy pasivního tlumení vibrací a jejich využití u dynamických hltičů 16	
3.2.1	Tlumič na principu vířivých proudů	16
3.2.2	Elektromagnetický tlumič s doplňkovým R-C obvodem	19
3.2.3	Viskoelastický tlumič	20
3.2.4	Materiálové tlumení pružných prvků	22
3.2.5	Tekutinový tlumič	29
3.2.6	Tlumič se sloupcem kapaliny	33
3.2.7	Částicový tlumič	34
3.2.8	Třecí tlumič	35
3.2.9	Kyvadlový tlumič	38
4	Shrnutí rešerše	40
4.1	Zaměření práce	40
4.2	Vhodnost užití nalezených řešení	40
4.2.1	Pružné elementy a jejich přeladitelnost	41
4.2.2	Tlumicí elementy	42
4.2.3	Vybrané varianty	43
5	Vlastní řešení	44
5.1	Koncepční návrhy možných řešení konstrukce	44
5.1.1	Koncept č.1	44
5.1.2	Koncept č. 2	46
5.1.3	Koncept č.3	48
5.1.4	Koncept č.4	50
5.1.5	Zhodnocení a volba vhodného konceptu	51
5.2	Popis hlcené soustavy	52
5.3	Konstrukce hltiče	59
5.3.1	Požadované vlastnosti	59



5.3.2	Technická řešení	59
5.3.3	Modularita.....	66
5.4	Výpočty parametrů hltiče.....	68
5.5	Ověření funkčnosti hltiče	74
5.6	Řízení pohonu hltiče	77
5.6.1	FPGA modul.....	79
5.6.2	Real-Time modul	82
5.7	Kontrolní výpočty	87
5.7.1	Kontrola odtrhovacího přípravku.....	87
5.7.2	Kontrola kluzného vedení	88
5.7.3	Kontrola přítláčné síly magnetů	89
6	Závěr	92
	Seznam obrázků	93
	Seznam tabulek	96
	Seznam použitého softwaru	97
	Seznam použité literatury.....	98
	Seznam příloh	103
	Textové přílohy	103
	Výkresová dokumentace.....	103
	Elektronické přílohy (SD karta)	103

1 Úvod

Vibrace jsou jevem, který velmi negativně ovlivňuje výrobní výkon, spolehlivost stroje a výslednou jakost obráběného dílce. Jejich minimalizace je velice důležitým faktorem při návrhu nejen obráběcích strojů, ale i například motorových vozidel, letadel, či budov.

Kmitání lze rozdělit na volné, vynucené a samobuzené. Nejvíce ovlivňuje přesnost a kvalitu povrchu obrobku kmitání samobuzené. To má svůj původ například v řezném procesu a projevuje se zmenšením životnosti nástroje i celého stroje, je doprovázeno hlukem, poškozují jakost výroby, geometrickou přesnost obrobku atd.

Kromě užití různých kompenzačních technik je zapotřebí, aby se konstruktér snažil o minimalizaci zdroje a působení mechanického kmitání. Toho lze dosáhnout konstrukčními úpravami částí stroje, které jsou náchylné k vybuzení zejména rezonančních frekvencí, u nichž dochází k největším výchylkám, a tedy k poškození. Je vhodné, aby byly tyto části dostatečně tuhé a lehké, a aby vykazovaly vysoké vlastní frekvence a celkové tlumení. K tomu může sloužit například topologická úprava částí konstrukce jako je tvar, žebrování, tloušťka stěn, vhodná volba materiálu nebo úprava spojů.

Realizace stroje, který kombinuje všechny zmíněné vlastnosti je finančně náročná, a proto může být výhodnější přejít od způsobů konstrukčních ke způsobům mechatronickým. Ty lze rozlišit podle dvou odlišných strategií. První je implementace kompenzačního algoritmu, navrženého podle výsledků měření daného stroje, do řídicího systému. Ten má za úkol řídit pohony tak, aby se minimalizovalo buzení nežádoucích vibrací. Druhá strategie užívá přídavná mechanická zařízení, pohlcující různými metodami těžce ovlivnitelné zdroje vibrací. Cílem práce, který je podrobně rozepsán v kapitole 2, je právě takovéto zařízení navrhnout. [1], [2]

2 Cíl práce

V práci vznikne rešerše způsobů pasivního pohlcování vibrací. Cílem je dle této studie vytvořit návrh konstrukce modulu pasivního řízení přeladitelného hltiče vibrací, který bude aplikovatelný na dílci stavby obráběcího stroje. Práce bude obsahovat dvě hlavní části:

Rešeršní část:

1. Představení základních metod, kterými lze potlačovat vibrace.
2. Vysvětlení principů pasivního tlumení vibrací a jejich využití u konkrétních zařízení.
3. Zhodnocení možných řešení a výběr vhodných variant použitelných pro tuto práci s úvodem do řešené problematiky.

Vlastní řešení: Tato část vychází z požadavků plynoucích ze zadání a možnostech, nalezených v rešeršní části.

1. Konstrukční návrh možných variant, vycházejících z rešerše.
2. Rozpracování návrhu zvolené varianty včetně konstrukčních, návrhových a kontrolních výpočtů vyhovujících požadovaným vlastnostem.
3. Vytvoření způsobu řízení přeladění a modulárního řazení hltiče.

3 Rešerše

3.1 Základní rozdělení metod potlačování vibrací

Vybraný přístup pro rozdělení metod potlačování vibrací v této práci je z hlediska řízení prvků, které mají vliv na tlumení mechanických vibrací. Tyto prvky se dají rozdělit na:[3]

- Aktivní
- Polo-aktivní
- Pasivní

3.1.1 Aktivní

Aktivní jsou nazývány takové systémy, které užívají k potlačení vibrací a koncových oscilací primární tlumené soustavy přidanou energii v podobě aktuátorů, řízených ve vazbě s příslušnými senzory. Jedná se například o lineární elektro/pneu/hydromotor, který svým silovým účinkem působí proti vznikající výchylce kmitání. Aktivní systémy jsou řízeny v uzavřené smyčce pomocí zpětnovazebních strategií (feedback) nebo mohou poskytovat proaktivní odezvu tlumení pomocí dopředného řízení (feed-forward). Dopředné řízení umožňuje systému proaktivně generovat a odesílat rušivé signály na základě očekávaných vibrací. [3], [4]

3.1.2 Polo-aktivní

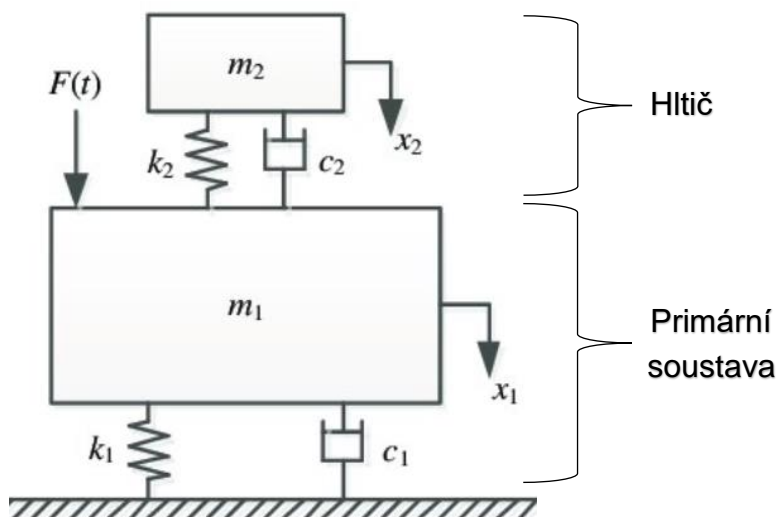
Polo-aktivní systém, využívající zpětnovazebného řízení, mění v závislosti na dynamické odezvě ze senzorů svou konstantu tlumení. Oproti aktivní metodě působí v tomto systému řízená síla na tlumený systém nepřímo a energie se z něj jen řízeně odebírá. Příkladem polo-aktivního tlumícího prvku může být kapalinový tlumič měnící své vlastnosti pomocí škrťacího ventilu nebo tlumič obsahující kapalinu s mikročásticemi, reagující na elektrické, či magnetické pole, a tím výrazně mění svoji viskozitu. [2], [5]

3.1.3 Pasivní

Pasivní systémy tlumící vibrace jsou nejjednodušší a nejstarší metodou pro snížení amplitudy kmitání, bez zásahu řídicího systému. K utlumení vibrací primární soustavy lze například použít kapalinu, viskoelastické materiály, elektromagnetismus nebo komplexnější zařízení, kterým je přeladitelný dynamický hltič. Kinetická energie vibrací je nejčastěji převáděna na teplo. Jelikož mají pasivní systémy konstrukci o pár prvcích, mohou být velice levné a spolehlivé. Při užití jednoduché konstrukce je nevýhodou nízké pásmo frekvencí, ve kterých se mohou ladit a horší tlumící účinky při malých frekvencích. [4], [6]

Dynamický hltič si lze podle schématu na obr. 1 představit jako hmotu, která je pomocí pružného a tlumícího prvku připojena k primární tlumené soustavě. Tyto prvky lze realizovat mnoho odlišnými způsoby a budou blíže představeny v kapitole 3.2.

Správnou volbou strukturních parametrů jako hmotnost, tuhost a tlumení lze hltiče využít pro tlumení širokého spektra frekvencí. K pohlcení energie kmitů, a tedy snížení jejich amplitudy, dojde při naladění hltiče na vlastní frekvenci, která je stejná s tlumenou soustavou. Tlumená energie je z části přetvořena na kmity sekundární odpružené hmoty s opačnou fází a z části pohlcena disipací tlumiče. Pro zlepšení tlumících vlastností je možné užít hltič obsahující více hmot. Ty mohou být vůči sobě řazeny paralelně nebo sériově a laděny na stejné i odlišné frekvence. Tím je dosahováno vyšší robustnosti a rozšíření pásma činnosti. [7], [8]



Obrázek 1: Schéma dynamického hltiče vibrací.[9]

Tato práce se bude dále zabývat pouze pasivními metodami tlumení vibrací, dle požadavků příslušného zadání.

3.2 Principy pasivního tlumení vibrací a jejich využití u dynamických hltičů

V této kapitole budou vysvětleny rozdílné principy vzniku tlumicí síly, kterou lze tlumit kmitající hmoty. U každého principu budou dále představeny zařízení, které je v odlišných konfiguracích reálně užívají.

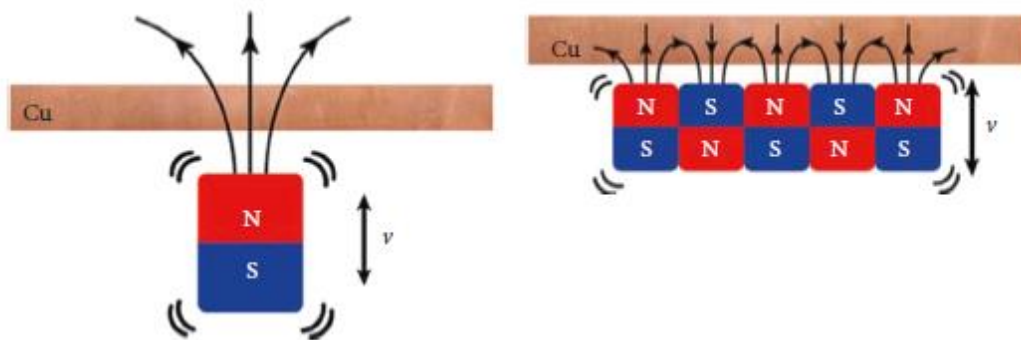
Laděné je v této práci nazýváno takové zařízení, které po sestavení díky charakteru použitých konstrukčních prvků, dovoluje naladění pouze na jednu vlastní frekvenci. Pokud je u prvků po sestavení umožněna změna jejich strukturních vlastností a tím zajištěna přeladitelnost určitého spektra vlastních frekvencí, je zařízení nazýváno jako přeladitelné.

3.2.1 Tlumič na principu vířivých proudů

Ke konstrukci elektromagnetických tlumičů se používají hlavně tři typy materiálů: paramagnetické, měkké feromagnetické a tvrdé feromagnetické. Paramagnetické jsou jen slabě ovlivněny vnějším magnetickým polem a nelze je trvale zmagnetovat. Často využívané paramagnetické materiály jsou: hliník, měď, titan nebo polymery. Při výběru tohoto materiálu musí být pečlivě zvážena jeho elektrická vodivost. Feromagnetické materiály při reakci s vnějším magnetickým

polem zvyšují celkovou hustotu magnetického toku. To zajišťuje více magnetického pole ve stejném objemu. Oproti paramagnetickým materiálům dokážou udržet magnetismus i bez přítomnosti magnetického pole. [10]

Tlumič na principu vířivých proudů je založen na interakci vodivého nemagnetického materiálu (nejčastěji mědi) a nestacionárního magnetického pole, vyvolaného pohybem permanentního magnetu. Při vzájemném pohybu vodiče a magnetu jsou ve vodiči generovány vířivé proudy. To v něm indukuje magnetické pole s opačnou polaritou oproti vnějšímu pohybujícímu se poli a vytváří tak mezi sebou navzájem působící silovou vazbu. Ta je závislá na rychlosti vzájemného pohybu a vzdálenosti obou prvků. Z obr. 2 si lze všimnout, že magnety mohou působit samostatně nebo se mohou paralelně skládat a vytvořit tak větší sílu. [10]

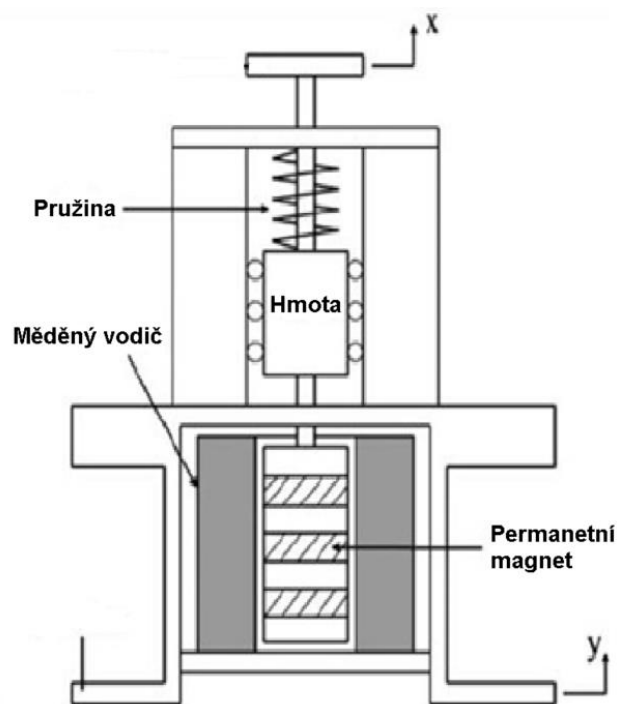


Obrázek 2: Možné uspořádání magnetů a vodivého materiálu. [10]

Laděný hltič s jedním stupněm volnosti

Zařízení z obr. 3 je ukázkou využití tlumiče v dynamickém hltiči. Jako pružný element je zde použita vinutá pružina, která díky vibračním tlumené soustavy rozkmitává hmotu. Hmotu je dále tyčí pevně spojena s permanentními neodymovými magnety vzájemně oddělenými čtyřmi bloky z měkkého kovu. Společně se stacionárním měděným vodičem prstencového tvaru, je vytvořen tlumič na principu vířivých proudů. Pro docílení největší účinnosti je mezi magnety a vodičem mezera jen několik desetin milimetru. Zařízení také obsahuje lineární vedení hmoty jehlovými ložisky. To dovoluje pohyb hmoty pouze v tlumicím vertikálním směru a zajišťuje při pohybu konstantní mezeru mezi magnetem a vodičem. [11]

Naladění je umožněno výměnou jednotlivých komponent (hmota, pružina, magnety) za jiné, s potřebnými strukturními vlastnostmi. Dle autorů práce dovoluje hltič díky užití elektromagnetického tlumiče zdárné utlumení jak nízkých, tak vysokých frekvencí až o 90 %. [11]

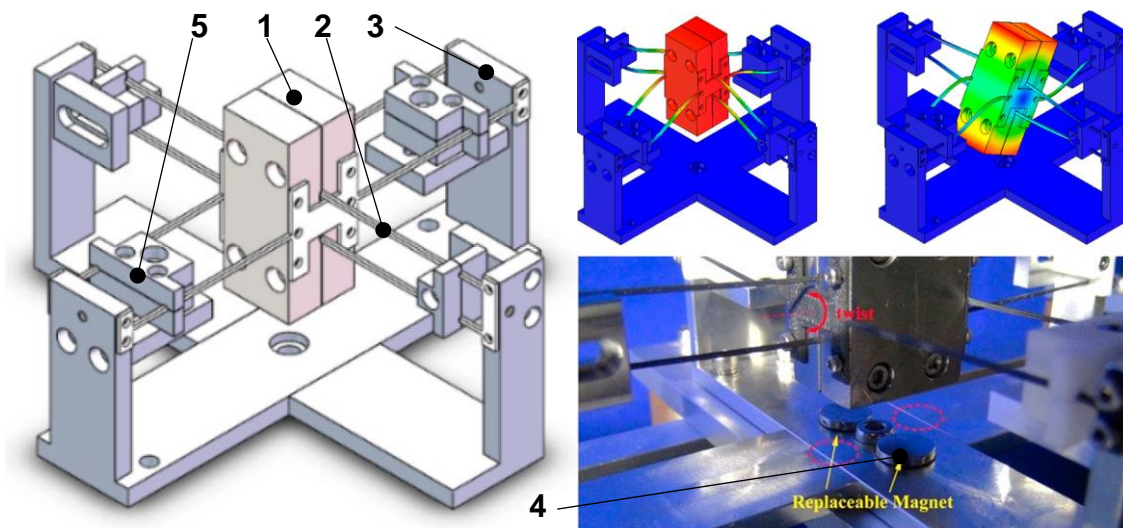


Obrázek 3: Schéma laděného hltiče s jedním stupněm volnosti. [11]

Přeladitelný hltič se dvěma stupni volnosti

Toto zařízení bylo vyvinuto za účelem tlumení ohybu a krutu konstrukce mostu. Je vytvořeno tak, aby zajistilo dva stupně volnosti vyhovující charakteru pohybu tlumené soustavy. Hltič má ve skutečnosti díky užití konstrukci více stupňů volnosti. V práci se ale berou v úvahu jen ty s výraznou dislokací. [12]

Experimentální zařízení se skládá z hmoty (1), osmy pružných tyčí (2), rámu (3), magnetů (4) a čtyř nastavitelných výztuh (5). Každá z pružných tyčí je na jedné straně pevně spojena s rámem a na druhé s hmotou. Přeladění vlastní frekvence je zde realizováno změnou aktivní délky tyče pomocí nastavitelných výztuh. Ty, kromě přeladění, kompenzují chyby vzniklé nedokonalým obráběním a zanedbáním předpětí pružného prvku při výpočtu. Tlumení je dosahováno principem vířivých proudů, kde jsou dva symetricky umístěné permanentní magnety přichyceny mezi podstavcem a kmitající hmotou. Velikost tlumení lze změnit volbou velikosti a síly magnetů, popřípadě zvýšením jejich počtu. [12]

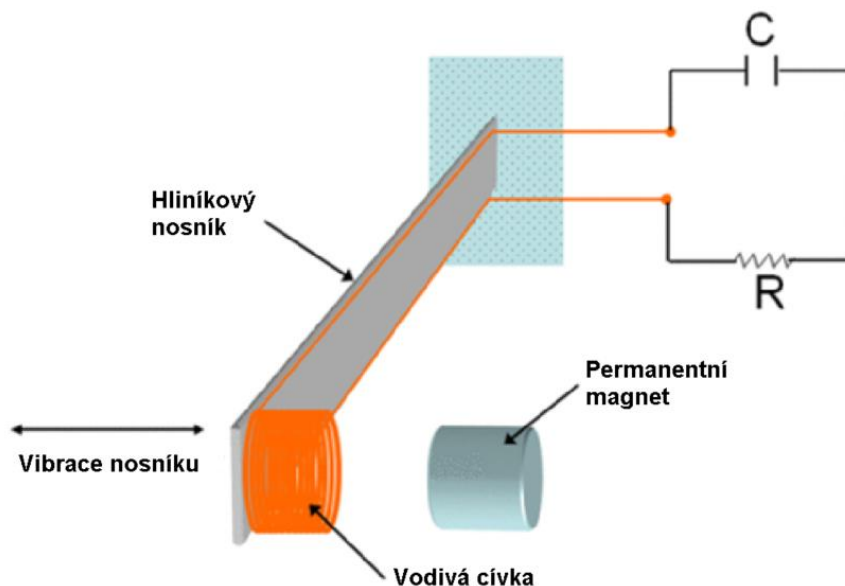


Obrázek 4: Přeladitelný hltič s ukázkou možných stupňů volnosti a umístění magnetů. [12]

3.2.2 Elektromagnetický tlumič s doplňkovým R-C obvodem

Elektromagnetický tlumič s doplňkovým R-C obvodem (angl. zkratka EMSD) je ve své podstatě elektromagnetický motor/generátor složený z permanentního magnetu a vodivé cívky, která je svými konci připojena k sériovému R-C obvodu. Při pohybu cívky v nestacionárním magnetickém poli se v důsledku změny magnetického toku v cívce indukují proud. Tím se v ní indukují magnetické pole, které vytváří silovou vazbu s magnetem a brzdí se tak jejich vzájemný pohyb. U sériově zapojeného R-C obvodu lze volbou velikosti rezistoru a kondenzátoru nastavit maxima a minima proudu. To na elektrické rezonanční frekvenci umožňuje větší přeměnu mechanické energie na elektrickou. Konstrukce tohoto tlumiče má dvě praktické výhody. Zaprvé jde o možnost využívat naakumulovanou elektrickou energii k další aplikaci. Zadruhé, energie z vibrací přenesená do tlumiče je odváděna pomocí drátů a lze ji tak disipovat na místech vzdálených od vzniku vibrací a neovlivňovat tak tlumený systém. [10], [13]

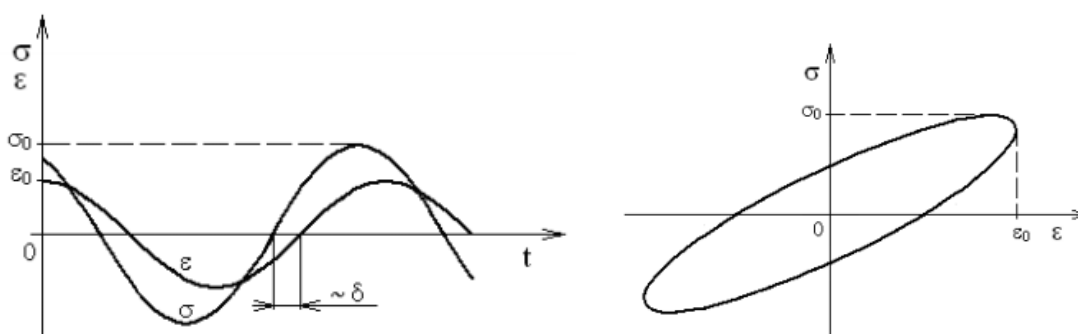
Na obr. 5 je znázorněna praktická aplikace tohoto tlumiče, kde je cívka z vodivého materiálu připevněna na pohyblivý konec kmitajícího nosníku a permanentní magnet připevněný například pomocí upínky ke stolu. Tlumící sílu lze ovlivnit změnou vzdálenosti magnetu od cívky nebo výměnou jednotlivých komponent s odlišnými vlastnostmi.



Obrázek 5: Tlumení kmitů nosníku pomocí EMSD [13]

3.2.3 Viskoelastický tlumič

Viskoelastické materiály jsou na pomezí viskózních a elastických materiálů. Představiteli jsou přírodní i technické materiály jako například asfalty, polymery a mnoho biologických materiálů. Jejich chování je znázorněno na obrázku 6. Při harmonickém namáhání (vibracích) se část vložené mechanické energie přemění v teplo a část spotřebuje při odlehčení. Díky strukturálnímu tlumení viskoelastických materiálů má poměrná deformace fázové zpoždění za napětím v rozmezí od 0 do $\pi/2$. Množství vytvořené tepelné energie je úměrné ploše hysterezní křivky, která je závislostí poměrné deformace a napětí při jednom cyklu. [14]

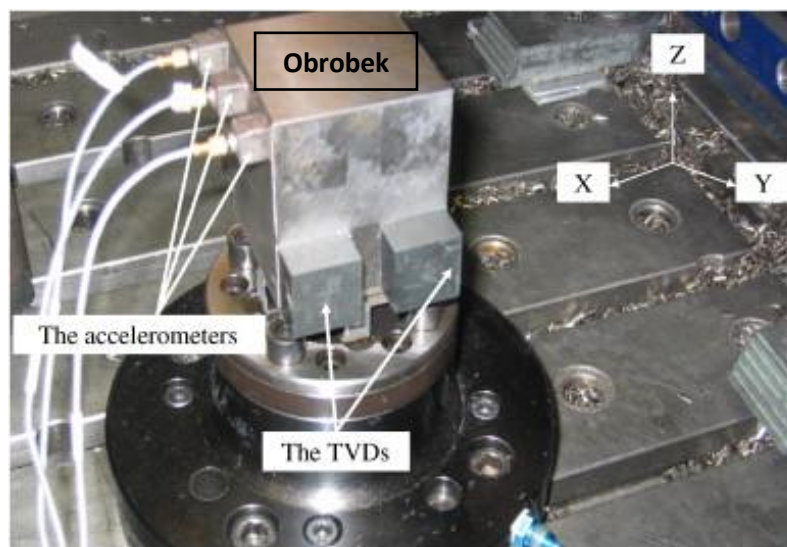


Obrázek 6: Závislost poměrné deformace a napětí při jednom cyklu harmonickém namáhání. [14]

Laděný viskoelastický tlumič

Na obr. 7 lze vidět využití laděného viskoelastického tlumiče (TVD), tlumícího vibrace obrobku při frézovacím procesu. Viskoelastický polymer je pro získání nejlepšího utlumení amplitudy vibrace připojen v místě, kde dochází k nejvyššímu vybuzení. Při takovéto konfiguraci vytváří tlumič odpor proti kmitavému pohybu obrobku a tím snižuje amplitudu buzené vibrace.

K naladění potřebné frekvence je zapotřebí správné kombinace materiálu, který má daný smykový modul při určité teplotě a hmotnosti. Vlastní frekvenci lze měnit i užitím více tlumičů tak, jak tomu bylo při experimentu. Nevýhodou je, že materiál při změně teploty způsobené disipací a obráběcím procesem mění své strukturní vlastnosti, a to způsobuje jeho nechtěné přeladění. [15]



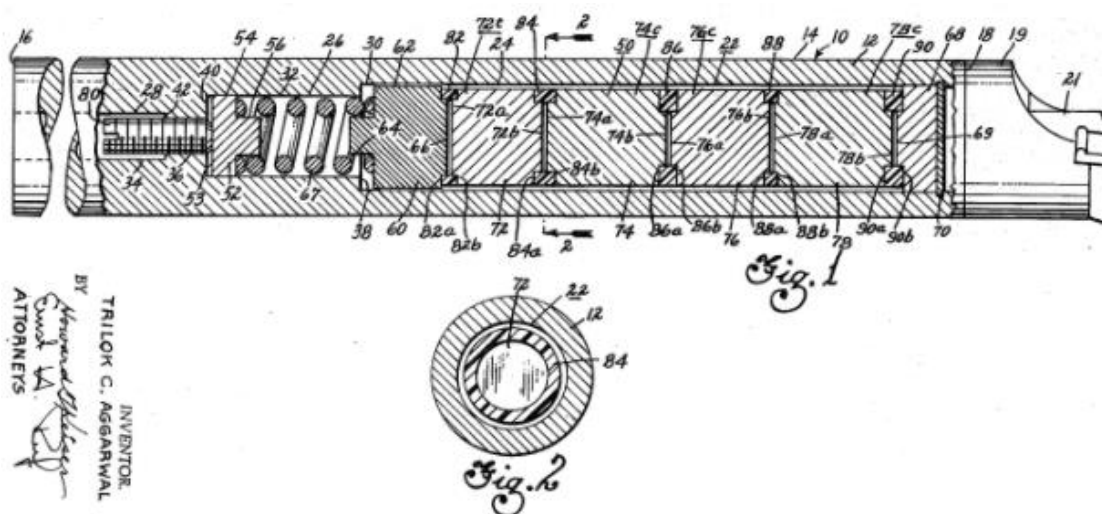
Obrázek 7: Použití TVS k tlumení vibrací obrobku při frézování [15]

Přeladitelný vícehmotový tlumič vibrací se sériově zapojenými hmotami

Vynález z obr. 8 obecně spadá do skupiny tlumených sériově zapojených hltičů vibrací. Je vhodný zejména pro části stroje s proměnnou vlastní frekvencí. Ačkoli bude hltič popsán s odkazem na vyvrtávací a vřetenové tyče s různou délkou, jeho využití je možné i u nástrojů používaných při frézování, či broušení. [16]

Těleso vyvrtávací tyče obsahuje hltič, který je interně namontovaný v přední části, kde má kmitání největší amplitudu. Díky užití více hmot, umožňuje hltič

naladěni na několik frekvencí najednou. To je potřeba z důvodu přeladění frekvence při změně například vysunutí nebo otáček. Jako pružný a zároveň tlumicí prvek jsou zde použity viskoelastické kroužky, oddělující jednotlivé hmoty. Celý mechanismus je předepnutý vinutou pružinou, umístěnou v zadní části hltiče. Stlačením pružiny, realizované pomocí šroubu, lze upravit tuhost pružných prvků a tím hltič naladit na jiné frekvence. Jiných frekvencí je také dosahováno výměnou hmot a viskoelastických prvků s jinými vlastnostmi, kterými jsou velikost, či hustota materiálu. [16]



Obrázek 8: Vícehmotový, sériově zapojený tlumič vibrací. [16]

3.2.4 Materiálové tlumení pružných prvků

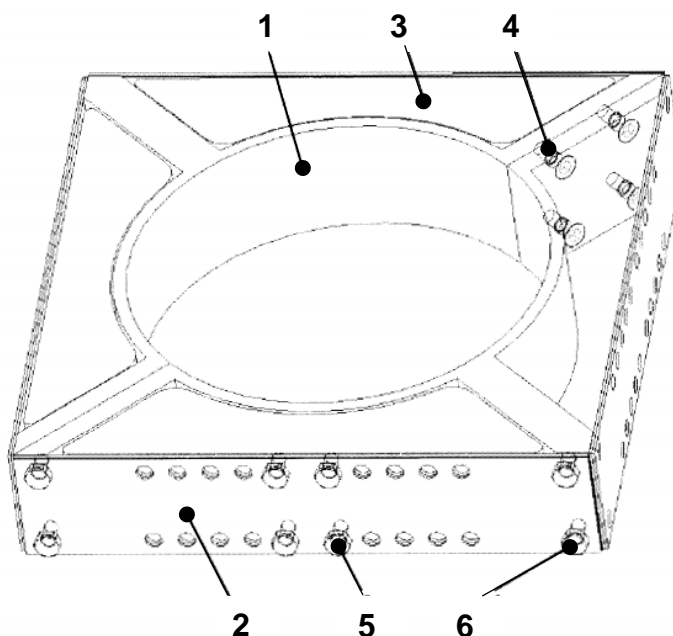
Následující hltiče nevyužívají k tlumení žádné přídavné tlumiče. Užité pružné prvky jako listová pružina a tyč vykazují v ideálním případě pouze elastické vlastnosti, a tudíž by byla veškerá energie znovu použita při odlehčení. Reálně ale většina materiálů vykazuje viskózní i elastické chování. K tlumení u nich dochází díky odchylkám od Hookova zákona, a i zde bude mít poměrná deformace určité fázové zpoždění za napětím. Působením vnitřního tlumení materiálu dojde k částečnému rozptýlení mechanické energie v teplo. [17]

Čtyřhmotový hltič kmitů pro smykadla obráběcích strojů

Tento hltič je příkladem toho, jak lze utlumit kmity, vzniklé při obráběcím procesu ve dvou navzájem kolmých osách. Konkrétně se jedná o aplikaci na rozhraní mezi vřetenem a smykadlem stroje. U smykadla převládá díky štíhlé

konstrukci délkový rozměr, a proto má stejně jako vyvrtávací tyče nízkou dynamickou tuhost. Ta zapříčiňuje náchylnost kmitání při obrábění. [18]

K připojení hltiče z obr. 9 na rozhraní mezi vřetenem a smykadlem dochází pomocí svěrného spoje, který zajišťují dva nákrůžky (1), pevně spojené pomocí šroubů (4). K nákrůžkům jsou šrouby (6) připevněné pružné planžety (2), které mohou být zdvojené. Díky tomu dojde k ještě většímu utlumení, způsobenému třením. Planžety v sobě mají několik otvorů, kterými se k nim přišroubují čtyři hmoty (3). Naladit vlastní frekvenci hltiče, lze zvolením vhodných parametrů, kterými jsou velikost hmot a tuhost planžet. Tuhost lze přeladit i za provozu vhodnou volbou otvorů, jimiž jsou k planžetám připevněné hmoty. Tím se změní jejich aktivní délka. [18]



Obrázek 9: Čtyřhmotový pasivní hltič kmitů pro smykadla obráběcích strojů a jeho součásti. [18]

Ladění tlumič kmitajících hmot

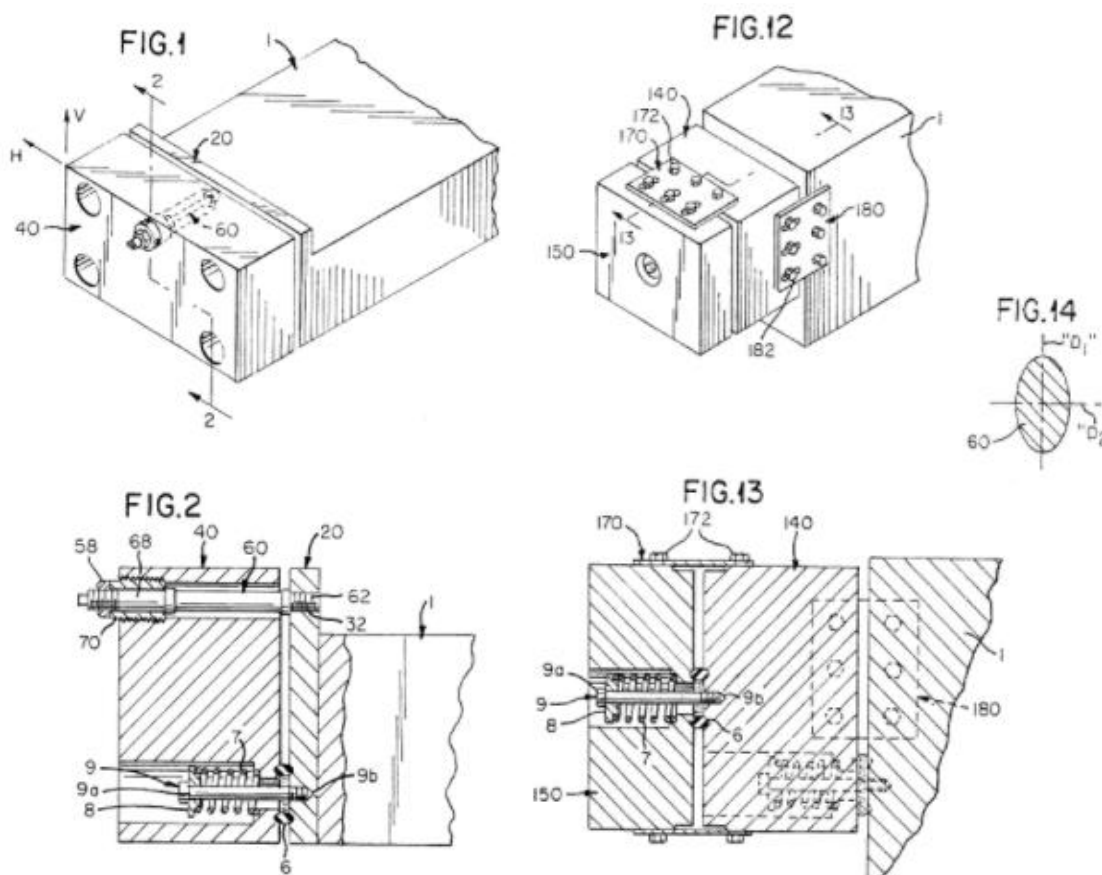
Následující zařízení slouží k tlumení vibrací vysokorychlostních obráběcích strojů, které mají svůj původ ve zrychlení či zpomalení součástí podél pohybových os stroje nebo v řezném procesu. Umožňuje disipaci energie a správné zadržení polohy hmoty v horizontálních i vertikálních směrech. Lze ho k tlumenému dílci přichytit přímo i nepřímo. [19]

První konfigurace tlumiče zobrazená vlevo na obr. 10, obsahuje hmotu druhého stupně (40). Ta je uprostřed v horní části k tlumenému dílci přichycena

pomocí nosné tyče (60). Hmoty v sobě také obsahuje čtyři díry. Ty v sobě ukrývají šroub (9) s pružinou (7), předepínající pružný element (6), nacházející se mezi hmotou a tlumeným dílcem. [19]

Druhá konfigurace obsahuje dvě hmoty druhého stupně. Oproti první konfiguraci je hmota mimo stejného předepjatého spoje k tlumené soustavě spojena deskou (180). Druhá hmota je k první přichycena stejným předepjatým spojením jako u první konfigurace a další deskou (170). [19]

Pokud je k tlumení použita jedna hmota, slouží zařízení převážně k tlumení jedné frekvence, která je naladěna volbou hmoty a předpětí pružného elementu, popřípadě velikostí desky u druhé konfigurace. Je zde ale možnost použít nosnou tyč s nesymetrickým průřezem zajišťující naladění na dvě frekvence. Konfigurace obsahující dvě hmoty, umožňuje díky nezávislému seřízení tlumicích elementů naladění minimálně dvou rozdílných frekvencí. [19]

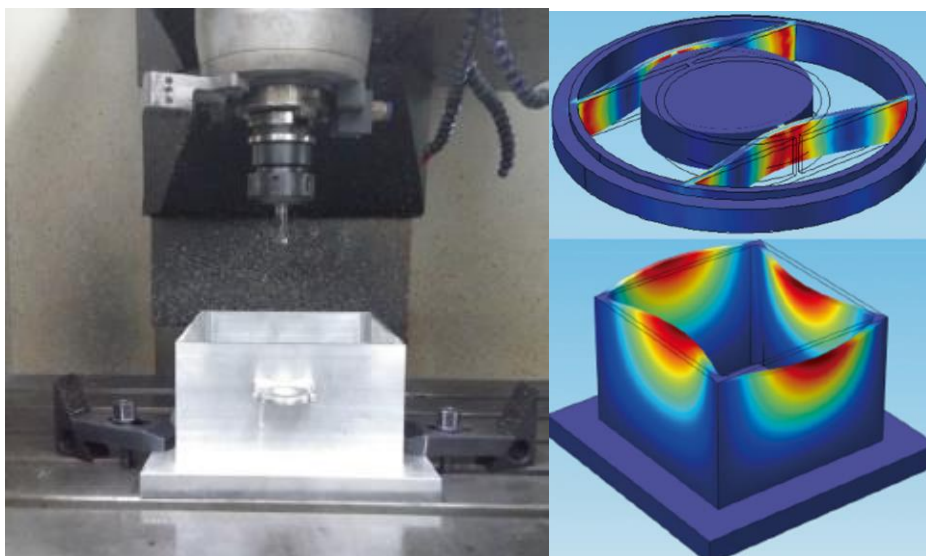


Obrázek 10: Konfigurace tlumiče jednohmotového (vlevo) a dvouhmotového (vpravo). [19]

Hltič s přeladitelnou tuhostí změnou úhlové orientace

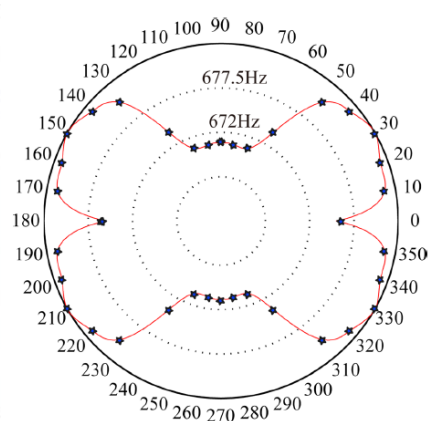
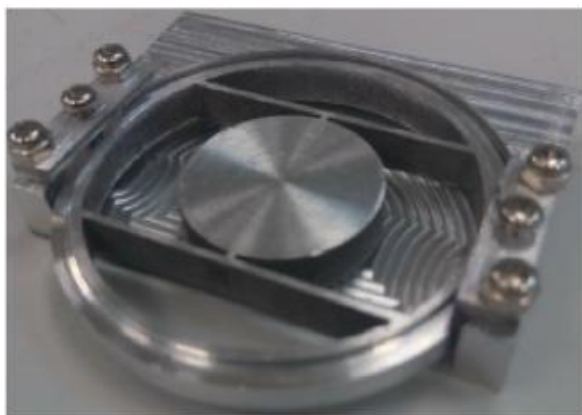
Tento hltič byl vytvořen pro aplikaci obrábění tenkostěnných dílců, které jsou díky své malé hmotnosti hojně využívány v leteckém průmyslu. Jedná se o oblast vysokorychlostního obrábění dílů s nízkou tuhostí. [20]

Skládá se ze sekundární hmoty ve tvaru válce, která je přes pružné elementy pevně spojena s kulatým rámem. Ten je na svých krajích připevněn svěrným spojem k upínce. Díky svému tvaru dovolují pružiny největší pohyb hmoty při konfiguraci zobrazené na obr. 11. Zařízení je k tenkostěnnému dílci připevněno uprostřed, protože má v tomto místě dle simulace největší amplitudu vibrací. [20]



Obrázek 11: Konkrétní užití přeladitelného hltiče na obráběném dílci a simulace jejich pohybů. [20]

Hltič lze na požadovanou vlastní frekvenci naladit volbou hmoty a tuhosti pružin, která se mění v závislosti na šířce jejich materiálu a relativní vzdálenosti. Přeladitelnost již zhotoveného hltiče se realizuje změnou jeho úhlové orientace v upínce. Tím je zajištěna změna tuhosti, a tedy i frekvence. Závislost natočení na vzniklé frekvenci zobrazuje graf z obr. 12. Patrnou nevýhodou vycházející z grafu, je možnost nastavení malého pásma frekvencí, které je v tomto konkrétním případě 13 Hz. Zajímavostí je, že dle autora došlo u natočení o 20° k redukci amplitudy na 1,3 % hodnoty netlumené. [20]



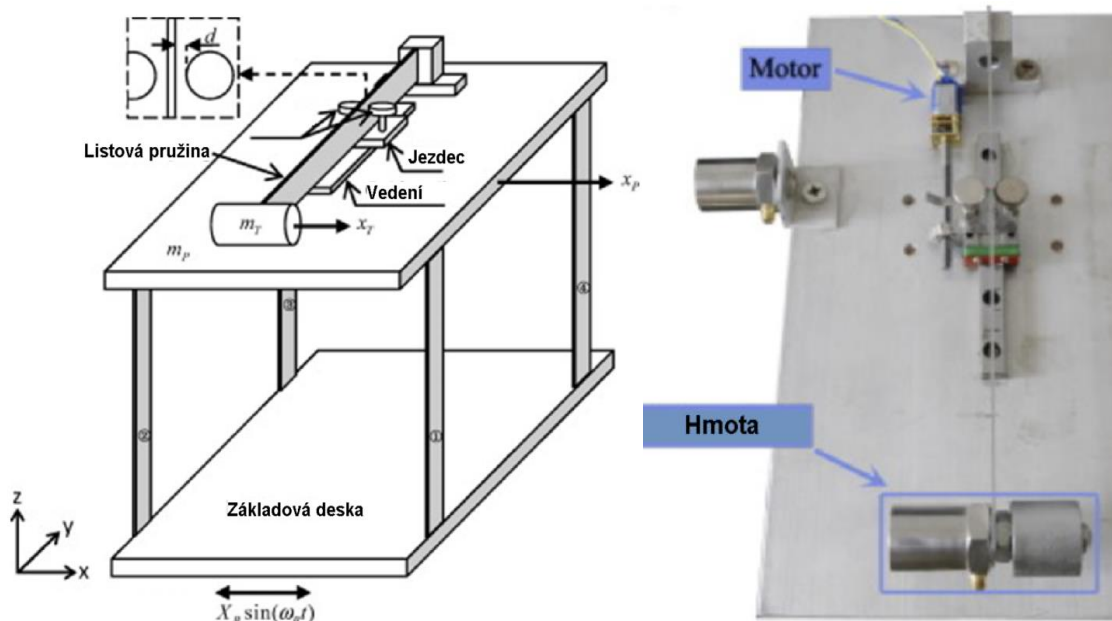
Obrázek 12: Celá sestava hltiče s grafem závislosti natočení na frekvenci. [20]

Hltič s přeladitelnou tuhostí pomocí elektromotoru

Zajímavý koncept hltiče s přeladitelnou tuhostí vyvinul pro laboratorní účely Xin Shui a Shimin Wang. Jejich konstrukční provedení přeladění je realizováno pomocí dvou dorazových bloků umístěných na jezdcí, který se pohybuje po lineárním vedení. Bloky omezují výchylky planžety v různých délkách a upravuje se tak její tuhost. Hltič vykazuje po částech lineární charakteristiku.[21]

Soustava zobrazena na obr. 13 se skládá z primární hmoty, na kterou je připevněn hltič vibrací. Primární struktura je složena z hmotné desky m_p a základové desky, jejímž pohybem lze díky čtyřem planžetám jednoduše vybudit kmity. Samotný hltič obsahuje systém hmota-pružina a již zmíněné zařízení upravující tuhost. Planžeta je jedním koncem připojena k hmotnosti m_T a druhým upevněna k desce. [21]

K nastavení polohy jezdcí dorazových bloků, upravujících tuhost, je použit šroub. Ten je přímo spojen s elektromotorem, který s ním otáčí. K vyhodnocení tlumicích vlastností jsou ke každé desce připojeny akcelerometry, které by se daly spolu s příslušným programem použít i k nastavení tuhosti v reálném čase. [21]

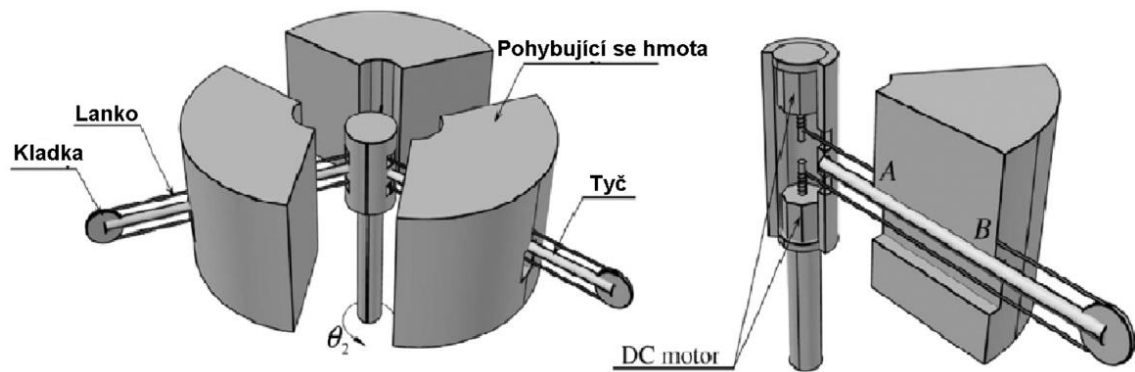


Obrázek 13: Schéma hltiče s hlavními komponenty (vlevo) a jeho systém přeladění (vpravo). [21]

Přeladitelný trojhmotový hltič vibrací

Následující experimentální zařízení z obr. 14 slouží k tlumení translačních i rotačních vibrací, blíže nespecifikované tlumené soustavy. Může k ní být přichyceno vertikálně, horizontálně i našikmo. Díky svému konceptu tří stupňů volnosti v jednom směru vykazuje dobré tlumicí účinky i přeladitelnost. [22]

Hltič obsahuje tři hmoty. Každá z nich představuje třetinu válce rozděleného po 120° . Válec obsahuje uprostřed díru. Tento prostor je zapotřebí kvůli umístění DC motorů, lanek a hřídeli, kterou se celé zařízení přichytí k tlumené soustavě. Každá hmota leží na pružné tyči a je přichycena k motorům dvěma lanky. Horizontální díra v hmotě je dostatečně velká na to, aby jí prošla tyč i spodní lanko. Přeladění je prováděno změnou aktivní délky tyče, na které leží příslušná hmota. Pokud je zapnut horní motor, hmota se pohybuje blíže ke středu a tím jsou tlumeny vyšší vlastní frekvence a naopak. [22]

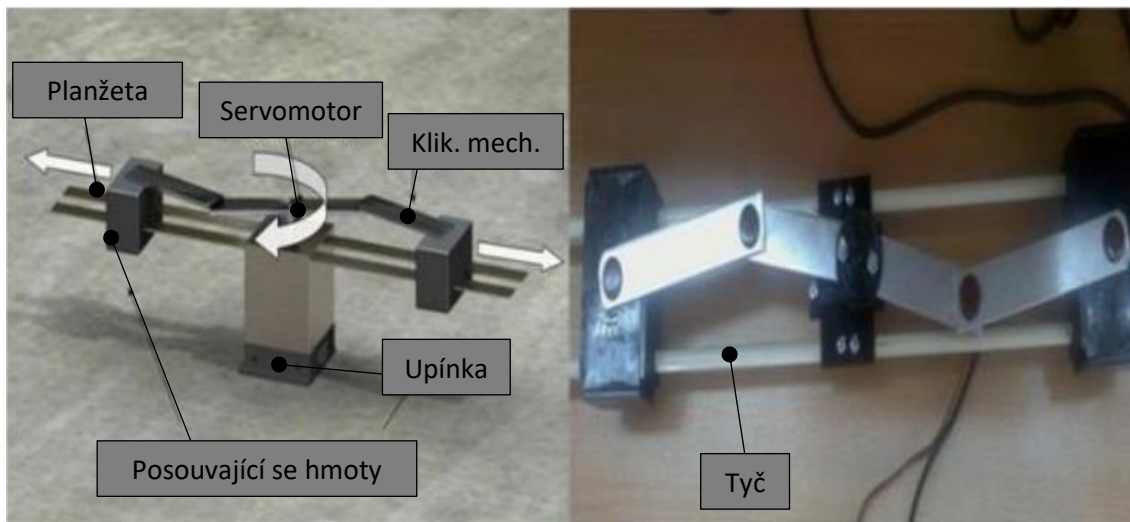


Obrázek 14: Trojhmotový hltič a detail mechanismu přeladění. [22]

Hltič s přeladitelnou tuhostí klikovým mechanismem

Záměrem experimentu, při kterém vzniklo zařízení z obr. 15, bylo utlumit vibrace nosníku pomocí hltiče s přeladitelnou tuhostí pružného elementu klikovým mechanismem. Díky použití dvou hmot jsou vytvořeny dva stupně volnosti v tlumeném vertikálním směru. [23]

Hltič se skládá ze dvou stejně velkých hmot, tyče nebo planžety, klikového mechanismu, servomotoru a upínky. Upínka má v sobě zespona čtyři díry pro šrouby, zajišťující pevné spojení s nosníkem. Nese v sobě také elektromotor, na jehož rotoru je připevněn střední článek klikového mechanismu. Jsou na ní uchyceny čtyři stejně dlouhé pružné elementy nesoucí jezdcy s příslušnými hmotami. Hmoty jsou díky užitému mechanismu vždy stejně vzdálené od středu. Přeladění vlastní frekvence je realizováno natočením středního článku, čímž dojde k pohybu hmot po pružině. Tím se změní její aktivní délka, a tedy i tuhost. Pokud dojde k pohybu dále od středu tak, jak je to zobrazeno na obr. 15, jsou tlumeny nižší frekvence a naopak. [23]

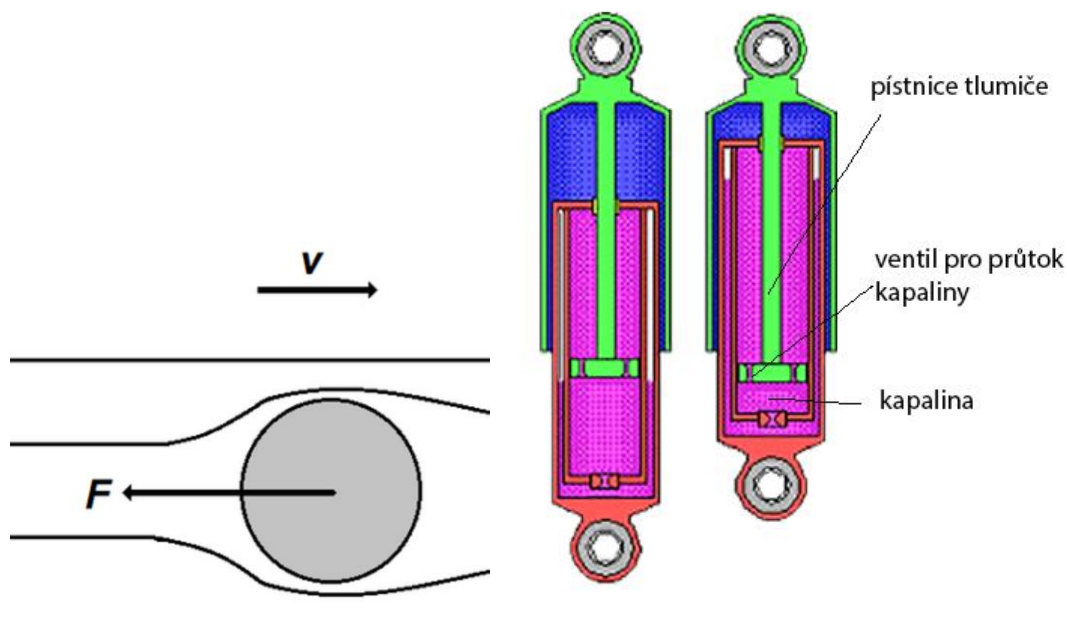


Obrázek 15: Hltič s přeladitelnou tuhostí listových pružin nebo tyčí klikovým mechanismem. [23]

3.2.5 Tekutinový tlumič

Tekutina je vhodná, díky svým relativně levným pořizovacím nákladům a schopnosti vyplnit i složitě tvarovaný prostor, k tlumení sekundární kmitající hmoty hltiče. Při kmitání nebo obecně pohybu rozráží hmotné těleso tekutinu, která ho obtéká. Při obtékání vzniká mezi povrchem tělesa a tekutinou tření, které způsobuje odporovou sílu, brzdící pohyb. Odporová síla působí proti pohybu obtékání a její velikost závisí na hustotě použité tekutiny, rychlosti jejího proudění a ploše čelního průřezu kmitajícího tělesa. [24]

Tekutina se používá i k tlumení odpružených částí různých vozidel. Tlumič na obr. 16 a jeho princip se užívá například u motocyklů a automobilů. Jak je vidno, pístnice tlumiče má v sobě ventily, na velikosti jejichž otvoru závisí odpor průtoku tekutiny. Ventily mohou být teoreticky i řízeně nastavitelné, čímž lze docílit změny tlumící konstanty. [25]



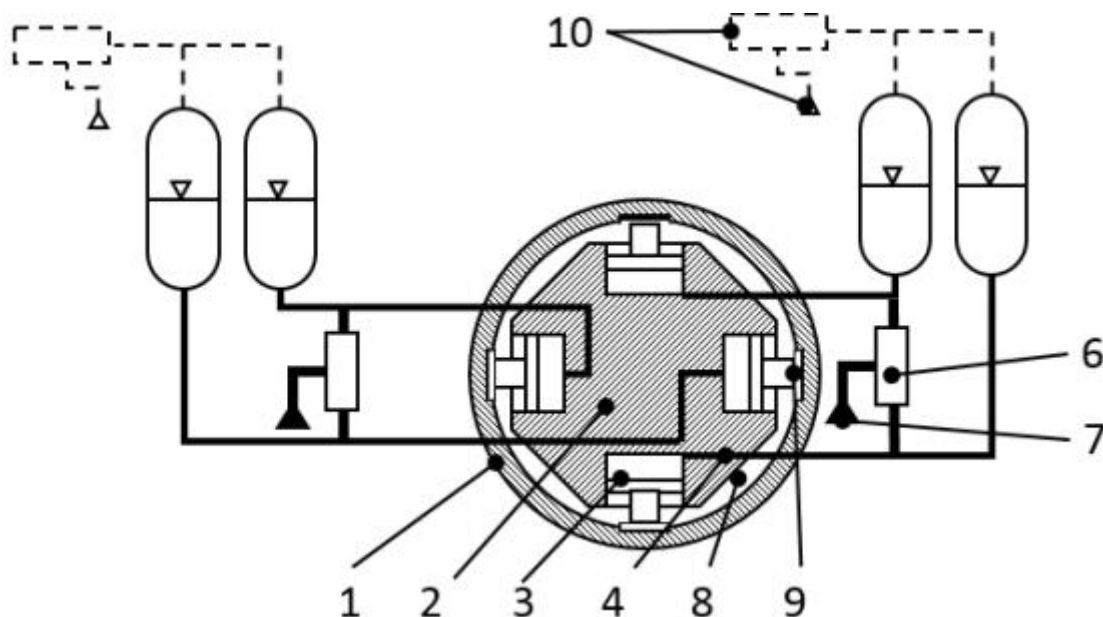
Obrázek 16: Odporová síla při obtékání tělesa tekutinou a zjednodušené schéma tlumiče odpružených hmot. [26], [25]

Fluidně přeladitelný dynamický hltič vibrací

Zařízení z obr. 17 je vhodné k potlačení vibrací vyvrtávací tyče, majících původ v řezném procesu při obrábění otvorů s velkými průměry. Je ovšem díky svému charakteru obecně využitelné i u strojních součástí, u kterých převládá délkový rozměr a mají nízkou vlastní frekvenci. Takovými součástmi jsou například smykadla a řezné nástroje. [7]

Podstatou technického řešení je pasivní dynamický hltič, který obsahuje: vlastní těleso (1), setrvačnou hmotu (2), lineární hydromotory (3), hydropneumatický akumulátor (5), prvky upravující tlak a jeho zdroj (6, 7, 10) a vzduchovou mezeru (8), která musí být pro dosažení tlumících účinků vyplněna tekutinou o vhodné viskozitě. Požadovanou vlastní frekvenci lze naladit dvěma způsoby. Prvním je volba hmotnosti pohyblivé hmoty, která by měla být co možná největší vzhledem k zástavbovým rozměrům. Maximálnímu využití rozměrů dopomáhá použití hydraulického mechanismu. Ten má zdroj energie mimo zařízení a umožňuje koncentraci velkých sil do malých prostorů. Druhým způsobem, použitelným i během samotného provozu na stroji, je přizpůsobení tlaku kapaliny ve válcích, která zastupuje funkci pružiny. Identifikací modálních vlastností strojní součásti v závislosti na vyložení, lze stanovit vztah úpravy tlaku způsobem, aby spolu s vyložением klesala vlastní frekvence hltiče. Umístění

motorů se stejným zdrojem proti sobě vyrovnává setrvačnou hmotu do střední polohy. [7]



Obrázek 17: Fluidně přeladitelný dynamický hltič vibrací a jeho jednotlivé součásti. [7]

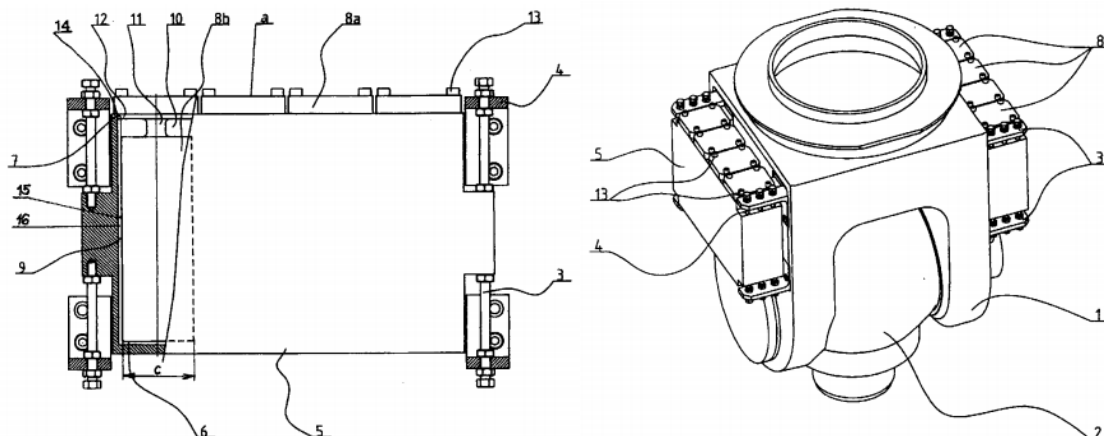
Laděný absolutní tlumič vibrací s nezatlumeným prvním stupněm

Vysoké přesnosti pohybů a statické tuhosti je u moderních obráběcích strojů dosahováno předepnutím valivých vedení jednotlivých skupin dílců. Taková vedení pak ale ztrácejí schopnost ztlumit nežádoucí vibrace, vzniklé například samobuzeným kmitáním při řezném procesu. Blíže představené zařízení slouží k utlumení vibrací frézovacích hlav, upevněných horizontálně, či svisle na smykadle. [27]

K utlumení vznikajících vibrací u frézových hlav se před vytvořením tohoto zařízení používalo vícestupňových olejových laděných tlumičů, majících zatlumený první stupeň. Nejčastěji se skládá z vany, pevně spojené s konstrukcí stroje, ve které je olej a uložena hmota prvního stupně. Použití takového zařízení například u vidlicové hlavy s naklápěcím vřetenem nepříznivě zvyšuje hmotnost, a proto je nevhodný z důvodu vznikajících setrvačných sil. [27]

K vidlicové hlavě (1) s naklápěcím vřetenem (2) jsou přichyceny konzoly (3), ve kterých je uložena hmota prvního stupně (5) obdélníkového tvaru. V hmotě jsou dutiny (6), vytvořené prostřednictvím svisle orientovaných nosníků (4).

V těsněních (7), nacházejících se v horní části, je uložena hmota druhého stupně (8). Vnější plochy (15) a vnitřní dutiny (16) hmoty tvoří díky svému uspořádání mezery (9), vyplněné olejem. Díky oleji a jeho proudění v úzké mezeře je dosaženo požadovaného tlumení. Pružinou je v tomto zařízení krček (11), vytvořený zúžením hmoty druhého stupně. [27]



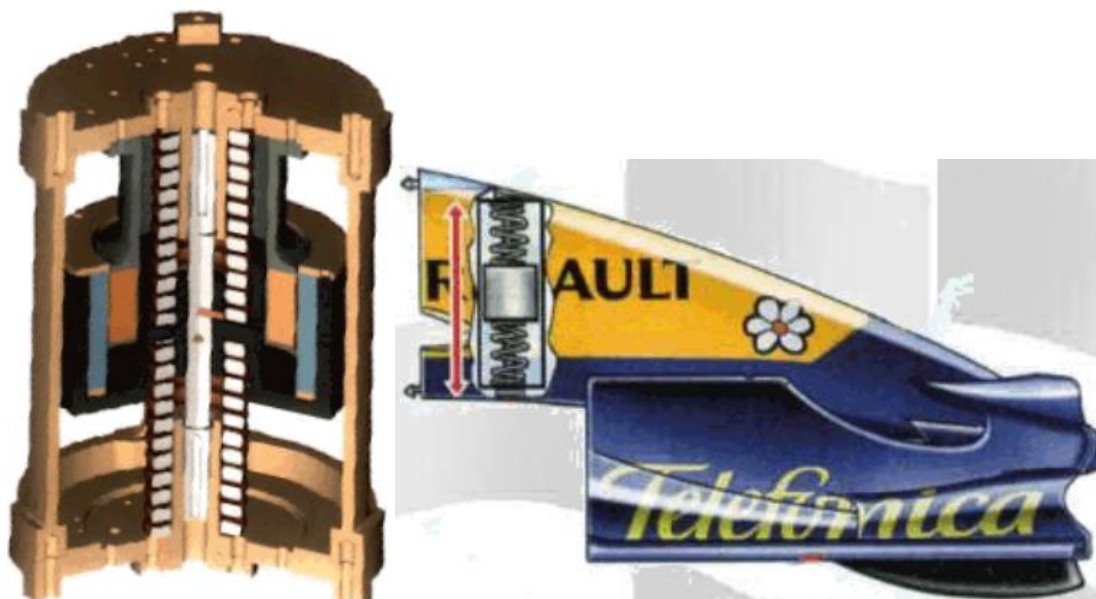
Obrázek 18: Laděný absolutní tlumič vibrací a jeho upevnění na frézovací hlavě. [27]

Přeladitelný hltič vibrací F1 monopostu

Zařízení vyvinuté inženýrem Rob Marshalllem pracujícím pro stáj Renault F1, mělo za úkol tlumit vertikální vibrace přenášené na monokok vozu, vzniklé při jízdě po zvlněném povrchu a zatáčkami. Nacházel se po vzoru obr. 19 ve středu přední části vozu. Vibrace byly utlumeny tak, že pohybující se disk uvnitř tlumiče působil na vybuzený pohyb v opačném směru. Jak určovala jeho hmotnost, síla pružin a tlumení oleje. [28]

Z konstrukčního hlediska se jedná o uzavřený válec, který v sobě nese hmotný kotouč, obvykle 9 kg, sevřen ve střední poloze díky dvěma stejně silným pružinám. Celý je pak zaplněn olejem, který zajišťuje tlumení. [28]

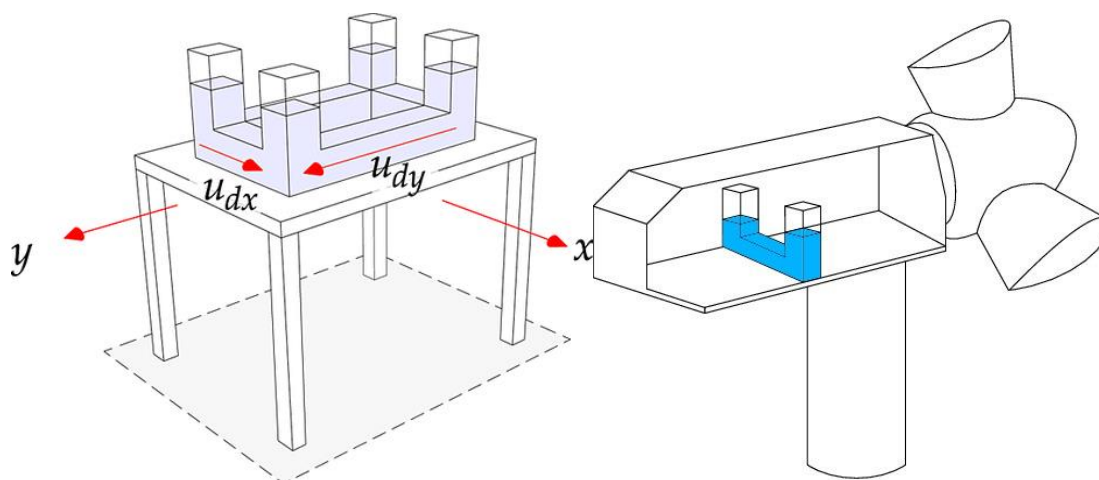
Ladění lze provádět několika způsoby. Prvním je změna tlumení, která je umožněna jednak volbou mezery mezi kotoučem a vnitřní stěnou válce nebo nastavitelným dvoucestným ventilem, nacházejícím se uvnitř kotouče, s kterým lze upravit průtok. Dalšími způsoby jsou změna hmotnosti kotouče a volba jinak tuhých pružin. [28]



Obrázek 19: Řez tlumičem a jeho umístění ve voze. [28]

3.2.6 Tlumič se sloupcem kapaliny

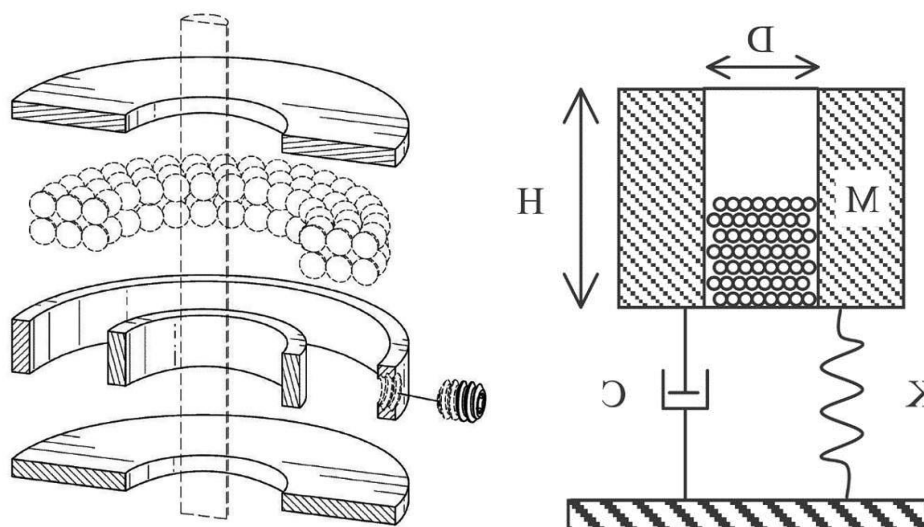
Tento druh tlumiče se užívá hlavně ve stavebnictví k tlumení výchylek výškových staveb při zemětřesení nebo silném větru. Svých tlumicích účinků dosahuje disipací energie způsobenou třením kapaliny při náhlé změně směru proudění mezi vodorovnou a svislou částí. Lze ho zkonstruovat v provedení dvou vodních sloupců tlumících pohyb v jedné ose nebo tří a více sloupců, které si poradí i s utlumením dvou navzájem kolmých os tak, jak je to znázorněno na obr. 20. Jako možné konfigurace, tlumicí kmity primární struktury, lze například užít: implementaci přímo do struktury zařízení nebo vnějšího připojení v kombinaci s pružinou. Oproti ostatním druhům tlumičů má několik výhod, kterými jsou: snadné naladění frekvence, manipulace, nízká cena (hlavně při užití vody), libovolný tvar a jednoduchá implementace do konstrukcí. Nespornými nevýhodami ovšem zůstávají jeho velikost a váha. [29]



Obrázek 20: Konstruktivní uspořádání tlumící dvě osy (vlevo) [29] a jednu osu (vpravo). [30]

3.2.7 Částicový tlumič

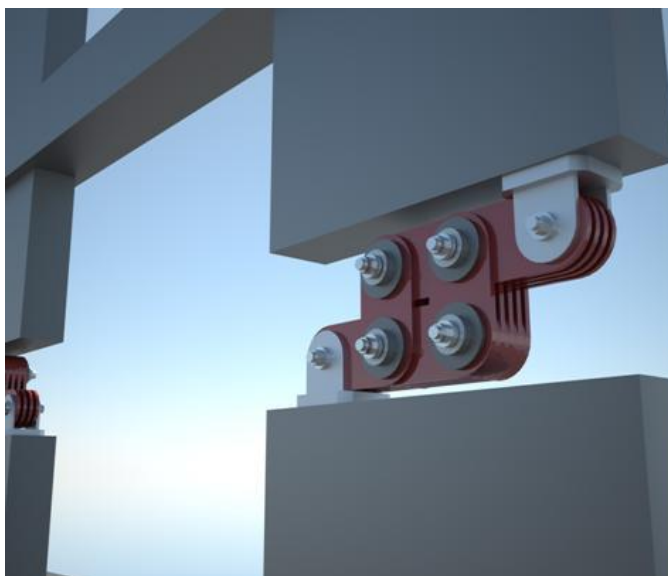
Částicové tlumiče jsou zařízení, které kombinují vlastnosti nárazového a třecího tlumení. Částice, které mohou být kovové, karbidové nebo keramické, jsou umístěny přímo do dutin vibrující struktury nebo do obalů k ní připojených. Pokud primární struktura vibruje, kinetická energie je významně absorbována kombinací účinků nepružných srážek částic mezi sebou nebo stěnami a ztrátami třením. Tato tlumící technologie je využívána díky své koncepční jednoduchosti, malým ekonomickým nákladům, dobré životnosti a tepelné necitlivosti. Částicový tlumič lze jednoduše zabudovat nebo namontovat k primární struktuře, aniž by došlo významným změnám hmotnosti nebo tuhosti. Zařízení, které slouží k přichycení na tlumenou soustavu lze i se schématem vidět na obr. 21. [31]



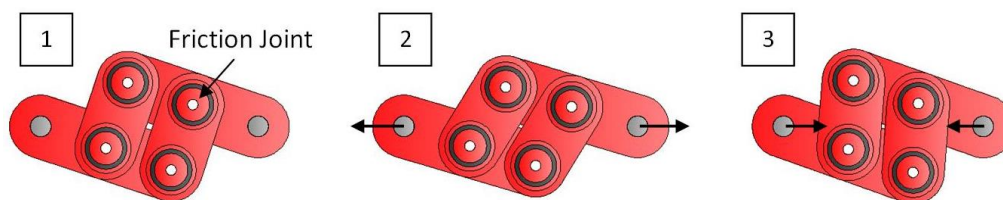
Obrázek 21: Částicový tlumič (vlevo) [32] a schéma jeho principu (vpravo). [33]

3.2.8 Třecí tlumič

Princip třecích tlumičů je založen na disipaci mechanické energie v teplo při vzájemném lineárním nebo rotačním pohybu dvou materiálů, mezi kterými dochází k tření. U tlumiče z obr. 22 například dochází k disipaci při rotačním pohybu čtyř třecích spojů. Ty tvoří ocelové desky a podložky, spojené svěrným spojem. Pokud se konstrukce rámu pohne doleva, tlumič se zkrátí a naopak. Velikost třecí síly lze upravit použitým materiálem vykazující určitý součinitel tření f . Dále svěrnou normálovou silou N , kterou jsou k sobě tlumiče spojeny. Třecí sílu vyjadřuje vzorec: $F_t = f \cdot N$. Jeho výhodou je jednoduchá konstrukce, nízká cena díky použitým materiálům a možnost vyrobit jakkoli velký tlumič podle potřeby. Nevýhodou je vhodnost jeho užití k tlumení spíše malých frekvencí. [34]



Obrázek 22: Třecí tlumič a jeho použití u staveb. [34]



Obrázek 23: 1. Výchozí pozice, 2. prodloužení, 3. zkrácení. [34]

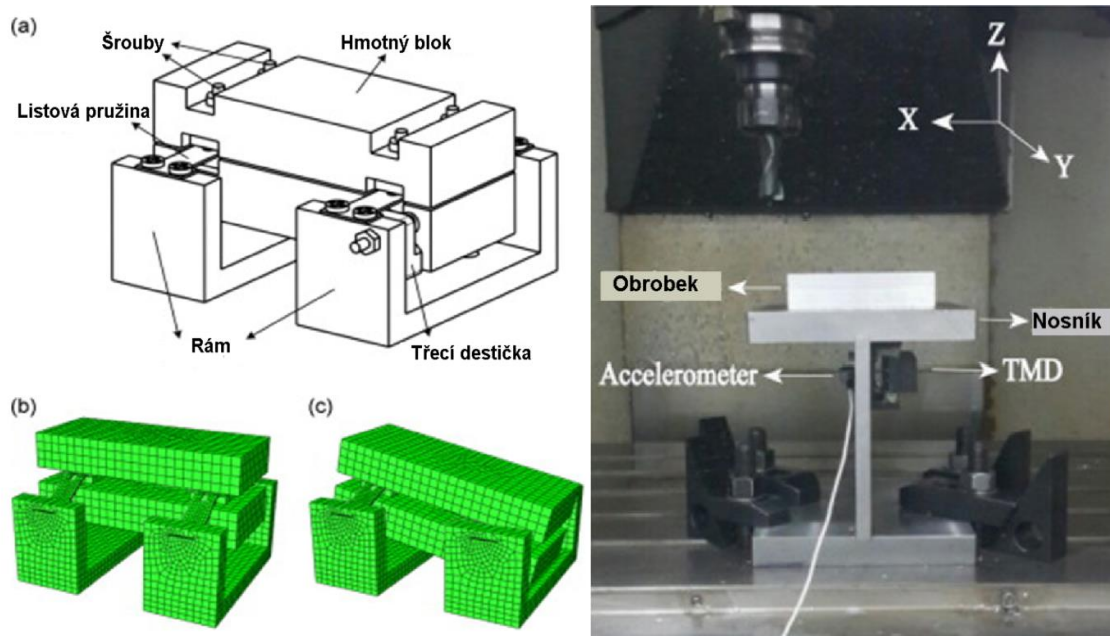
Přeladitelný hltič se dvěma stupni volnosti

K tomu, aby se dosáhlo kvalitního utlumení vibrací je třeba správně zvolit strukturální parametry. Další možností jak tlumení vylepšit je zařízení modulárně

rozšířit nebo použít jiné s větším počtem stupňů volnosti. Experimentem využívajícím dvou rovnoběžných stupňů volnosti se zabíral Yiqing Yang a jeho kolegové. Zařízení slouží k tlumení vibrací přenášených na podstavec obrobku při frézování a zajišťuje ještě větší ochranu nástroje a kvalitnější výsledný povrch. Podstavec zde představuje nosník tvaru I a je tedy výrazně náchylnější na ohyb okolo osy Y. [8]

Design hltiče je představen na obr. 24. Skládá se ze dvou stejných hmot, které jsou pomocí šroubů přichyceny na pružných elementech. Šrouby mohou díky vytvořeným drážkám měnit svoji polohu a tím ladit tuhost pružin změnou jejich aktivní délky. Pružiny jsou dále pevně přichyceny na každé straně k rámu. Tlumení je zajištěno třením mezi hmotami a třecí destičkou, která je též přichycena k rámu. [8]

Díky dvěma stupňům volnosti tlumič vykazuje dva módy, ve kterých tlumí vibrace. V jednom se planžety pohybují synchronně a v tom druhém dochází k reverznímu pohybu. Obě varianty (b, c) jsou také znázorněny na obrázku. Z experimentálních měření na stroji při provozu vyplývá, že došlo k více než 80% poklesu amplitudy rezonanční frekvence. [8]

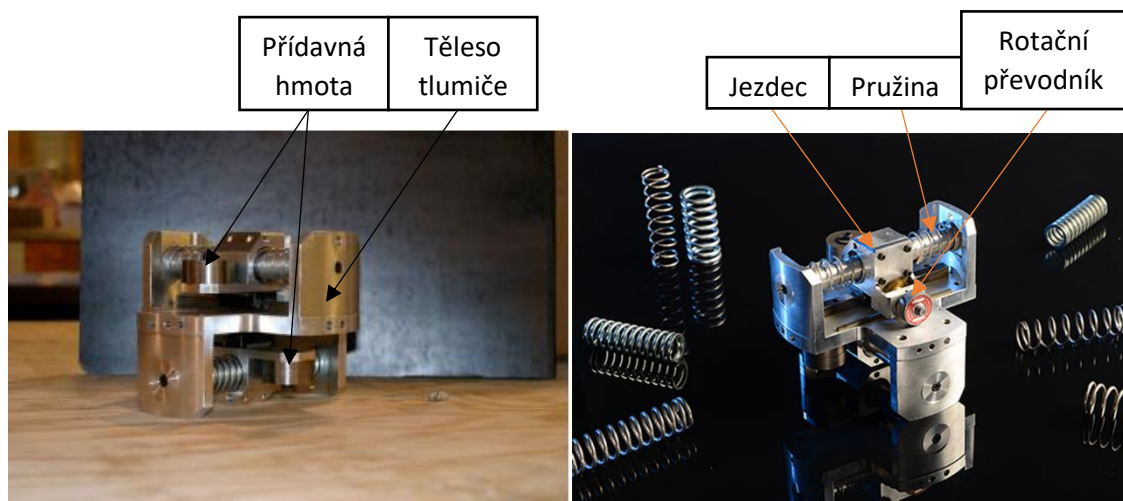


Obrázek 24: Schéma tlumiče a jeho aplikace na upínacím prostředku. [8]

Kompaktní laděný hltič vibrací

Dalším zajímavým řešením, které snižuje vibrace primární struktury, je kompaktní hltič vibrací, vyvinutý výzkumným centrem NASA. Velikost disipované energie je úměrný čtverci rychlosti nebo posunutí laděné hmoty. Sama NASA tvrdí, že jejich design tlumiče dovolí hmotě na jezdcí dosáhnout 2 až 3krát většího rozsahu pohybu, než tomu je u konvenčních zařízení. To zapříčiňuje 4 až 9krát větší účinnost pro stejnou velikost a hmotnost. Hltič lze vyrobit v různých velikostech. Může být dostatečně malý pro použití při testech v aerodynamickém tunelu a obráběcích strojích nebo velký pro tlumení vibrací vrtulníků, větrných turbín a mrakodrapů. [35]

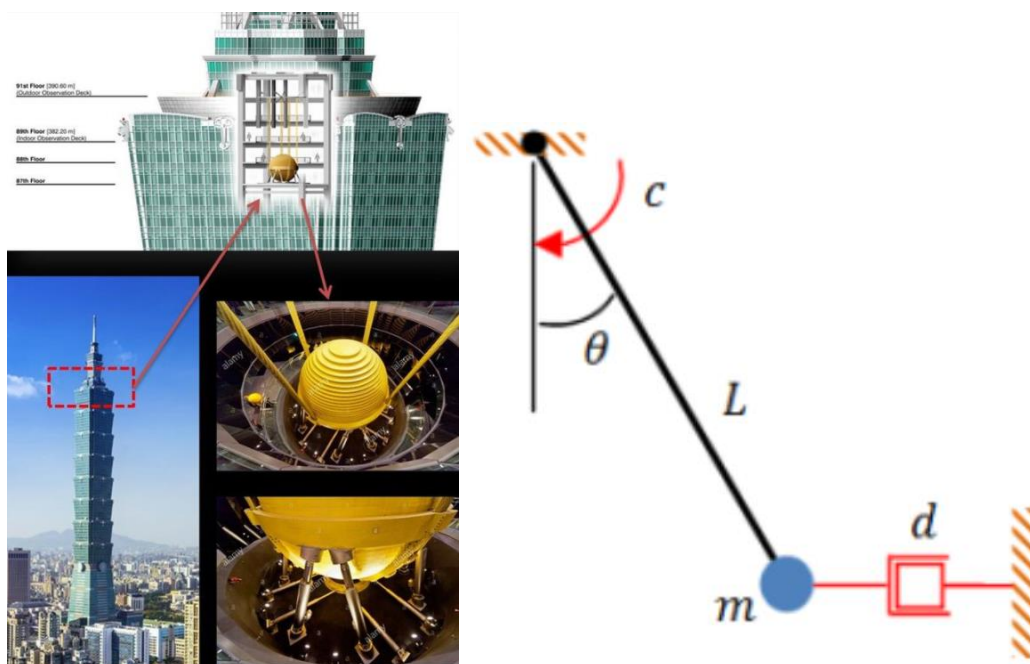
Zařízení obsahuje pevné těleso a pohyblivou hmotou vykonávající lineární pohyb ve dvou směrech. Hmoty je spojena na obou koncích pružinami, které jsou vyměnitelné a stlačené o trojnásobek své délky. To umožňuje kompaktnost a vystředění jezdcí. Ozubené kolo spojené s jezdcem převádí lineární pohyb na rotační převodník, který pomocí tření disipuje energii a zastává tak funkci tlumiče. Hltič lze naladit jednoduchou výměnou vinuté pružiny, hmoty nebo rotačního převodníku s odlišnými vlastnostmi. [35]



Obrázek 25: Kompaktní hltič vibrací a jeho jednotlivé části. [35], [36]

3.2.9 Kyvadlový tlumič

Tento tlumič se skládá z hmoty m umístěné na konci lana nebo tyče o délce L , která je např. čepem připevněna k rámu primární struktury. Slouží nejčastěji k utlumení horizontálních výchylek výškových budov, jejichž frekvence se pohybuje v řádů jednotek. Změnou rovnovážné polohy dochází k relativnímu pohybu kyvadla, které produkuje horizontální sílu působící proti směru vychýlení primární struktury. Frekvenci lze naladit správnou volbou hmoty, jejího umístění od středu rotace a příslušného přidavného tlumiče. Tradiční kyvadlové tlumiče pracující s jednou délkou ramena, jsou velice náchylné ke změnám frekvence a jejich správné naladění je poměrně složité. Vylepšení těchto vlastností lze dosáhnout užitím mechanismu, který zajišťuje úpravu délky ramena, připojením tlumiče k pohyblivé hmotě, nebo umožnění posunutí hmoty blíže, či dále ke středu rotace. Výhodou tohoto zařízení je jednoduchost doprovázená malou poruchovostí a pořizovacími náklady. [37], [38]



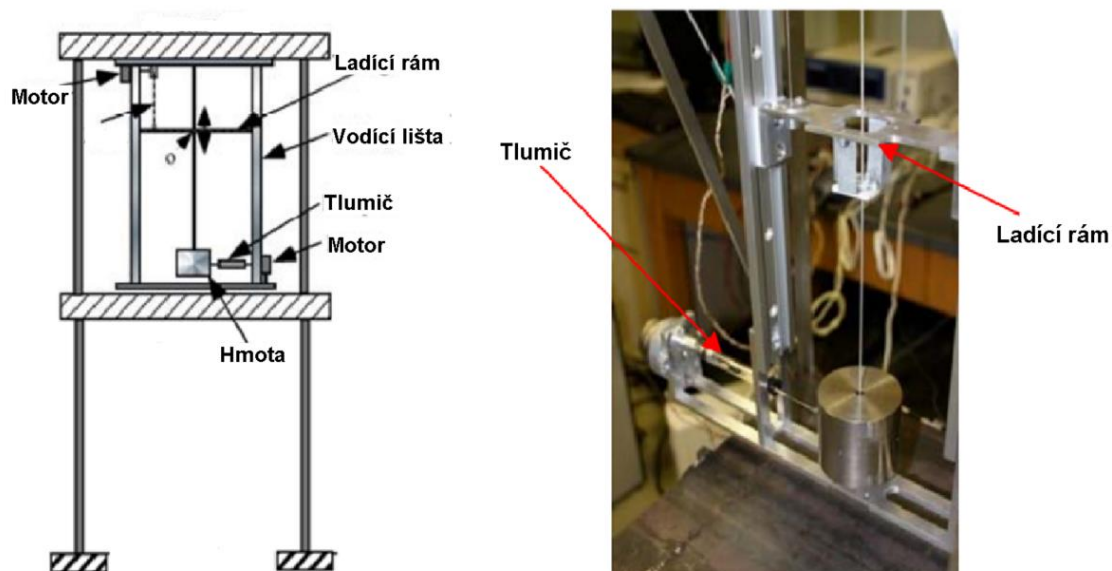
Obrázek 26: Kyvadlový tlumič výškové budovy s tlumičem hmoty a jeho schéma. [39], [40]

Přeladitelný kyvadlový tlumič

Zařízení vytvořené pro laboratorní výzkumné účely z obr. 27 se skládá z 1,5 kg hmoty. Ta je pomocí drátu přichycena k horní části primární struktury, která se působením vnějších vlivů vychyluje z rovnovážné polohy. Hmoty se kýve

a tím působí proti pohybu primární struktury. K hmotě je připevněn vzduchový tlumič sloužící k přenosu mechanické energie na teplo a následné disipace do svého okolí. [41]

K dosažení vlastní frekvence, která odpovídá primární tlumené struktuře, se používá ladící rám. Ten má v obě oko, kterým prochází drát a celý se pomocí lineárních vedení a zabudovaného elektromotoru pohybuje nahoru nebo dolů. Vyšší hodnoty frekvence je dosahováno posunem dolů a naopak. Frekvence, které dokáže toto zařízení utlumit se pohybují v řádu jednotek. Představované zařízení patří v laboratorní konfiguraci z obr. 27, díky řídicímu systému upravující tlumicí konstantu vzduchových tlumičů, spíše do skupiny polo-aktivních zařízení. Pokud by se ale odstranili senzory a řízení, vznikl by pasivní systém. [41]



Obrázek 27: Schéma adaptivního kyvadlového tlumiče a detail ladícího rámu. [41]

4 Shrnutí rešerše

4.1 Zaměření práce

Ve vlastním řešení diplomové práce má vzniknout zařízení, které bude schopno utlumit nežádoucí vibrace dílců obráběcího stroje s jedním převládajícím nebo menším rozměrem. Takové dílce jsou ve směrech s menším rozměrem poddajnější, a tedy i náchylnější na vybudzení vibrací. Příkladem může být smykadlo, jehož velikost převládajícího rozměru je závislá na vyložení a lze si jej představit jako nosník, u kterého dochází k ohybovým kmitům. Vlastní frekvence takového systému se za provozu mění. Proměnlivost je dána například změnou vyložení smykadla a (nebo) nástroje nebo přidáním hmotného břemene. Aby mohl být vzniklý hltič efektivně využíván nejen pro jedny konkrétní podmínky, musí také zaručovat proměnlivost svých vlastních frekvencí, která bude realizována kontrolovaným přeladěním. Hltič bude také umožňovat modulární řazení do větších sestav. To si dle rešerše slibuje možnost tlumit i několik frekvencí najednou. Jelikož může součast s převládajícím rozměrem kmitat ve dvou navzájem kolmých směrech (díky dvěma menším rozměrům), hltič bude muset buď obsahovat dvě hmoty, které budou charakterem uložení na pružném elementu také kmitat ve dvou navzájem kolmých směrech, nebo se použijí dva nezávislé hltiče umístěné na navzájem kolmých stěnách dílce, nebo bude pružný element dovolovat pohyb jedné hmoty v obou směrech.

4.2 Vhodnost užití nalezených řešení

V této podkapitole budou kriticky zhodnocena jednotlivá nalezená řešení. Jedním z hlavních kritérií plynoucím ze zadání práce je možnost přeladění vlastních frekvencí. Toho lze dosáhnout změnou parametrů, kterými jsou: hmotnost, tuhost a s nepatrným vlivem i tlumení. Řízené přeladění bude realizováno pouze změnou konstanty tuhosti. Změna hmotnosti je totiž umožněna pouze výměnou hmoty, a to je v praxi jen těžce realizovatelné. Tlumení má spíše vliv na zatlumení rezonančních špiček. Dalším důležitým kritériem jsou například zástavbové rozměry a možný rozsah tlumených frekvencí. Zhodnocení nalezených řešení bude rozděleno pod jednotlivé

kategorie, z kterých budou následně vybrány vhodné varianty. Ty se budou moci zkombinovat a vytvoří tak výsledné zařízení vyhovující podmínkám zadání.

4.2.1 Pružné elementy a jejich přeladitelnost

Nevhodné

Prvním zmíněným pružným elementem v rešerši je vinutá pružina konstantního průřezu, kterou využívá hned několik zařízení. Tento pružný element je velice dobře dostupný a relativně levný. Pokud je ale u hltiče vyžadována přeladitelnost, lze jí dosáhnout pouze její výměnou. Z tohoto důvodu je pro užití v práci nevhodný.

Viskoelastický materiál může plnit funkci absorbéru i pružiny. I zde se ovšem naráží na problém nemožné přeladitelnosti.

Kapalina je bezesporu prvkem, který je schopen zajistit přeladitelnost a další požadované vlastnosti. V práci ale jako pružný element využita nebude z důvodu potřeby akumulátorů, ventilů a dalších přídatných komponent, které by museli být vyvedeny z místa tlumení, protože jsou těžké a společně zabírají značný prostor.

Vhodné

Planžeta je jednoduchým pružným elementem vyhovujícím ve všech ohledech. Přeladitelnost lze u ní realizovat úpravou aktivní délky, kterou mohou zajišťovat různé druhy pohyblivých výztuh. Dalším způsobem je změna úhlové orientace. Toto řešení se ovšem jeví jako nevhodné z důvodu malého rozsahu frekvencí. Z rešerše pak ještě vyplývá i možnost třetího tlumení, které vzniká při spojení několika pružin k sobě.

Tyče jsou také jednoduchým a levným řešením, u kterého lze změnou aktivní délky přeladit frekvenci. Je zde i možnost je konstrukčně upravit tak, aby byly naladěné na několik frekvencí. Oproti planžetě je možné použít tento element samostatně k tlumení dvou navzájem ovlivňujících se směrů, vektorově sečtených v jeden proměnlivý.

4.2.2 Tlumicí elementy

Nevhodné

Tlumič se sloupcem kapaliny není vhodný z důvodu velikosti zástavbových rozměrů. Jeho využití je nejvhodnější jen jako samostatné zařízení tlumící nízké frekvence.

Částicový tlumič se může zdát jako dobrá volba. Ovšem s přihlédnutím na jeho těžce predikovatelnou konstantu tlumení při výpočtu a ke složité výměně částic, která by znamenala rozmontovat celé zařízení, protože by musely být uvnitř samotné hmoty, je také nevhodný.

Třecí tlumič je jednoduchým a levným řešením. Jeho užití je ale vhodné pro aplikace s nízkými frekvencemi. Při tlumení vyšších frekvencí je zde riziko výrazného opotřebení, čímž by se porušila stálost jeho tlumicích parametrů.

Kyvadlový tlumič je také vhodný pouze k tlumení nízkých frekvencí a u hltiče by jen těžko hledal uplatnění.

Vhodné

Z elektromagnetických tlumičů je díky jednodušší konstrukci a potřebě méně komponent lepší volbou tlumič na principu vířivých proudů. Jeho první výhodou je možnost efektivního tlumení nízkých i vysokých frekvencí. Další je možnost implementace permanentních magnetů přímo na kmitající hmotu. Tím by se snížila parazitní hmota tlumiče, kterou by zde zastupoval pouze tenký plech z vodivého materiálu.

Viskoelastické tlumiče se samostatně ukázaly jako dobrými tlumiči frekvencí vzniklých při frézovacím procesu. Jejich pořizovací cena, vyhovující parametry a možnost jednoduchého upevnění na kmitající hmotu z nich také dělá vhodnou variantu.

Další vhodnou volbou je tlumení pomocí kapaliny. Ta dokáže jednoduše vyplnit skoro jakýkoliv prostor a je velice levná. Její velkou výhodou je také její jednoduchá výměna za kapalinu s rozdílnými vlastnostmi (viskozitou).

4.2.3 Vybrané varianty

Tabulka 1: Výsledný přehled zhodnocených konstrukčních prvků hltiče.

Pružné elementy		Tlumicí elementy	
Vhodné	Nevhodné	Vhodné	Nevhodné
Planžety	Vinutá pružina	Kapalina	Sloupec kapaliny
Tyče	Viskoelastický	Viskoelastický	Částicový
	Kapalina	Elektromagnetický	Třecí
			Kyvadlový

Varianty, které mají potenciál vyhovět zadání práce jsou z pružných elementů: planžety a tyče. Tyto komponenty umožňují jednoduchou přeladitelnost změnou své aktivní délky. Změna by měla, spolu s možností tyto elementy jednoduše konstrukčně upravit, zajistit uspokojivý rozsah tlumených frekvencí.

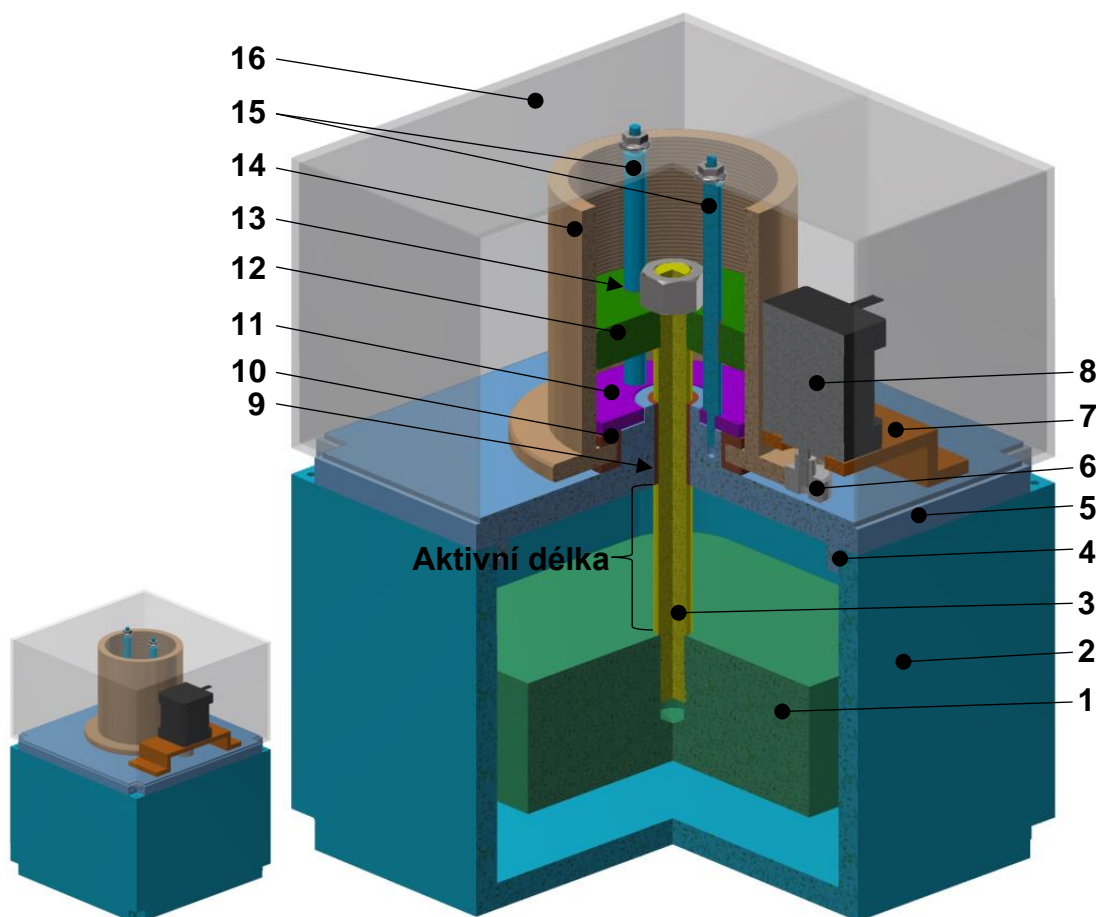
Jako nejvhodnější elementy, tlumicí kmitající hmotu na pružině, se dle rešerše ukázali tlumiče: kapalinové, viskoelastické a elektromagnetické. Kapalinové tlumiče vynikají svou jednoduchou implementací a výměnou zajišťující změnu tlumicích parametrů. U elektromagnetických se zase jedná hlavně o možnost minimalizace parazitní hmoty a možnosti efektivního tlumení velkého spektra frekvencí. Viskoelastické tlumiče mají dobré tlumicí schopnosti, jsou levné a lehce připevnitelné na kmitající hmotu.

5 Vlastní řešení

5.1 Konceptní návrhy možných řešení konstrukce

V této kapitole budou představeny koncepty, které odlišným způsobem řeší hlavní konstrukční uzly: návrh způsobu přeladění, užití vybraných pružných prvků, tvar hmoty a tvar samotného celku. Jelikož se jedná pouze o koncepty, zařízení nevycházejí z konkrétních návrhových parametrů, proporčně se liší a nejsou u nich namodelovány veškeré prvky potřebné k uvedení do provozu jako například šroubové spoje víka s nádobou.

5.1.1 Koncept č.1



Obrázek 28: 1. koncept s rotačně posuvným mechanismem.

Technické řešení

Zařízení se skládá z nádoby (2) s viskózní kapalinou, ve které je zavěšena hmota (1) ve tvaru kvádrů na pružném elementu (3) (tyč kruhového průřezu). Nádoba (2) je pevně spojena víkem (5) s příslušným těsněním (4), které zabraňuje úniku kapaliny z vnitřního prostoru. Pružný element (3) je uložen v kluzném prvku (9) lineárního vedení víka.

Přeladění vlastní frekvence je realizováno změnou aktivní délky pružiny (3). Změnu délky realizuje rotačně posuvný mechanismus skládající se z rotačního krokového motoru (8), pevně spojeného upínkou (7) k víku (5). Hřídel motoru je osazena ozubeným pastorkem (6). Ten v určitém převodovém poměru roztáčí ozubeným kolem rotační součásti (14) mechanismu. Součást trubkového tvaru je rotačně uložena pomocí kluzného radiálně-axiálního ložiska (10), skládajícího se ze spodního kusu tvaru L (v průřezu) a horního mezikruží. Správnou funkci ložiska realizuje deska (11) sevřená mezi tyč (15) lineárního vedení a víko (5). Rotační pohyb součásti (14) je převeden na lineární pomocí matice (12) s vnějším závitem, do které je vetknuta pružina (3). Pootočení matice (12) je zabráněno vedením (15) s kluzným prvkem (13).

Stálost dosažené polohy pružného elementu zaručuje samosvornost posuvného mechanismu, případně zvolená elektronická brzda pohonu. Jelikož je pracovní prostor obráběcího stroje nepříznivým prostředím, celý rotačně-posuvný mechanismus je zakrytován (16). Výřezy v rozích víka (5) dovolují spojení více zařízení.

Výhody

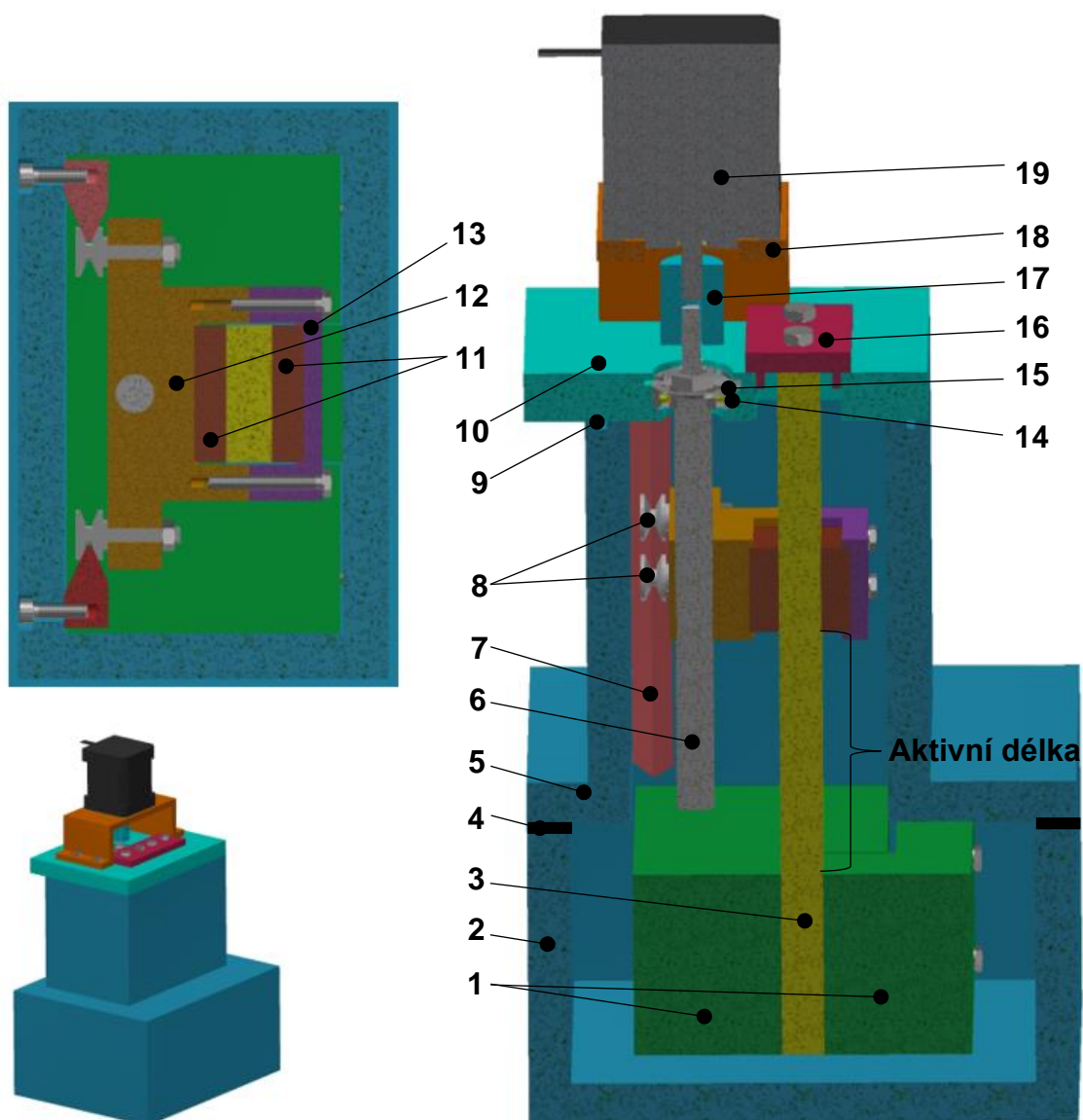
- Jemné naladění aktivní délky díky kombinaci závitového a ozubeného převodu.
- Samosvornost závitového mechanismu.
- Možnost hlčení vibrací ve více směrech.
- Maximalizace aktivní hmoty díky čtvercovému tvaru.

Nevýhody

- Možné přičení celého mechanismu ve vedené způsobené kombinací rotačního a translačního pohybu.

- Složitost výroby z pohledu potřebných přísných geometrických tolerancí.
- Maximalizace pasivní hmoty díky čtvercovému tvaru nádoby a víka.
- Zvýšená parazitní hmotnost díky pohybující se hmotě.
- Při čtvercovém tvaru hmoty nezbyvá na vnějším plášti nádoby prostor pro složitěji řešený upínací mechanismus.

5.1.2 Koncept č. 2



Obrázek 29: 2. koncept s rolničkovým vedením a snadno vyměnitelným pružným elementem.

Technické řešení

Podstatou tohoto řešení je možnost jednoduché změny rozsahu tlumených frekvencí. Toho lze dosáhnout výměnou pružného prvku (3) (planžety) a odpovídající tloušťce kluzných bronzových prvků (11).

Podobně jako u předešlého zařízení je aktivní hmota (1) v nádobě (2) ponořena ve viskózní kapalině. Hmota (1) se skládá ze dvou kusů, svírajících šroubovým spojem planžetu (3). Přeladění aktivní délky je realizováno pohybem závitové tyče (6), uložené přes kuličkové ložisko (14) ve víku (10), zajištěné pojistným kroužkem (15). Závitová tyč (6) je spojkou (17) přímo propojena se servomotorem (19), připevněným upínkou (18) k víku (10).

Jezdec (12, 13), zobrazený v levém řezu na obr. 29, se pohybuje po rolničkovém lineárním vedení. Správné ustavení vedení může být realizováno uložením pomocí excentrického čepu vodících rolen (8), nebo oválnými děrami pro šrouby v (5) upevňující kolejnici (7), nebo kombinací obou zmíněných. Samotný jezdec je složen ze dvou částí (12, 13), spojených šrouby. Při volbě malého stoupání šroubu lze dosáhnout jemného přeladění. Všechny spoje a otvory vnějšího pláště jsou utěsněny (4, 9, 14, 16) proti úniku kapaliny.

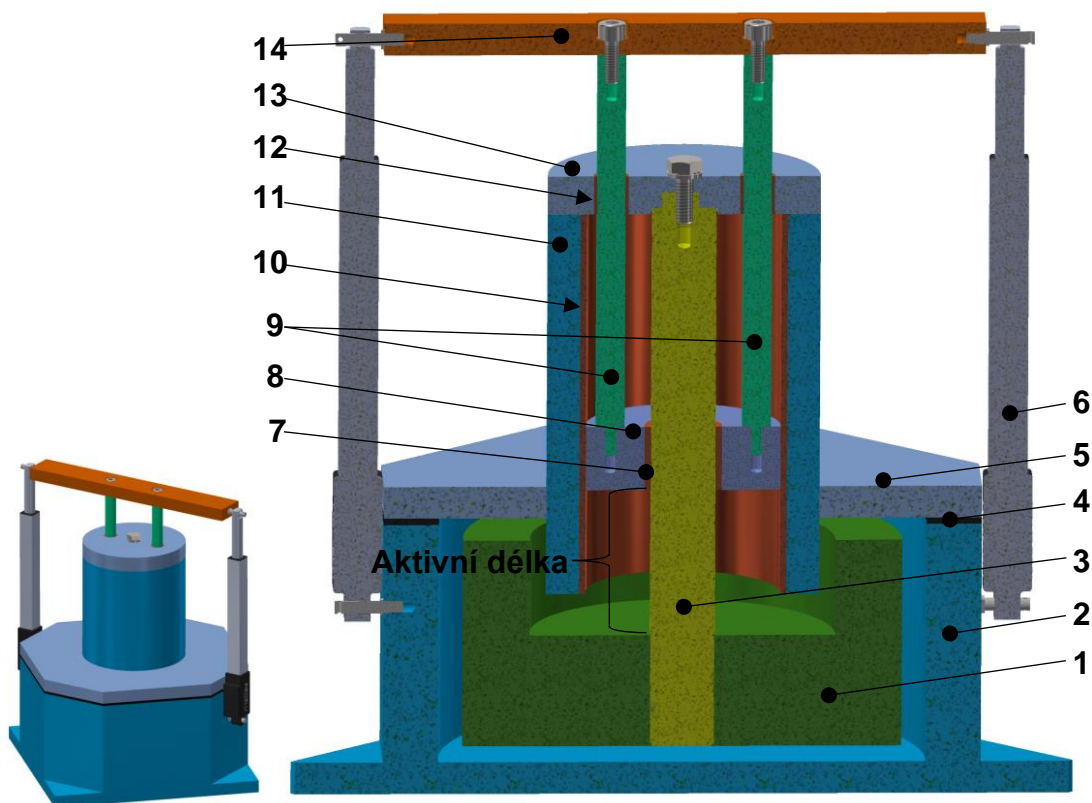
Výhody

- Možnost změny rozsahu frekvencí snadnou výměnou planžety a odpovídajících kluzných elementů.
- Zmenšení parazitní hmoty kapaliny díky vertikálně nepohyblivé hmotě.

Nevýhody

- Složitě realizovatelné přesné ustavení polohy rolničkového vedení.
- Příliš mnoho tvarově složitých součástí.
- Celková velikost víka (5) vzhledem k složitému vedení a jezdcí.
- Možnost hlcení pouze v jednom směru.
- Nevhodně zvolená koncepce, která neumožní dosažení malých rozměrů (šířka představeného zařízení 170 mm).

5.1.3 Koncept č.3



Obrázek 30: 3. koncept s lineárními aktuátory.

Technické řešení

Koncept využívá paralelně řazené lineární aktuátory (6) s integrovanými převody, které jsou oproti průmyslovým servopohonům cenově dostupnější a zároveň dovolují jemné naladění své délky.

Hmota (1) válcového tvaru je přes pružný element (3), vetknutý do víka (13) tubusu (11) (pouzdra) vedení, zavěšena do nádoby (2) naplněné viskózní kapalinou. Výztuha (8), uložená v tubusu (11) vedení upravuje změnou své výškové orientace aktivní délku pružného elementu (3). Změnou orientace dochází k přeladění frekvence. Vertikální pohyb výztuhy (8) je zajištěn závitovým spojením vodících tyčí (9) s výztuhou (8), uložených ve víku (13). Tyče (9) jsou vetknuty do upínky (14), paralelně spojující lineární aktuátory (6). Veškerá užitá vedení obsahují kluzné prvky (7, 10, 12), vyhotovené z bronzové slitiny.

Z důvodu minimalizace výškových rozměrů je tubus (11) vedení zapuštěn do prostoru aktivní hmoty (1), která má ve své horní části tvar mezikruží. Jelikož by při umístění aktuátorů (6) na víko (5) nádoby (2) vznikl nevyužitý prostor nad



víkem (13) tubusu (11) vedení, byly umístěny na vnější plášť nádoby (2). Z důvodu možného úniku kapaliny je mezi víkem a nádobou těsnění (4).

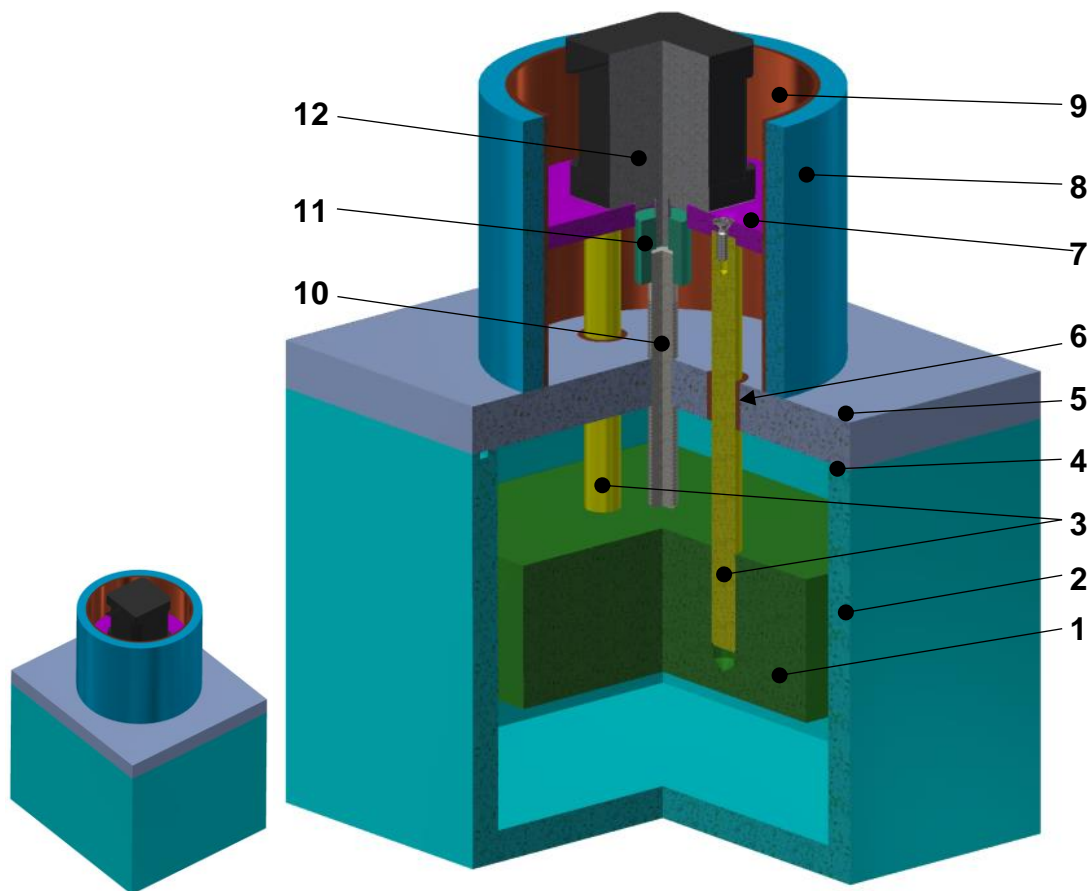
Výhody

- Využití prostoru zapuštěním aretačního mechanismu pružného elementu do aktivní hmoty.
- Snížení hmotnosti kapaliny zásluhou vertikálně nepohyblivé hmotě.
- Již integrovaný převod v cenově dostupných lineárních aktuátorech dovolujících jemné přeladění.
- Možnost hlčení vibrací ve více směrech (užití kruhové tyče).
- Stejně tlumicí účinky kapaliny ve všech směrech díky hmotě kruhového průřezu.

Nevýhody

- Příliš tvarově složitá a těžká nádoba.
- Díky potřebě zakrytí aktuátorů, a tedy i nádobě, špatně realizovatelné upínací rozhraní.
- Zmenšený prostor pro připnutí a modulární spojení o prostor pro aktuátory.
- Nemožná minimalizace zařízení z důvodu potřebného prostoru pro pohony, které by vyčnívaly.

5.1.4 Koncept č.4



Obrázek 31: 4. koncept s paralelně řazenými pružnými elementy.

Technické řešení

Hlavní podstatou tohoto řešení je užití dvou paralelně řazených pružin (3), jejichž tuhosti se sčítají. Uložení dovoluje užití závitového mechanismu (10), synchronně se zasouvajícího s hmotou (1) do prostoru nádoby (2). Tím je lépe využit celkový objem.

Aktivní hmota (1) obdélníkového průřezu je v prostoru nádoby (2) zavěšena na dvou pružných elementech (3), které jsou vetknuty do upínky (7) motoru (12). Mechanismus je veden v tubusovém pouzdru (8) s kluzným prvkem (9) z důvodu možného přičení závitové tyče (10) a vzniku parazitních frekvencí, jelikož by motor (12) s upínkou (7) představovali další aktivní hmotu na pružině. Frekvence je stejně jako u předešlých zařízení laděna změnou aktivní délky pružin (3). K jejich pohybu dochází díky závitovému spojení tyče (10) s víkem (5), která je spojkou (11) propojena s rotačním elektromotorem (12). Nádoba (2) je naplněna viskózní kapalinou a uzavřena víkem (5) s drážkou (4) pro těsnící kroužek.

Výhody

- Sčítání tuhostí paralelně spojených pružin (vhodnost využití pro tlumení vysokých frekvencí).
- Minimalizace výškového rozměru díky zasouvání závitové tyče do prostoru nádoby.

Nevýhody

- Schopnost hltit pouze v jednom směru.
- Náchylnost příčeni pružin při působení sil i v jiném než tlumicím směru.
- Možnost úniku kapaliny z nádoby skrze závitové spojení tyče a víka do prostoru pod elektromotorem.
- Rozdílná tuhost v kolmý směrech tlumení.

5.1.5 Zhodnocení a volba vhodného konceptu

V tabulce č. 2 jsou mezi sebou dle vybraných kritérií srovnány představené koncepční návrhy z 5.1. Každé kritérium může nabýt hodnoty od 1 do 5 bodů. Čím více získá koncept bodů, tím je vhodnější. Díky tomuto srovnání je případný uživatel schopen lépe posoudit vhodnost konceptu dle individuálních požadavků.

Tabulka 2: Srovnání jednotlivých konceptů.

Koncept	Č.1	Č.2	Č.3	Č.4
Počet komponent	3	2	4	5
Předpokládané náklady	3	2	4	4
Jednoduchost výroby	3	2	4	4
Zástavbové prostory	3	2	3	5
Údržba	2	2	4	4
Možnost hlcení ve více směrech	5	1	5	1
Bodů celkem	20	11	24	23

Dle srovnání se jako nejvhodnější varianta jeví koncept č. 3. Avšak tento koncept má plno nedostatků, které budou muset být pro finální podobu

odstraněny. Jedná se hlavně o tvar víka s nádobou, na kterou jsou umístěny lineární aktuátory. Vhodnější by bylo zvolit proporce celého zařízení tak, aby bylo možné umístit pohony na víko. Tím by vznikl prostor pro optimalizaci tvaru nádoby, která by nemusela být při užití vhodného materiálu zakrytována a dovolovala by tak lepší řešení připojovacích prvků a ušetření hmotnosti. Upravit se také bude muset díl, který propojuje pohony a tyče vedení. Pokud by totiž došlo k nesouměrnému výsuvu hřídelí, způsobilo by to přičení kluzných prvků.

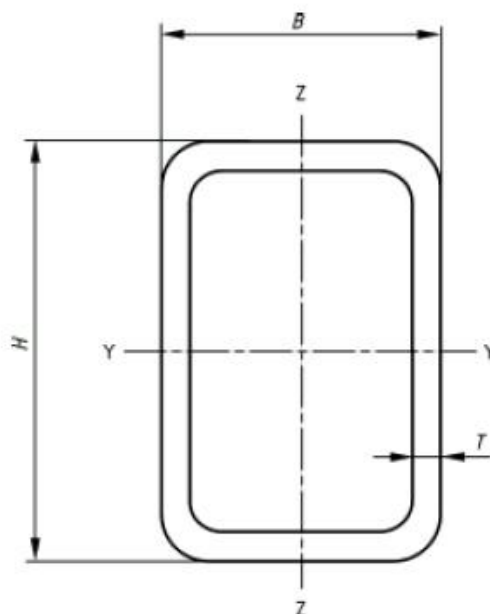
U představených konceptů byl jako element tlumící vibrace uvažována pouze kapalina. Od užití viskoelastického tlumiče bylo upuštěno, protože by při umístění na hmotě zabíral značný prostor a jeho tlumící účinky nejsou natolik výhodné. Možnost užití tlumiče na principu vířivých proudů bude představena až na vybraném a dle zadaných požadavků konstrukčně upraveném hltiči. Jeho podoba se díky němu nějak zvlášť nezmění. Permanentní magnety nahradí vnější část aktivní hmoty a tenký vodič se umístí na vnitřní plášť nádoby. Jeho vhodnost bude diskutována déle.

5.2 Popis hlcené soustavy

Jako hlcená soustava, na jejíž parametry bude dimenzovaná konstrukce hltiče byl zadán nosník, který si lze představit jako náhradu smykadla obráběcího stroje. Jedná se o dutý profil s obdélníkovým průřezem z obr. 32. Jeho dodavatelem je společnost Feron [42]. Většina vlastností potřebných k popisu matematickým modelem jsou dostupné přímo na stránkách dodavatele nebo byly s jejich pomocí dopočítány. Sepsány jsou v tabulce 3.

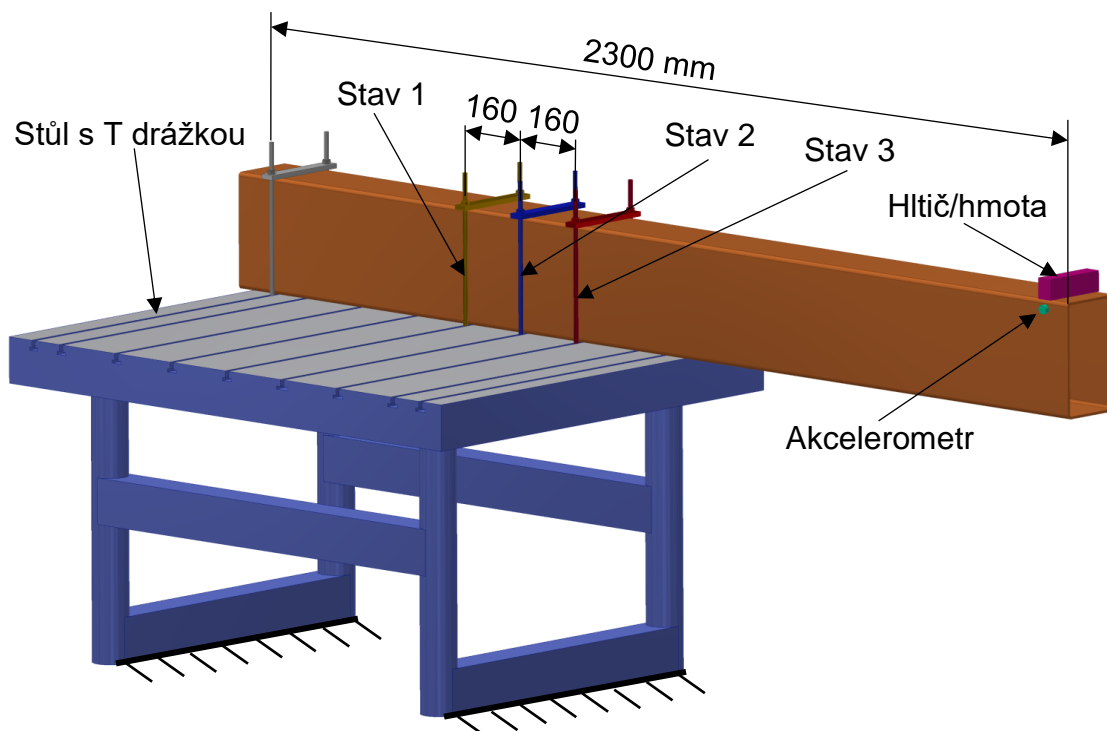
Tabulka 3: Potřebné parametry nosníku.

Materiál	S355J2H (11 503)
Rozměry (HxBxT)	250x150x5 mm
Hmotnost	29,205 kg/m
Plocha průřezu	$38,40 \text{ cm}^2 = 0,00384 \text{ m}^2$
Hustota	$29,205/0,00384 = 7685,52 \text{ kg/m}^3$
Poissonovo číslo	0.27-0.3
Modul pružnosti	200 GPa
Kvadratický moment průřezu k ose y	$3304,18 \text{ cm}^4$
Kvadratický moment průřezu k ose z	$1507,95 \text{ cm}^4$



Obrázek 32: Zadaný dutý profil s obdélníkovým průřezem. [42]

K nosníku byly poskytnuty data z měření, které v minulosti proběhlo ve výzkumné laboratoři na ústavu výrobních strojů a zařízení | RCMT. Konfigurace upevnění nosníku je znázorněna na obr. 33. Nosník je upevněn ke stolu dvěma třmeny pomocí T drážky. Samotný stůl je pevně spojen se zemí. Na konci nosníku je připevněn dynamický hltič, který byl pro účel zadaných výsledků zpevněný a představoval tak jen přídavnou hmotu 10 kg. Ve stejné vzdálenosti je také vertikálně umístěný akcelerometr. Toto umístění již napovídá o horizontálním směru buzení, provedeném modálním kladívkem. Data jsou naměřená pro 3 stavy, které odpovídají rozdílné orientaci předního z třmenů. T drážky umožňovaly posun vždy o 160 mm směrem k volnému konci.

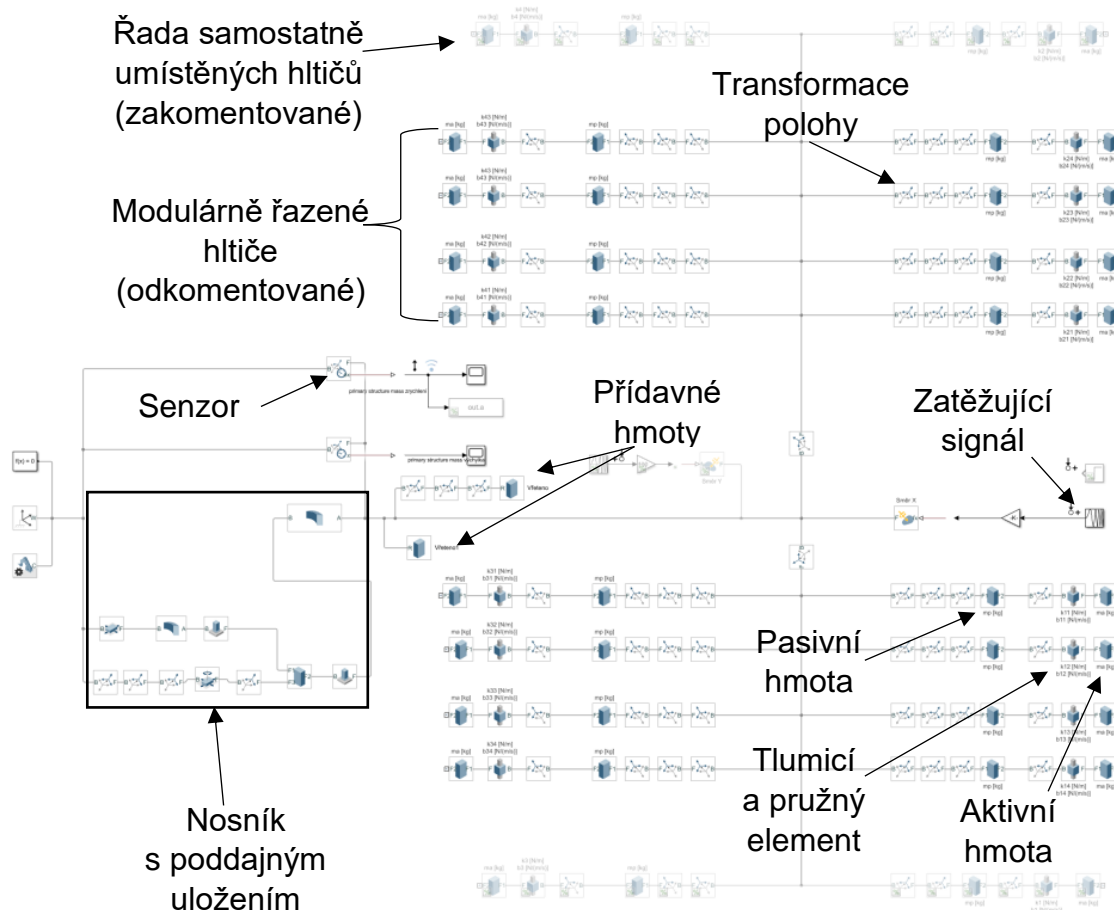


Obrázek 33: Upevnění nosníku v laboratoři při fyzickém měření.

Pro vytvoření modelu hlcené soustavy s hltičem byl použit nástroj programu Matlab s názvem Simscape Multibody, znázorněný na obr. 34. Výpočet nosníku je obecně vhodné provádět pomocí metody konečných prvků (MKP). Tato metoda spočívá v diskretizaci spojitého kontinua do zvoleného počtu prvků (elementů) a lze s ní na vytvořeném fyzickém modelu simulovat průběhy například deformací, vlastních frekvencí, napětí atd. Multibody slouží k vytváření hlavně kinematických 3D modelů. Od roku 2018 byla ovšem jeho knihovna doplněna o flexibilní struktury, jejichž výpočty jsou prováděny zmíněnou metodou.

Funkčnost vytvořeného nástroje byla verifikována na jednoduchém vetknutém nosníku, který byl se stejnými parametry vytvořen jak pomocí MKP skriptu, tak Multibody. Výsledky se téměř nelyšily. Další ověření vhodnosti užití proběhlo formou porovnání fyzicky naměřených dat a těch získaných modelem z obr. 34.

Pro upevnění z obr. 33 nebylo možné z charakteru velmi poddajného uložení uvažovat jeho pouhé vetknutí na místě přední podpory. Takové uložení u stavu 1 vykazovalo hodnoty frekvence okolo 70 Hz pro první tvar kmitu a okolo 450 Hz pro tvar druhý. Bylo tedy nutné zvolit poddajné uložení s příslušnými hodnotami tuhosti a tlumení.

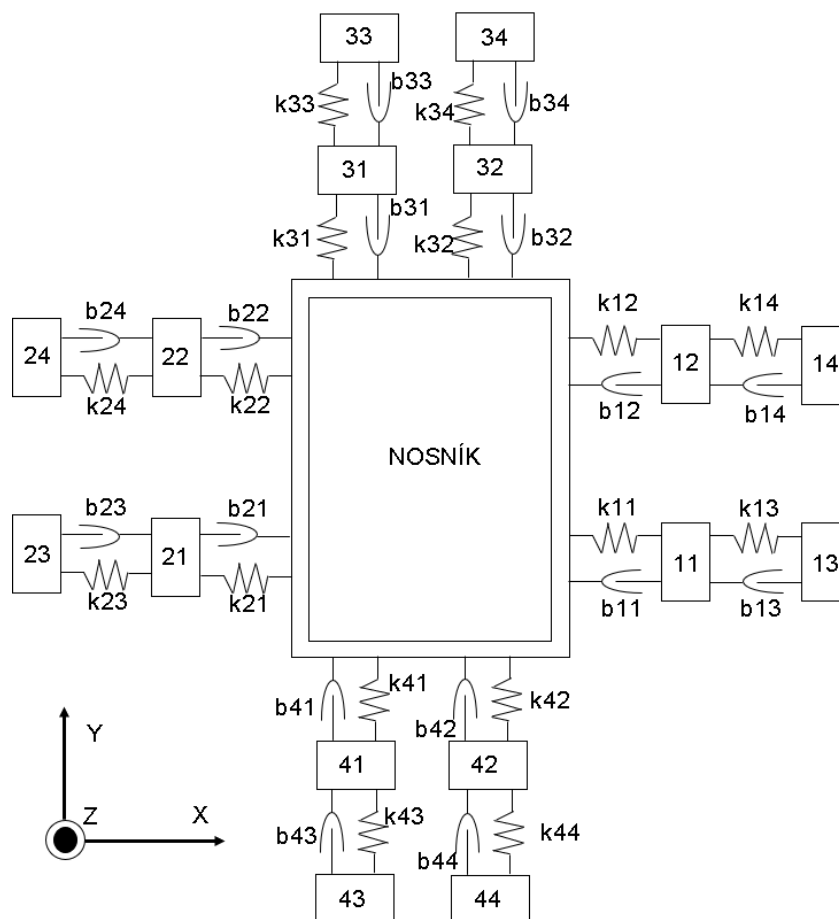


Obrázek 34: Model nosníku a hltiče v prostředí Simscape Multibody.

Vytvořený model dovoluje umístit na nosník až 4 zařízení na každou jeho stranu. Nepotřebné komponenty se dají potlačit funkcí komentování. Jednotlivé hltiče mají svůj vlastní index, dle kterého jsou nazývány i jejich jednotlivé komponenty (tuhost, tlumení). Schématický náčrt s logikou indexů je na obr. 35. Aktivní i pasivní hmoty se uvažují stejně, protože má vzniknout zařízení dovolující bez dalšího konstrukčního zásahu tlumit požadované spektrum frekvencí.

Model je propojen s vytvořeným skriptem nesoucí název: parametry_hltice_modularni. U něho si uživatel volí materiál a rozměry pružného elementu, hmotnosti aktivní a pasivní hmoty a poměrný útlum odpovídající vlastnostem užitě kapaliny. Po zvolení těchto parametrů lze přistoupit k odkomentování takových pasivních hmot v modelu Multibody, které budou odpovídat příslušným indexům užitých hltičů. Nyní stačí model načíst například v prostředí Model Linearizer. Zjištěné vlastní frekvence se doplní do skriptu a vše potřebné k testování je připraveno.

Model také umožňuje umístit pouze jeden hltič na střed každé strany. K tomuto účelu byl pro přehlednost vytvořen samostatný výpočtový skript s názvem: `parametry_hltice_samosatne`. Pro tuto variantu slouží řada samostatně umístěných hltičů z obr. 34. Elementy tuhosti a tlumení mají v tomto případě na každé straně jeden index totožný s první číslicí indexů z obr. 35.



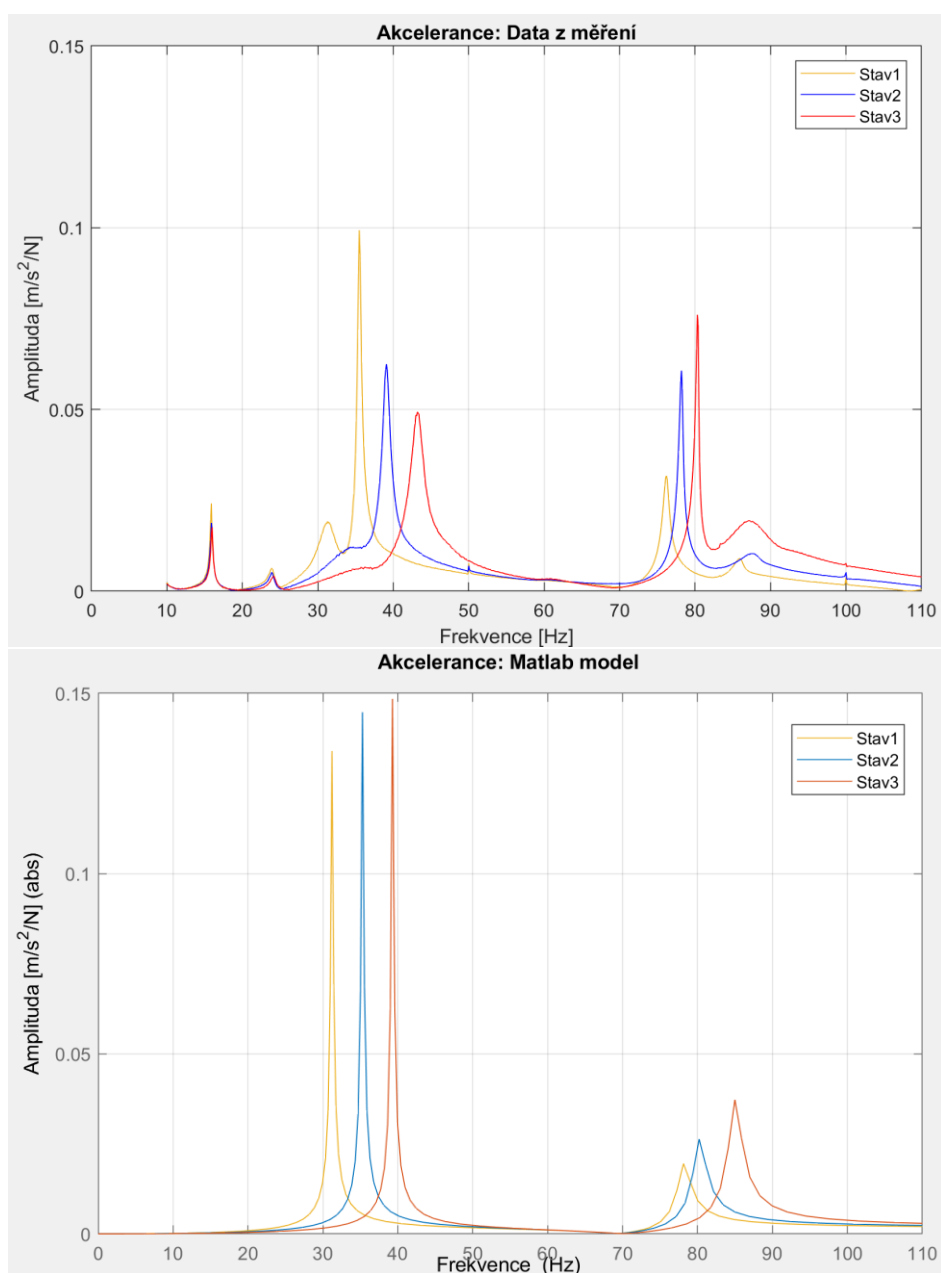
Obrázek 35: Indexy jednotlivých prvků hltičů umístěných na nosníku v modelu Simscape Multibody.

Nosník je na svém konci zatěžován signálem, u kterého dochází k lineárnímu zvyšování frekvence. Na stejném místě je také osazen pohybovým senzorem, který slouží jako výstup. Model je v závislosti výstupu na vstupu linearizován a zobrazen na Bodeho grafu. Jako výstup je zde měřeno zrychlení a výsledkem je tedy akcelerance. Zobrazena je na obr. 36 a lze z ní jednoduše vyčíst vlastní frekvence.

Z důvodu lepší přehlednosti byla data z fyzického měření a modelu vytvořeného v programu Matlab vynesena do separátních grafů a umístěny pod sebe na obr. 36. Grafy mají stejné měřítko a jednotlivé stavy měření mají stejné

barvy. Naměřená data obsahovala ještě další vlastní frekvence až do hodnot lehce nad 200 Hz, které ovšem zobrazené nejsou. Hltič bude sloužit pouze k tlumení prvních dvou vlastních frekvencí.

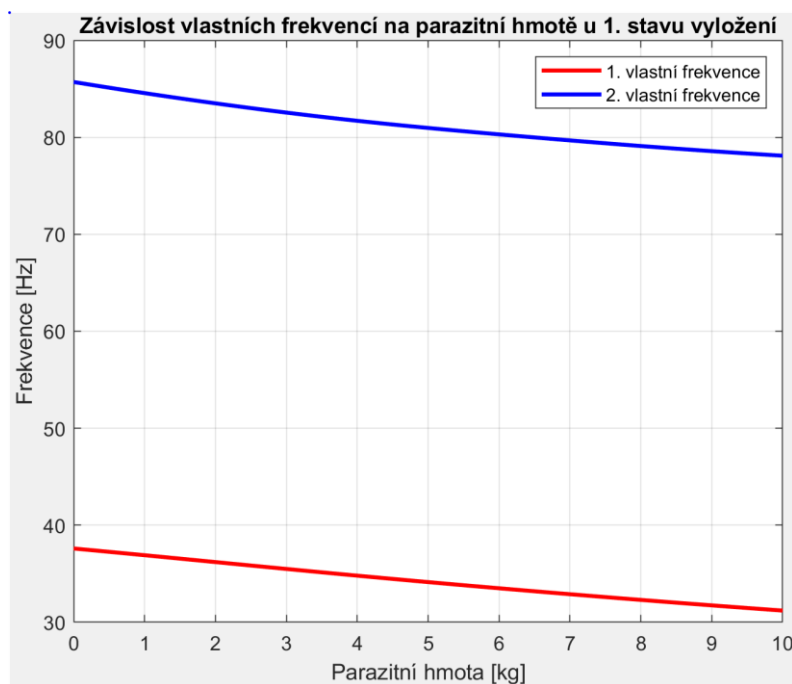
Jelikož k datům nebyly dodány vlastní tvary kmitů, bylo nemožné z prvního pohledu určit, jaké z frekvencí náležely ohybovým, a jaké torzním kmitům. Vzhledem k poloze senzoru je předpokládán výskyt obou variant. První dvě rezonanční špičky na hodnotách okolo 16 a 24 Hz náleží s největší pravděpodobností stolu, ke kterému je nosník upnut. Lze tak usuzovat z důvodu jejich překrytí pro všechny stavy a nízkých hodnot amplitud.



Obrázek 36: Porovnání získaného frekvenčního přenosu z měření vs. modelu.

Jako nevýhoda Simscape Multibody se oproti klasické modální analýze jeví nemožnost upravovat pro jednotlivé frekvenční špičky hodnoty tlumení, a proto se jejich velikost liší. Na druhou stranu je nutno podotknout, že měření pro jednotlivé stavy neproběhlo opakovaně a například u prvních vlastních frekvencí v 2. a 3. stavu je patrné zatlumení rezonančních špiček. Výhodou je naopak větší přehlednost a snadnější nastavování parametrů, které dovoluje každá použitá součást modelu ve svém menu. Pohyb namodelované soustavy je také znázorněn 3D modelem v reálném čase. Modely se dají vytvářet jak pomocí definovaných těles v knihovně, tak exportem z 3D modelovacího programu.

Graf na obr. 37 ukazuje závislost přeladění vlastních frekvencí na velikosti hmoty umístěné na konci nosníku.



Obrázek 37: Nelineární závislost frekvencí na parazitní hmotě u 1. stavu vyložení.

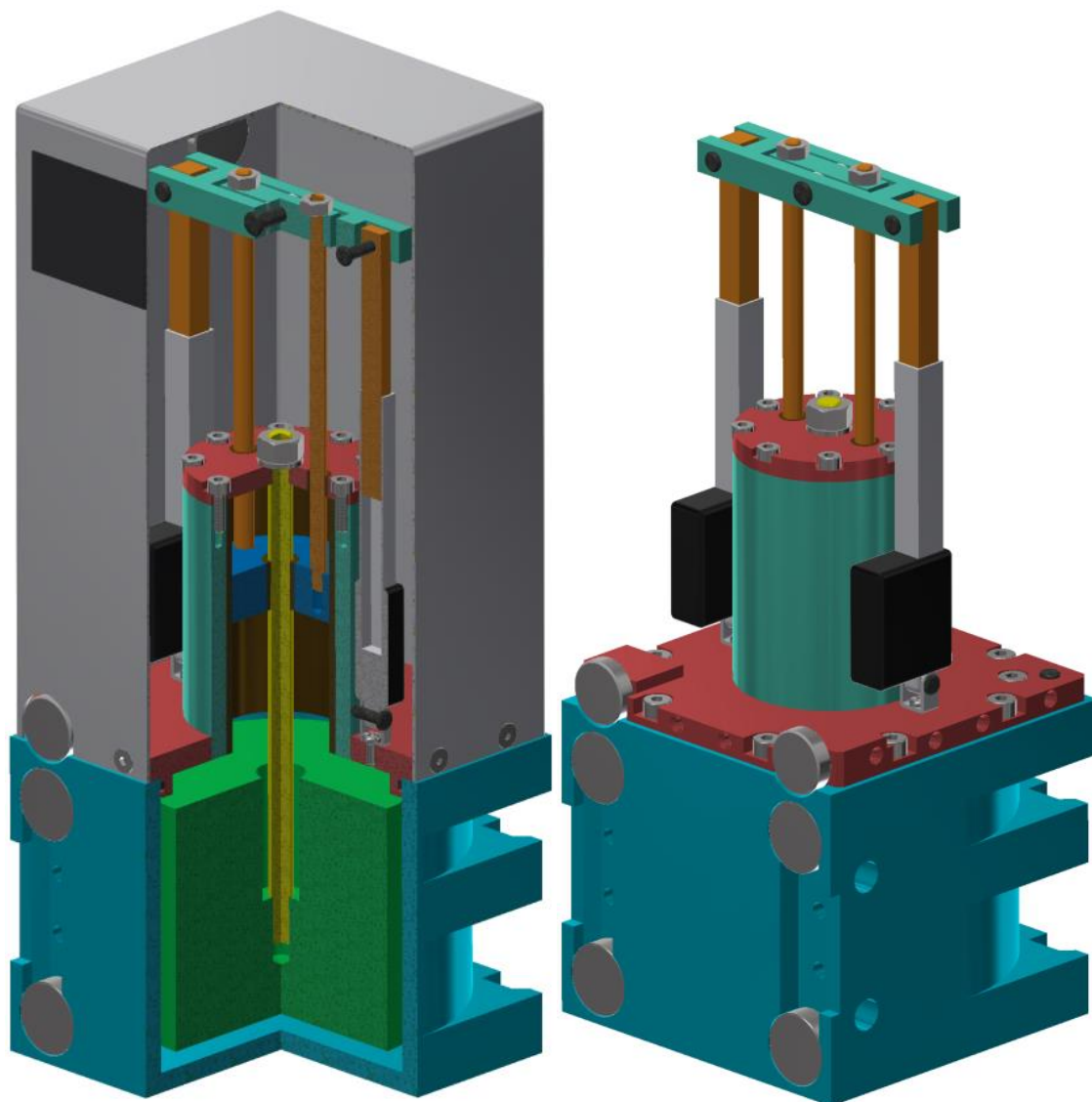
Z grafu je patrná nelineární závislost přeladění vlastních frekvencí na parazitní hmotě. Markantnější rozdíl přeladění se projevuje u první vlastní frekvence, kde došlo k poklesu o 18 %. U druhé se jedná o pokles 9 %.

5.3 Konstrukce hltiče

5.3.1 Požadované vlastnosti

Hltič musí umožňovat modulární spojení do větších sestav. Tato vlastnost dovolí ve stejném okamžiku tlumení více vlastních frekvencí. Jako předloha pro konkrétní užití slouží laboratorní nosník představený v kapitole 5.2. Blíže představený hltič v této kapitole umožňuje svými parametry tlumení první i druhé frekvence nosníku pro všechny 3 stavy upnutí. Hmotnost obou hltičů by neměla překročit 10 % hmotnosti celé tlumené soustavy, pohybující se okolo 73 kg. Poměr aktivní/pasivní hmota by neměl klesnout pod hodnotu 1.

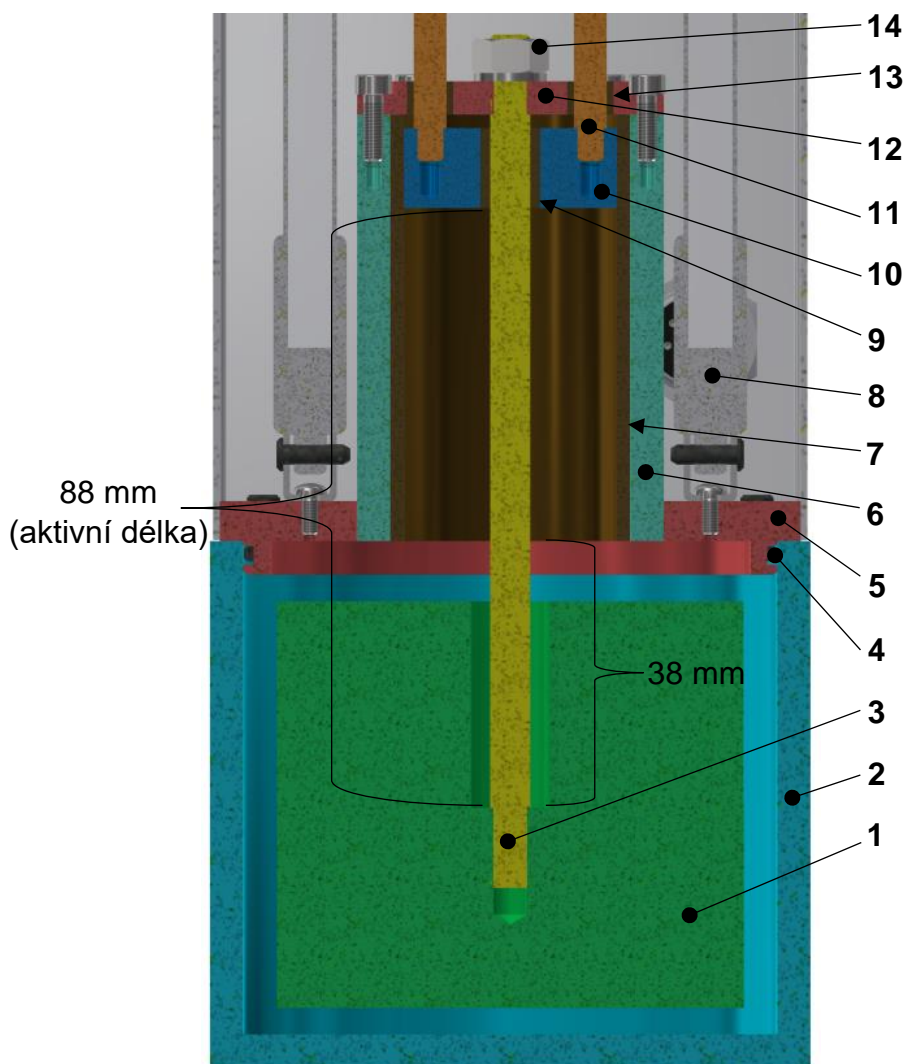
5.3.2 Technická řešení



Obrázek 38: Navržený hltič dle požadovaných vlastností.

Na obr. 38 je představena finální konstrukce hltiče, splňující požadavky potřebné k hlčení vibrační tlumené soustavy z 5.2 pro celý rozsah první i druhé vlastní frekvence. Hmotnost celého zařízení, včetně viskózní kapaliny je 3,4 kg. Při úvaze dvou modulárně spojených hltičů tedy nebyl překročen hmotnostní limit. Další splněná vlastnost je poměr aktivní/pasivní hmota. Ta nabývá díky 1,8 kg aktivní a 1,6 kg pasivní hmoty hodnoty 1,125.

Dle obr. 39 je aktivní hmota (1) kruhového průřezu zavěšena za pružný element (3) do nádoby (2) s viskózní kapalinou. Pružný element (3) je vetknut do víka (12) tubusu (6) lineárního vedení. Spojení pružiny (3) s hmotou (1) a víkem (12) je řešeno lepeným šroubovým spojem, kde je spoj pružiny s víkem navíc pojištěn maticí s podložkou (14). Pružným elementem (1) je tyč kruhového průřezu z austenitické nerezové oceli s označením 1.4031 dle ČSN 10088-1 a průměrem 6 mm. Z důvodu minimalizace parazitní hmoty je pro nádobu (2), obě víka (5, 12) a tubus (6) lineárního vedení užitá hliníková slitina s označením AW EN 7075. Aktivní délka pružiny je měněna vertikálním pohybem výztuhy (10) v rozsahu 38-88 mm. Jedná se o maximální možný rozsah pohybu lineárních aktuátorů (8). Vlastní frekvence lze ladit od 28 Hz do 99 Hz. Aby nedocházelo k úniku kapaliny z vnitřního prostoru, je mezi víkem nádoby (5) a nádobou (2) umístěn těsnící O kroužek (4). Vedení výztuhy (10), pružného prvku (1) a vodicích tyčí (11) mají kluzný prvek (7, 9, 13) vyrobený z cínového bronzu.

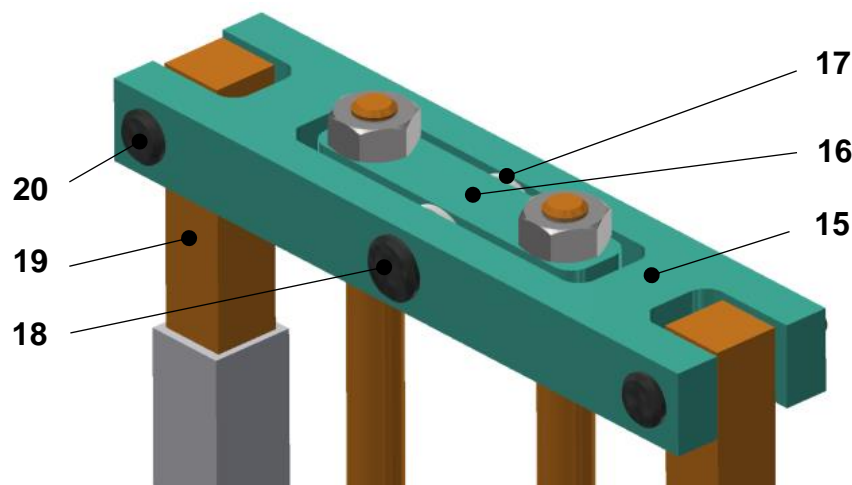


Obrázek 39: Vedení výztuhy upravující aktivní délku pružiny.

Zařízení je koncipováno tak, aby uživatel při potřebě hltit jiný rozsah frekvencí konstrukčně upravoval pouze průměr pružiny (3) s výztuhou (10) a kluzným prvkem (9), nebo výšku tubusu (6) s kluzným prvkem (7) a délkou vodicích tyčí (11), popřípadě jejich kombinaci. Tato úprava by se dala spolu s výpočetním skriptem a parametrickým modelováním do budoucna automatizovat. Vzniknout by mohly celé série hltičů. V praxi by to mohlo například vypadat tak, že uživatel zvolí dle hmotnosti, velikosti, zátěžné síly, a možných zástavbových rozměrů tlumené soustavy určitou sérii. Ta by měla již předpřipravené zařízení s možností volby daných spekter vlastních frekvencí, volených dle potřeb hlcené soustavy. Vznikl by v podstatě konfigurátor, na jehož konci by se automaticky upravil model, předpřipravené výkresy, výpočty a dokumentace.

Lineární aktuátory (8) jsou zvoleny od společnosti Actuonix řady P8 stepper. Jak již napovídá název, jsou poháněny krokovým motorem. Uživatel si může zvolit rozsah jejich pohybu: 10, 25, 50, 75 a 100 mm. Jejich výhodou je oproti jiným řadám výrobců umístění převodu do strany a tím zkrácení celkové délky.

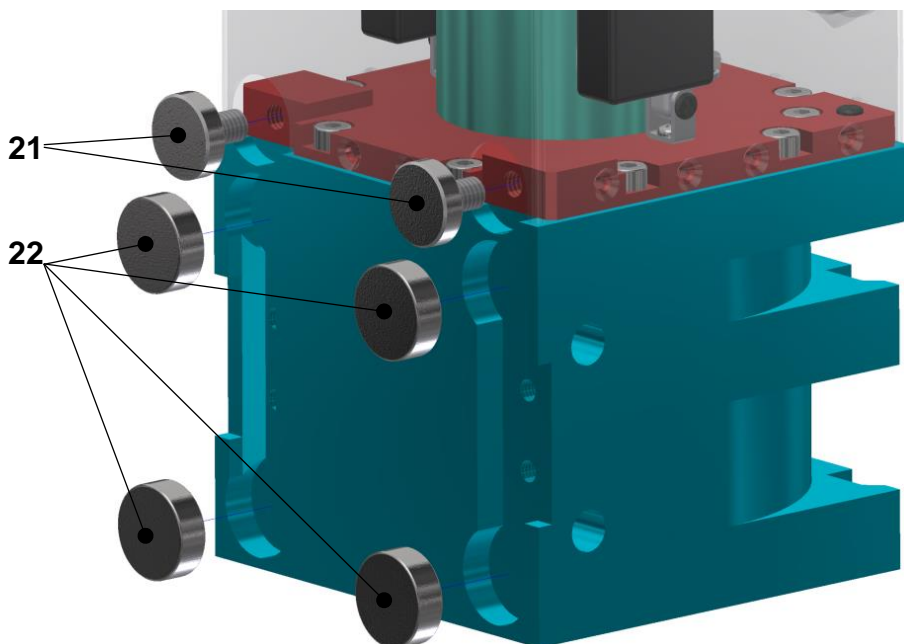
Protože u lineárních aktuátorů (8) hrozí nesouměrný pohyb hřídelí, například z důvodu odlišných vůli integrovaného převodu nebo chybám v řízení, bylo zapotřebí předejít přičení vodících tyčí (11) a výztuhy (10) ve svých kluzných prvcích (9, 13) z cínového bronzu. Z tohoto důvodu se skládá upínka vodících tyčí (11) a aktuátorů (8) ze dvou částí (15, 16), které dovolují vzájemné pootočení podle osy středního čepu (18). Dále je z důvodu náklonu upínky změněna orientace hřídelí aktuátorů (19) o 90°, aby bylo možné umístit jejich čepy (20) ve stejné orientaci. Na středním čepu (18) jsou umístěné teflonové podložky (17), držící mechanismus ve střední poloze.



Obrázek 40: Upínka vodících tyčí a lineárních aktuátorů.

K upevnění na stěnu hlčené soustavy slouží neodymové magnety (21, 22). Dle obr. 41 jsou první dva magnety (21) spojeny s víkem nádoby (5). Působí jako podpora víka (5) z důvodu uzavírání sil od působení výztuhy (10) na své lineární vedení. Jedná se o typ magnetického úchytu se závitovým čepem. Další čtyři kotoučové magnety (22) jsou vlepeny přímo do otvorů vyfrézovaných v nádobě (2). Každý horní magnet disponuje odtrhovou silou 10 kg a kotoučový vlepený odtrhovou silou 6,2 kg. Magnetický úchyt se závitovým čepem má vyšší sílu při menších rozměrech díky svému pouzdru vyrobenému z magneticky měkké oceli. To způsobuje soustředění magnetického toku na upínací čelo. Konstrukce je

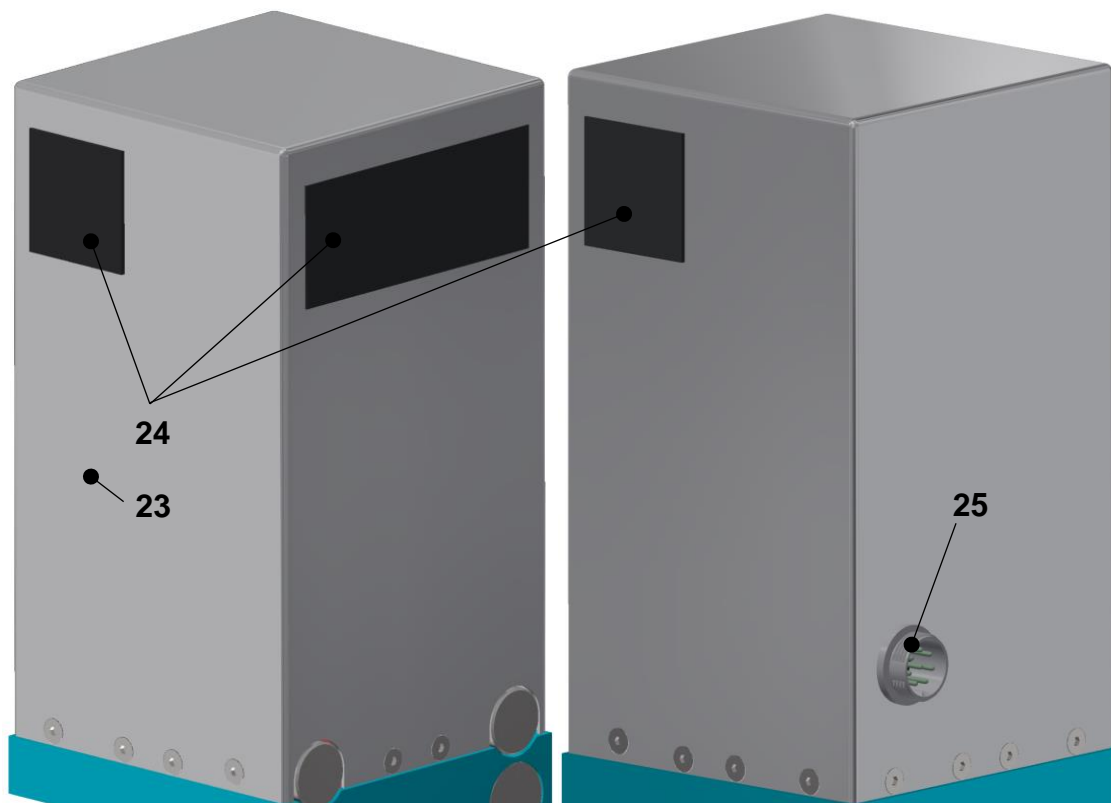
řešena tak, aby na plochu hlcené soustavy přilehlo čelo hliníkové nádoby a tělo magnetických úchytů. Vlepené magnety jsou do těla nádoby zapuštěny o 0,1 mm z důvodu své křehkosti, a tedy náchylnosti na rázy při prudkém secvaknutí.



Obrázek 41: Umístění dvou druhů magnetů sloužících k uchycení na tlumené soustavě.

Protože se počítá s vystavením hltiče nepříznivým vlivům, na které nejsou zejména užitá pohony stavěny, bylo nutné uzavřít posuvný mechanismus krytem (23) z obr. 42. Ten je vyroben z ohýbaného a následně svařovaného hliníkového plechu tloušťky 1 mm. Materiál byl stejně jako u ostatních komponent zvolen ke snížení hmotnosti. Jeho hmotnost je pouhých 168 g oproti například ocelovému plechu s hmotností 488 g.

Mezi kryty spojených hltičů a plochou hlcené struktury je vynechána mezera. Na vnější část krytu s mezerou jsou vlepeny 3 pryžové desky (24). Ty dopomáhají k útlumu vibrací krytu (23) a celkovému zpevnění. Ve vnitřní části krytu jsou v místech desek vlepeny na každé straně vždy 2 neodymové magnety (26) se silou 4,1 kg. Tato síla je ovšem snížena 3 mm mezerou. Na krytu je také umístěn 8 pinový panelový konektor GX-16 (25), sloužící k propojení pohonů (8) s modulovými ovladači/řídícím počítačem. Jeho stupeň krytí zaručuje ochranu proti vniku proudící kapaliny i nečistotám.



Obrázek 42: Kryt hltiče s panelovým konektorem a pryžovými deskami.

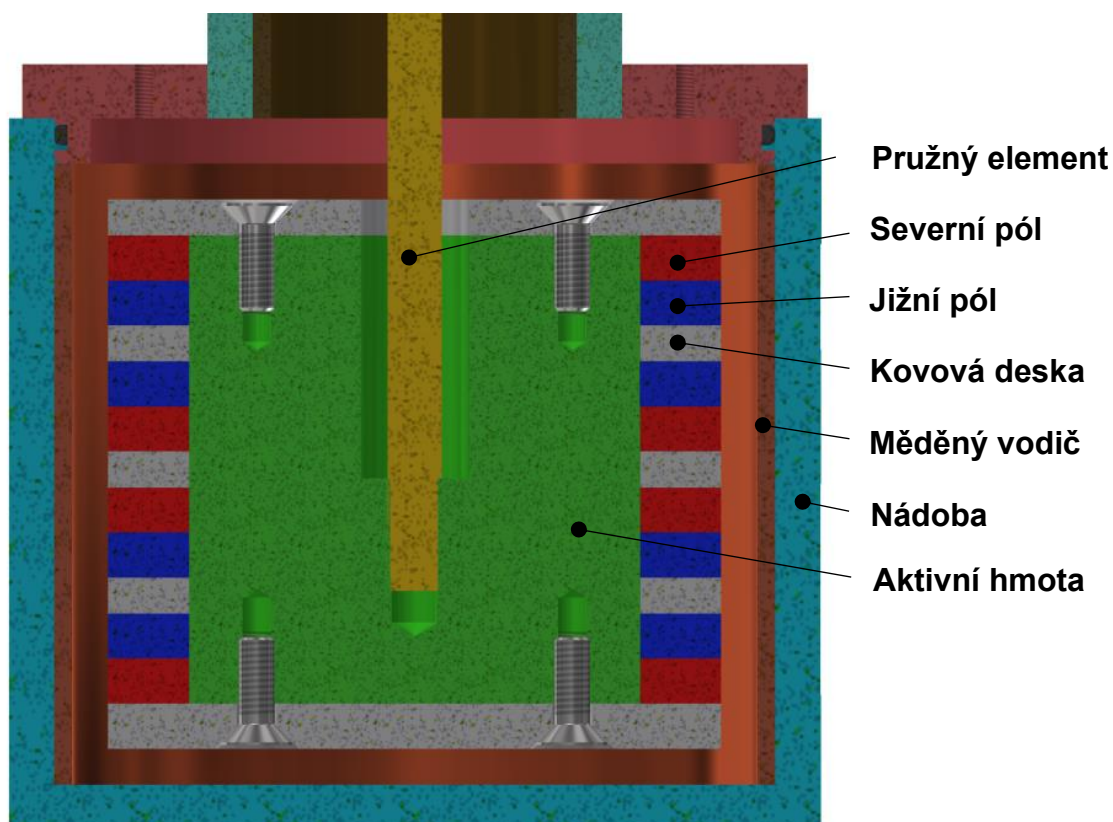
Díry pro zapuštěné šrouby, šrouby i tloušťka plechu jsou vyrobené v určité geometrické toleranci. Aby byl zajištěn správný kontakt dosedacích ploch nádob modulárně spojených hltičů, je kryt oproti nádobě z každé strany dle obr. 43 zapuštěn o 0,5 mm. Mezi krytem a okolo horních magnetů s nádobou je vytvořena 0,5 mm a 0,2 mm mezera. Ta se po sestavení vyplní silikonem, který zabrání vniku nečistot a kapaliny do vnitřního prostoru.



Obrázek 43: Umístění magnetů (vlevo) a mezera určená k vyplnění silikonem (vpravo).

Tlumič na principu vířivých proudů vyplynul v závěru rešerše jako vhodná varianta tlumení vibrací. Byla diskutována výhoda ušetření pasivní hmoty tím, že se stanou permanentní magnety součástí aktivní hmoty jako na obr. 48. Jelikož je ovšem užitý materiál nádoby hliníková slitina, je zapotřebí vložit do vnitřního prostoru měděný vodič, který má 3krát větší hmotnost než tlumicí kapalina. Dále je jeho nevýhoda oproti kapalině složitá změna tlumicích parametrů, jejich výpočet, nelineární průběh tlumicích účinků a v neposlední řadě vyšší ekonomická náročnost.

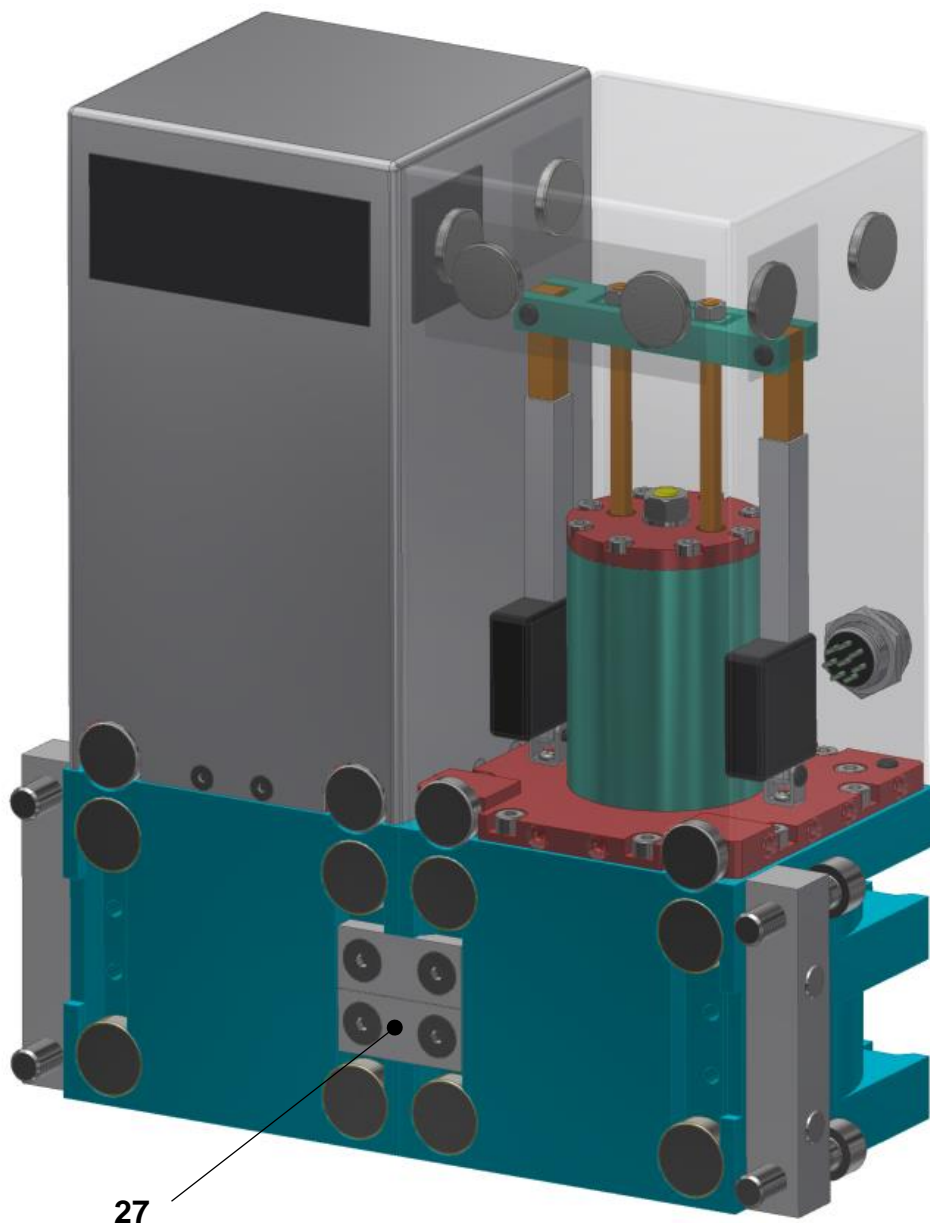
Tlumič by se dle obr. 44 skládal z magnetů, prokládaných kovovými deskami. Každý další magnet navazuje na předchozí stejným pólem, aby se magnetické pole soustředilo do stran, kde uzavírá silovou vazbu s měděnou stěnou nádoby.



Obrázek 44: Hltič s tlumičem na principu vířivých proudů.

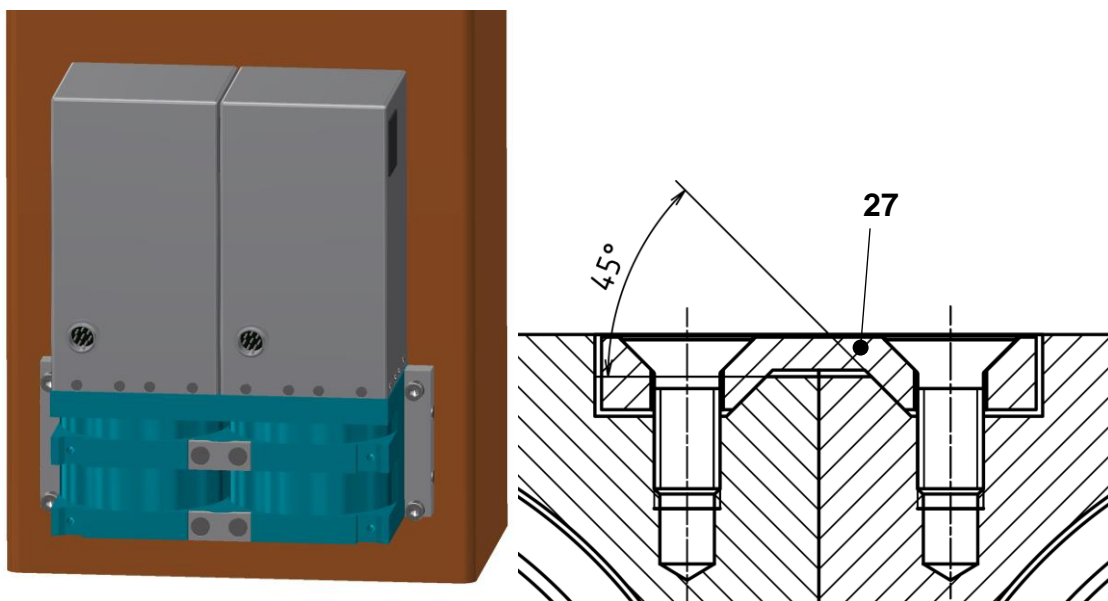
5.3.3 Modularita

Zvolené modulární řešení dovoluje spojení více hltičů vedle sebe. Za tímto účelem je vyfrézovaná drážka v rozích nádoby z obr. 46, dovolující zapuštění upínacího přípravku (27). Díky dosedací ploše nádoby a upínacího přípravku sešikmené o 45°, dochází k vzájemnému předepnutí, a tedy zvýšení tuhosti spoje.



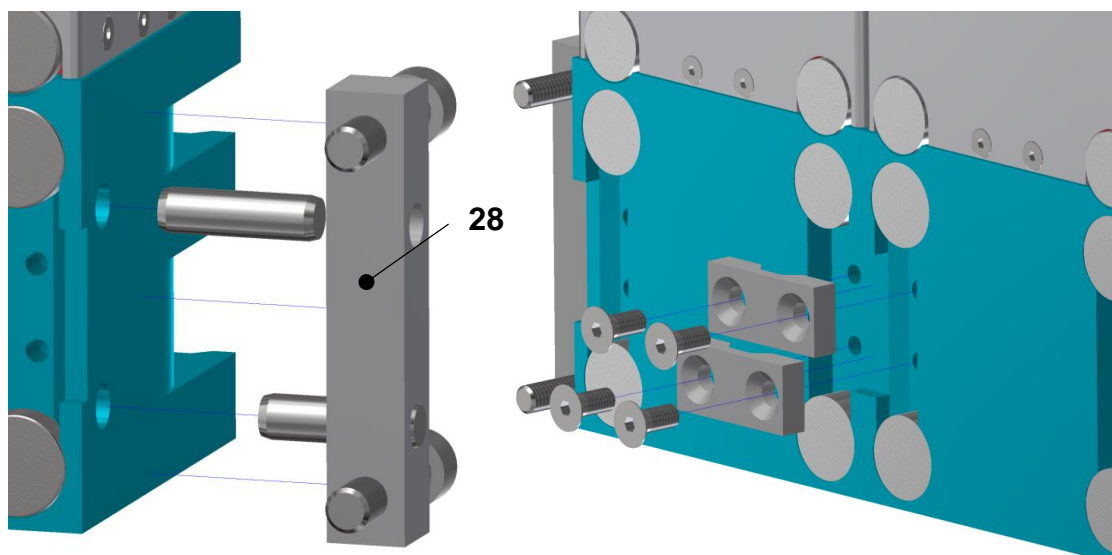
Obrázek 45: Modulární spojení dvou hltičů.

Ukázka spojení hltiče s vertikálně orientovaným nosníkem z 5.2 je znázorněna na obr. 46. Rozměry dovolují spojení i při horizontální orientaci nosníku.



Obrázek 46: Modulárně spojený hltič na nosníku (vlevo) a upínací přípravek v zadní části hltiče (vpravo).

Magnetická síla představuje při spojení dvou hltičů bezmála 900 N. Z tohoto důvodu bylo nutné zajistit odtržení zařízení od tlumené soustavy. K tomuto účelu byl zhotoven přípravek (28) z obr. 47. Do těla přípravku jsou vlisovány čepy, pro které jsou v nádobě zhotoveny otvory s vůlí. Po vložení přípravku začne obsluha utahovat šrouby, které zaručí oddálení dosedacích ploch tlumené soustavy a hltičů. Tím dojde k ponížení síly magnetů a snadné demontáži hltičů.



Obrázek 47: Přípravek na odtržení (vlevo) a upínací přípravky na čele hltiče (vpravo).

5.4 Výpočty parametrů hltiče

Aktivní hmota

V minulé kapitole již bylo řečeno, jaké hodnoty by měla dosahovat celková hmotnost hltičů včetně poměru aktivní/pasivní hmota. Tento závěr byl učiněn po konzultaci s odborníky v oboru a dle odborných článků jako např.: [43]. Jednotlivé hmotnosti byly odečítány z programu Inventor.

Po zhotovení prvních koncepčních návrhů byly zjištěny hmotnosti jednotlivých komponent a následně došlo dle dodaných hodnot o tlumené soustavě k jejich optimalizaci. Důležitým parametrem bylo respektování maximálních zástavbových prostorů, daných šířkou plochy nosníku. Dalším důležitým parametrem bylo dodržení poměru aktivní/pasivní hmota, díky kterému bylo zapotřebí volit největší součásti pasivní hmoty z lehkého materiálu. Jako materiál pro aktivní hmotu byla zvolena konstrukční ocel s hustotou 7850 kg/m^3 . S tímto materiálem bylo dosaženo **aktivní hmotnosti 1,8 kg**.

Pokud by bylo prioritou dosáhnout co nejlepšího poměru aktivní/pasivní hmota, byla zde možnost volit materiál aktivní hmoty s větší hustotou. V levnějším případě se může jednat o měď s hustotou 9000 kg/m^3 . Mnohem větší koncentrace hmoty ve stejném objemu by bylo možné dosáhnout s užitím wolframových slitin, u nichž se pohybuje hustota okolo $18000\text{-}19000 \text{ kg/m}^3$. Volba takových materiálů ovšem nemá z ekonomických důvodů význam, protože se zejména u wolframu jedná o řádově dražší materiál se složitou obrobiteľností.

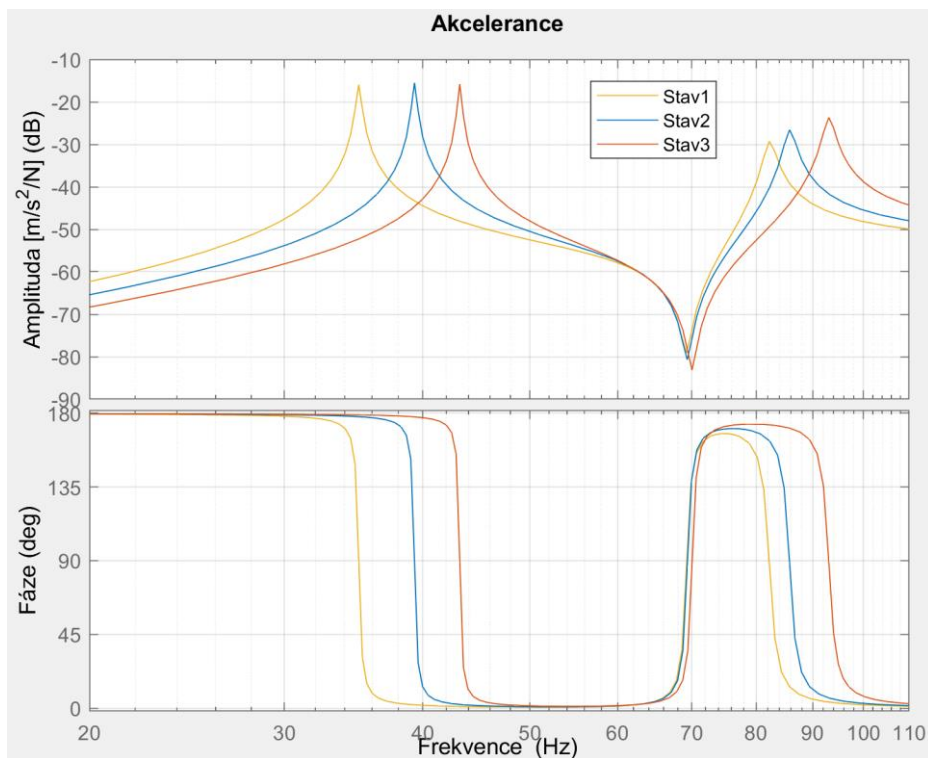
Pasivní hmota

Pasivní hmotou jsou všechny komponenty hltiče, které se aktivně nepodílí na hlacení vibrací. Jedná se tedy o vše kromě aktivní délky pružiny a aktivní hmoty.

Pro účel minimalizace pasivních hmot byla vybrána slitina hliníku s hustotou 2700 kg/m^3 , oproti 7850 kg/m^3 konstrukční oceli. Díky ní bylo možné dosáhnout celkové hmotnosti **pasivní hmoty 1,5 kg**.

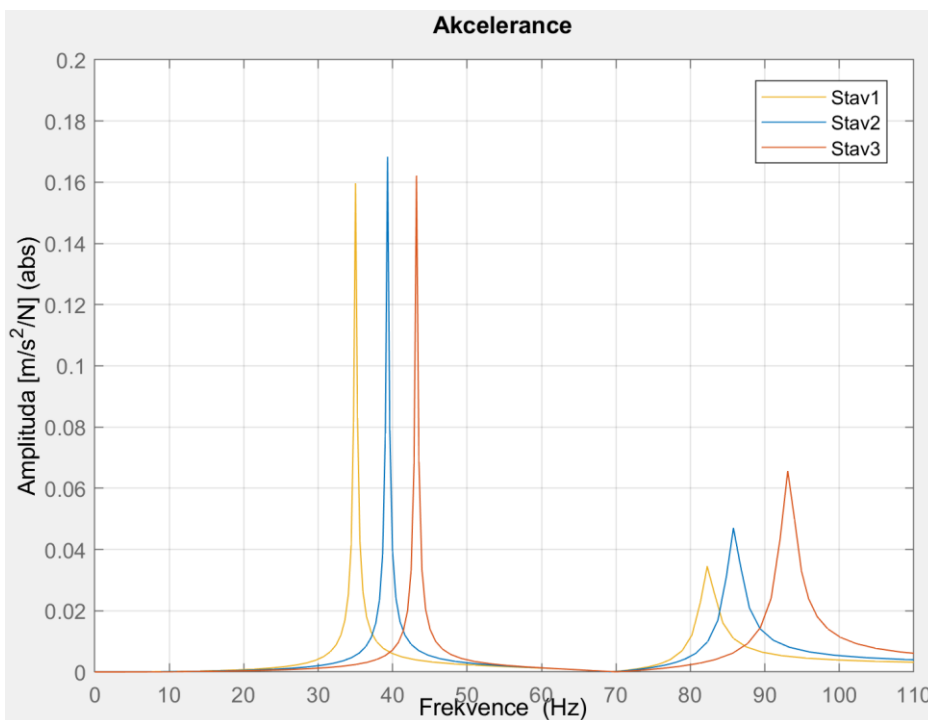
Po připojení pasivní hmoty ke smykadlu dojde u stejných hodnot vyložení k ponížení vlastních frekvencí. To zapříčiní nutnost delší pružiny hltiče při stejné

ploše průřezu. Přeladění vlastních frekvencí je pro všechny stavy vyložení zobrazeno v logaritmicích souřadnicích na Bodeho grafu z obr. 48.



Obrázek 48: Bode diagram nosníku po připojení pasivních hmot.

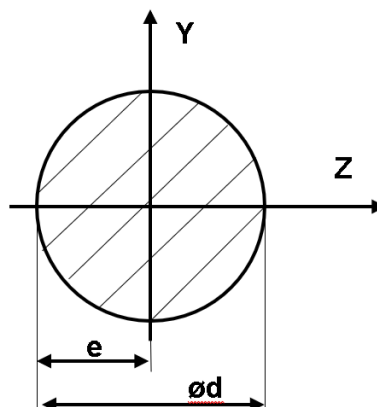
Pro porovnání s grafy z měření v absolutních hodnotách a lineárním měřítku:



Obrázek 49: Frekvenční přenos v absolutních hodnotách amplitudy.

Vztahy potřebné k výpočtu pružného elementu

Jako pružný element je užitá tyč kruhového průřezu dle schématu:



Obrázek 50: Schéma profilu tyče k výpočtovým vztahům.

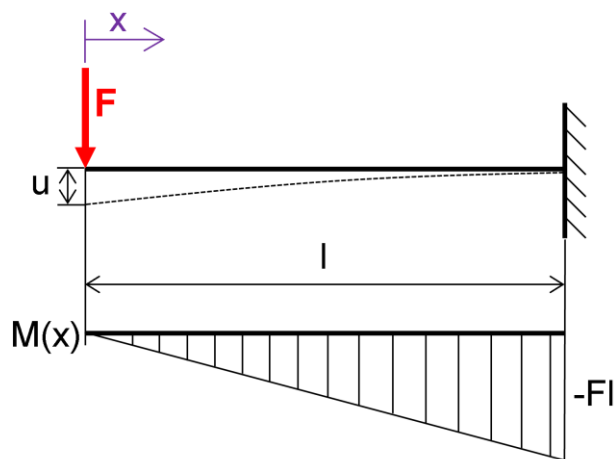
Nejprve je zapotřebí vypočítat kvadratický moment průřezu podle vztahu:

$$J = \frac{\pi \cdot d^4}{64} [m^4] \quad (5.1)$$

Dále je možné s odkazem na tento vzorec dopočítat modul průřezu v ohybu mající podobu:

$$W_{O_{z,y}} = \frac{J}{e} = \frac{\pi \cdot d^3}{32} [m^3] \quad (5.2)$$

Pružný element s aktivní hmotou si lze dle obr. 51 představit jako vetknutý nosník zatěžovaný silou F , vzniklou od aktivní hmoty. Nejdříve je zapotřebí vypočítat průhyb v místě zátěže. K tomu poslouží Bernoulliho diferenciální rovnice průhybové čáry.



Obrázek 51: Vetknutý nosník reprezentující pružný element.

Rovnice je v základním stavu zapsána:

$$v''(x) = -\frac{M_o(x)}{E \cdot J} \quad (5.3)$$

Kde: $M_o(x)$ [Nm] - ohybový moment v obecném místě

E [MPa] - modul pružnosti

J [m^4] - kvadratický moment průřezu

Dle Schwedlerovi věty je moment při postupu zleva:

$$M_o(x) = -F \cdot x \quad (5.4)$$

Po doplnění momentu do rovnice (5.3), její první derivaci a dopočtu konstant z geometrických podmínek vznikne vztah pro výpočet natočení, který je na volném konci tyče:

$$v' = \varphi(0) = \frac{F \cdot l^3}{2 \cdot E \cdot J} \quad (5.5)$$

Další derivací a dopočtu konstant vznikne vztah pro výpočet průhybu, který je na volném konci nosníku:

$$u(0) = \frac{F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot J} \quad (5.6)$$

Nyní je třeba nahradit neznámé parametry. K tomu poslouží vzorec pro výpočet tuhosti:

$$\frac{F}{u} = k = \omega^2 \cdot m_a = \frac{3 \cdot E \cdot J}{l^3} \quad (5.7)$$

Kde: ω [rad/s] - úhlová frekvence

m_a [kg] - aktivní hmota

Jelikož je ω úhlová frekvence, je nutné jí vyjádřit vztahem:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (5.8)$$

Kde: f [Hz] - vlastní frekvence smykadla pro konkrétní vyložení

Rovnice pro výpočet potřebné aktivní délky pružného elementu, závislá na vlastní frekvenci smykadla, má tvar:

$$l = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot E \cdot J}{\omega^2 \cdot m_a}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot E \cdot J}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot m_a}} \quad (5.9)$$

Po připojení pasivní hmoty je rozsah frekvencí nosníku 35-93 Hz. Zvolené parametry dovolují při aktivních délkách pružiny 38-88 mm přeladění v rozsahu frekvencí 28-99 Hz. Větší rozsah byl zvolen z bezpečnostních důvodů.

Maximálně přípustná síla působící na pružinu

Aby se zabránilo mechanickému poškození, za které je odpovědná plastická deformace pružiny, je zapotřebí stanovit maximální možnou sílu, kterou se bude moci pružina zatěžovat.

Výchozí rovnice pro výpočet napětí:

$$\sigma = \frac{M_o}{W_o} \quad (5.10)$$

Díky dříve odvozeným vztahům je znám vztah pro zatěžující ohybový moment i modul průřezu. Nyní je třeba určit maximální dovolené napětí. Maximální napětí v ohybu je u užitého materiálu 240 MPa. Při uvažování bezpečnosti vychází dovolené napětí:

$$\sigma_D = \frac{\sigma_o}{1,2} = 200 \text{ MPa} \quad (5.11)$$

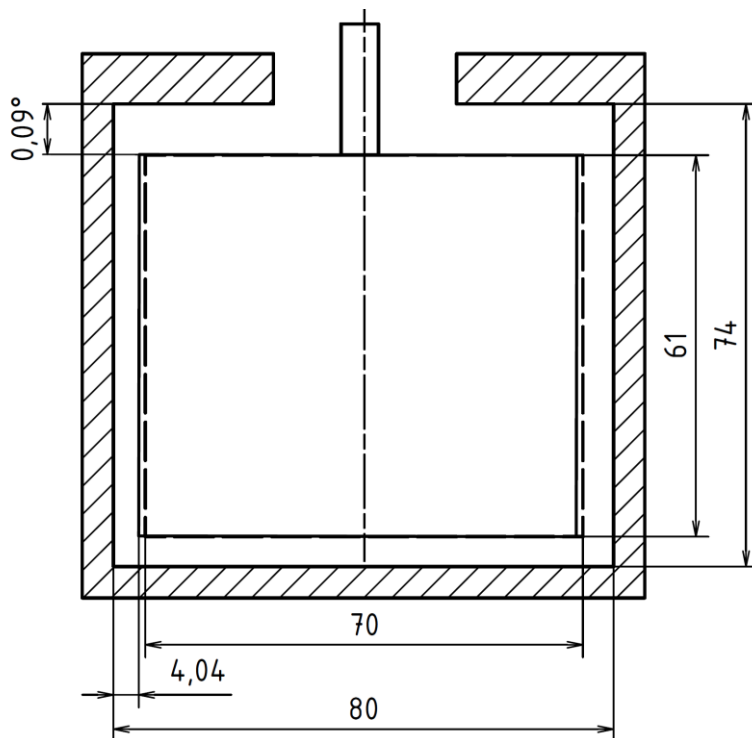
Bezpečnost je uvažována takto malá z důvodu maximalizace hodnoty síly.

Po doplnění vztahů do rovnice 5.10 a vyjádření síly dostáváme vztah:

$$F = \frac{\sigma_D \cdot W_o}{l} = 48,1 \text{ N} \quad (5.12)$$

Průhyb a natočení spjaté s kontrolou mezery

Z dříve odvozených vztahů pro výpočet natočení a průhybu lze spolu s maximálně přípustnou silou vypočítat a znázornit limitní pohyb aktivní hmoty v nádobě:



Obrázek 52: Průhyb a natočení aktivní hmoty v nádobě.

Maximální natočení

$$\varphi_{max} = 0,0932^\circ \quad (5.13)$$

Maximální průhyb:

$$u_{max} = 0,864 \text{ mm} \quad (5.14)$$

Mezi aktivní hmotou a vnitřní stěnou nádoby je navíc vytvořena 4 mm mezera z důvodu bezpečnosti a stálejšímu průběhu tlumicích parametrů. Ty budou vždy nelineárního průběhu a bez legitimního experimentu jen velmi špatně predikovatelné.

Tlumení

Výpočet tlumení, ale i tuhosti, vychází ze základní diferenciální rovnice rovnováhy:

$$m \cdot \ddot{x} + b \cdot \dot{x} + k \cdot x = 0 \quad (5.15)$$

Po vydělení rovnice m dostaneme:

$$\ddot{x} + \frac{b}{m} \cdot \dot{x} + \frac{k}{m} \cdot x = 0 \quad (5.16)$$

Nyní dojde k porovnání s tvarem rovnice:

$$\ddot{x} + 2 \cdot \xi \cdot \omega_0 \cdot \dot{x} + \omega_0^2 \cdot x = 0 \quad (5.17)$$

Vyjádríme konečný tvar konstanty tlumení:

$$b = \xi \cdot 2 \cdot \sqrt{k \cdot m} \quad (5.18)$$

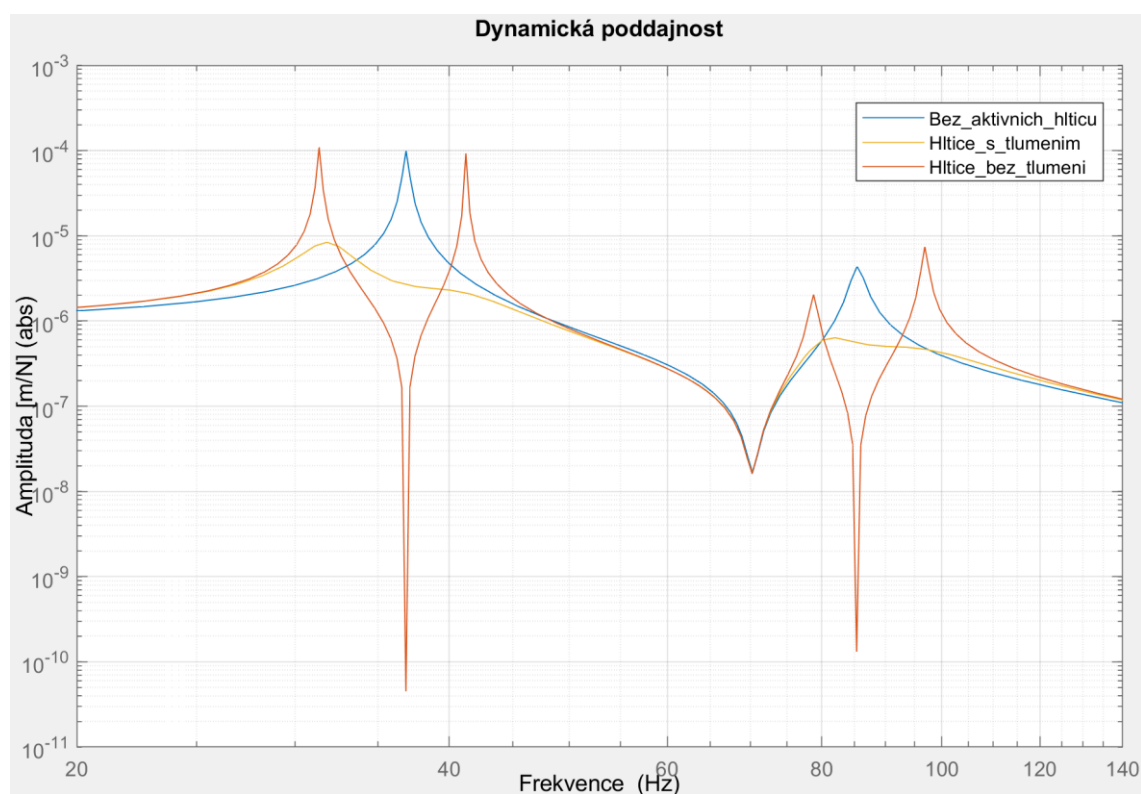
Hodnoty tlumení užití kapaliny se zjišťují pomocí experimentálního měření, které v tomto případě nebylo uskutečněno. Poměrný útlum ξ se odvíjí od viskozity užitého oleje a pohybuje se v rozmezí 0,1 – 0,2. Při výpočtech byla uvažována střední hodnota. Jako tlumicí kapalina mohou být užitý například oleje od společnosti Ekolube viskózní třídy 220, 320 a 680. Všechny tyto řady byly pro podobná zařízení testovány v laboratořích ústavu RCMT a jako nejvhodnější se jevila řada 320. Ke zjištění nejvhodnější řady pro představený hltič a tlumenou soustavu by ovšem také muselo být provedeno experimentální měření.

5.5 Ověření funkčnosti hltiče

Pro ukázkou principu zatlumení vlastních frekvencí a ověření funkčnosti je uvažován 1. stav upnutí laboratorního nosníku. Po připojení parazitních hmot

hltičů nabývají vlastní frekvence hodnot 36,9 a 85,4 Hz. Je tedy nutné u jednotlivých hltičů naladit aktivní délku pružného elementu, odpovídající dané frekvenci. K tomuto úkonu slouží skript propojený s Multibody modelem s názvem: parametry_hltice_modularni nebo parametry_hltice_samostatne. Z tohoto výpočtového skriptu vychází aktivní délky pružin 73,3 a 41,9 mm.

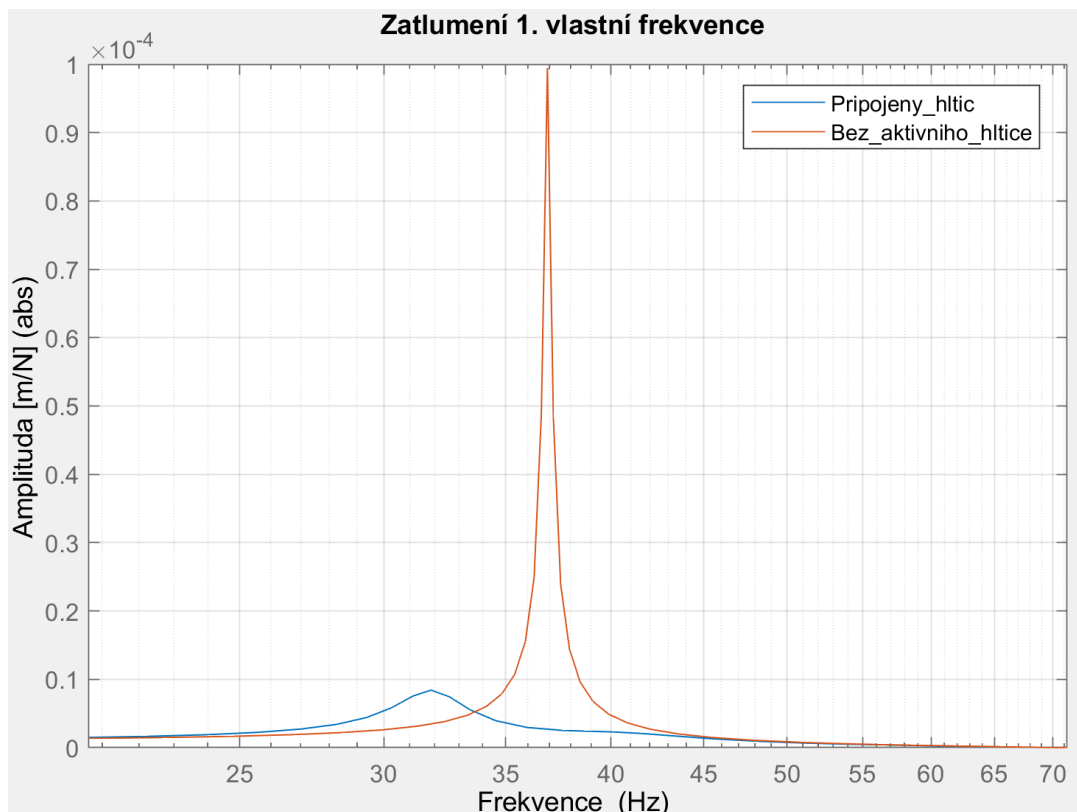
Dle přenosové funkce z obr. 53 vzniknou po připojení netlumeného hltiče dvě nové rezonanční špičky s antirezonancí na hodnotě tlumené frekvence. Tento průběh znamená vytvoření výchylek na dvou nově vzniklých vlastních frekvencích. Aby bylo možné výchylky eliminovat, je zapotřebí zatlumit kmitající hmotu hltiče. Tlumení způsobí vyhlazení průběhu přenosové funkce a snížení amplitudy vibrací hlcené soustavy. Graf je zobrazen v logaritmickém měřítku obou os a představuje závislost výchylky na působící síle, která se nazývá dynamická poddajnost. Poddajnost se mimo jiné vyznačuje poklesem křivky za 1. vlastní frekvencí o 40 dB/dekádu.



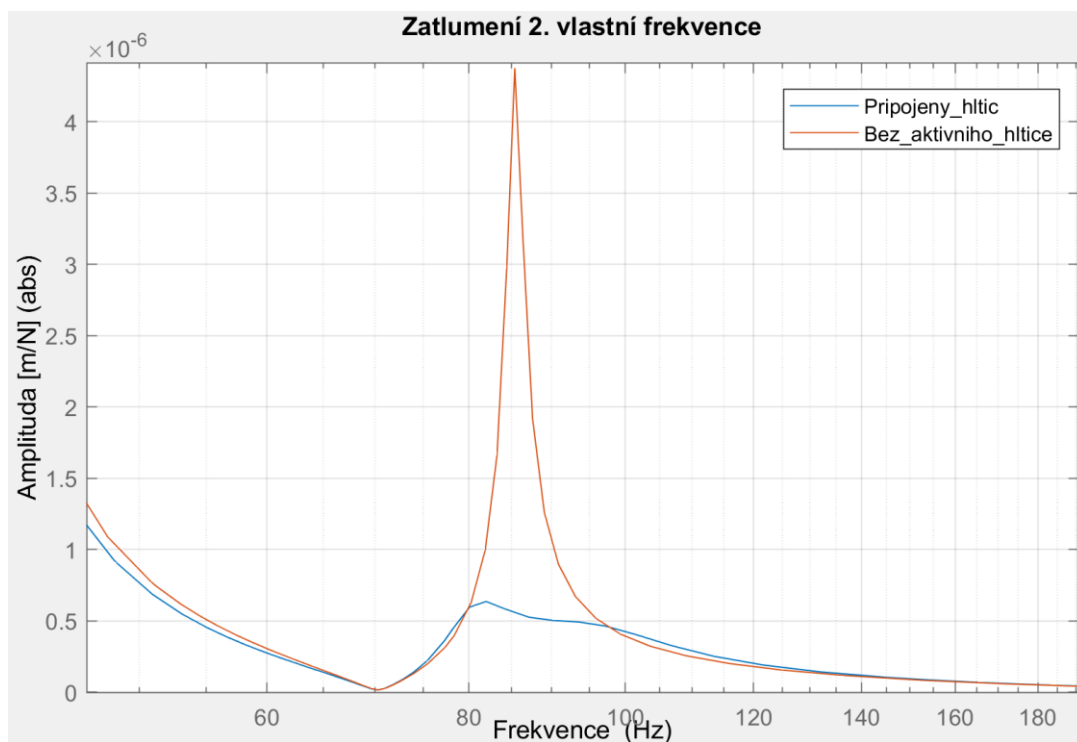
Obrázek 53: Vznik nových špiček a zatlumení amplitud po připojení hltičů.

Obr. 54 a 55 detailněji porovnávají průběhy výchylek na hodnotách vlastních frekvencí před a po aktivaci hltičů. Osa amplitudy je zobrazena v lineárním měřítku. Pro hodnotu poměrného útlumu $\xi = 0,15$ došlo k zatlumení 1. vlastní

frekvence na 8,5 % původní hodnoty. U 2. vlastní frekvence došlo k zatlumení na 15,9 % původní hodnoty.

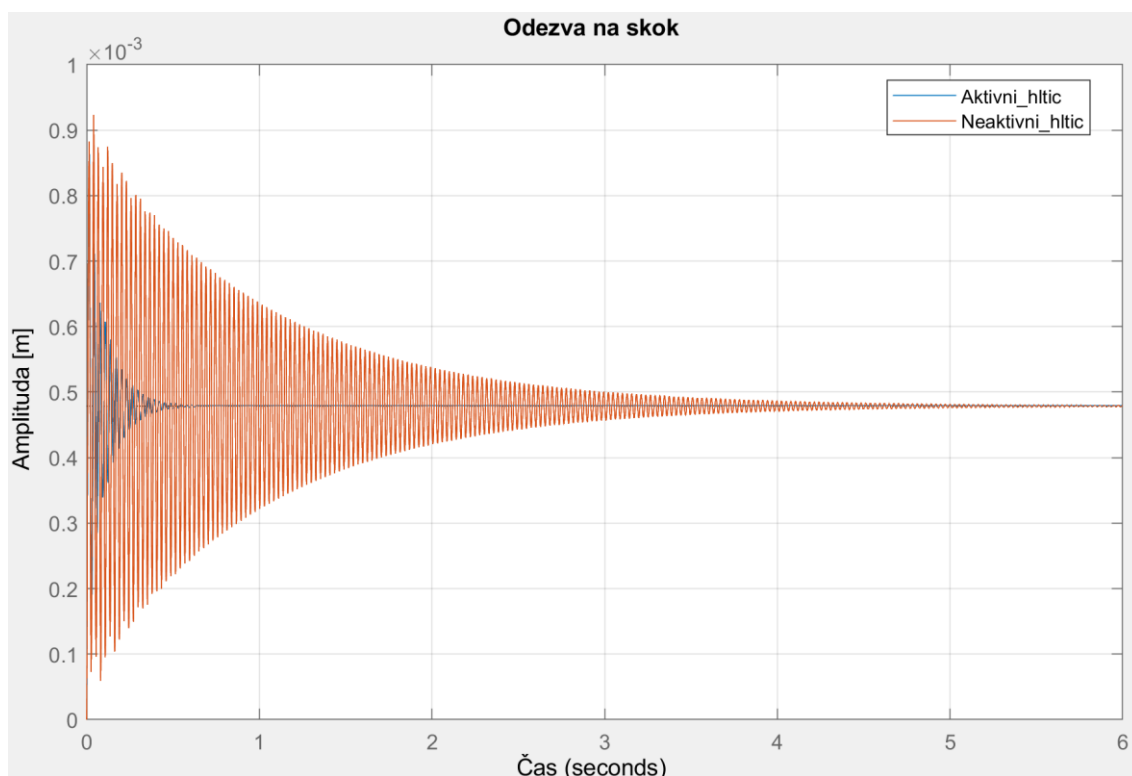


Obrázek 54: Zatlumení 1. vlastní frekvence po připojení tlumeného hltiče.



Obrázek 55: Zatlumení 2. vlastní frekvence po připojení tlumeného hltiče.

Dále byla sledována odezva na skok síly 500 N, z obr. 56. Tento druh zátěže vybudí všechny frekvence. Na výchylce se projeví vlastní frekvence, protože právě její amplituda je zesílena. Vlastní frekvence tlumené soustavy nezáleží na velikosti síly. Jediný parametr, měnící se s velikostí síly je velikost výchylky. Frekvence není závislá ani na místě buzení. Tlumená soustava kmitá okolo polohy silové rovnováhy mezi působící silou a odporovou silou tlumené soustavy (pružiny). Dle výsledků z tohoto měření dochází po aktivaci hltičů k desetkrát rychlejšímu zatlumení výchylky než u varianty bez aktivních hltičů.



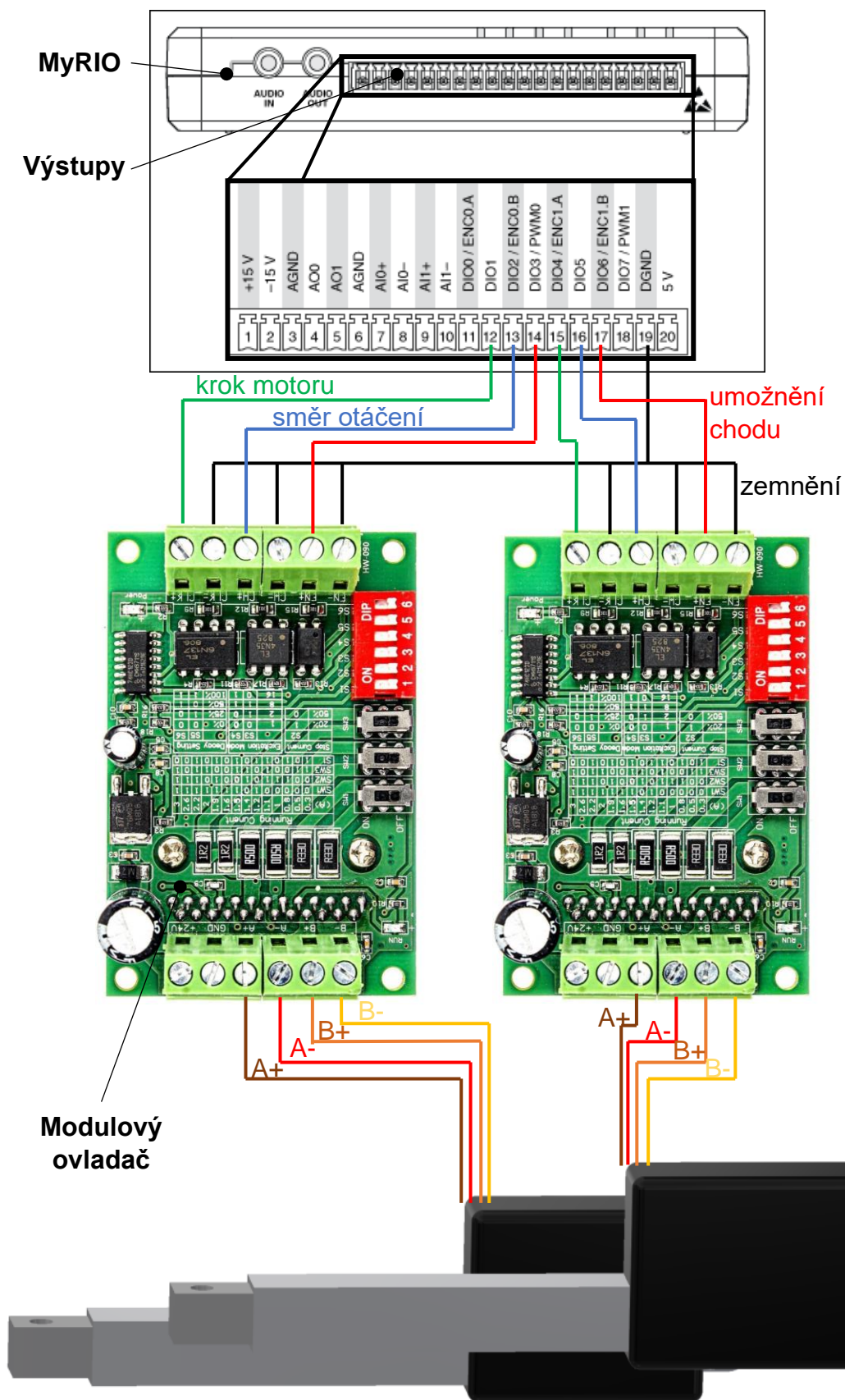
Obrázek 56: Odezva na skok před a po aktivaci hltiče.

5.6 Řízení pohonu hltiče

Návrh řízení užitých lineárních aktuátorů je vytvořen pomocí softwaru Labview a řídicího počítače MyRIO od společnosti National Instruments. Jedná se o průmyslově uplatnitelné provedení, které lze propojit například s daty z řídicího systému stroje a PLC. Vytvořený program je součástí přílohy práce.

V programu Labview byly vytvořeny dva moduly. FPGA modul obsahující hardwarovou logiku, na míru kompilovanou pro zařízení MyRIO a Real-Time modul, který obsahuje logiku řízení pohybu, rychlosti atd. pohonů.

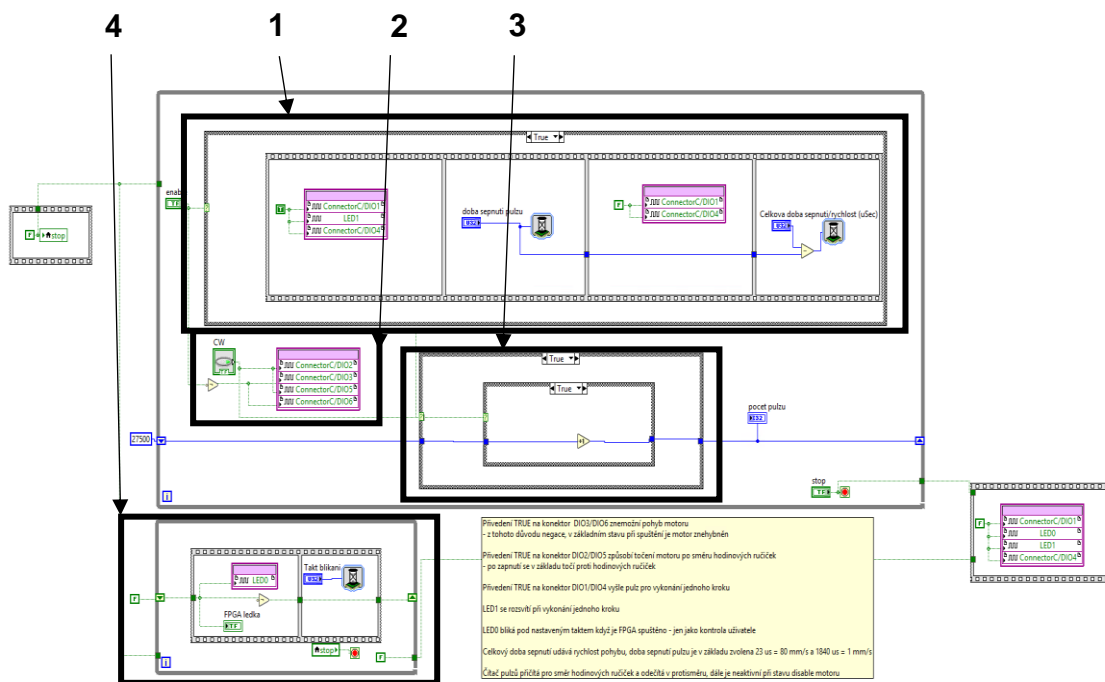
Schéma propojení MyRIO s moduly a lineárními aktuátory:



Obrázek 57: Schéma zapojení MyRIO s moduly TB 6560 a lineárními aktuátory.

5.6.1 FPGA modul

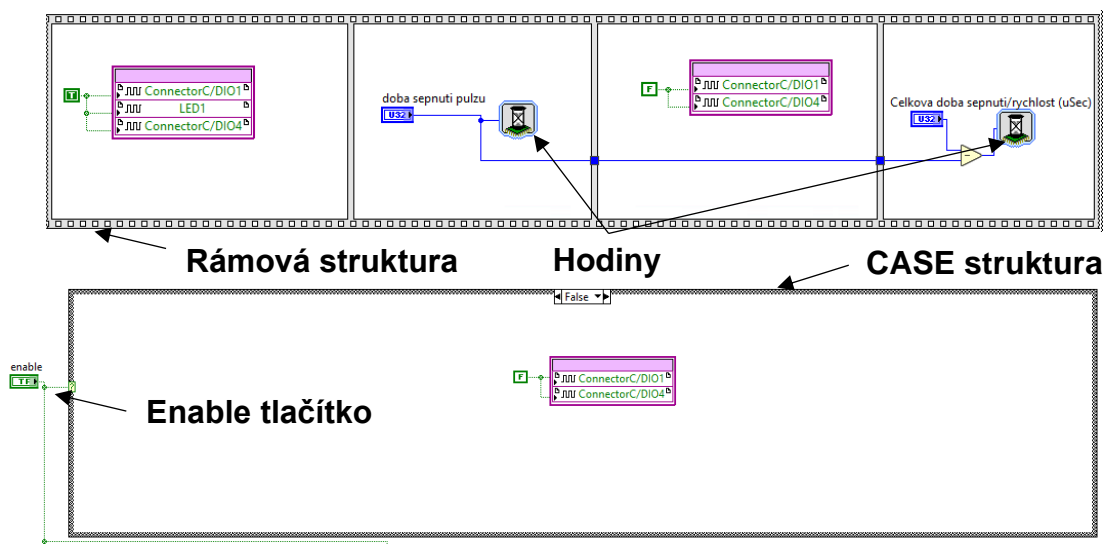
Hltič obsahuje dva paralelně spojené lineární aktuátory. Každý z nich má svůj vlastní modulový ovladač s označením TB 6560 v2.0. Logika propojení jednotlivých komponent je znázorněna na obr. 57. Z důvodu paralelně zapojených komponent jsou v FPGA modulu všechny výstupy z MyRIO vstupující do ovladačů zdvojeny. Celý FPGA program je na obr. 58.



Obrázek 58: FPGA modul.

1 Vysílání pulzů pohybu

K vysílání pulzů, ovládající krokový přírůstek motoru, slouží MyRIO výstupy s označením DIO1/DIO4. Na obr. 59 lze vidět dva stavy struktury CASE. První stav FALSE znemožňuje přivedení pulzu na výstupy DIO1/DIO4. Stav TRUE je spuštěn, pokud je umožněn chod motoru (zapnutí tlačítka enable). V tomto stavu se nachází rámová struktura, zjišťující chronologický postup logické operace. Zapnutí pulzu výstupů DIO1/DIO4 probíhá na 23 μs, tato doba je zajištěna konstantou prvních hodin nacházejících se v druhém okénku rámu. Po této době dojde k vypnutí pulzu na dobu určenou v posledním okénku rámu. Na celkové době proběhnutí smyčky záleží rychlost posuvu.

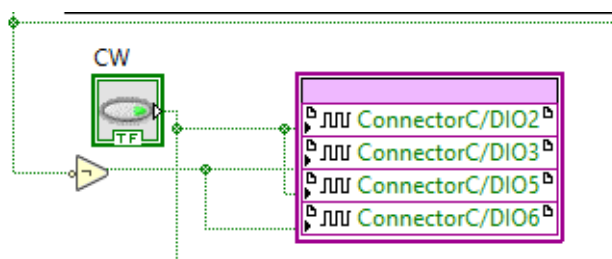


Obrázek 59: CASE struktura k ovládání pulzů motoru.

2 Směr otáčení a umožnění chodu

K určení směru otáčení motoru (směru výsuvu) slouží výstupy DIO2/DIO5. V základním stavu se motor otáčí proti směru hodinových ručiček, což odpovídá zasouvání hřídele aktuátoru. Pokud je na tyto konektory přiveden pulz (TRUE tlačítka CW), dojde k výsuvu aktuátorů.

Konektory DIO3/DIO6 zamezí chod motoru, pokud je na ně přiveden pulz. Z tohoto důvodu je před nimi negace tlačítka enable, ovládající více popsanou strukturu CASE.

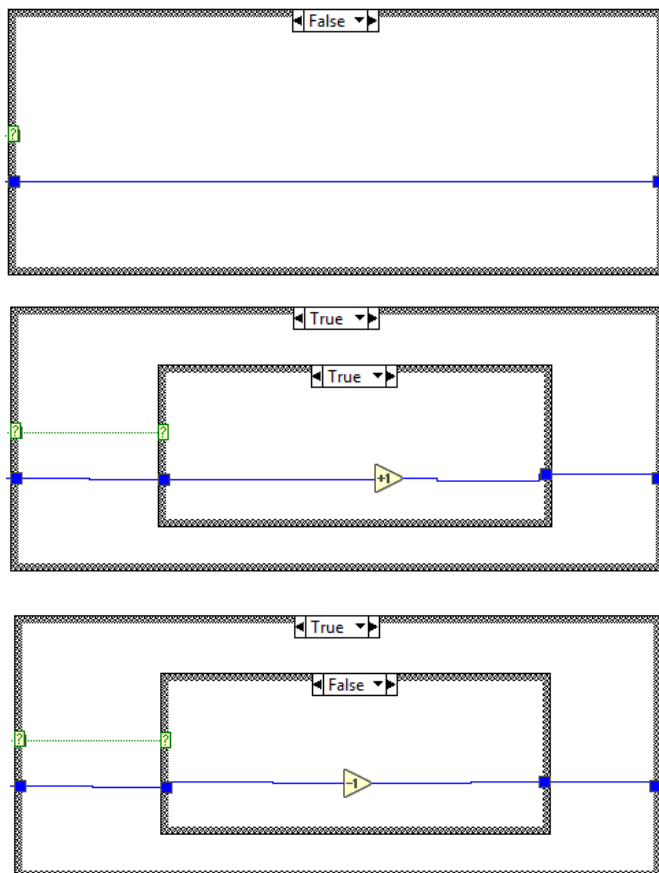


Obrázek 60: Konektory pro ovládání směru otáčení a znemožnění chodu motoru.

3 Čítač pulzů motoru

Aby bylo možné určit, v jaké poloze se právě aktuátory nachází, bylo nutné vytvořit čítač pulzů polohy. Ten tvoří dvě struktury CASE. První umožní zápis pulzů, pokud je umožněn pohyb motoru. Druhá, pokud je pohyb umožněn, přičte

pulz po proběhnutí jedné smyčky pro směr výsuvu aktuátorů. Pro druhý směr pohybu je pulz odečítán.



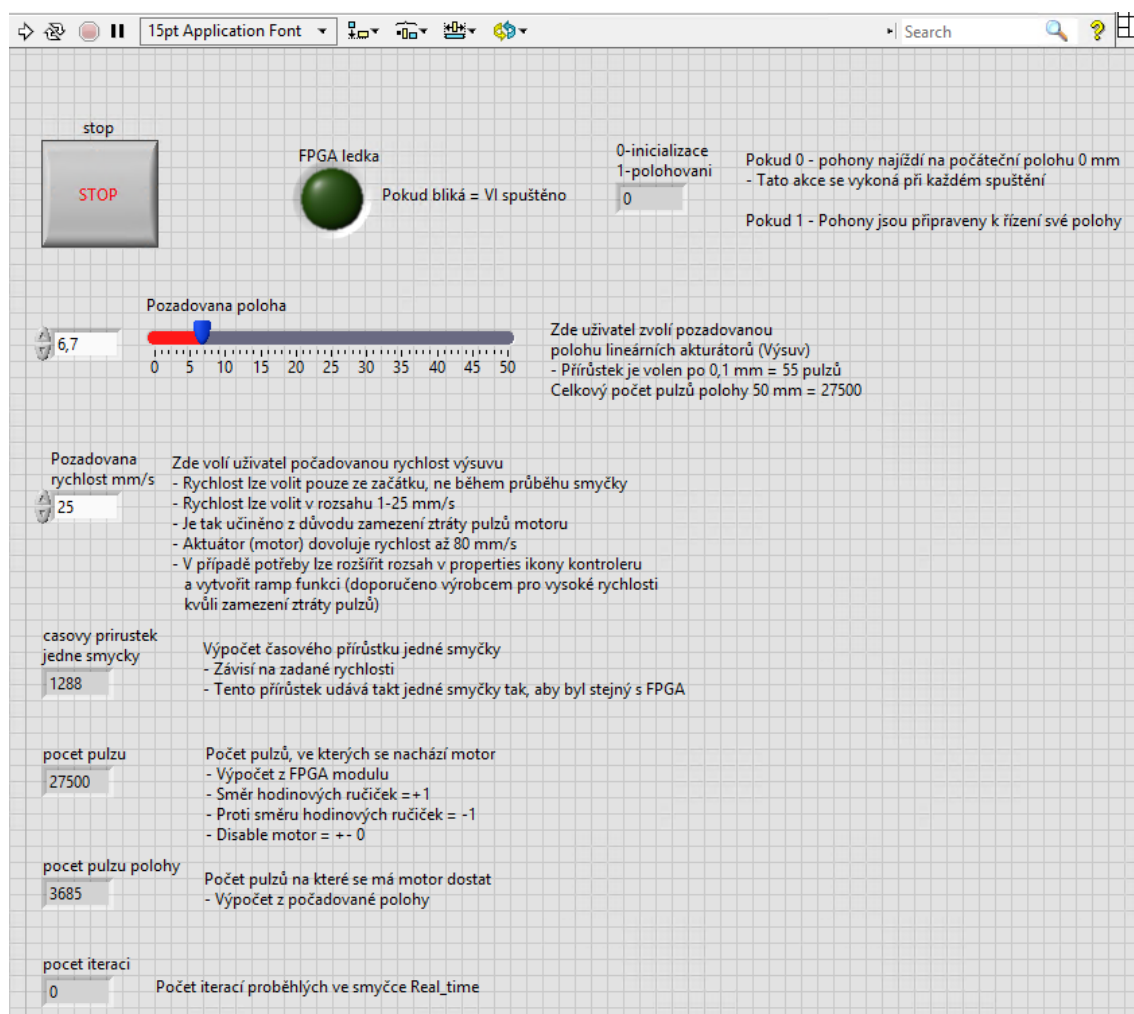
Obrázek 61: Čítač pulzů polohy.

4 Uživatelská LED

Uživatelská LED bliká při spuštění chodu a slouží pouze k vizuální kontrole na MyRIO. Její takt si uživatel může pro různé stavy v Real-Time modulu měnit.

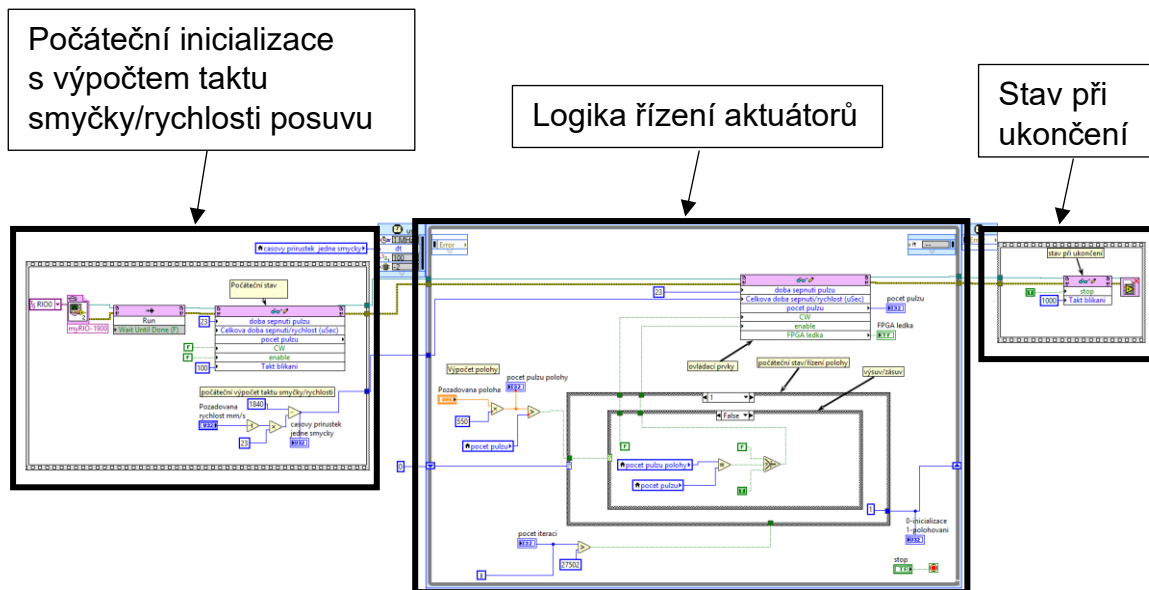
5.6.2 Real-Time modul

Na obr. 62 je zobrazen ovládací panel modulu Real-Time. Nachází se na něm tlačítko STOP, které po zmáčknutí přeruší veškeré procesy. Uživatel si zde volí požadovanou rychlost výsuvu a polohu. Polohu 0-50 mm volí uživatel šoupátkem, které je možné zaměnit za ovládací prvek z výstupu např. PLC propojeným s daty o výsuvu smykadla z řídicího systému stroje. Dále se na panelu nachází informace, zda již došlo k počáteční inicializaci polohy, s jakým časovým přírůstkem je ovládána řídicí smyčka a počet nastavených/dosáhnutých pulzů polohy.



Obrázek 62: Ovládací panel Real-Time modulu.

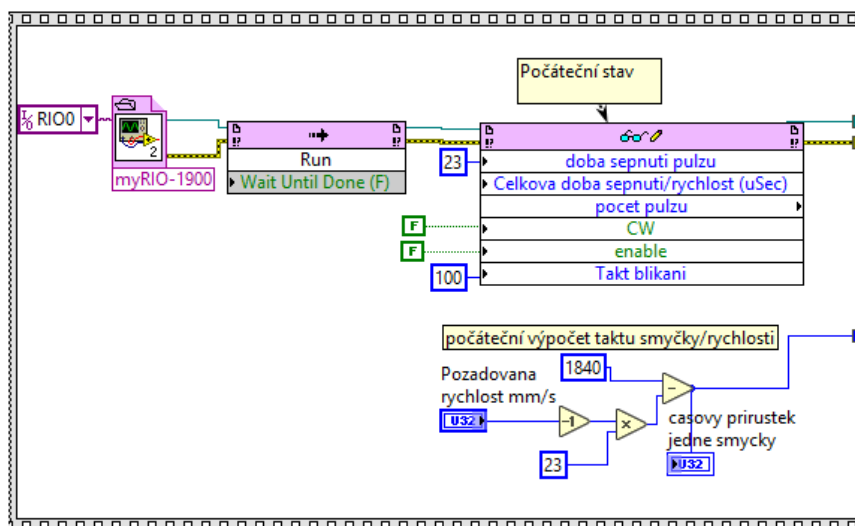
Na obr. 63 se nachází ukázka celého Real-Time modulu. Ten se skládá ze tří částí. První je počáteční inicializace s výpočtem taktu smyčky. Druhá obsahuje příslušnou logiku ovládání pohonů. Třetí odpovídá stavu po ukončení řízeného pohybu.



Obrázek 63: Real time modul s logikou řízení.

1 Počáteční inicializace

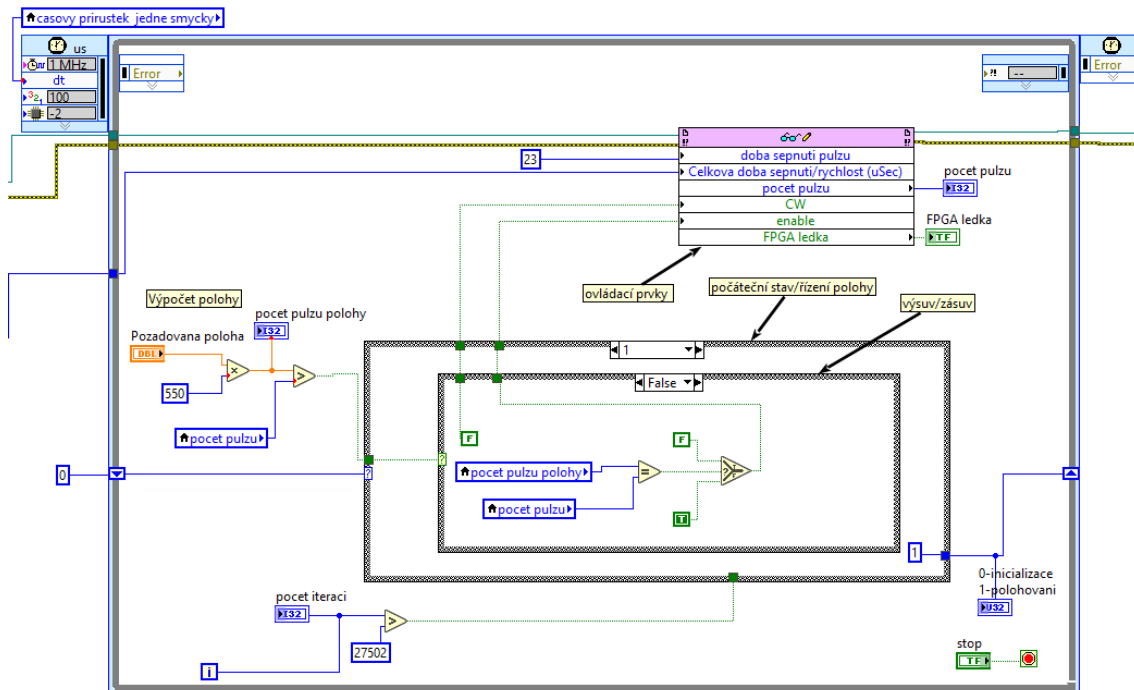
V počáteční inicializaci jsou definované stavy jednotlivých výstupu po spuštění. Nachází se zde také výpočet rychlosti. Rychlost výsuvu je závislá na taktu opakování jedné WHILE smyčky. Takt $23 \mu s$ odpovídá rychlosti výsuvu 80 mm/s a $1840 \mu s$ rychlosti 1 mm/s . Výpočet časového přírůstku je přes lokální proměnnou spojen s časovým přírůstkem hlavní WHILE smyčky. Rychlost výsuvu je možné měnit pouze před začátkem samotného řízení.



Obrázek 64: Počáteční inicializace s výpočtem taktu smyčky WHILE.

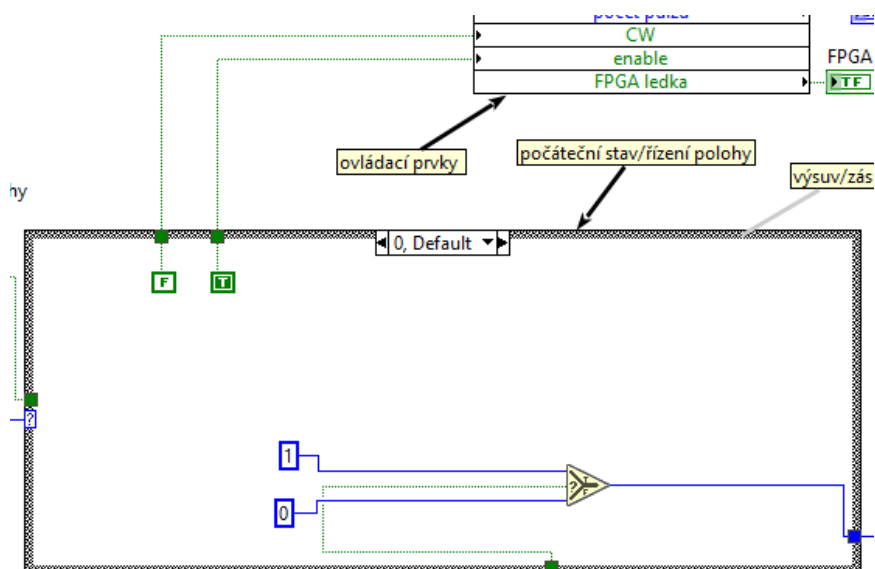
2 Logika řízení

Na obr. 65 se nachází hlavní WHILE smyčka, ve které probíhají veškeré logické operace spjaté s řízením polohy. Výpočet polohy je spjatý s počtem vyslaných pulzů do krokového motoru. Polohu je možné volit s přírůstkem 0,1 mm, kterému odpovídá 55 pulzů.



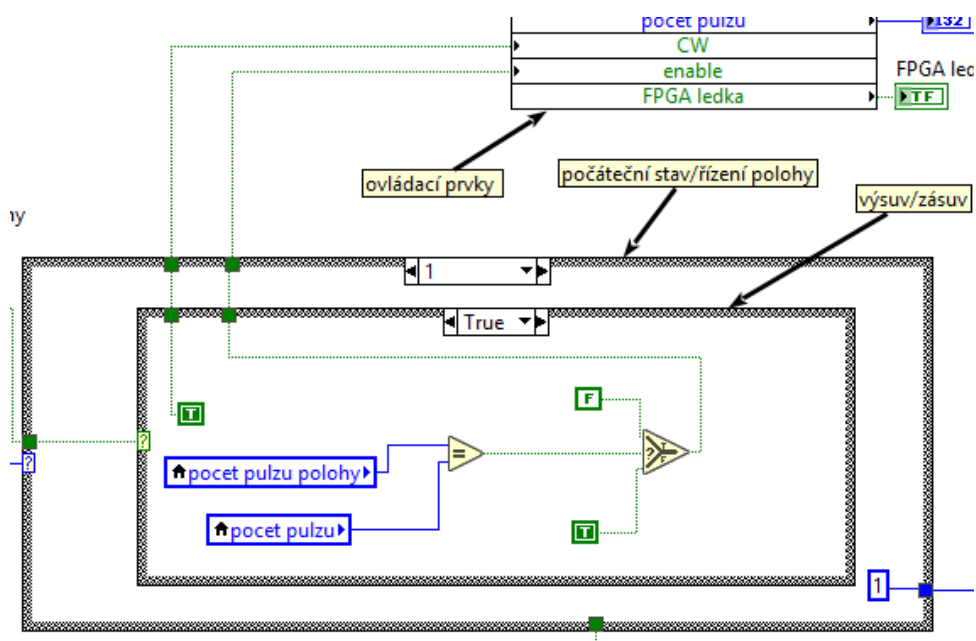
Obrázek 65: Hlavní WHILE smyčka.

Jelikož zvolené lineární aktuátory nemají zpětnovazební snímač polohy, je nutné po spuštění zajistit počáteční najetí na nulovou polohu výsuvu. K tomu slouží CASE struktura z obr. 66. Počáteční najetí je provedeno vysláním 27500 pulzů (kroků) motoru ve směru zasunutí. Rozmezí 0-27500 pulzů motoru odpovídá rozsahu výsuvu 0-50 mm. Po uplynutí zmíněného počtu pulzů se struktura CASE automaticky přepne do stavu 1, ve kterém již dochází k samotnému řízení polohy.



Obrázek 66: CASE struktura s počáteční inicializací polohy.

O řízení polohy se stará podřazená CASE struktura té výše zmíněné. Po zadání požadované polohy se vypočítá počet odpovídajících pulzů. Pokud je tento počet vyšší než ten, ve kterém se aktuátory nacházejí, dojde k přepnutí do stavu TRUE z obr. 67 a následnému výsuvu. Po dosažení výsuvu se zamezí chodu motoru (FALSE tlačítka enable). Pokud je počet pulzů nižší, struktura CASE se přepne do stavu FALSE z obr. 68 a dojde k zasouvání, které se opět zastaví po dosažení polohy.



Obrázek 67: Stav TRUE CASE struktury řídící vysouvání.

5.7 Kontrolní výpočty

Maximální dovolené hodnoty jednotlivých veličin užitých při výpočtech jsou vždy voleny s určitou bezpečností. Bezpečnost je volena z důvodu možného překročení vypočtených hodnot za působení nepředvídatelných jevů. Vypočtené hodnoty by tedy neměly být při užívání zařízení překročeny, přestože materiál reálně snese vyšší zatížení.

5.7.1 Kontrola odtrhovacího přípravku

Dovolené napětí na stříh

Napětí ve stříhu je dle materiálové charakteristiky oceli $11\ 600\ \tau_s = 80\ MPa$. Bezpečnostní koeficient čepu je z důvodu statické síly volen $k_\zeta = 1,5$.

$$\tau_{DS} = \frac{\tau_s}{k_\zeta} = \frac{80}{1,5} = 53,3\ MPa \quad (5.19)$$

Kde: τ_s [Mpa] - napětí ve stříhu

τ_{DS} [MPa] - dovolené napětí ve stříhu

k_ζ [-] - bezpečnostní koeficient čepu

Kontrola čepu odtrhovacího mechanismu na stříh

Při výpočtu je počítáno se stavem, kdy dojde k utahování pouze jednoho šroubu mechanismu, čímž bude veškerá síla magnetů obou zařízení působit na jeden čep.

$$\tau_{tS} = \frac{F}{\frac{\pi \cdot d_k^2}{4}} = \frac{900}{\frac{\pi \cdot 8^2}{4}} = 45,84\ MPa \quad (5.20)$$

$$\tau_{tS} \leq \tau_{DS} \rightarrow \text{vyhovuje}$$

Kde: F [N] - síla působící na jeden čep

d_k [mm] - průměr čepu

τ_{tS} [MPa] - vypočtené napětí ve stříhu

Kontrola hliníkové nádoby na otláčení od čepu

Jelikož má materiál hliníkové nádoby AW EN 7075 horší vlastnosti než materiál čepu 11 600, poslouží ke kontrole výpočtu otláčení pouze nádoba. Dovolенý tlak na otláčení slitiny hliníku je $p_D = 35 \text{ MPa}$.

$$p_k = \frac{F}{d_k \cdot t} = \frac{900}{8 \cdot 11} = 10,23 \text{ MPa} \quad (5.21)$$

$$p_k \leq p_D \rightarrow \text{vyhovuje}$$

Kde: p_D [MPa] - dovolený tlak

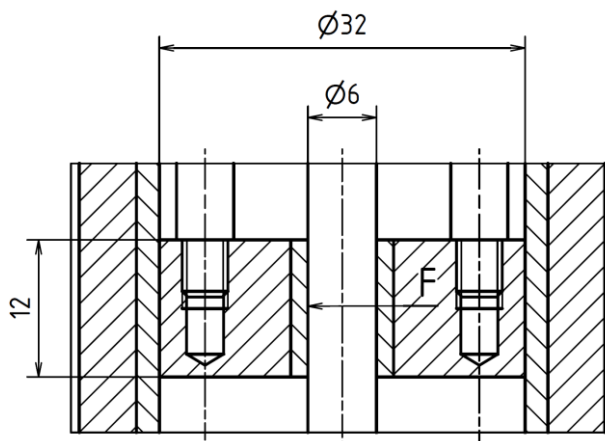
p_k [MPa] - kontaktní tlak spoje

t [mm] - kontaktní délka čepu v nádobě

5.7.2 Kontrola kluzného vedení

Výpočet kluzného prvku pružiny na otláčení

Jelikož je důležité, aby kluzné prvky plnily správně svojí funkci ve smyslu zachování svých geometrických tolerancí uložení a homogenity povrchu, je u nich třeba dopočítat otláčení v závislosti na maximální možné působící síle od pružiny.



Jako kluzný element lineárního vedení a výztuhy je zvolen cínový bronz s označením dle ČSN 42 3123. Maximálně přípustný tlak na otláčení tohoto materiálu je 12 MPa. S ohledem na dynamické namáhání je zvolena bezpečnost 2.

$$p_D = \frac{p_{max}}{k_l} = \frac{12}{2} = 6 \text{ MPa} \quad (5.22)$$

$$p_k = \frac{F}{d_p \cdot t} = \frac{48,1}{6 \cdot 12} = 0,669 \text{ MPa} \quad (5.23)$$

$$p_k \leq p_D \rightarrow \text{vyhovuje}$$

Kde: p_D [MPa] - dovolený tlak

p_{max} [MPa] - maximálně přípustný tlak materiálu

k_l [-] - bezpečnostní součinitel ložiska

p_p [MPa] - kontaktní tlak kluzného elementu pružiny

F [N] - vyvíjená síla od pružiny

d_p [mm] - průměr pružiny

t [mm] - výška výztuhy

Výpočet kluzného prvku výztuhy na otláčení

$$p_v = \frac{F}{d_v \cdot t} = \frac{48,1}{32 \cdot 12} = 0,125 \text{ MPa} \quad (5.24)$$

$$p_v \leq p_D \rightarrow \text{vyhovuje}$$

Kde: p_v [MPa] - kontaktní tlak kluzného elementu pružiny

d_v [mm] - průměr výztuhy

5.7.3 Kontrola přitlačné síly magnetů

Statické namáhání ve smyku

Hltič je na smyk staticky namáhán od vlastní tíhy ve vertikálním směru. Tíhová síla je:

$$F_v = m_h \cdot g = 3,3 \cdot 9,81 = 32,37 \text{ N} \quad (5.25)$$

Síla vyvolaná magnety kolmo k povrchu:

$$F_m = 2 \cdot F_h + 4 \cdot F_s = 2 \cdot 100 + 4 \cdot 62 = 448 \text{ N} \quad (5.26)$$

Dle experimentálních testů dodavatele magnetů, společnosti Unimagnet, lze počítat se ztrátou síly magnetů pro smykové namáhání až o 80 %. To odpovídá hodnotě součinitele tření $f=0,2$.

Třecí síla:

$$F_t = \frac{F_m \cdot f}{k} = \frac{448 \cdot 0,2}{1,5} = 59,73 \text{ N} \quad (5.27)$$

$$F_v \leq F_t \rightarrow \text{vyhovuje}$$

- Kde: F_v [N] - tíhová síla vyvolaná ve vertikálním směru
 m_h [kg] - hmotnost hltiče
 g [m/s^2] - gravitační zrychlení
 F_m [N] - normálová síla magnetů
 F_h [N] - síla magnetických úchytů se závitovým čepem
 F_s [N] - síla vlepených magnetů
 F_t [N] - třecí síla magnetů
 f [-] - součinitel tření
 k [-] - bezpečnostní koeficient

Dynamické namáhání ve smyku

Jako nejvíce zatěžující dynamické namáhání lze pro smyk uvažovat zasunutí smykadla v ose Z. Lze tedy spočítat při jakém zrychlení nebo zpomalení vysunutí dojde k překonání třecí síly:

$$a_v = \frac{F_t - F_v}{m_h} = \frac{59,73 - 33,37}{3,3} = 7,99 \text{ m/s}^2 \quad (5.28)$$

Je také nutné vypočítat maximální možné zrychlení vibrací pro stav, kdy budou hltiče umístěné po obvodu smykadla a vibrace budou působit na hltič v příčném směru:

$$a_p = \frac{F_t}{m_h} = \frac{59,73}{3,3} = 18,1 \text{ m/s}^2 \quad (5.29)$$

Kde: a_v [m/s²]- maximální zrychlení osy Z při zasouvání smykadla

a_p [m/s²]- maximální zrychlení příčně působících vibrací

Dynamické namáhání v tahu

Nyní zbývá dopočítat jakou hodnotu zrychlení vibrací, působících v kolmo na hltič, je možné připustit:

$$a_h = \frac{F_m}{m_h \cdot k} = \frac{448}{3,3 \cdot 1,5} = 90,5 \text{ m/s}^2 \quad (5.30)$$

Kde: a_h [m/s²]- maximální hodnota zrychlení vibrací

6 Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout modulárně řazený pasivní hltič vibrací, dovolující řízené přeladění svých vlastních frekvencí. Zařízení mělo svým konstrukčním provedením dovolovat průmyslové užití, zejména v oblasti tlumení vibrací dílčích částí obráběcích strojů.

V úvodu rešeršní části práce byly představeny základní metody, kterými lze potlačovat nežádoucí vibrace. Na to navazuje nejobsáhlejší část, pojednávající o pasivním tlumení vibrací. Byly v ní vysvětleny rozdílné principy vzniku tlumicí síly, vhodné pro tlumení kmitající hmoty a byla představena konkrétní zařízení, která tento princip využívají. U nich byla diskutována technická řešení provedení konstrukce a způsoby, jakými lze měnit jejich vlastní frekvence. Závěr rešerše obsahuje shrnutí. Jako nejvhodnější pružné elementy vyšly planžety a tyče. Mezi tlumiči to byly kapalinový, viskoelastický a elektromagnetický.

Z rešerše získané poznatky a zkušenosti posloužily k vytvoření čtyř koncepčních návrhů. Ty se lišily tvarem, užitým pružným elementem a hlavně mechanismem, ladícím úpravou aktivní délky pružin vlastní frekvence. Vybraný koncepční návrh s lineárními aktuátory byl dále vylepšen a zkonstruován na míru zadanému laboratornímu nosníku, včetně možnosti modulárního řazení do větší sestavy. Konstrukční návrh proběhl za podpory návrhových a kontrolních výpočtů, včetně výpočtu možných limitních sil a zrychlení. Pro spojení hlcená soustava – hltič byl v programu Matlab vytvořen výpočtový model, sloužící k verifikaci a výpočtu parametrů hltiče. Z tohoto modelu bylo patrné zatlumení první vlastní frekvence laboratorního nosníku na 8,5 % původní hodnoty a 15,9 % původní hodnoty u druhé vlastní frekvence. V neposlední řadě se práce zabývala návrhem řízení užitých pohonů, který byl proveden pomocí programu Labview a fyzicky verifikován jako plně funkční.

Jednotlivé dílčí úlohy práce plně splnily požadavky plynoucí ze zadání. Závěrem je nutno podotknout, že je u vytvořeného hltiče prostor pro další úpravy a rozvoj. Jeden z dalších kroků je parametrické propojení výpočetního programu s 3D modelem. To by dalo prostor pro vznik konfigurátoru s automatickou úpravou dílčích celků dle požadovaných vlastností tlumené soustavy.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma dynamického hltiče vibrací.[9].....	16
Obrázek 2: Možné uspořádání magnetů a vodivého materiálu. [10].....	17
Obrázek 3: Schéma laděného hltiče s jedním stupněm volnosti. [11]	18
<i>Obrázek 4: Přeladitelný hltič s ukázkou možných stupňů volnosti a umístění magnetů. [12]</i>	<i>19</i>
Obrázek 5: Tlumení kmitů nosníku pomocí EMSD [13].....	20
Obrázek 6: Závislost poměrné deformace a napětí při jednom cyklu harmonickém namáhání. [14].....	20
<i>Obrázek 7: Použití TVS k tlumení vibrací obrobku při frézování [15]</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 8: Vícehmotový, sériově zapojený tlumič vibrací. [16]</i>	<i>22</i>
Obrázek 9: Čtyřhmotový pasivní hltič kmitů pro smykadla obráběcích strojů a jeho součásti. [18]	23
Obrázek 10: Konfigurace tlumiče jednohmotového (vlevo) a dvouhmotového (vpravo). [19].....	24
Obrázek 11: Konkrétní užití přeladitelného hltiče na obráběném dílci a simulace jejich pohybů. [20]	25
Obrázek 12: Celá sestava hltiče s grafem závislosti natočení na frekvenci. [20]	26
Obrázek 13: Schéma hltiče s hlavními komponenty (vlevo) a jeho systém přeladění (vpravo). [21]	27
Obrázek 14: Trojhmotový hltič a detail mechanismu přeladění. [22].....	28
Obrázek 15: Hltič s přeladitelnou tuhostí listových pružin nebo tyčí klikovým mechanismem. [23].....	29
Obrázek 16: Odporová síla při obtékání tělesa tekutinou a zjednodušené schéma tlumiče odpružených hmot. [26], [25].....	30
Obrázek 17: Fluidně přeladitelný dynamický hltič vibrací a jeho jednotlivé součásti. [7].....	31
Obrázek 18: Laděný absolutní tlumič vibrací a jeho upevnění na frézovací hlavě. [27].....	32
Obrázek 19: Řez tlumičem a jeho umístění ve voze. [28]	33

Obrázek 20: Konstrukční uspořádání tlumící dvě osy (vlevo) [29] a jednu osu (vpravo). [30].....	34
Obrázek 21: Částicový tlumič (vlevo) [32] a schéma jeho principu (vpravo). [33]	34
Obrázek 22: Třecí tlumič a jeho použití u staveb. [34]	35
Obrázek 23: 1. Výchozí pozice, 2. prodloužení, 3. zkrácení. [34].....	35
Obrázek 24: Schéma tlumiče a jeho aplikace na upínacím prostředku. [8]	36
Obrázek 25: Kompaktní hltič vibrací a jeho jednotlivé části. [35], [36].....	37
Obrázek 26: Kyvadlový tlumič výškové budovy s tlumičem hmoty a jeho schéma. [39], [40].....	38
<i>Obrázek 27: Schéma adaptivního kyvadlového tlumiče a detail ladícího rámu. [41].....</i>	39
Obrázek 28: 1. koncept s rotačně posuvným mechanismem.	44
Obrázek 29: 2. koncept s rolničkovým vedením a snadno vyměnitelným pružným elementem.....	46
Obrázek 30: 3. koncept s lineárními aktuátory.	48
Obrázek 31: 4. koncept s paralelně řazenými pružnými elementy.	50
Obrázek 32: Zadaný dutý profil s obdélníkovým průřezem. [42]	53
Obrázek 33: Upevnění nosníku v laboratoři při fyzickém měření.	54
Obrázek 34: Model nosníku a hltiče v prostředí Simscape Multibody.	55
Obrázek 35: Indexy jednotlivých prvků hltičů umístěných na nosníku v modelu Simscape Multibody.	56
Obrázek 36: Porovnání získaného frekvenčního přenosu z měření vs. modelu.	57
Obrázek 37: Nelineární závislost frekvencí 1. stavu vyložení na parazitní hmotě.	58
Obrázek 38: Vzniklý hltič dle požadovaných vlastností.	59
Obrázek 39: Vedení výztuhy upravující aktivní délku pružiny.	61
Obrázek 40: Upínka vodících tyčí a lineárních akturátorů.	62
Obrázek 41: Umístění dvou druhů magnetů sloužících k uchycení na tlumené soustavě.....	63
Obrázek 42: Kryt hltiče s panelovým konektorem a pryžovými deskami.	64
Obrázek 43: Umístění magnetů (vlevo) a mezera určená k vyplnění silikonem (vpravo).	64

Obrázek 44: Hltič s tlumičem na principu vířivých proudů.....	65
Obrázek 45: Modulární spojení dvou hltičů.	66
Obrázek 46: Modulárně spojený hltič na nosníku (vlevo) a upínací přípravek v zadní části hltiče (vpravo).....	67
Obrázek 47: Přípravek na odtržení (vlevo) a upínací přípravky na čele hltiče (vpravo).....	67
Obrázek 48: Bode diagram nosníku po připojení pasivních hmot.	69
Obrázek 49: Frekvenční přenos v absolutních hodnotách amplitudy.	69
Obrázek 50: Schéma profilu tyče k výpočtovým vztahům.	70
<i>Obrázek 51: Vetknutý nosník reprezentující pružný element.</i>	<i>71</i>
Obrázek 52: Průhyb a natočení aktivní hmoty v nádobě.....	73
Obrázek 53: Ukázka principu zatlumení amplitud vlastních frekvencí.....	75
Obrázek 54: Zatlumení 1. vlastní frekvence po připojení tlumeného hltiče.	76
Obrázek 55: Zatlumení 2. vlastní frekvence po připojení tlumeného hltiče.	76
Obrázek 56: Odezva na skok před a po aktivaci hltiče.....	77
Obrázek 57: Schéma zapojení MyRIO s moduly TB 6560 a lineárními aktuátory.	78
Obrázek 58: FPGA modul.	79
Obrázek 59: CASE struktura k ovládání pulzů motoru.	80
Obrázek 60: Konektory pro ovládání směru otáčení a znemožnění chodu motoru.....	80
Obrázek 61: Čítač pulzů polohy.	81
Obrázek 62: Ovládací panel Real-Time modulu.....	82
Obrázek 63: Real time modul s logikou řízení.....	83
Obrázek 64: Počáteční inicializace s výpočtem taktu smyčky WHILE.	83
Obrázek 65: Hlavní WHILE smyčka.	84
Obrázek 66: CASE struktura s počáteční inicializací polohy.....	85
Obrázek 67: Stav TRUE CASE struktury řídící vysouvání.	85
Obrázek 68: Stav FALSE CASE struktury řídící zasouvání.	86
Obrázek 69: Stav po ukončení řízení.....	86



Seznam tabulek

Tabulka 1: Výsledný přehled zhodnocených konstrukčních prvků hltiče.....	43
Tabulka 2: Srovnání jednotlivých konceptů.....	51
Tabulka 3: Potřebné parametry nosníku.....	52



Seznam použitého softwaru

- Microsoft Word 2016
- Microsoft Excel 2016
- MATLAB R2020a
- Autodesk Inventor Profesional 2020
- NI LabVIEW 2019
- Zotero

Seznam použité literatury

- [1] Ing. Jan Vetiška, „ANALÝZA STABILITY ŘEZNÉHO PROCESU OBRÁBĚCÍHO STROJE VZHLEDEM K SAMOBUZENÉMU KMITÁNÍ“, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Brno. [Online]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=60499
- [2] S. info@sabre.cz www sabre cz, e-mail:, „Jak potlačovat vibrace obráběcích strojů | Technický týdeník“, srp. 2013, Viděno: bře. 19, 2021. [Online]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/jak-potlacovat-vibrace-obrabcich-stroju_21946.html
- [3] Ing. Zbyněk Šika, Ph.D., „Aktivní a poloaktivní snižování mechanického kmitání strojů“, České vysoké učení technické v Praze, Praha, 2004.
- [4] „Vibration damping: What’s the difference between passive and active?“ <https://www.motioncontroltips.com/vibration-damping-whats-the-difference-between-passive-and-active-methods/> (viděno bře. 20, 2021).
- [5] V. K. Bankar a A. S. Aradhye, „A Review on Active, Semi-active and Passive Vibration Damping“, *Int. J. Curr. Eng. Technol.*, roč. 6, č. 6, s. 5, 2016.
- [6] V. Steffen Jr, D. A. Rade, a D. J. Inman, „Using passive techniques for vibration damping in mechanical systems“, *J. Braz. Soc. Mech. Sci.*, roč. 22, č. 3, s. 411–421, 2000, doi: 10.1590/S0100-73862000000300004.
- [7] Ing. Štěpán Fiala, Ing. Lukáš Novotný, a Ing. Vlastimil Hlavatý, „Fluidní laditelný pasivní dynamický hltič vibrací“, 32 099 [Online]. Dostupné z: <https://isdv.upv.cz/doc/FullFiles/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0032/uv032099.pdf>
- [8] Y. Yang, W. Dai, a Q. Liu, „Design and implementation of two-degree-of-freedom tuned mass damper in milling vibration mitigation“, *J. Sound Vib.*, roč. 335, s. 78–88, led. 2015, doi: 10.1016/j.jsv.2014.09.032.
- [9] Z. Chen, H. Fang, Z. Han, a S. Sun, „Influence of bridge-based designed TMD on running trains“, *J. Vib. Control*, roč. 25, s. 107754631877302, kvě. 2018, doi: 10.1177/1077546318773022.
- [10] E. Diez-Jimenez, R. Rizzo, M.-J. Gómez-García, a E. Corral-Abad, „Review of Passive Electromagnetic Devices for Vibration Damping and

- Isolation", *Shock Vib.*, roč. 2019, s. e1250707, srp. 2019, doi: 10.1155/2019/1250707.
- [11] P. Paul, C. Ingale, a B. Bhattacharya, „Design of a vibration isolation system using eddy current damper“, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, roč. 228, s. 664–675, bře. 2013, doi: 10.1177/0954406213489408.
- [12] F. Meng, J. Wan, Y. Xia, Y. Ma, a J. Yu, „A Multi-Degree of Freedom Tuned Mass Damper Design for Vibration Mitigation of a Suspension Bridge“, *Appl. Sci.*, roč. 10, č. 2, Art. č. 2, led. 2020, doi: 10.3390/app10020457.
- [13] T. Cheng a I. Oh, „Vibration Suppression of Flexible Beam Using Electromagnetic Shunt Damper“, *IEEE Trans. Magn.*, roč. 45, č. 6, s. 2758–2761, čer. 2009, doi: 10.1109/TMAG.2009.2020549.
- [14] „Viskoelastická materiálů“. Universita Tomáše Bati ve Zlíně. Viděno: bře. 26, 2021. [Online]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/index.php?page=env_fyzika
- [15] A. Rashid a C. M. Nicolescu, „Design and implementation of tuned viscoelastic dampers for vibration control in milling“, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, roč. 48, č. 9, s. 1036–1053, čvc. 2008, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2007.12.013.
- [16] AGGARWAL TRILOK C, „Series vibration damper“, 3,559,512, úno. 02, 1971 [Online]. Dostupné z: <https://worldwide.espacenet.com/patent/my-espacenet>
- [17] Ondřej Fučík, „EXPERIMENTÁLNÍ URČENÍ TLUMENÍ NOSNÍKU“, Bakalářská práce, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Brno, 2019. [Online]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=192657
- [18] Ing. Petr Smrčka, Ing. Martin Machálka, a Petr Jaška, „Čtyřmotový pasivní hltič kmitů pro smýkadla obráběcích strojů“, 2014–69, srp. 12, 2015 [Online]. Dostupné z: https://isdv.upv.cz/doc/FullFiles/Applications/2014/PPVCZ2014_0069A3.pdf
- [19] Burt Dennis, Kohring Mark, Loretta Miles, a Mccalmont Paul, „Tuned damped absorber support“, 6,719,503 B1, dub. 13, 2004

- [20] Y. Yang, R. Xie, a Q. Liu, „Design of a passive damper with tunable stiffness and its application in thin-walled part milling”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, roč. 89, s. 1–8, dub. 2017, doi: 10.1007/s00170-016-9474-7.
- [21] X. Shui a S. Wang, „Investigation on a mechanical vibration absorber with tunable piecewise-linear stiffness”, *Mech. Syst. Signal Process.*, roč. 100, s. 330–343, úno. 2018, doi: 10.1016/j.ymssp.2017.05.046.
- [22] R. Mohammadi-Ghazi, A. K. Ghorbani-Tanha, a M. Rahimian, „Adaptive Configuration Tuned Mass Damper for Mitigation of Rotational Vibrations”, *J. Eng. Mech.*, roč. 138, č. 8, s. 934–944, srp. 2012, doi: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000400.
- [23] R. Mirsanei, A. Hajikhani, B. Peykari, a J. Hamedi, „Developing a New Design for Adaptive Tuned Dynamic Vibration Absorber (ATDVA) Based on Smart Slider-Crank Mechanism to Control of Undesirable Vibrations”, 2012. doi: 10.11159/IJMEM.2012.010.
- [24] „Odporová síla v tekutinách”, *Onlineschool.cz*. <https://onlineschool.cz/fyzika/odporova-sila/> (viděno dub. 24, 2021).
- [25] „Rozdíl mezi plynokapalinovým a kapalinovým tlumičem”, 2014. <https://www.mjauto.cz/rozdil-mezi-plynokapalinovym-a-kapalinovym-tlumicem> (viděno dub. 24, 2021).
- [26] „ELUC”, *Obtékání těles kapalinou*. <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1688> (viděno dub. 24, 2021).
- [27] „Laděný absolutní tlumič vibrací s nezatlumeným prvním stupněm”, 302 522, pro. 09, 2009 [Online]. Dostupné z: <https://isdv.upv.cz/doc/FullFiles/Patents/FullDocuments/302/302522.pdf>
- [28] „Mass Damper”, *formula 1 dictionary*. http://www.formula1-dictionary.net/mass_damper.html (viděno dub. 11, 2021).
- [29] L. Rozas, R. L. Boroschek, A. Tamburrino, a M. Rojas, „A bidirectional tuned liquid column damper for reducing the seismic response of buildings”, *Struct. Control Health Monit.*, roč. 23, č. 4, s. 621–640, 2016, doi: <https://doi.org/10.1002/stc.1784>.
- [30] M. Alkmim, M. Morais, a A. Fabro, „Vibration Reduction of Wind Turbines Using Tuned Liquid Column Damper Using Stochastic Analysis”, *J. Phys. Conf. Ser.*, roč. 744, řij. 2016, doi: 10.1088/1742-6596/744/1/012178.

- [31] Z. Lu, Z. Wang, S. F. Masri, a X. Lu, „Particle impact dampers: Past, present, and future", *Struct. Control Health Monit.*, roč. 25, č. 1, s. e2058, 2018, doi: <https://doi.org/10.1002/stc.2058>.
- [32] „Space Tech Expo USA: TopLine Granted Patent for Toroidal-Shaped Particle Impact Damper". <https://www.spacetechempo.com/resources/news-and-editorial/news-container/2019/05/21/topline-granted-patent-for-toroidal-shaped-particle-impact-damper/> (viděno bře. 26, 2021).
- [33] K. Mao, M. Y. Wang, Z. Xu, a T. Chen, „DEM simulation of particle damping", *Powder Technol.*, roč. 142, č. 2, s. 154–165, dub. 2004, doi: 10.1016/j.powtec.2004.04.031.
- [34] „MULTI-UNIT FRICTION DAMPERS", *Damptech | Earthquake Protection*, 2015. <https://www.damptech.com/dampers-for-buildings> (viděno bře. 30, 2021).
- [35] NASA, „Compact Vibration Damper", 8,672,107
- [36] Jason Pizzino, *Reduce machinery vibrations with a self-tuning mass damper I MAQ Academy, Session 3*, (2020). Viděno: bře. 20, 2021. [Online Video]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=XM61dakZ5nl>
- [37] L. Wang, W. Shi, a Y. Zhou, „Study on self-adjustable variable pendulum tuned mass damper", *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, roč. 28, č. 1, s. e1561, 2019, doi: <https://doi.org/10.1002/tal.1561>.
- [38] „Tuned Mass Damper Systems". Purdue university, 2002. [Online]. Dostupné z: https://engineering.purdue.edu/~ce573/Documents/Intro%20to%20Structural%20Motion%20Control_Chapter4.pdf
- [39] O. Akyürek, „Lateral and Torsional Seismic Vibration Control for Torsionally Irregular Buildings", Florida institute of technology, Florida, 2019. [Online]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/333149689_Lateral_and_Torsional_Seismic_Vibration_Control_for_Torsionally_Irregular_Buildings
- [40] „homework and exercises - What are the forces acting on a Pendulum Tuned Mass Damper?", *Physics Stack Exchange*, 2020. <https://physics.stackexchange.com/questions/149747/what-are-the-forces-acting-on-a-pendulum-tuned-mass-damper> (viděno dub. 19, 2021).



- [41] R. Lourenco, A. Roffel, a S. Narasimhan, „ADAPTIVE PENDULUM MASS DAMPER FOR THE CONTROL OF STRUCTURAL VIBRATIONS", Ontario, Canada, 2011, s. 10. Viděno: dub. 04, 2021. [Online]. Dostupné z: /paper/ADAPTIVE-PENDULUM-MASS-DAMPER-FOR-THE-CONTROL-OF-Lourenco-Roffel/67bd8d5c0d577fabeafd02566de99cf8279c071c
- [42] „Feron online - Profil dutý svařovaný černý s obdélníkovým průřezem, EN 10219,|rozměr|250x150x5". <https://online.ferona.cz/detail/33225/profil-duty-svarovany-cerny-s-obdelnikovym-prurezem-en-10219-rozmer-250x150x5> (viděno zář. 26, 2021).
- [43] F. Zdraveski a E. Donceva, „MATHEMATICAL MODEL OF DYNAMIC VIBRATION ABSORBER-RESPONSE PREDICTION AND REDUCTION", *Int. J. Eng.*, s. 6.

Seznam příloh

Textové přílohy

- Příloha 1 – Katalogový list lineárních aktuátorů Actuonix P8-Stepper
- Příloha 2 – Tabulka hodnot pulzů k řízení aktuátorů
- Příloha 3 – List s vlastnostmi materiálů kluzných ložisek

Výkresová dokumentace

- DP-1806-00 Výkres sestavy hltiče
- DP-1806-01 Výrobní výkres aktivní hmoty
- DP-1806-02 Výrobní výkres nádoby
- DP-1806-03 Výrobní výkres pružiny
- DP-1806-04 Výrobní výkres svařence tubusu a víka
- DP-1806-05 Výrobní výkres výztuhy
- DP-1806-06 Výrobní výkres víka tubusu
- DP-1806-07 Výrobní výkres plechu
- DP-1806-08 Výrobní výkres upínky vodicích tyčí
- DP-1806-09 Výrobní výkres upínky lineárních aktuátorů
- DP-1806-10 Výrobní výkres upínky modulárního spojení
- DP-1806-11 Výrobní výkres přípravku k odtržení magnetů

Elektronické přílohy (SD karta)

- Diplomová práce (.pdf)
- 3D modely sestav
- Výkresy
- Dokumentace komponent
- Programy



Příloha 1 - Katalogový list lineárních aktuátorů Actuonix P8-Stepper



P8- 50mm Stroke
Actual Size

Applications

- Robotics
- Optics
- Diagnostic Equipment
- Industrial Automation

All data on this sheet is provided for information purposes only and is subject to change. Purchase and use of Actuonix Actuators is subject to our terms and conditions as posted here:
<http://www.Actuonix.com/terms.asp>

Miniature Linear Motion Series · P8 STEPPER

Actuonix Motion Devices unique line of Miniature Linear Actuators enables a new generation of motion-enabled product designs, with capabilities that have never before been combined in a device of this size. These linear stepper actuators are a superior alternative to designing your own push/pull mechanisms.

The P8 stepper actuators are complete, self-contained linear motion devices. Several stroke length options allow these to fit a wide variety of applications.

The brushless stepper design makes the P8-ST one of our longest life actuators.

P8 Stepper Specifications					
Stroke Option	10mm	25mm	50mm	75mm	100mm
Mass	18g	20g	24g	28g	32g
Closed Length hole to hole	45mm	60mm	85mm	110mm	135mm
Maximum Side Load	≈ 0.10 *Maximum Force				
Gear Ratio	49:1		165:1		
Full Step Size	~0.006mm		~0.0018mm		
Backdrive Force	9N (no power)	> 30N (power applied)	25N (no power)	> 100N (power applied)	
Temperature Rise	80°C Max				
Input Voltage	0-4.2 VDC				
Max Current (per phase)	256mA				
Operating Temperature	-10°C to +40°C				
Audible Noise	< 40 dB @ 45cm low noise settings				
Ingress Protection	IP-54				
Mechanical Backlash	< 0.5mm				
Inductance (per phase)	4.5mH@1kHz				
Resistance (per phase)	15ohm				
Maximum Duty Cycle	100%				
Maximum Static Load	200N				

Basis of Operation

The P8 stepper is designed to push or pull a load axially along its full stroke length. The speed of travel is determined by the step frequency, and maximum force by the current applied. When power is removed the actuator will hold its position, unless the applied load exceeds the back drive force. Actuators should be tested in each specific application to determine their effective life under those loading conditions and environment.

Ordering

Small quantity orders can be placed directly online at www.Actuonix.com. Purchase orders, volume quotes, and custom order requests can be sent to sales@Actuonix.com. MOQ for custom strokes, cables or connectors is typically 500pcs. Each actuator ships with two mounting brackets and M3 mounting hardware. The cable length is approximately 300mm with actuator mating connector and bared leads.



Actuonix Motion Develoes Inc. 1 (206) 347-9684 Phone sales@actuonix.com
Unit 201-1753 Sean Heights 1 (888) 225-9198 Toll Free www.actuonix.com
Saanichton, BC Canada 1 (206) 347-9684 Fax
V8M 0B3

Model Selection

P8 stepper options are identified according to the following model numbering scheme:

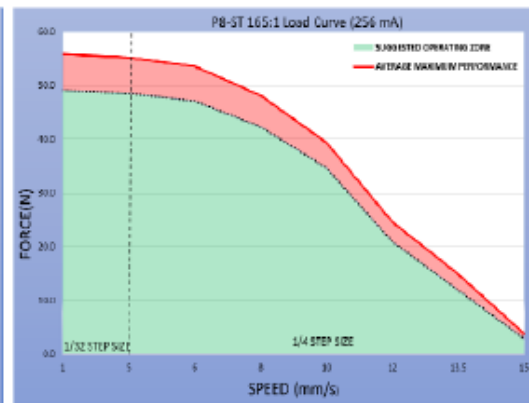
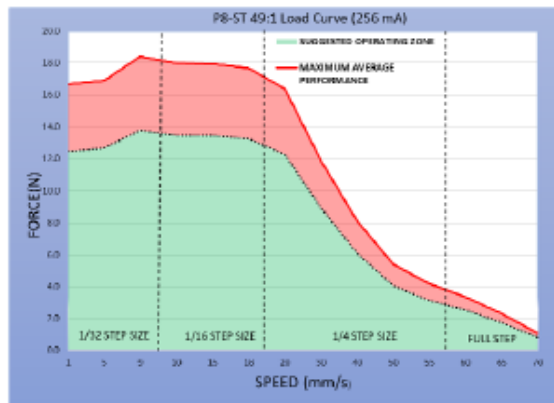
P8-SS-GG-VV-C

Feature	Options
SS: Stroke	10, 25, 50, 75, 100
GG: Gear reduction	49, 165
VV: Voltage	3
C: Controller	ST

P8 Connector Pin-out

WIRING:

A1 - ORANGE	- Motor Coil A +
A2 - RED	- Motor Coil A -
B1 - BROWN	- Motor Coil B +
B2 - BLACK	- Motor Coil B -



WARNING: As the applied force approaches the maximum force there is greater risk for missed steps to occur.

Driver Selection and Settings

The P8 stepper can be driven by most standard 4 wire stepper drivers. Actuonix offers the Tic T825 USB Multi-Interface Stepper Motor Controller. This driver is easily adjustable so that you can determine the best settings for your application. The controller supports six control interfaces: USB, TTL serial, I²C, analog voltage, quadrature encoder, and RC. Refer to the Pololu Tic T825 Datasheet for further driver specific details.

For reliable operation it is suggested that the applied force fall between 50%-75% of maximum force for a given speed.

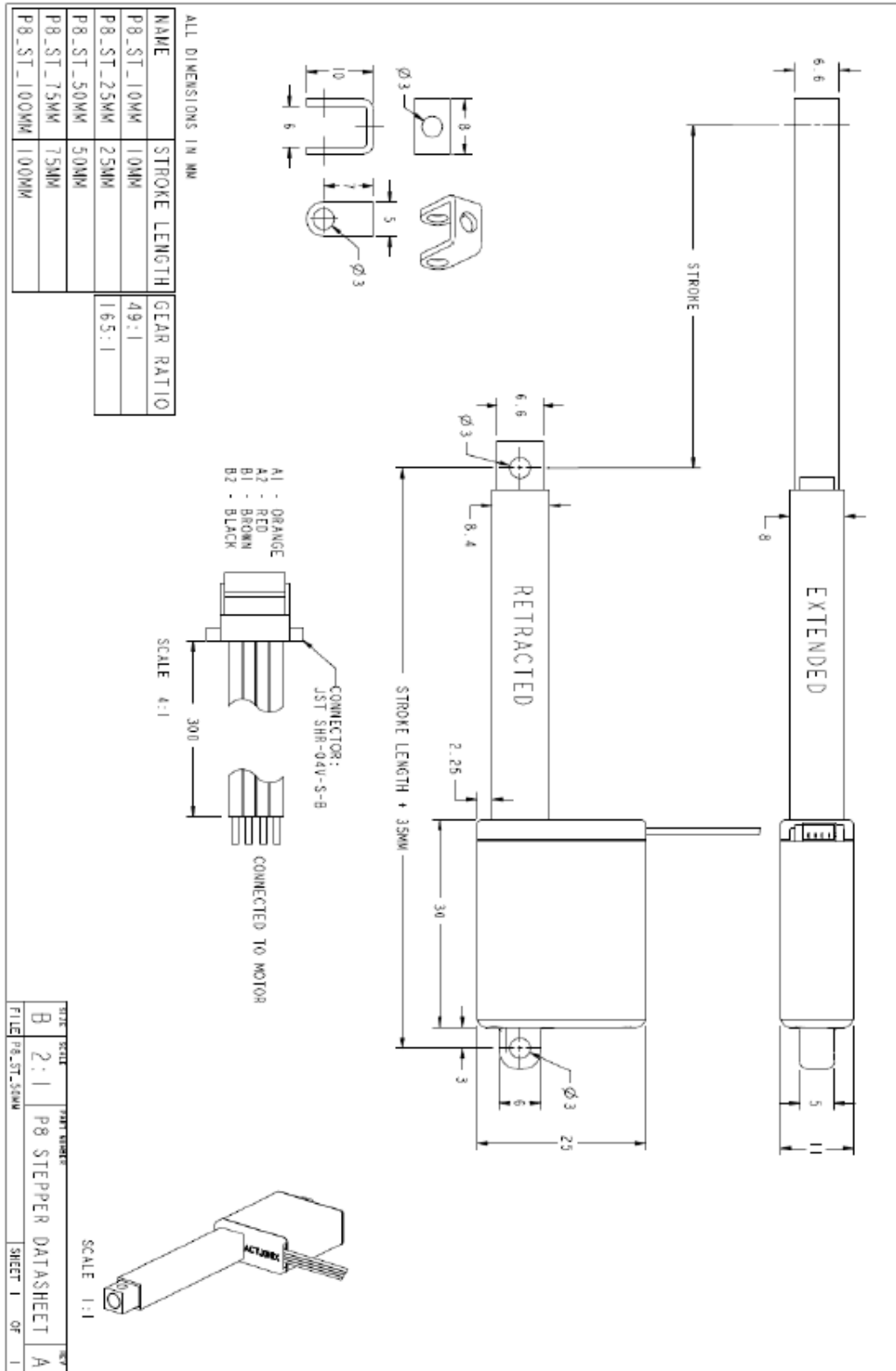
For quiet and smooth operation at low speeds we recommend a micro step setting. At medium speeds the full step setting (1), will provide an improvement in maximum load, while still minimizing audible noise. At high speeds we recommend Full Step with limited acceleration and deceleration (Ramp the frequency of your step control signal). Without adequate ramping, the actuator will not move. Note: Ramped Micro step settings can also be used at higher speeds, however this will reduce the maximum force.

To save power on light load applications, you can reduce the constant current setting below the rated value. For higher loads you can increase current beyond the rated value, however your duty cycle may need to be reduced to keep the motor within the acceptable temperature range. Note: Exceeding datasheet rated values can reduce motor life, and is not covered by our warranty.

Microstepping can be used to increase resolution, however there will be some non-linearity between microsteps, and reduced holding force.



Actuonix Motion Devices Inc. 1 (206) 347-9684 Phone sales@actuonix.com
Unit 201-1753 Sean Heights 1 (888) 225-9198 Toll Free www.actuonix.com
Saanichton, BC Canada 1 (206) 347-9684 Fax
V8M 0B3



Příloha 2 - Tabulka hodnot pulzů k řízení aktuátorů

165:1	Step Mode->	Full ≅0.0018mm	1/2 ≅0.00091mm	1/4 ≅0.00045mm	1/8 ≅0.00023mm	1/16 ≅0.00011mm	1/32 ≅0.000057mm
Stroke Length(mm)	Revolutions	steps	steps	steps	steps	steps	steps
10	1.67	5500	11000	22000	44000	88000	176000
25	4.17	13750	27500	55000	110000	220000	440000
50	8.33	27500	55000	110000	220000	440000	880000
75	12.50	41250	82500	165000	330000	660000	1320000
100	16.67	55000	110000	220000	440000	880000	1760000
Speed (mm/s), (steps/s)	speed (mm/s)	steps/	steps/s	steps/s	steps/s	steps/s	steps/s
	1	550	1100	2200	4400	8800	17600
	5	2750	5500	11000	22000	44000	88000
	10	5500	11000	22000	44000	88000	176000
	15	8250	16500	33000	66000	132000	264000
	30	16500	33000	66000	132000	264000	528000
	40	22000	44000	88000	176000	352000	704000
	50	27500	55000	110000	220000	440000	880000
	60	33000	66000	132000	264000	528000	1056000
	70	38500	77000	154000	308000	616000	1232000
80	44000	88000	176000	352000	704000	1408000	
Beyond Driver Limits (50000 maximum)							
Maximum Reliable Acceleration	steps/s^2	10000	20000	40000	80000	160000	320000

Table 3: 165:1 Gear Ratio P8-ST and Tic T825 Parameters

Příloha 3 – List s vlastnostmi materiálů kluzných ložisek
MATERIÁL NA KLUZNÁ LOŽISKA

Materiál	Maximální			Výrobek	Příklady užití
	zatížení, kp/cm ²	kluzná rychlost, m/s	teploty, °C		
Šedá litina	35	5	³⁾	odlitky	Obvyklý ložiskový kov na malá zatížení a dobré mazání
Cínová kompozice Sn–Sb 10 Cu6	240	¹⁾	120	výstelky	Parní a vodní turbíny, velké elektrické stroje, velká kliková ložiska
Olovená kompozice Pb–Sb15 Sn10	90	¹⁾	100	výstelky	Obvyklý ložiskový kov
Olověný bronz Cu–Pb29	350	¹⁾	²⁾	výstelky	Velmi namáhaná ložiska železničních vozů a naftových motorů
Cínoolověný bronz Cu–Sn10 Pb10 Ni	80	¹⁾	²⁾	výstelky	Ložiska pro vysoké tlaky, namáhaná rázy nebo nedokonale mazaná; válcov. stolice, drtiče, zdvihadla
Červený bronz Cu–Sn5 Pb5 Zn	105	¹⁾	²⁾	výstelky pouzdra pánve	Všeobecné použití, obráběcí stroje, čerpadla
Cínový bronz Cu–Sn6	120	¹⁾	²⁾	tyče trubky	Letadla a automobily (rychlostní skříně, rozvodové hřídele aj.)
Speciální mosaz Ms57 Mn Al	40	¹⁾	²⁾	tyče trubky výlisky	Všeobecné použití, obráběcí stroje, čerpadla
Manganová mosaz Ms59 Mn Al	40	¹⁾	²⁾	pouzdra pánve výstelky	Všeobecné použití, obráběcí stroje, čerpadla
Spékaný kov	80	1,5	²⁾	pouzdra	Pomocná uložení obráběcích strojů s malými měrnými tlaky, textilní stroje, strojky pro domácnost, kancelářské stroje, laboratorní přístroje
Tmelený kovový prášek	60	2,25	80	pouzdra	Jako u spékaných kovů
Tvrzené lisované tkaniny	20	1,5	100	tyče trubky	Válcovací stolice, jeřáby, polní dráhy, bagry, traktory, drtiče, čerpadla, menší elektromotory, textilní stroje

¹⁾ V normě neuvedena: U cínových kompozic až 50 m/s, u ostatních kovů až 5 m/s. Kontroluje se výpočtem na zahřátí. Součin $p \cdot v$ (p v kp/cm², v v m/s) nesmí překročit hodnoty: nápravy železničních vozů – 100, elektromotory – 50 až 80, klikové ústrojí pístových strojů – 15 až 45.

²⁾ Provozní teplota ložisek je omezena jen nejvyšší dovolenou teplotou oleje.

VLASTNOSTI KOVOVÝCH LOŽISKOVÝCH MATERIÁLŮ

Materiál		Tvrdość HB	Maximální tlak p (MPa)	Kluzná rychlost v (m s ⁻¹)	Připustná teplota t (°C)	Rázové zatížení	Zabiha- telnost
ČSN	druh						
42 2456	šedá litina	140 až 200	3,5 až 6	0,5 až 5	200	ne	špatná
42 3753	čínová kompozice	22 až 26	24 až 32	neomezená	110	ano	dobrá
42 3721	olověná kompozice	20 až 24	23 až 40	neomezená	100	ano	velmi dobrá
42 3117	čínový bronz	70 až 90	10,5	do 6	2,5	ano	méně dobrá
42 3123	bronz	70 až 80	12	do 6	250	ano	dobrá
42 3122	čínoolověný bronz	70	10,5 až 16	nad 6	150	ano	dobrá
42 3182	olověný bronz	35 až 50	25	neomezená	150	ano	dobrá
42 3184	bronz	24 až 27	35	neomezená	150	ano	dobrá
42 3137	červený bronz	60	10,5	nad 6	—	ano	dobrá
42 3146	hliníkový bronz	140 až 160	100 až 120	malá	—	ano	—
42 3226	mosaz	100 až 150	10	nad 6	250	—	—
42 4261	slitiny hliníku	60	25 až 40	do 4	160	ano	velmi dobrá
	spékané kovy	25 až 35	1 až 2	do 3	80	ne	—
	tmelené kovy	—	0,5 až 1,5	do 3	50	ne	—

VLASTNOSTI NEKOVOVÝCH LOŽISKOVÝCH MATERIÁLŮ

Materiál	Hustota ρ (kg m ⁻³)	Maximální tlak p (MPa)	Kluzná rychlost v (m s ⁻¹)	Připustná teplota t (°C)
Reaktoplasty tvrzené tkaniny vulkanfibry	1 150 až 1 420 1 200 až 1 450	80 až 180 —	1 až 7 —	100 110
Termoplasty polyamidy polyvinylchloridy polytetrafluórethyleny polystyrény	1 150 1 380 — 1 050	5 až 15 — 0,1 až 10 —	0,3 až 1,5 — 1 až 3 —	60 až 100 50 až 60 260 70 až 100

Termoplasty mají velkou tepelnou roztažnost, proto větší vůle uložení