



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**METODIKA PRO STANOVENÍ DYNAMICKÝCH
CHARAKTERISTIK PNEUMATICKÉHO AKTUÁTORU
TURBODMYCHADLA**

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A TURBOCHARGER
PNEUMATIC ACTUATOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Dominik Hálek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.

BRNO 2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Bc. Dominik Hálek**
Studijní program: Automobilní a dopravní inženýrství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **prof. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijníma zkušebníma řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Metodika pro stanovení dynamických charakteristik pneumatického aktuátoru turbodmychadla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Turbodmychadlo může být regulováno pomocí systému s obtokovým ventilem (tzv. wastegate). U některých konstrukčních řešení je obtokový ventil ovládán pomocí pneumatického aktuátoru. V rámci práce se předpokládá vyhodnocení technických experimentů, návrh nových technických experimentů a vyhodnocení dynamických parametrů pneumatického aktuátoru turbodmychadla s pryžovou membránou u turbodmychadla nákladního vozidla.

Cíle diplomové práce:

Přehled a analýza konstrukčních řešení systémů regulace turbodmychadla pomocí obtokového ventilu.

Metodika pro stanovení dynamických parametrů aktuátoru turbodmychadla s pryžovou membránou z technických experimentů.

Seznam doporučené literatury:

BENINI, Ernesto. Advances in Gas Turbine Technology. 2011. ISBN 978-953-307-611-9.
MILLER, Jay. Turbo: Real World High-Performance Turbocharger Systems. Michigan, USA: CarTech, 2008. ISBN 978-1932494297.
STACHOWIAK, Gwidon W. a Andrew W. BATCHELOR. Engineering Tribology. 3. vyd. Boston:Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 0-7506-7836-4.
NGUYEN-SCHÄFER, Hung. Rotordynamics of Automotive Turbochargers. Second Edition. Ludwigsburg, Germany: Springer, 2015. ISBN 978-3-319-17643-7

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.

děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem metodiky pro stanovení dynamických charakteristik pneumatického aktuátoru turbodmychadla. Pneumatický aktuátor se využívá jako regulační mechanismus ve spalovacích motorech s přeplňováním, který má vliv na výkon, účinnost a spotřebu motoru. Hlavním cílem práce je vytvořit systematický ucelený postup pro sběr a analýzu naměřených dat dynamického chování tohoto aktuátoru. V první části práce je navržena a implementována experimentální metoda pro měření dat potřebných k analýze dynamiky aktuátoru při různých variantách nastavení tlaku, posuvu a frekvence. Je sestaven měřicí řetězec s vhodnými snímači a je vytvořeno softwarové prostředí pro sběr a ukládání dat. V druhé části práce jsou vyhodnocována experimentálně naměřená data pomocí matematického modelu v programovém prostředí Matlab, který z naměřených dat extrahuje hodnoty tuhosti a tlumení a určí se jejich závislost na frekvenci, tlaku a posuvu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Pneumatický aktuátor, turbodmychadlo, metodika, experiment, snímač, síla, tlak, posuv, tuhost, tlumení

ABSTRACT

This diploma thesis is dealing with design of Methodology for Determining the Dynamic characteristics of a Turbocharger Pneumatic Actuator. Pneumatic Actuator is used as a control mechanism in turbocharged internal combustion engines, which affects the engine performance, efficiency and fuel consumption. Main aim of this thesis is to develop a systematic comprehensive procedure for collecting and analysing measured data of dynamic behaviour of this actuator. In the first part of the thesis, an experimental method is designed and implemented to measure the data required to analyse the dynamics of the actuator at different variations of pressure, displacement and frequency settings. A measurement chain with appropriate sensors is built and a software environment for data acquisition and storage is developed. In the second part of the thesis, the experimentally measured data are evaluated using mathematical model in Matlab software environment to extract stiffness and damping values from measured data and determine their dependence on frequency, pressure and displacement.

KEYWORDS

Pneumatic actuator, turbocharger, methodology, experiment, sensor, force, pressure, displacement, stiffness, damping

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HÁLEK, Dominik. *Metodika pro stanovení dynamických charakteristik pneumatického aktuátoru turbodmyhadla*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149430>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Pavel Novotný.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce na téma *Metodika pro stanovení dynamických charakteristik pneumatického aktuátoru turbodmyhadla* je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením prof. Ing. Pavla Novotného, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 26. května 2023

.....

Dominik Hálek

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu prof. Ing. Pavlu Novotnému, Ph.D. za vstřícný přístup, ochotu a velmi cenné rady při zpracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Petru Škarovi, Ing. Juraji Pospíšilovi a dalším ze společnosti Garrett Motion za ochotu, trpělivost a odborné rady.

OBSAH

1	Úvod	11
2	Obtokový ventil turbodmychadla	12
2.1	Funkce turbodmychadla a možnosti jeho regulace	12
2.2	Popis obtokového regulačního ventilu	13
2.3	Interní obtokový ventil	14
2.4	Externí obtokový ventil	15
2.5	Aktuátor	16
2.5.1	Elektrický aktuátor	16
2.5.2	Pneumatický aktuátor	17
2.6	Další konstrukční řešení obtokového ventilu	17
2.6.1	Aktuátor umístěný na turbínové skříni	17
2.6.2	Aktuátor umístěný na kompresorové skříni	18
2.7	Dvoustupňové (two-stage) turbodmychadla	19
3	Formulace problému	20
4	Metodika pro stanovení dynamických parametrů aktuátoru	22
4.1	Jevy	22
4.1.1	Statické jevy	22
4.1.2	Dynamické jevy	22
4.2	Snímače a senzory	22
4.2.1	Tenzometrický snímač	22
4.2.2	Kapacitní snímače síly	28
4.2.3	Piezoelektrické snímače síly	29
4.2.4	Akcelerometry	31
4.2.5	Impedanční snímače	32
4.3	Sběr a ukládání dat	33
4.3.1	Datové sběrnice	33
5	Experimentální měření	36
5.1	Simulace pohybu aktuátoru	36
5.2	Vhodný výběr snímačů	38
5.3	Úprava aktuátoru	38
5.4	Návrh upevnění aktuátoru na měřicí desce	39
5.5	Hardwarové sestavení měřícího řetězce	40
5.6	Synchronizace a softwarové prostředí	42
5.6.1	Kalibrace tenzometrického snímače	43
5.6.2	Vytvoření softwarového prostředí v programu LabVIEW	43
5.7	Provedení technického experimentu	46
5.7.1	Průběh měření	47
6	Zpracování naměřených dat	49
6.1	Analýza naměřených dat síly	51
6.1.1	Závislost síly na frekvenci při stejném tlaku	53
6.1.2	Závislost síly na frekvenci při stejném posuvu	54
6.1.3	Závislost síly na zrychlení	56

6.2	Výpočet tuhosti a tlumení systému	57
6.2.1	Vyhodnocení tuhosti systému	59
6.2.2	Vyhodnocení tlumení systému.....	62
Závěr	67
Použité informační zdroje	69
Příloha	74

1 ÚVOD

Silniční doprava je v těchto dnech zodpovědná celosvětově za produkci zhruba 15 % škodlivých CO₂ emisí [1]. V dnešní době je tak stále více kladen důraz na snahu o snížení emisí, lepší využití paliva ale zároveň i na dosažení vyššího výkonu spalovacích motorů, přičemž jedním z neefektivnějších způsobů, jak těchto cílů dosáhnout, je přepřínování motoru pomocí turbodmychadel. Důraz u moderních motorů na co nejvyšší účinnost způsobuje, že výfukové plyny dosahují čím dál vyšších teplot a tlaků a dochází tak ke zvyšování zatížení celého motoru, což vede ke stále vyšším nárokům na turbodmychadlo. Aby bylo možné turbodmychadlo efektivně ovládat a přizpůsobit se požadovaným provozním podmínkám, je nezbytné tyto vysoké tlaky regulovat. Jednou z možností regulace turbodmychadla je obtokový ventil neboli wastegate.

Obtokový ventil turbodmychadla umožňuje odklonění výfukových plynů mimo turbínové kolo do výfukového potrubí, čímž jej chrání před zničením, protože dojde ke snížení působících sil na lopatky turbíny. Tento regulační ventil je ovládán akčním členem nazývaným aktuátor. Většina dnešních turbodmychadel má buď elektrický nebo pneumatický aktuátor. Elektrický aktuátor je využíván spíše u osobních automobilů, zatímco pneumatický nachází uplatnění u nákladních vozidel a stavebních strojů.

Úkolem pneumatického aktuátoru na turbodmychadle je nastavit vhodnou polohu otevření obtokového ventilu za účelem dosažení optimálního výkonu motoru při různých provozních režimech. Tento druh aktuátoru přináší výhody v podobě rychlé a spolehlivé odezvy v kombinaci s jeho vysokou odolností a nízkou pořizovací cenou oproti elektrickým aktuátorům. Jeho jednoduchá konstrukce a ovládání umožňují dynamickou regulaci turbodmychadla v závislosti na požadovaném výkonu motoru, což znamená, že motor může dosahovat optimálního výkonu a účinnosti při nízkých, tak i při vysokých otáčkách.

Cílem této diplomové práce je navrhnout metodiku měření dynamických parametrů na pneumatickém aktuátoru turbodmychadla z nákladního vozidla pomocí experimentů v laboratoři společnosti Garrett Motion. Účelem je stanovení a analýza dynamických vlastností tohoto typu aktuátoru s cílem optimalizovat řízení turbodmychadla a maximalizovat tak výkon a účinnost a současně minimalizovat emise spalovacích motorů.

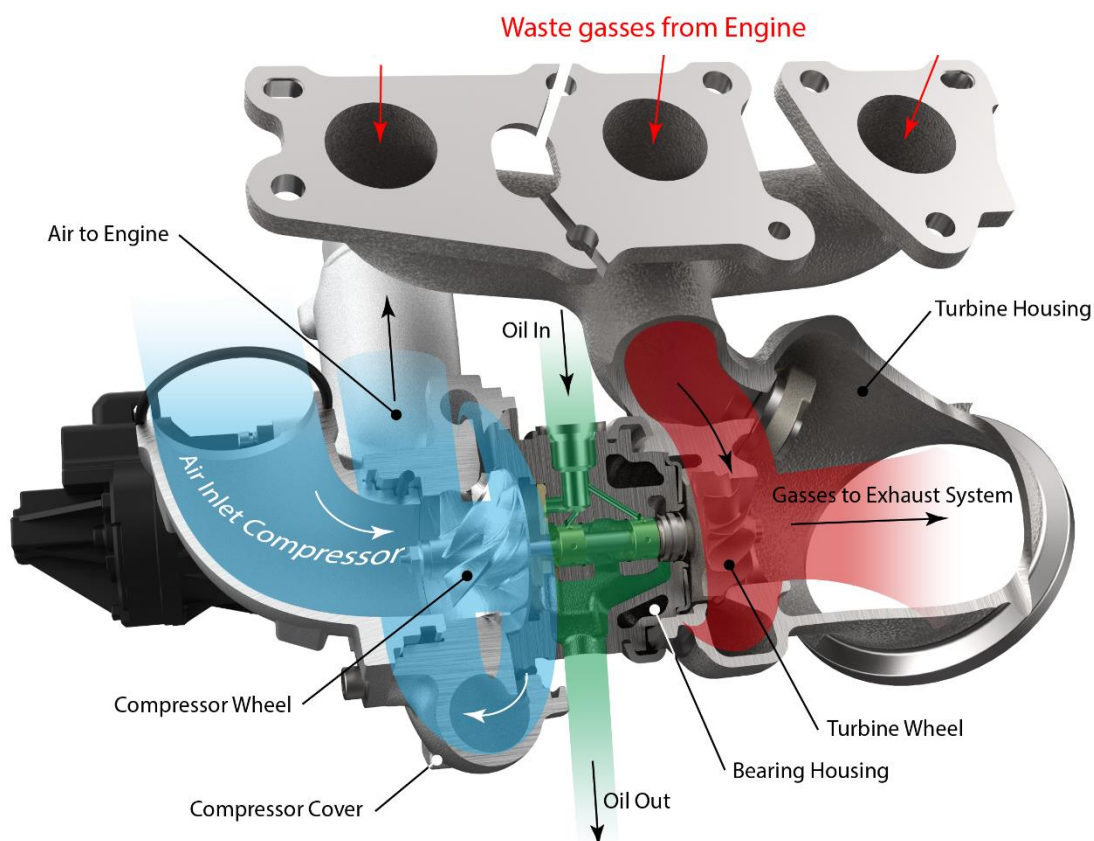
2 OBTOKOVÝ VENTIL TURBODMYCHADLA

Obtokový regulační ventil (anglicky „wastegate“) je mechanismus zajišťující regulaci proudění výfukových plynů skrz turbínové kolo turbodmychadla.

2.1 FUNKCE TURBODMYCHADLA A MOŽNOSTI JEHO REGULACE

Turbodmychadlo je zařízení, které slouží k přepřínování spalovacího (jak vznětového, tak zážehového) motoru, čímž se zvyšuje jeho účinnost.

Princip viz Obr.1 je následující: výfukové plyny (Waste gasses from Engine) vstupují do turbínové skříně (Turbine Housing), roztáčejí turbínové kolo (Turbine Wheel) a odchází do výfukového potrubí (Gasses to Exhaust System). Turbínové kolo je přes hřídel spojeno s kompresorovým kolem (Compressor Wheel), které stlačuje vzduch nasátý z venku (Air Inlet Compressor), zvyšuje jeho hustotu a vhání jej do spalovacího prostoru motoru (Air to Engine). Hřídel je uložena v kluzných ložiscích v ložiskové skříně (Bearing Housing), kam vstupuje a vystupuje olej (Oil In a Oil Out), který je nezbytný pro zajištění hydrodynamického mazání v ložiscích a odvodu tepla z hřídele.



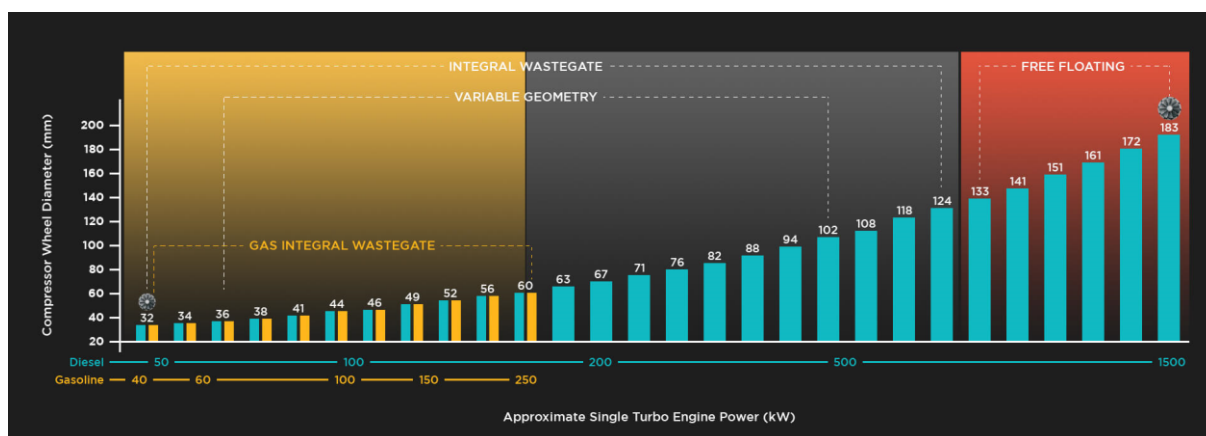
Obr. 1: Schéma turbodmychadla [2].

Většina přepřínovaných motorů používá ještě chladič plnicího vzduchu (tzv. intercooler), který stlačený vzduch před vstupem do spalovacího prostoru ochladí, čímž mu ještě navýší hustotu a

zároveň zvýší odolnost vůči detonaci. Takto stlačený a ochlazený vzduch s vyšší hustotou vstupuje do spalovacího prostoru každého z válců, což umožňuje vstříknutí více paliva při zachování stejných otáček a zároveň objemu motoru, což má za následek zvýšení výkonu [3].

Dnešní turbodmychadla pracují s vysokými tlaky a při plném zatížení dosahují otáček až $300\,000\text{ min}^{-1}$ [4], což má za následek velké namáhání všech komponent turbodmychadla. Záleží sice na typu, ale uvádí se, že při překročení otáček o zhruba 5 % dochází ke kompletní destrukci turbodmychadla [5]. Aby se předešlo poškození turbodmychadla nebo následnému poškození motoru automobilu, je potřeba tyto vysoké tlaky regulovat. Turbodmychadla podle způsobu regulace lze rozdělit na:

- turbodmychadlo bez regulace (tzv. free-floating),
- turbodmychadlo s obtokovým ventilem (wastegate),
- turbodmychadlo s proměnnou geometrií lopatek (VNT).



Obr. 2: Rozdělení turbodmychadel dle způsobu jejich regulace: obtokový ventil (wastegate), proměnná geometrie lopatek (variable geometry, VNT) a bez regulace (free floating). Na ose x je přibližný výkon motoru s jedním turbodmychadlem v kW a na ose y je průměr kompresorového kola v mm [6].

V této diplomové práci se budu zabírat pouze regulací skrze obtokový ventil.

2.2 POPIS OBTOKOVÉHO REGULAČNÍHO VENTILU

Regulační obtokový ventil (tzv. wastegate) je umístěn před turbínovým kolem a umožňuje nastavení maximálního plnicího tlaku turbodmychadla. Princip regulace je následující: výfukové plyny z motoru vcházejí do turbíny a roztáčejí turbínové kolo, při překročení nastaveného maximálního plnicího tlaku dochází k otevření ventilu, což vede k odklonění proudění výfukových plynů mimo turbínové kolo do výfukového potrubí. To má za následek snížení působících sil na lopatky turbínového kola, což prodlužuje životnost turbodmychadla [7].

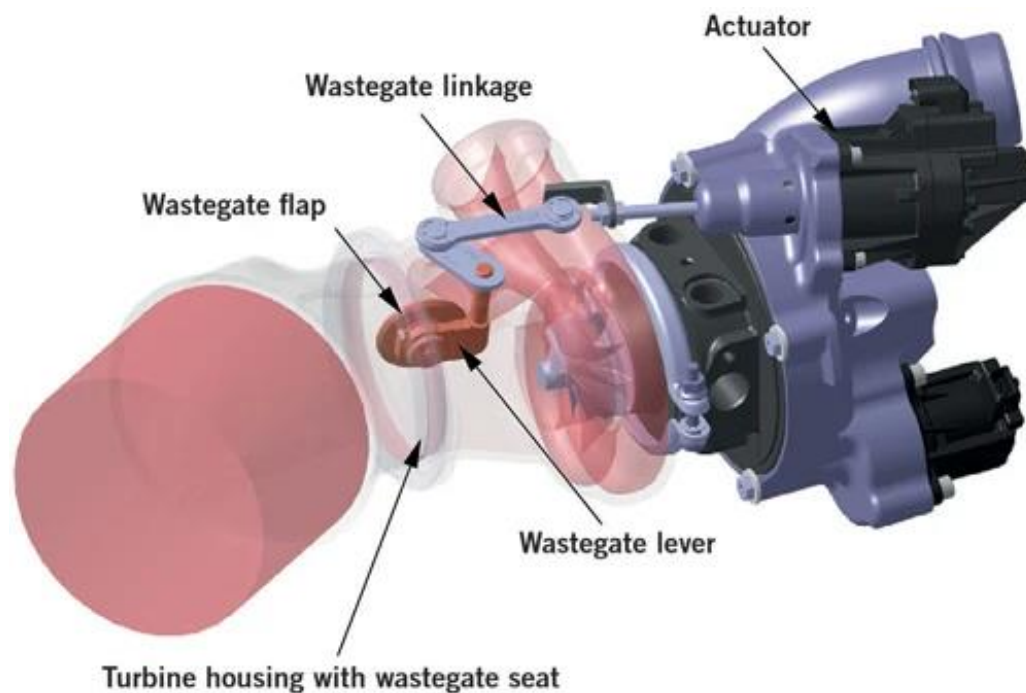
Další výhodou obtokového regulačního ventilu je, že se díky němu dají optimalizovat rozměry turbodmychadla oproti free-floating turbodmychadlům. Obtokový ventil odkloněním výfukových plynů při dosažení maximálního plnicího tlaku zajistí, že menší turbínové kolo nepřesáhne své maximální bezpečné otáčky a nedojde tak k poškození turbodmychadla.

Zároveň menší turbínové kolo znamená také menší turbínovou skříň, která zajistí rychlejší náběh turbíny při nízkých rychlostech motoru, kdy je obtokový ventil zavřený [8]. Další výhodou je menší hmotnost celého turbodmychadla. Podle typu konstrukce a způsobu umístění rozlišujeme dva typy regulačních obtokových ventilů:

- interní obtokový ventil,
- externí obtokový ventil.

2.3 INTERNÍ OBTOKOVÝ VENTIL

Interní obtokový ventil je umístěn přímo na samotném turbodmychadle, konkrétně v jeho turbínové skříni. Mechanismus, který obtokový ventil ovládá, se nazývá aktuátor a je většinou umístěn na kompresorové skříni z důvodu zde dosahovaných nižších teplot. Výhodou interního obtokového ventilu je snadnější instalace do motorového prostoru, protože obtokový ventil už je přímo součástí turbodmychadla.



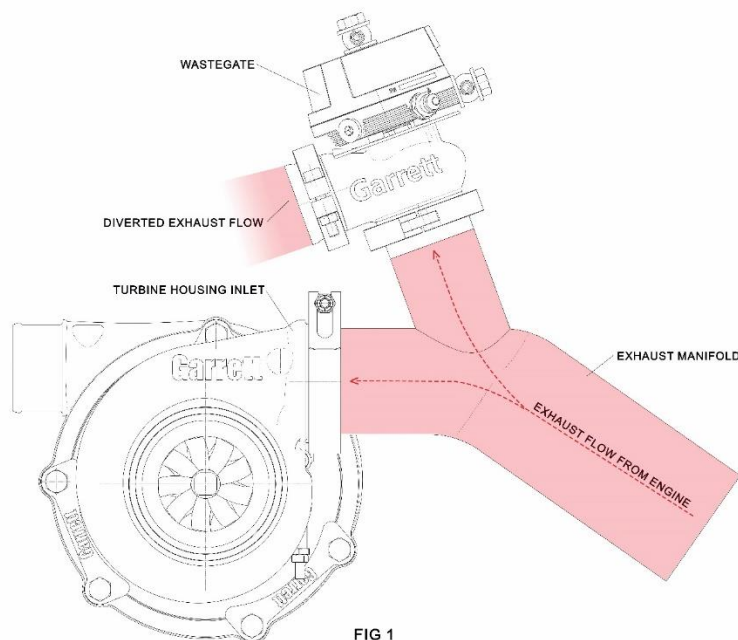
Obr. 3: Schéma turbodmychadla s interním obtokovým ventilem obsahující: rameno (Wastegate linkage), kliku (Wastegate lever) a klapku (Wastegate flap) [9].

Skládá se z aktuátoru, ramena, kliky, čepu a klapky. Když dojde k dosažení maximálního plnicího tlaku, tak aktuátor (nejčastěji elektrický nebo pneumatický) začne posunovat ramenem směrem od aktuátoru, čímž se přes kliku a čep začne otevírat klapka na obtokovém ventilu a výfukovým plynům je umožněno proudit mimo turbínové kolo.

Tato diplomová práce se bude hlouběji zabírat právě interním obtokovým ventilem.

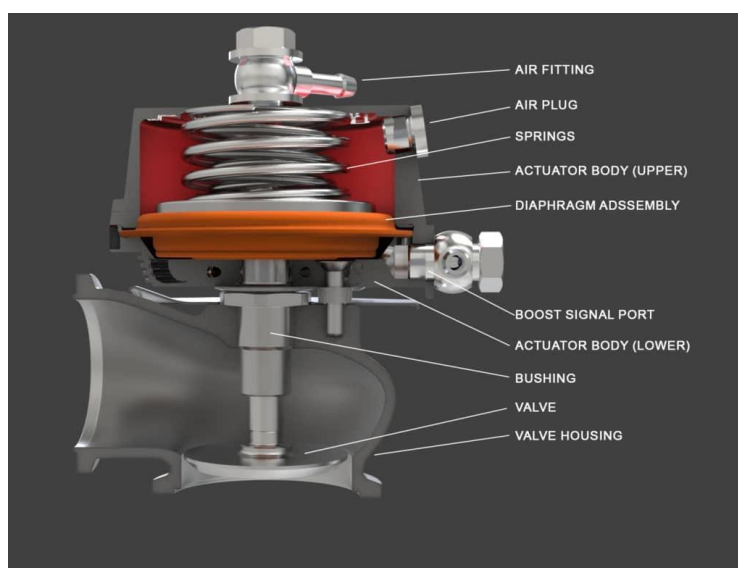
2.4 EXTERNÍ OBTOKOVÝ VENTIL

Externí obtokový ventil se používá u turbodmychadel, které nemají v sobě zabudovaný interní obtokový ventil. Obr. 4 ukazuje, že externí obtokový ventil potřebuje speciálně konstruované výfukové potrubí s odděleným vstupem a bývá zpravidla umístěn před turbínou.



Obr. 4: Schéma umístění externího obtokového ventilu [10].

Skrze své výhody bývá často používán u motorů s velmi vysokým výkonem, jelikož není limitován velikostí turbínové skříně. Výhodou také je, že výfukové plyny jsou vpuštěny do výfukového potrubí dále za turbínou, což má za následek zlepšení jejího výkonu. U některých závodních aplikací jsou odváděny spaliny z obtoku přímo do atmosféry [8].



Obr. 5: Řez externím obtokovým ventilem: pružiny (springs), membrána (diaphragm) a ventil (valve) [10].

Externí obtokový ventil se skládá z membrány, pružiny a ventilu. Maximální plnicí tlak odpovídá tuhosti pružiny. Jakmile je dosaženo vyššího plnicího tlaku než je ten maximální, tak se membrána se začne nafukovat vzduchem směrem proti pružině, která začne otevírat ventil, což umožní výfukovým plynům proudit mimo turbínu dál do výfukového potrubí [10].

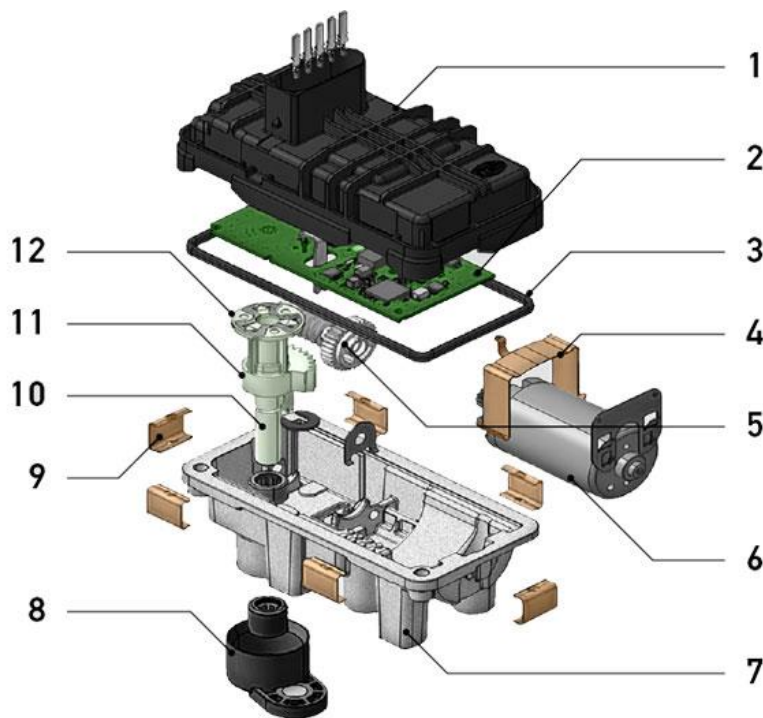
2.5 AKTUÁTOR

Zařízení, akční člen, které otevírá nebo uzavírá interní obtokový ventil, se nazývá aktuátor. Díky němu můžeme efektivně regulovat proudění výfukových plynů přes turbínové kolo. Nejrozšířenější typy aktuátorů jsou elektrický nebo pneumatický.

V této diplomové práci se budu hlavně zabírat pneumatickými aktuátory a jejich vlastnostmi.

2.5.1 ELEKTRICKÝ AKTUÁTOR

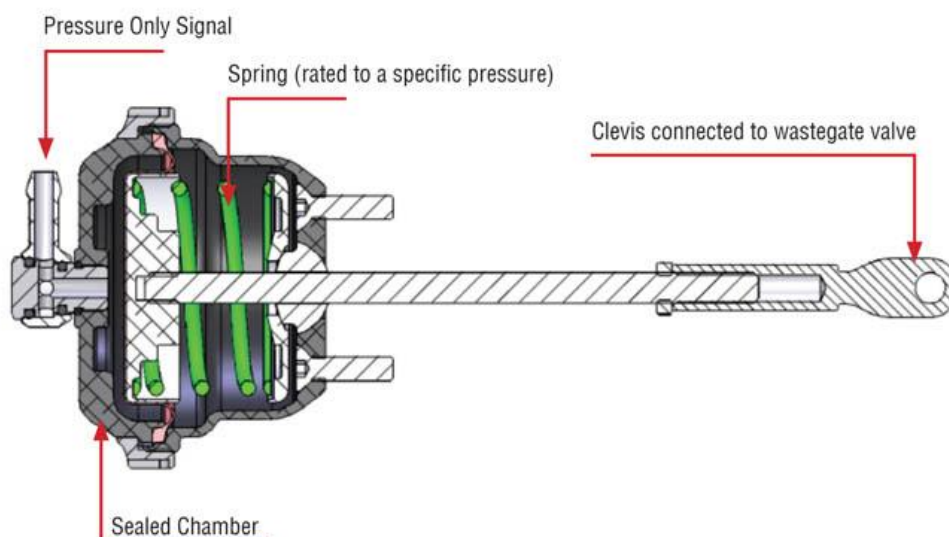
Elektrický aktuátor se skládá z elektromotoru komunikujícího přímo s řídicí jednotkou a lineárního aktuátoru, který obsluhuje obtokový ventil. Výhodou elektrického aktuátoru je lepší schopnost reagovat na regulaci výfukových plynů tím, že dokáže otevírat nebo zavírat obtokový ventil v přesných krocích a zaručit tak plynulejší chod. Zároveň dokáže rychleji (bez prodlevy) reagovat na potřebu regulovat průtok výfukových plynů skrz turbínové kolo [5]. Nevýhodou může být vyšší cena oproti pneumatickému aktuátoru a nižší tepelná odolnost, protože v motorovém prostoru okolo turbodmychadla se dosahuje velmi vysokých teplot.



Obr. 6: Schéma elektrického aktuátoru: základová deska (2), šnekový převod (3), elektromotor (6) a páka ovládající ventil (8) [11].

2.5.2 PNEUMATICKÝ AKTUÁTOR

Pneumatický aktuátor může být poháněn buď tlakem vzduchu nebo vakuem. Aktuátor poháněný tlakem vzduchu je ovládán hadičkou propojenou s výstupem z kompresoru, zatímco aktuátor poháněný vakuem je přímo připojen na vakuový okruh vozidla [8]. Hlavními komponenty jsou: ventil, pružina, membrána a táhlo, přičemž ventil je spojen hadičkou s výstupem z kompresoru. Za ustálených podmínek je obtokový ventil uzavřený, což zajišťuje tuhost pružiny, která zamezuje jeho otevření. Pokud plnicí tlak na výstupu z kompresoru přesáhne maximální definovanou hranici, tak dojde k nafouknutí membrány vzduchem, která stlačí pružinu, ta pohne s táhlem, čímž dojde k otevření obtokového ventilu. U některých pneumatických aktuátorů bývá ještě umístěn senzor polohy, který snímá polohu táhla aktuátoru a posílá tyto údaje řídicí jednotce.



Obr. 7: Řez pneumatickým aktuátorem [12].

2.6 DALŠÍ KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ OBTOKOVÉHO VENTILU

Po rozdělení konstrukčních řešení systému obtokového ventilu neboli wastegate na interní a externí a popsání typů aktuátorů, které tento obtokový ventil ovládají, se mohou ještě rozdělit podle umístění aktuátoru na turbodmychadle.

Aktuátor může být umístěn buď na kompresorové nebo turbínové skříni. Vzhledem k vysokým teplotám, které dosahují až 1050 °C [13], což je způsobeno prouděním rozžhavených výfukových plynů skrz turbínovou skříň, se ve většině případů umísťuje aktuátor na kompresorovou část, čímž se chrání před zničením.

2.6.1 AKTUÁTOR UMÍSTĚNÝ NA TURBÍNOVÉ SKŘÍNI

U některých nákladních vozidel se vzhledem k zástavbovým rozměrům motoru umísťuje pneumatický aktuátor přímo na turbínovou skříň. Protože ale turbínová skříň za plného provozu

dosahuje velmi vysokých teplot, tak je aktuátor umístěn na držáku. Většina aktuátorů má kolem sebe ještě i tepelný kryt (heat shield), který jej chrání před zničením v důsledku vysokých teplot.



Obr. 8: Turbodmychadlo od společnosti Perkins s pneumatickým aktuátorem uchyceným na držáku (bracket) umístěném na turbínové skříni [14].

2.6.2 AKTUÁTOR UMÍSTĚNÝ NA KOMPRESOROVÉ SKŘÍNI

Konstrukční řešení, které využívá naprostá většina turbodmychadel určených do osobních vozů a některé určené do nákladních vozů. Aktuátor se umístí co nejdál od turbínové skříně z důvodu ochrání aktuátoru před zničením v důsledku zde dosahovaných vysokých teplot. Aktuátor je uchycený pomocí šroubů buď přímo na kompresorové skříni a nebo na držáku.



Obr. 9: Turbodmychadlo od společnost Garrett Motion s pneumatickým aktuátorem umístěným na držáku (bracket) přišroubovaném na kompresorové skříni [15].

2.7 DVOUSTUPŇOVÉ (TWO-STAGE) TURBODMYCHADLA

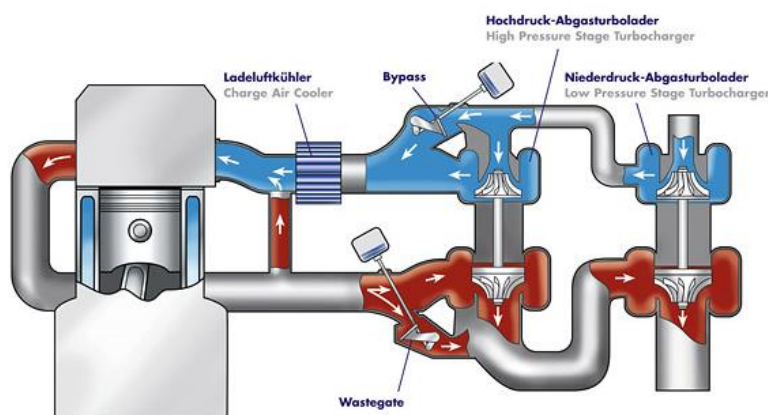
Zajímavým konstrukčním řešením jsou two-stage turbodmychadla kombinující menší vysokotlaké turbodmychadlo s větším nízkotlakým. Regulace obou turbodmychadel může být realizována ve 4 variantách - obojí pomocí obtokového ventilu (wastegate), obojí pomocí proměnné geometrie lopatek (VNT) a nebo kombinací obou zmíněných variant, tedy jedno turbodmychadlo je regulováno pomocí obtokového ventilu a druhé pomocí proměnné geometrie lopatek.



Obr. 10: Two-stage turbodmychadlo od firmy BorgWarner [16].

Dvoufázové (two-stage) turbodmychadlo dodává vysoké plnicí tlaky v celém rozsahu rychlostí. V menších rychlostech jdou výfukové plyny do menšího vysokotlakého turbodmychadla, které zaručuje rychlý nástup plnicího tlaku, ale při vyšších rychlostech se obtokový ventil otevře a přeměruje výfukové plyny do většího nízkotlakého. Celý tento systém pomáhá zlepšovat spotřebu paliva a zároveň zvyšovat výkon [16].

2-stufige geregelte Aufladung (R2S™) Regulated 2-stage Turbocharging (R2S™)



Obr. 11: Schéma two-stage turbodmychadla od společnosti BorgWarner, kde systém obtokového ventilu (wastegate) reguluje průtok výfukových plynů buď přes vysokotlaké (High Pressure Stage Turbocharger) nebo nízkotlaké (Low Pressure Stage Turbocharger) turbodmychadlo [17].

3 FORMULACE PROBLÉMU

Motory automobilů dnes pracují v různých režimech zatížení a pro dosažení ideálního plnicího tlaku ve všech pracovních režimech je potřebné zavést regulaci přeplňování, čímž se, jak bylo zmíněno výše, dosahuje zvýšení výkonu a snížení spotřeby. Z tohoto důvodu je důležitá co nejpřesnější regulace plnicího tlaku, aby nedocházelo např. ke špatné distribuci plnicích tlaků do spalovacího prostoru motoru nebo naopak k nerovnoměrnému přísunu výfukových spalin k turbíně turbodmychadla, což by v krajních případech mohlo vést až k destrukci obou zmíněných komponent.

Jak již bylo naznačeno v předchozích kapitolách, tato diplomová práce se bude zabývat interním obtokovým ventilem ovládaným pomocí pneumatického aktuátoru, konkrétně přetlakového pneumatického aktuátoru umístěného na turbodmychadle nákladního vozidla.

Pneumatický aktuátor turbodmychadla má při svém pohybu, kdy dochází k otevírání či zavírání obtokového ventilu, jisté tlumicí účinky, které ovlivňují jeho vlastnosti a mohou tedy ohrozit správnou regulaci plnicích tlaků, pokud nejsou dobře známy.



Obr. 12: Zkoumaný pneumatický aktuátor.

Právě z těchto důvodů bylo potřebné navrhnout novou metodiku měření za účelem tyto tlumicí účinky experimentálně změřit na reálném pneumatickém aktuátoru a zjistit, co tlumení na aktuátoru ovlivňuje.

Tato práce má tedy za cíl připravit ucelený postup měření dynamických charakteristik pneumatického aktuátoru z technických experimentů provedených v laboratoři společnosti Garrett Motion, přičemž budou měněny různé parametry aktuátoru jako tlak, posuv a frekvence, aby bylo zjištěno, jak tyto parametry ovlivňují tuhost a tlumení pneumatického aktuátoru. Následně bude nutné při zpracování experimentálně naměřených dat navrhnout vhodnou výpočtovou metodu, která umožní získat z naměřených dat závislosti tuhosti a tlumení pro daný pneumatický aktuátor.

Nová metodika experimentálního měření dynamických charakteristik aktuátoru bude obsahovat:

- realizování pohybu táhla aktuátoru,
- vhodný výběr snímačů,
- vhodnou úpravu aktuátoru pro potřeby měření,
- způsob uchycení aktuátoru,
- sestavení kompletního měřicího řetězce,
- přípravu softwarového prostředí pro měření dat,
- ukládání měřených dat,
- zpracování naměřených dat,
- vytvoření matematického výpočtového modelu pro získání hodnot tuhosti a tlumení z naměřených dat,
- určení závislosti tuhosti a tlumení na měněných parametrech během experimentálního měření.

4 METODIKA PRO STANOVENÍ DYNAMICKÝCH PARAMETRŮ AKTUÁTORU

Jak již bylo naznačeno v předchozích kapitolách, v případě určitých konstrukčních řešení turbodmychadel je obtokový regulační ventil ovládán pomocí pneumatického aktuátoru. U těchto aktuátorů je pak možné určit a měřit určité parametry, a to buď statické nebo dynamické.

4.1 JEVY

4.1.1 STATICKÉ JEVY

V rámci mechaniky těles se považují jako statické ty jevy, které jsou popisovány pouze veličinami síly a prostoru a jsou tedy v čase neměnné. Lze je využít pro popis mechanických modelů, při kterých zatížení nevyvolává zrychlení daného mechanismu nebo jeho částí. V případě měření a vyhodnocování sil působících na mechanismus považujeme za statické ty jevy, u kterých měřená hodnota zůstává stabilní v určitém rozsahu a nekolísá. Přesto je potřeba zohledňovat v interpretaci statického jevu v případě silového měření několik faktorů, přičemž hlavním z nich je přirozená oscilace výstupní hodnoty měřicího řetězce, která může při statickém jevu vznikat [18].

4.1.2 DYNAMICKÉ JEVY

V oblasti mechaniky se jako dynamika považuje kombinace statického a kinematického pohledu na mechanismus. Jak již bylo zmíněno, statika se zabývá veličinami síly a prostoru, zatímco kinematika popisuje mechanismy pouze pomocí veličin času a prostoru. Právě kombinace statiky a kinematiky umožňuje popsat mechanismy pomocí druhého Newtonova zákona, tedy pomocí veličin síly, prostoru, času a hmoty. Z hlediska měření a vyhodnocování sil se jako dynamické jevy rozumí ty, které jsou časově proměnné a při kterých proměnlivost přesahuje hodnoty šumu nebo chyby měření. K dosažení této podmínky je nutné, aby byl mechanismus zatížen silami, které způsobí zrychlení mechanismu nebo jeho částí [19].

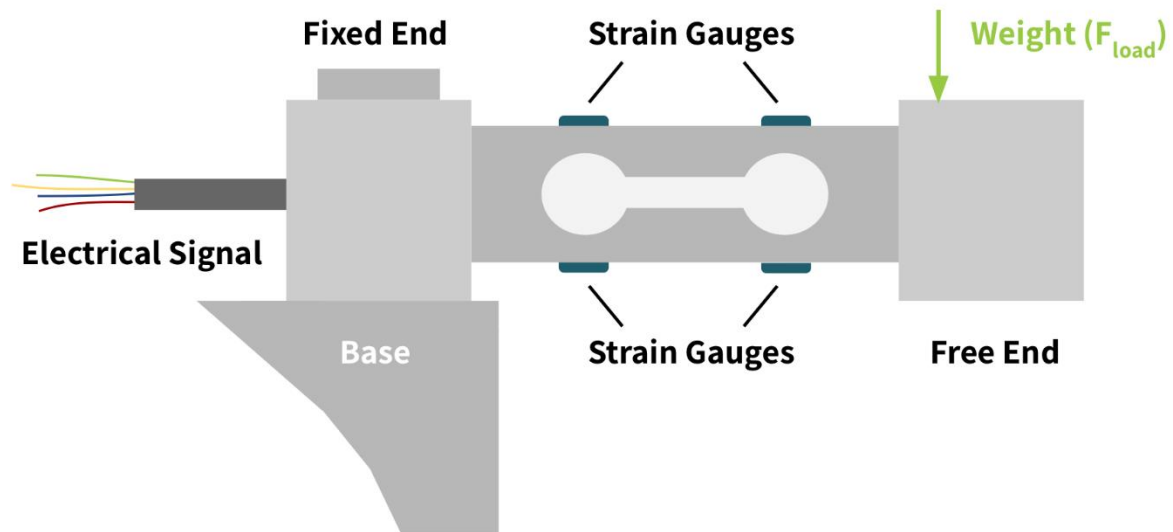
4.2 SNÍMAČE A SENZORY

Důležitou součástí tvorby metodiky experimentálního měření je vhodný výběr snímačů, které dokážou efektivně a spolehlivě vybrané parametry v reálném čase měřit.

4.2.1 TENZOMETRICKÝ SNÍMAČ

Tenzometrický snímač funguje na principu změny elektrického odporu, který dokáže převést na měřitelný elektronický signál. Uvnitř každého tohoto snímače se vyskytuje minimálně jeden nebo více tenzometrů, jejichž přesná funkce je popsána níže. Samotné tenzometrické snímače jsou poté připevněny ke konstrukčnímu prvku, který se při zatížení deformuje. Tento druh

snímačů síly je velmi oblíbený hlavně pro vysokou přesnost, relativně nízkou cenu a snadné použití a lze je tedy použít pro prakticky jakoukoliv průmyslovou aplikaci [20]. Tenzometrické snímače jsou vyráběny v mnoha různých tvarech a montážních konfiguracích, protože existuje velký počet různých možností zatížení [21]. Je potřeba dodat, že tenzometrické snímače jsou pasivní snímače, což znamená, že ke své činnosti potřebují budící napětí. To může omezovat jejich použití na místech s omezeným přístupem k elektřině nebo na místech, kde může hrozit nebezpečí vznícení [20].

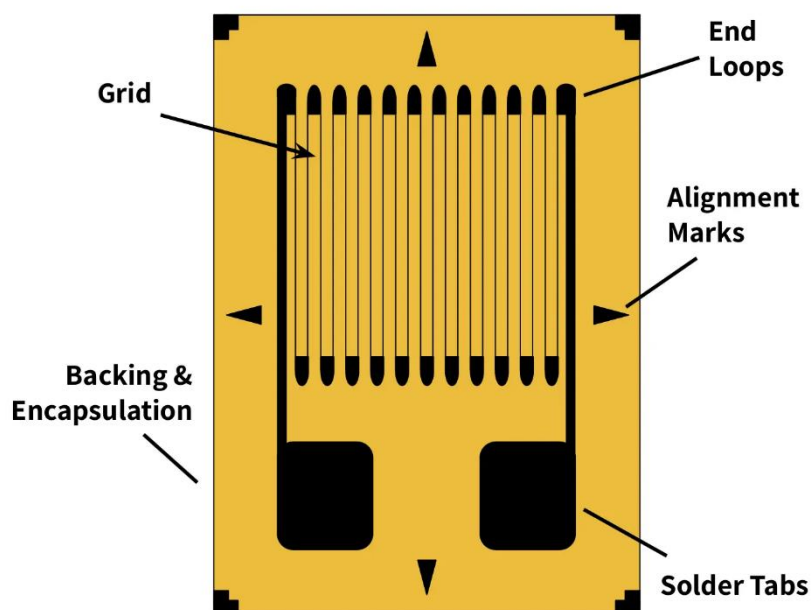


Obr. 13: Schéma jedné z variant tenzometrických snímačů [21].

Jak již bylo zmíněno na začátku, tak základem fungování tenzometrického snímače je tenzometr. Tenzometr je elektronická součástka, jejíž vnitřní odpor se mění v závislosti na působení vnější síly. Tuto změnu odporu lze převést na měřitelný signál, který je úměrný síle způsobující deformaci. Tenzometr bývá v tenzometrických snímačích většinou lepený.

Lepený tenzometr se viz Obr. 14 skládá z tenkého drátku umístěného na nevodivém podkladu s konektory na obou koncích drátku. Délka drátku je celková délka všech smyček, akorát koncové smyčky jsou širší, aby byl zanedbatelný rozdíl v odporu oproti stejné délce přímého drátku. Kromě toho tenzometr také obsahuje značky označující směr normálového a axiálního zatížení [22].

Z hlediska funkce v tenzometru se drát chová jako odpor, přičemž odpor je funkcí elastických vlastností daného drátu. Když se drát natahuje, tak to způsobí, že jeho délka se prodlužuje a zmenšuje se tak jeho průřez, což vede k růstu odporu. Při stlačování drátu dochází k opačnému efektu [22].



Obr. 14: Schéma tenzometru umístěném v tenzometrickém snímači. Značky označující směr zatížení (Alignment Marks), koncové smyčky (End Loops), tenký drátek (Grid), pájecí destičky (Solder Tabs) a obal (Encapsulation) [22].

Poměrné prodloužení je definováno vztahem:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}, \quad (1)$$

kde ΔL [m] je změna délky drátu a L [m] jeho původní délka.

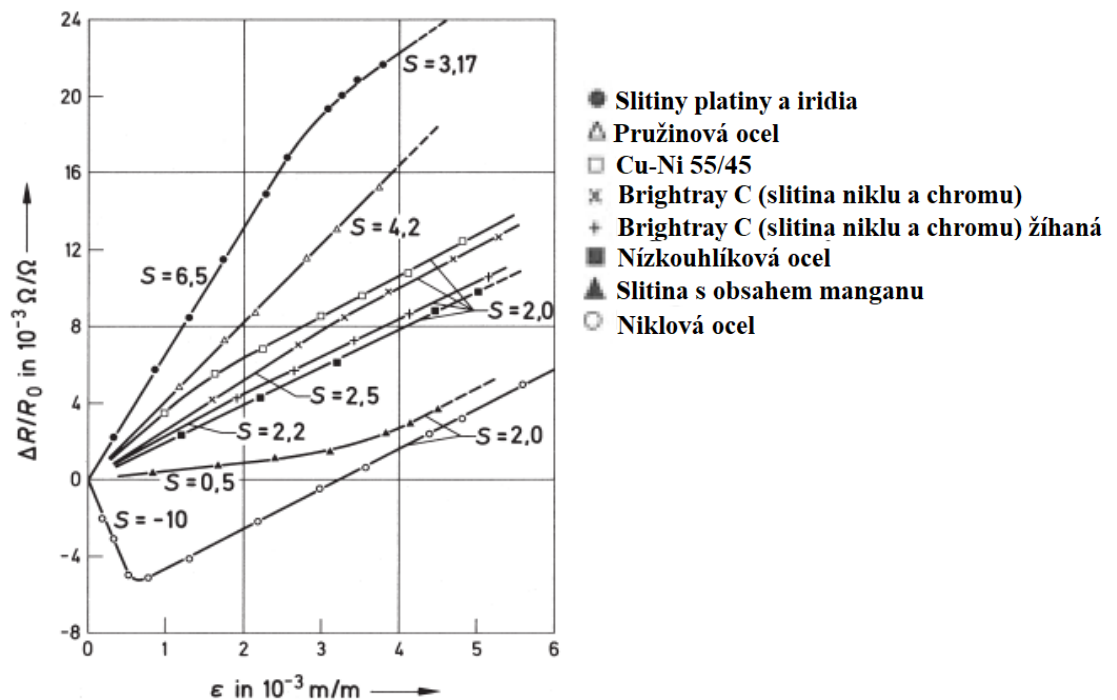
S tím souvisí tzv. citlivostní faktor (anglicky „Gauge factor“), který je dán vztahem:

$$G = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}} = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\epsilon}, \quad (2)$$

kde ΔR [Ω] je změna odporu a R [Ω] původní hodnota odporu.

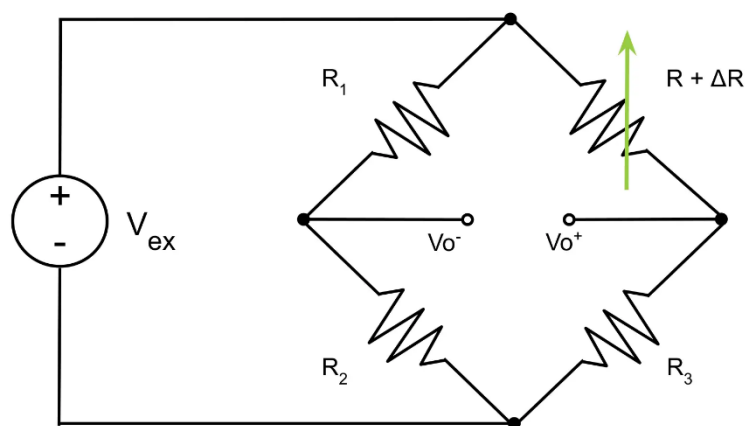
Z tohoto vzorce je patrné, že vztah mezi změnou odporu a deformací drátu v důsledku působícího zatížení je přibližně lineární. Tento lineární vztah je klíčovým pro fungování tenzometru. Zatěžovací síla způsobuje deformaci drátu, což následně mění jeho odpor. V důsledku toho se na tenzometru mění výstupní napětí podle toho, jestli drát je nebo není zatěžován [22].

Umístění tenzometru v tenzometrickém snímači odpovídá bodu, který je při zatížení nejvíce namáhán. Jeho orientace je zpravidla taková, že jeho delší část leží podél hlavní osy měřené síly. Další tenzometry umístěné podél různých os mají za cíl eliminovat vliv nežádoucích sil, teplotních vlivů a dalších okolností. Tenzometry mají své mezní hodnoty zatížení a jejich napětí na vodiči nesmí překročit určitý bod, kdy se kov už nevrátí zpět do své původní délky, ale trvale se deformuje. Citlivostní faktor (Gauge factor) nám říká, že změna odporu je úměrná deformaci. Pro většinu kovů se tento faktor pohybuje okolo řádu 2 [22].



Obr. 15: Ukazuje tzv. Gauge factor označovaný buď GF nebo S různých slitin, přičemž osa x ukazuje relativní prodloužení a osa y relativní změnu odporu [23].

Tenzometry využívají funkce tzv. Wheatsonova můstku, který slouží pro měření odporu nebo velmi malých změn odporu, které by normální ohmmetr buď vůbec nezměřil nebo by se vešly do procentní chyby měřidla. Wheatsonův můstek je obvod, ve kterém jsou paralelně zapojené dva děliče napětí se společným zdrojem [22].



Obr. 16: Schéma jednoduchého obvodu Wheatsonova můstku [22].

Na Obr. 16 značí V_{ex} budící napětí a proměnný odpor $R + \Delta R$ představuje tenzometr. Hodnoty R , R_1 , R_2 a R_3 mají stejné odpory a ΔR má nulovou hodnotu bez zatížení. Když tenzometr není zatížen, tak jsou napětí V_o^- a V_o^+ ekvivalentní. To tedy znamená, že výstup můstkového obvodu, kterým je rozdíl napětí na těchto dvou uzlech, je nulový. Při zatížení působící silou je potřeba vycházet z obecné rovnice pro napětí v každém výstupním uzlu. Ohmův zákon říká, že napětí V [V] mezi dvěma uzly v sériovém obvodu se rovná součinu proudu I [A], který prochází

obvodem, a celkového odporu R [Ω] (při zachování značení napětí jako „V“ místo „U“ viz Obr. 16) [22].

$$V = IR \quad (3)$$

Pokud si přeuspořádáme vztah tak, abychom si vyjádřili proud I a dosadíme za něj to, čemu se rovná v levé polovině můstkového obvodu, tak nám vyjde tento vztah:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V_{ex}}{(R_1 + R_2)}. \quad (4)$$

Dva rezistory rozdělují podél této cesty budící napětí V_{ex} na V_o^- . Dosadíme-li předem vyjádřený výraz pro proud I do obecné rovnice Ohmova zákona pro vyjádření napětí V_o^- , tak vyjde následující vztah:

$$V_o^- = V_{ex} \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (5)$$

Analogicky lze vyjádřit i druhé napětí V_o^+ :

$$V_o^+ = V_{ex} \frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R_3}, \quad (6)$$

což znamená, že celkové výstupní napětí je jednoduše rozdílem těchto dvou napětí:

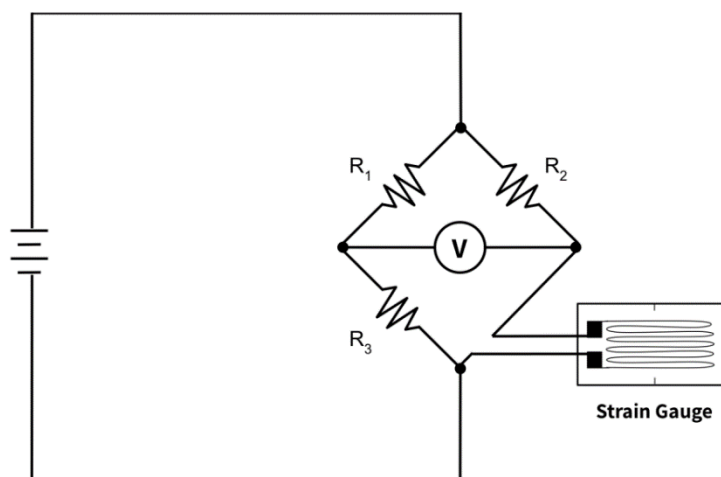
$$V_o = V_o^+ - V_o^-, \quad (7)$$

$$V_o = V_{ex} \frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R_3} - V_{ex} \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad (8)$$

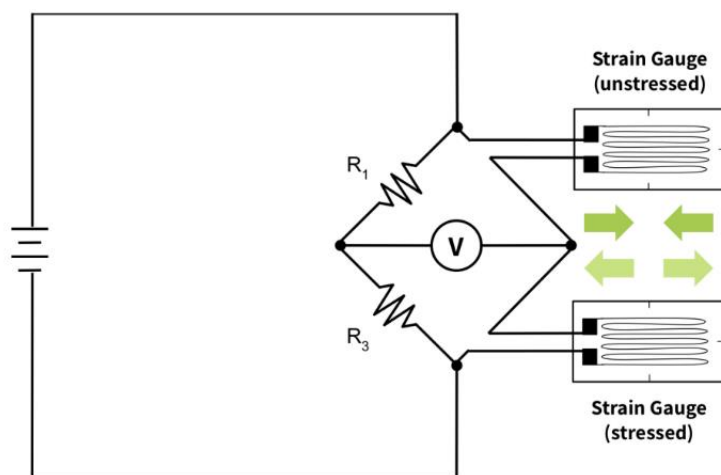
$$V_o = V_{ex} \frac{(R + \Delta R)R_1 - R_2R_3}{(R + \Delta R + R_3)(R_1 + R_2)}. \quad (9)$$

Podnětem pro použití Wheatsonova můstku a důvodem, proč zvyšuje přesnost, je to, že nyní se úbytek napětí na tenzometru porovnává s úbytkem napětí na podobném odporu při stejném budícím napětí. To znamená, že změna napětí na tenzometru bude stejného řádu jako srovnávací napětí. Také jakékoliv změny napětí způsobené změnou teploty nebo jinými faktory prostředí budou mít stejný vliv na všechny rezistory v obvodu, což je důležité pro zmírnění vlivu těchto faktorů prostředí na výstup [22].

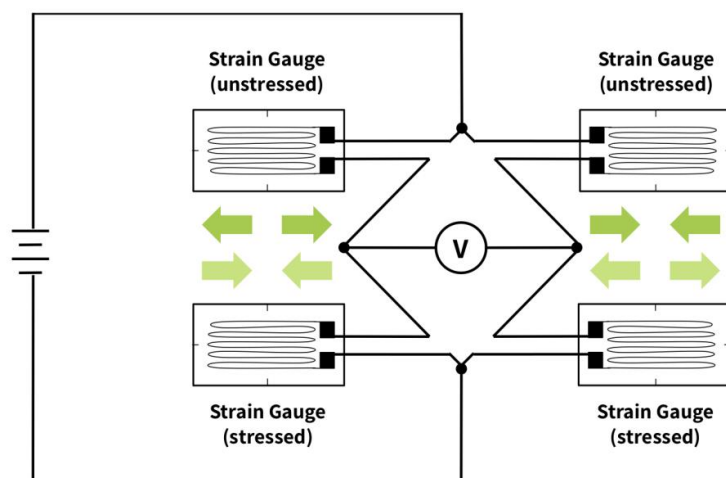
Všechny Wheatsonovy můstky mají čtyři odporové prvky. Při konstrukci tenzometrického snímače je jedno, kolik z těchto prvků budou tenzometry a kolik jen neproměnné rezistory. Pokud je pouze jeden z odporových prvků tenzometrický, tak se jedná o čtvrtmůstek. Pokud jsou dva prvky tenzometrické, jedná se o půlmůstek. Pokud jsou všechny čtyři odporové prvky tenzometry, tak se jedná o plný můstek viz Obr. 17, Obr. 18 a Obr. 19. Výhody a nevýhody jednotlivých konfigurací záleží na konkrétní aplikaci. Obecně platí, že čím méně měřících prvků, tím je levnější konstrukce, naopak více měřících prvků zvyšuje výkon můstku a pomáhá eliminovat např. vliv teploty [22].



Obr. 17: Čtvrtmůstkové zapojení [22].



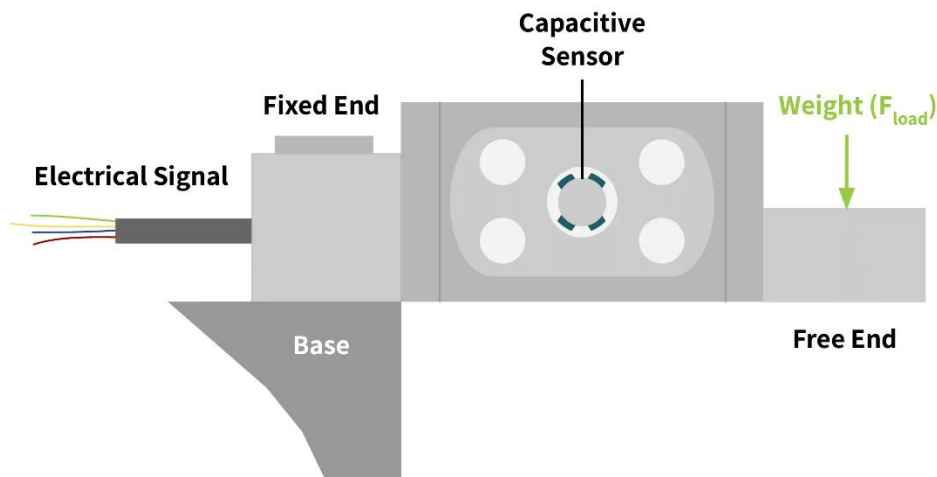
Obr. 18: Půlmůstkové zapojení [22].



Obr. 19: Plné zapojení [22].

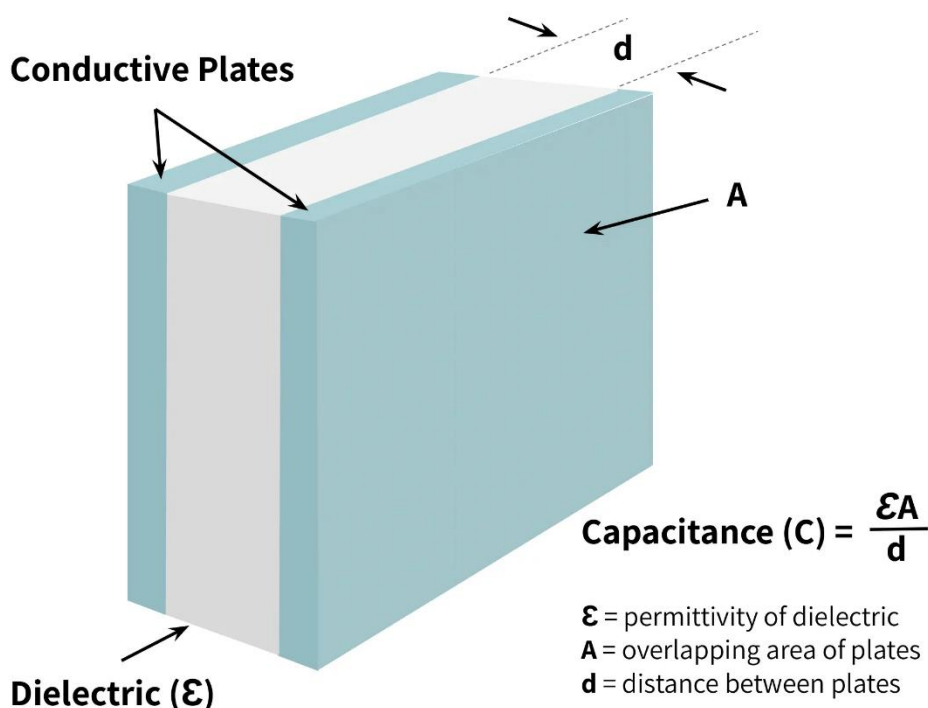
4.2.2 KAPACITNÍ SNÍMAČE SÍLY

Kapacitní snímače pracují na rozdíl od tenzometrických snímačů na principu schopnosti materiálu nebo systému uchovat elektrický náboj [21].



Obr. 20: Schéma kapacitního snímače síly ve stejné konstrukční variantě, jako předchozí tenzometrický snímač [21].

Skládají se ze dvou desek s mezerou vyplněnou dielektrikem, což může být např. i vzduch, přičemž se do desek přivádí elektrický proud do té doby, než se na každé z nich vytvoří stabilní elektrický náboj – na jedné desce kladný na druhé záporný. Když na jednu z desek začne působit síla, tak mezera mezi deskami se zmenší a uloží se v ní náboj. Tento náboj je pak výstupem kapacitního snímače síly a převádí se na měřené zatížení [21].



Obr. 21: Detailnější pohled na kapacitní sensor tvořený dvěma deskami a dielektrikem [21].

Jak je vidět na Obr. 21, tak kapacita C [F], čili schopnost tělesa uchovat elektrický náboj, je dána vztahem:

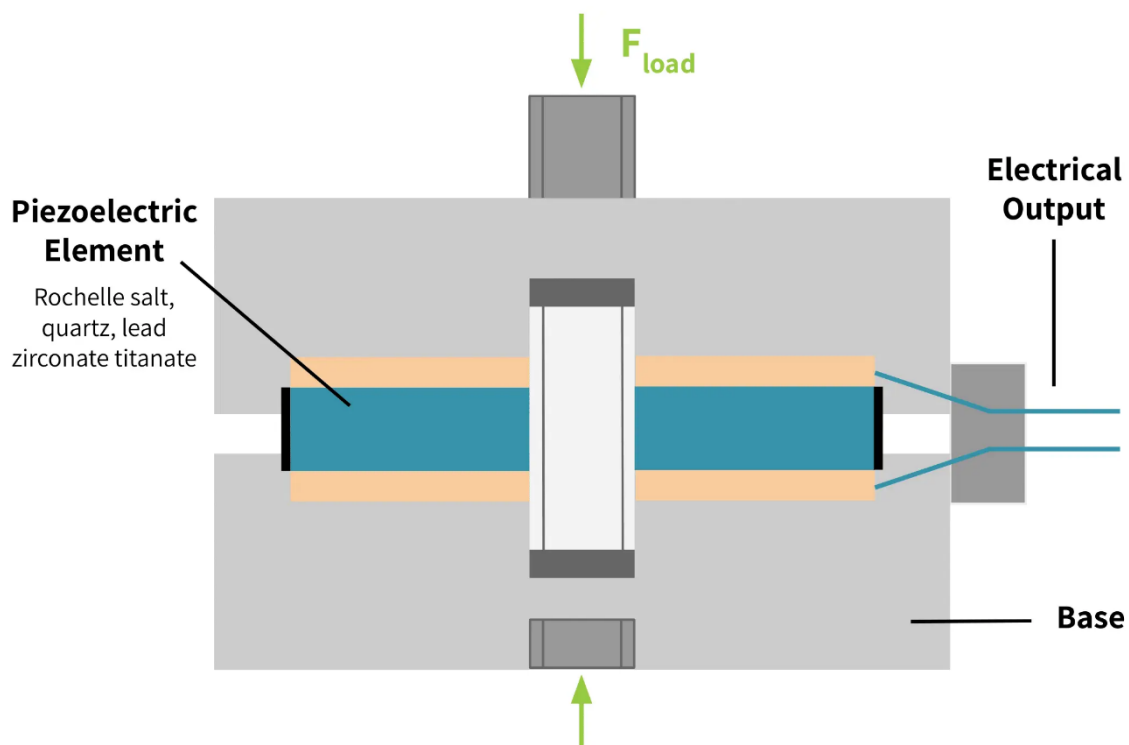
$$C = \frac{\varepsilon_2 A}{d}, \quad (10)$$

kde ε_2 [$F \cdot m^{-1}$] je permitivita dielektrika, A [m^2] je plocha desek a d [m] je vzdálenost mezi deskami [21].

Kapacitní snímače síly jsou velmi citlivé a přesné v širokém rozsahu sil. Díky jejich schopnosti fungovat v hermeticky uzavřeném prostředí se jeví jako perfektní snímače pro využití v potravinářské nebo lékařské aplikaci, kde je kladen velký důraz na hygienu. Stejně jako tenzometrické snímače nejsou vhodné do prostředí, kde by mohlo dojít ke vznícení, protože pracují s elektrickým nábojem. Další nevýhodou je, že některá dielektrika používaná v kapacitních snímačích síly jsou citlivá na teplotu a můžou tak ovlivňovat výsledky měření [21].

4.2.3 PIEZOELEKTRICKÉ SNÍMAČE SÍLY

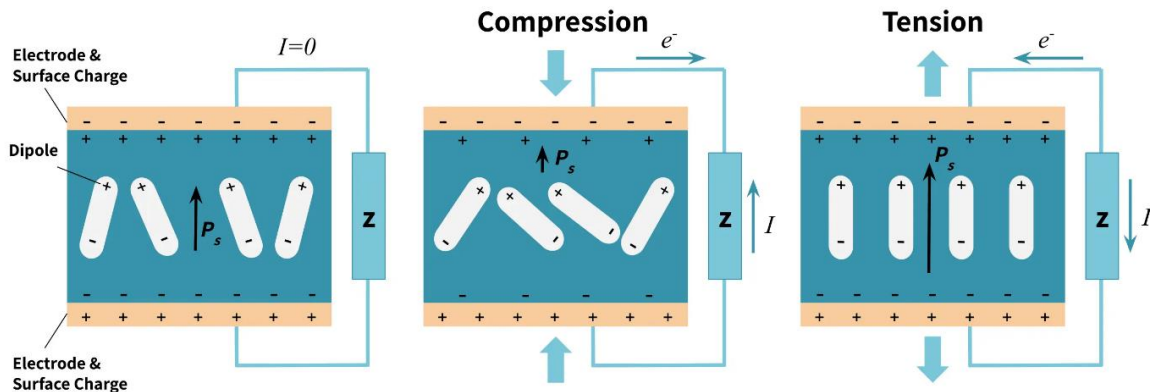
Dalším typem snímačů síly jsou piezoelektrické snímače síly, které fungují na principu piezoelektrického jevu.



Obr. 22: Schéma piezoelektrického snímače síly [21].

Piezoelektrický jev je schopnost některých materiálů vyvářet elektrický náboj při reakci na jejich deformaci (stlačení nebo natažení). Tento jev je možné pozorovat pouze u středově nesouměrných krystalů, které jsou vybroušeny tak, aby na jedné straně byly soustředěny náboje kladné a na druhé záporné. Bude-li se tento krystal deformovat, tak se změní polohy částic

s nábojem a na protilehlých plochách krystalu vzniknou stejně velké opačné náboje (dochází k posunu elektronů ve směru působící síly). Pokud budou na krystalech umístěny elektrody, je možné mezi nimi měřit piezoelektrické napětí [24].



Obr. 23: Grafika piezoelektrického jevu na piezoelektrickém materiálu při stlačení (Compression) a natahování (Tension) [21].

Jako piezoelektrické materiály můžeme označovat materiály ať už přírodní nebo syntetické:

- přírodní - berlinit, křemen, topaz nebo Seignettova či Rochellova sůl (vinan draselno-sodný $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6$),
- syntetické – např. titaničitan barnatý (BaTiO_3) nebo titaničitan-zirkoničitan olovnatý ($\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$) [25].

Piezoelektrický snímač síly je aktivní snímač, tudíž ke generování signálu nepotřebuje žádný externí zdroj energie. Jeho výstupní signál ale potřebuje zesílení, protože je velmi malý. Piezoelektrický snímač síly můžeme využít pouze při dynamických časově proměnných měřeních a nelze jej používat při statickém zatížení, protože se senzor výstupu vrátí na nulu. Další výhodou piezoelektrických snímačů síly je, že jsou odolnější než jiné snímače síly a mají také vysokou frekvenční odezvu [21].



Obr. 24: Piezoelektrický snímač síly od společnosti Kistler [26].

4.2.4 AKCELEROMETRY

Akcelerometr je zařízení, které měří vibrace nebo zrychlení určitého tělesa. Základní princip akcelerometrů spočívá v tom, že dokážou detekovat zrychlení a převádět ho na měřitelný signál. Rozlišujeme akcelerometry jednoosé anebo tříosé, které jsou schopné měřit ve třech na sobě kolmých směrech (X, Y a Z). Většina kvalitnějších akcelerometrů funguje na piezoelektrickém jevu detailněji vysvětleném v kapitole 4.2.3. V případě piezoelektrických akcelerometrů to znamená, že síla způsobená vibracemi nebo zrychlením způsobí, že se pomocí seismického závaží stlačí piezoelektrický krystal, který vytvoří elektrický náboj, jenž je úměrný síle, která na něj působí, a protože náboj je úměrný síle a hmotnost je konstantní, tak je náboj úměrný i zrychlení [27]. Dále rozlišujeme ještě piezorezistivní akcelerometry, které mění svůj odpor v závislosti na zrychlení, ale jsou méně citlivé než akcelerometry piezoelektrické, protože nedokážou dobře snímat zrychlení při nízkofrekvenčních vibracích nebo nárazech. Nicméně tyto akcelerometry nachází uplatnění v aplikacích, kde se dosahuje vysokých amplitud jako např. nárazové zkoušky vozidel nebo zkoušky zbraní. Posledním druhem jsou kapacitní akcelerometry, které mění svoji kapacitu v závislosti na zrychlení, které zaznamenávají [28]. Detailněji jsou kapacitní snímače opět vysvětleny v předchozí kapitole 4.2.2.

Akcelerometry nachází uplatnění v široké škále aplikací od vesmírného, přes automobilový průmysl až po kapesní elektroniku jako např. smartphony [27].

Piezoelektrické akcelerometry pracují s elektromechanickým senzorem, který je určen k měření statického nebo dynamického zrychlení. Statické zrychlení je např. gravitace nebo tření, kdy jsou tyto síly do značné míry stálé, zatímco dynamické zrychlení jako např. vibrace nebo rázy, jsou nerovnoměrné. Existují dva typy piezoelektrických akcelerometrů:

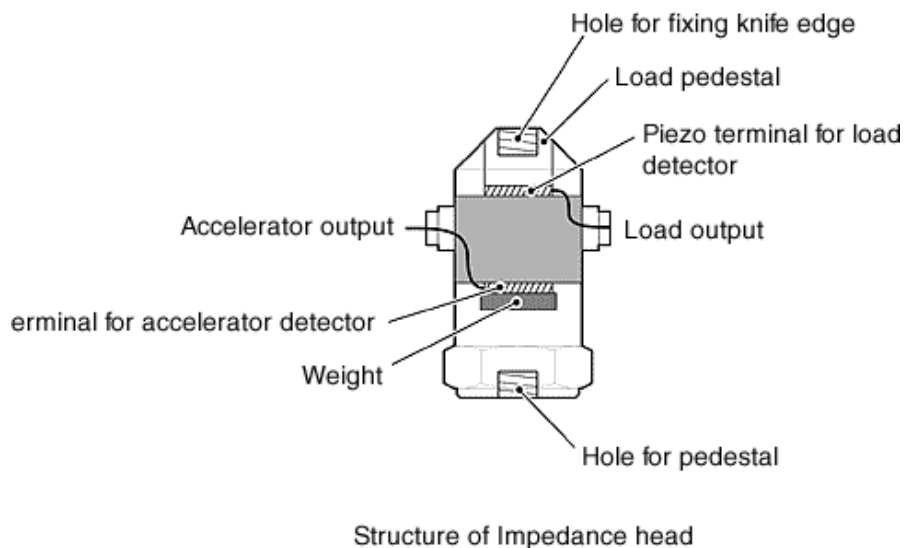
- **S vysokou impedancí** – u tohoto typu akcelerometru produkuje piezoelektrický krystal elektrický náboj, který je přímo připojen k měřicím přístrojům, přičemž nábojový výstup vyžaduje speciální úpravy a přístroje, které se většinou nachází pouze ve výzkumných pracovištích. Bývá využíván v aplikacích s vysokou teplotou (přes 120 °C), kde nelze použít akcelerometry s nízkou impedancí.
- **S nízkou impedancí** – tento typ má jako přední část nábojový akcelerometr, ale obsahuje ještě zabudovaný malý mikroobvod s FET tranzistorem, který převádí tento náboj na nízkoimpedanční napětí, které lze snadno propojit se standartními přístroji. Tento typ akcelerometru je běžně využíván v průmyslu [27].



Obr. 25: Tříosý piezoelektrický akcelerometr od společnosti Dytran Inc [29].

4.2.5 IMPEDANČNÍ SNÍMAČE

Impedanční snímače dokážou kombinovat měření dynamického zrychlení a síly do jednoho zařízení, protože v sobě kombinují akcelerometr a snímač síly. Tyto snímače fungují na principu mechanické impedance, která vyjadřuje poměr síly k rychlosti v určitém bodě mechanické soustavy. Impedanční snímače fungují na stejném principu jako výše zmíněné akcelerometry s nízkou či vysokou impedancí.



Obr. 26: Schéma impedanční hlavy [30].

Impedanční hlavy v sobě integrují akcelerometr a snímač síly, díky čemuž nachází uplatnění v modálních a strukturálních analýzách, v automobilním či leteckém průmyslu nebo při vibračních měřeních na shakerech. Např. impedanční hlava od společnosti DJB Instruments je vyrobena z nerezové oceli a může pracovat v rozsahu teplot -40 až $+121$ °C. Citlivost se pohybuje v rozmezí $5 - 10$ mV/N v případě snímání síly a $50 - 100$ mV/g pro měření zrychlení. Na rozdíl od tenzometrických snímačů, impedanční hlava umožňuje přesné měření působících sil v širokém pásmu. Ve variantě AF/50/5 lze pomocí impedanční hlavy měřit rozsah sil až do $1\,000$ N a zrychlení do ± 100 g [31].



Obr. 27: Impedanční hlava od společnosti Metromatics. Písmeno F označuje výstup pro sílu, písmeno A výstup pro zrychlení [32].

4.3 SBĚR A UKLÁDÁNÍ DAT

Při vhodném výběru snímače či senzoru je potřebné se zaměřit na zobrazení a záznam dat, přičemž pro tyto účely bývá využívána datová sběrnice ve většině případů doplněna o zesilovač.

4.3.1 DATOVÉ SBĚRNICE

Kompaktní sběr dat (DAQ nebo DAS) je proces vzorkování fyzikálních nebo elektrických jevů jako např. napětí, proud, teplota, tlak nebo zvuk a jejich převedení do digitální podoby, se kterou už lze pracovat pomocí softwaru v počítači. Moderní sběr dat se sestává ze čtyř základních částí:

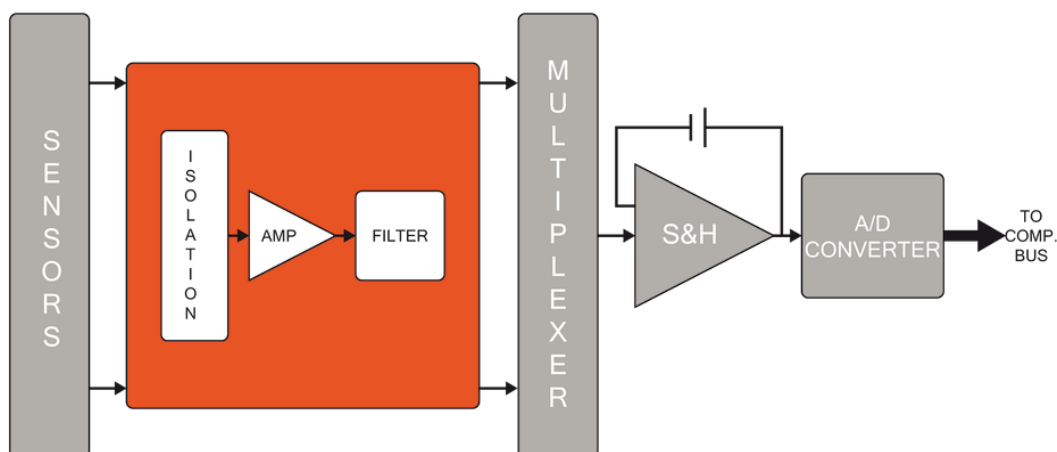
- senzoru,
- úpravy signálu,
- analogově-digitálního převodníku (A/D),
- počítače se softwarem pro záznam a analýzu dat.



Obr. 28: Základní rozdělení měřicího procesu na: senzor, sběr dat (DAQ) a počítač se softwarem schopný naměřená data uložit a zpracovat [33].

Mezi hlavní cíle kompaktního sběru dat (DAQ) patří získávání a ukládání dat, nicméně je určený také pro vizualizaci a analýzu dat ať už v reálném čase nebo po jejich zaznamenání. Tento proces se postupem času stal zcela nezbytným při testování nových výrobků napříč odvětvími přes automobily až po lékařské přístroje, protože umožňuje objektivní porovnání měření, které je možno případně opakovat, matematicky analyzovat nebo jinými způsoby vizualizovat [33].

Základním principem je převod reálných signálů do digitální oblasti, protože fyzikální jevy existují v analogové oblasti, tzn. ve fyzickém světě, ve kterém žijeme. Tohoto procesu je dosaženo pomocí senzorů a obvodů pro úpravu signálu a výstupy jsou vzorkovány analogově-digitálními převodníky (A/D nebo ADC) a poté jsou v časové doméně zapsány na digitální paměťové médium [33].

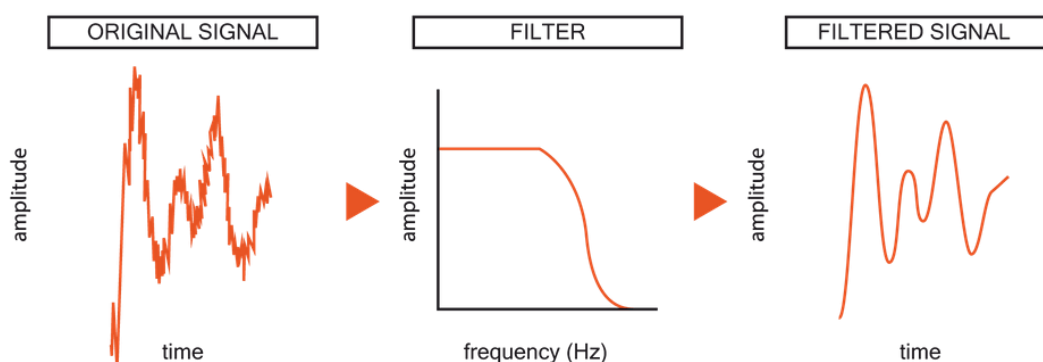


Obr. 29: Kompletní schéma systému analogového sběru dat [33].

Úprava signálu, která připravuje signál pro další fázi zpracování, patří mezi nejdůležitější kroky při zpracování dat. Mezi typické úpravy signálu patří například:

- **Zesílení** - zvyšuje se amplituda vstupního signálu pro výstupní signály s nízkým napětím.
- **Útlum** - naopak se snižuje amplituda vstupního signálu (např. pokud je výstupní napětí vyšší než 10 V, tak tento proces snižuje výstup, aby se dostal do správného rozsahu A/D převodníku).
- **Filtrování** – odstraňuje se nežádoucí šum v konkrétním frekvenčním rozsahu.
- **Linearizace** – je určena pro signály, které nevykazují lineární vztah ke skutečnému měření [34].

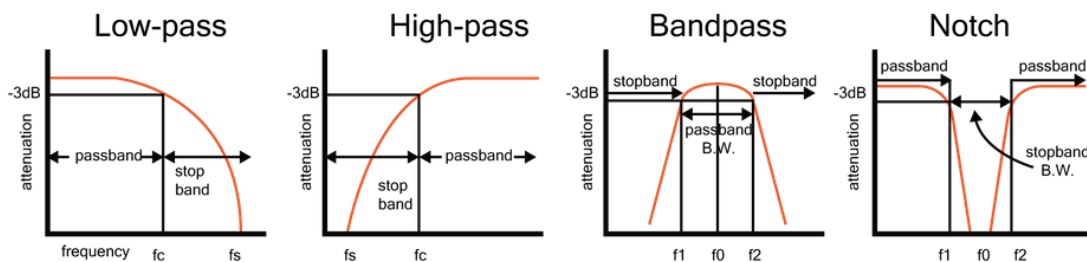
Každý signál, který chceme měřit, je ovlivněn elektrickým rušením nebo šumem, což má různé příčiny např. vliv okolních elektromagnetických polí, která se mohou indukovat, nebo vliv napěťových potenciálů, které existují mezi senzorem nebo měřícím systémem a testovaným předmětem. Systémy sběru dat proto poskytují volitelnou filtraci, která může pomoci k odstranění těchto rušení a tím pádem provedení kvalitnějších měření [33].



Obr. 30: Schéma ukazující filtraci původního signálu za účelem odstranění nežádoucích frekvencí [33].

Pro tyto účely slouží 4 základní typy filtrů:

- **Dolní propust (Low-pass filter)** – nepropouští signál o vyšších frekvencích než předem nastavená frekvence.
- **Horní propust (High-pass filter)** – naopak propouští signál o vyšších frekvencích než předem nastavená frekvence.
- **Pásmová propust (Bandpass filter)** – propouští frekvence v daném rozmezí dvou nastavených frekvencí.
- **Pásmová zádrž (Notch)** – naopak nepropouští frekvence v daném rozmezí frekvencí [33].



Obr. 31: Grafické znázornění čtyř výše popsaných filtrů [33].

Analogově-digitální převodníky (A/D nebo ADC) mohou být buď jednodanálové nebo multiplexní, přičemž právě v multiplexním systému A/D se k převodu více signálů z analogové do digitální oblasti používá jeden analogově-digitální převodník. V dnešní době už je většina A/D převodníků u systémů měření dat určených pro dynamická měření 24bitová a 16bitové A/D převodníky jsou obecně považovány za minimální rozlišení pro měření signálů. Rychlost, s jakou jsou signály převáděny, se nazývá vzorkovací frekvence. Některé aplikace jako např. měření teploty nevyžadují vysokou vzorkovací frekvenci, protože měření se nemění příliš rychle, naopak u měření proudů, rázů nebo vibrací je vyžadována vysoká vzorkovací frekvence v řádech desítek až stovek tisíc vzorků za sekundu. Velmi žádoucí jsou A/D převodníky poskytující anti-aliasingovou filtraci (AAF), protože zabraňují chybám měření způsobených vzorkováním signálu s příliš nízkou frekvencí [33]. Aliasing, neboli zkreslení signálu, vzniká při nedodržení Nyquistova teorému:

$$f_{vz} \geq 2f_{max}, \quad (11)$$

který říká, že vzorkovací frekvence f_{vz} [Hz] musí být rovna nebo větší, než je dvojnásobek maximální frekvence vzorkovaného signálu f_{max} [Hz]. Pokud tato podmínka není splněna, tak dojde ke ztrátě informací a zkreslení signálu [35].

Po převodu signálu na digitální je tento signál dále zpracováván v počítači, přičemž v první řadě je zobrazen uživateli na obrazovce pro vizuální kontrolu a přezkoumání. Většina DAQ systémů umožňuje zobrazení měřených dat nejen v časové doméně ale také například přímé číselné zobrazení. Mnoho systémů dnes už také umožňuje i zobrazení v sloupcových grafech, FFT nebo v X-Y grafech [33].

5 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Technické experimenty byly prováděny v laboratoři společnosti Garrett Motion v Brně na jedné z motorových zkušeben, kde je umístěn shaker. Pro technický experiment byl zvolen pneumatický aktuátor, který je součástí turbodmychadla pro nákladní vozy. Před začátkem experimentálního měření bylo potřeba navrhnout celý proces měření a sběru dat.

Příprava technického experimentu byla rozčleněna do těchto bodů:

- simulace pohybu aktuátoru,
- vhodný výběr snímačů,
- úprava aktuátoru pro proces měření,
- návrh upevnění aktuátoru na měřicí desce,
- hardwarové sestavení měřicího řetězce,
- vytvoření softwarového prostředí pro měření dat,
- uložení měřených dat.

Je potřeba zdůraznit, že měření probíhalo za pokojové teploty 25 °C, tudíž veškerá naměřená data a poté zpracované průběhy odpovídají této počáteční podmínce. Pro simulaci pohybu aktuátoru byl zvolen menší shaker, který se v laboratoři Garrett Motion nachází. Ze snímačů byly vybrány tři – tenzometrický snímač, jednoosý akcelerometr a snímač tlaku.

Všechny části, které byly součástí technického experimentu budou popsány v následujících kapitolách.

5.1 SIMULACE POHYBU AKTUÁTORU

Pro simulaci pohybu pneumatického aktuátoru byl využit shaker od společnosti Data Physics, konkrétně model GW V-350, který se nachází v laboratoři společnosti Garrett Motion. Jedná se o menší elektromagnetický vzduchem chlazený shaker, který lze využít pro experimenty v medicínském výzkumu, pro testování elektronických součástek, analýzu materiálů, testování automobilových součástí nebo vyvažování pneumatik [36]. Tyto shakery se skládají z elektromagnetického systému generujícího sílu potřebnou pro vytváření vibrací a vzduchového chlazení, které chrání shaker před přehřátím.

Shaker GW V-350 byl pootočen o 90°, aby simuloval pohyb pneumatického aktuátoru ve vodorovné poloze a to pouze v ose x. Měřicí deska shakeru byla využita pro upevnění držáku aktuátoru a pro jeho polohování pro různé varianty nastavení.

Shaker využívá digitální zesilovač DSA5-2K také od společnosti Data Physics. Jedná se o vysoko výkonový dvoukanálový zesilovač vhodný pro testování a měření vibrací.



Obr. 33: Elektromagnetický vzduchem chlazený shaker Data Physics GW V-350 umístěný v motorové zkušebně v laboratoři společnosti Garrett Motion.



Obr. 34: Digitální zesilovač Data Physics DSA5-2K.

5.2 VHODNÝ VÝBĚR SNÍMAČŮ

Vzhledem k dostupnosti snímačů v laboratoři společnosti Garrett Motion byl pro měření síly potřebné k posunutí táhla pneumatického aktuátoru zvolen tenzometrický snímač LCM703-500 od společnosti Omega Engineering. Jedná se o malý, nízko profilový, vysoce přesný tenzometrický snímač, který je díky svému nízkému profilu, robustní konstrukci a příznivé ceně hojně využíván v mnoha průmyslových aplikacích jako např. v robotice nebo u automatizovaných vázicích systémů [37].

Parametry tenzometrického snímače LCM703-500:

- Rozsah síly: 0 – 4 904 N
- Rozměry: 44,5 x 25,4 x 23,6 mm
- Linearita: $\pm 0,1$ %
- Délka kabelu: 3,6 m
- Nominální citlivost snímače: 2 mV/V



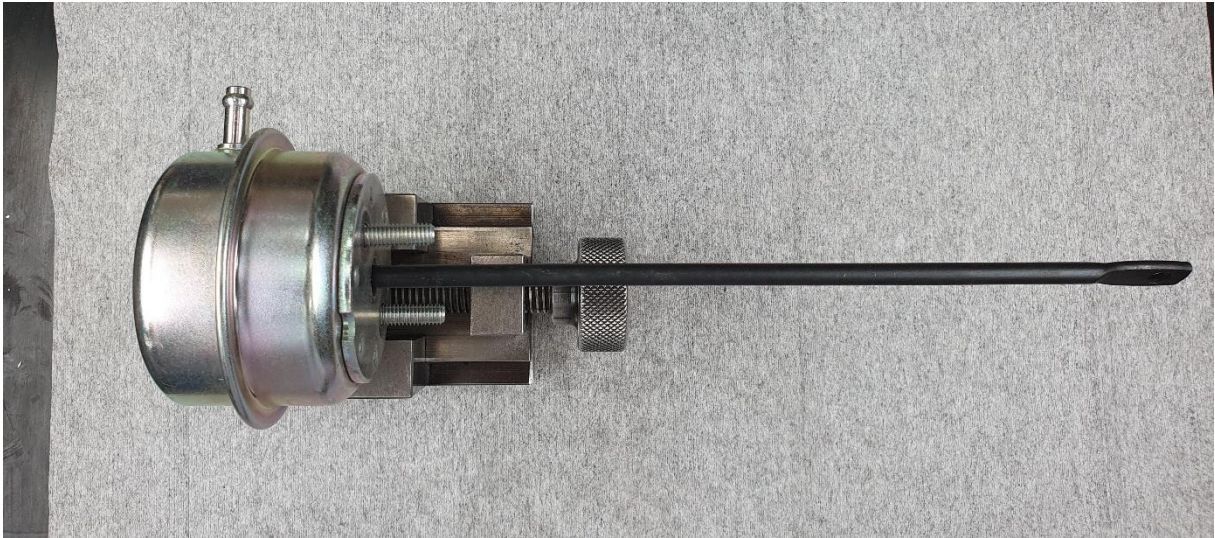
Obr. 35: Tenzometrický snímač LCM703-500 využitý pro účely experimentálního měření.

Dále byly pro účely měření využity jednoosý akcelerometr pro snímání zrychlení a pro zpětnou vazbu shakeru a také snímač tlaku pro přesnější nastavení požadovaného tlaku v aktuátoru.

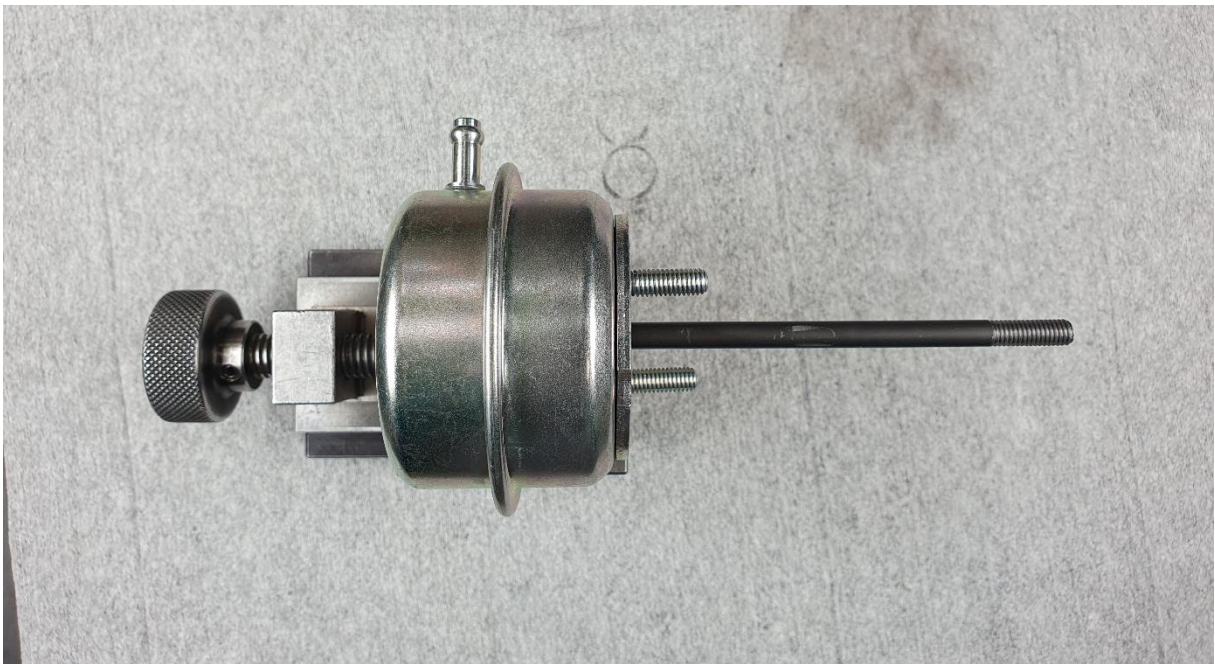
5.3 ÚPRAVA AKTUÁTORU

Pneumatický aktuátor je standartně dlouhý 275 mm. Skrze rozměry měřicí desky shakeru a hliníkového držáku, ve kterém aktuátor drží, bylo potřeba táhlo aktuátoru zkrátit na odpovídající délku a vytvořit na něm závit. Bylo změřeno, že je potřeba zkrátit jeho délku o 119 mm. Následně na něm byl pomocí závitníku vytvořen závit M6, aby na něj mohl být našroubován tenzometrický snímač.

Z hlediska opakovatelnosti měření bylo takových aktuátorů připraveno 10 kusů.



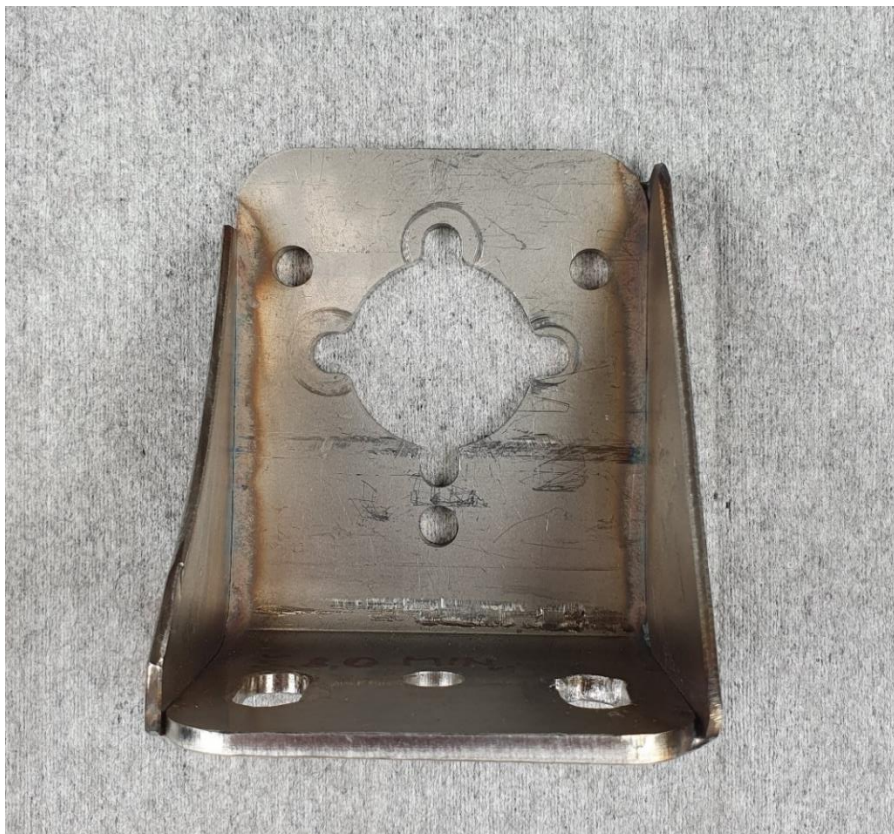
Obr. 36: Pneumatický aktuátor před úpravou.



Obr. 37: Upravený aktuátor se zkráceným táhlem a vytvořeným závitem M6.

5.4 NÁVRH UPEVNĚNÍ AKTUÁTORU NA MĚŘÍCÍ DESCE

Pro potřeby technického experimentu bylo potřeba vymyslet uchycení pneumatického aktuátoru na měřicí desce shakeru. K tomuto účelu byl využit držák, který byl již dříve k podobným experimentům v laboratořích společnosti Garrett Motion využit. Jedná se o jednoduchý L profil z hliníku, který je vyztužen pomocí bočnic pro zvýšení jeho tuhosti. Držák je připevněn k měřicí desce pomocí dvou šroubů s podložkami v drážkách, které umožňují pohyb aktuátoru při jeho tlakování na požadované hodnoty.



Obr. 38: Hliníkový držák s bočnicemi pro upevnění pneumatického aktuátoru.

5.5 HARDWAROVÉ SESTAVENÍ MĚŘÍCIHO ŘETĚZCE

Při sestavení hardwaru měřícího řetězce bylo ještě potřeba vyřešit redukční člen mezi vstupem do shakeru a táhlem aktuátoru, protože otvor v shakeru má závit M8, ale na táhlu aktuátoru byl vytvořen závit M6. Na změnu závitu z M8 na M6 byla použita redukce s matkou, která ale redukovala na jemný závit, takže bylo ještě potřeba přidat mezičlen v podobě redukce jemného závitu M6 na hrubý, který byl nutný pro našroubování tenzometrického snímače. Následně bylo do tenzometrického snímače z druhé strany našroubováno táhlo aktuátoru a aktuátor byl poté pevně připevněn na držák.

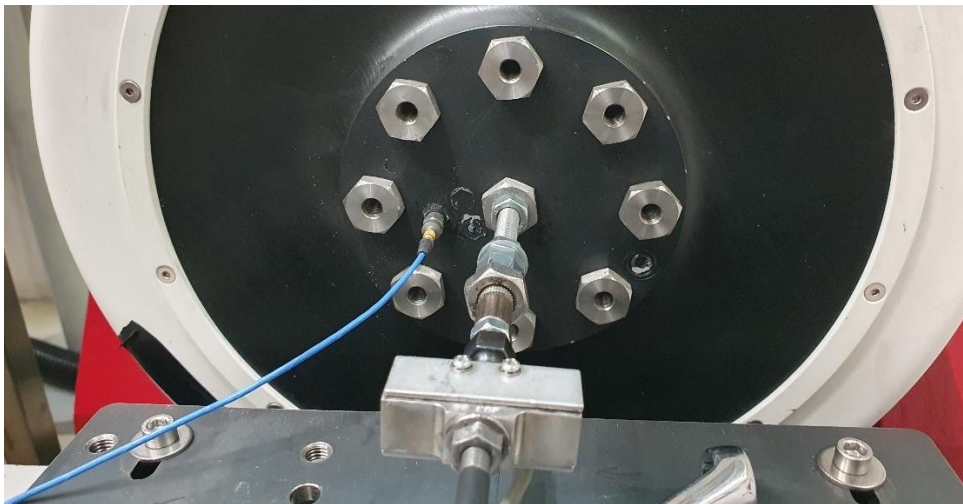


Obr. 39: Redukční členy při změně závitu z M6 na M8.

Při sestavování měřicího řetězce bylo potřeba myslet také na to, že při natlakování aktuátoru na konkrétní měřený tlak dojde k určitému stlačení pružiny a tím pádem k posunutí táhla aktuátoru na měřící desce. Při tlakování aktuátoru bylo možné využít při posunutí jak maximální délku drážky na držáku, tak posunu měřící desky shakeru, která je upevněna k základně pomocí šesti šroubů M6. Tenhle dvojitý posuv umožňoval využít u daného aktuátoru rozsah tlaků 0,5 – 1,3 baru, přičemž pro měření byly zvoleny o 0,1 baru větší respektive menší tlakové rozsahy z důvodu vyvarování se mezním stavům, které by mohly zkreslovat měřené výsledky.

Pro správné natlakování aktuátoru na požadovanou hodnotu tlaku bylo potřeba přidělat k výstupu stlačeného vzduchu redukční ventil, který měl stupnici od 0 do 15 barů. V tomto případě se dal velmi obtížně stanovovat tlak v nižších hodnotách v rozmezí mezi 0,6 až 1,2 baru, jak bylo zamýšleno. Z tohoto důvodu bylo potřeba k redukčnímu ventilu přidat ještě snímač tlaku, který umožňoval daleko přesnější regulaci tlaku na zvolené hodnoty, protože poskytoval přesnou číselnou odezvu přes notebook použitý pro účely měření tohoto technického experimentu.

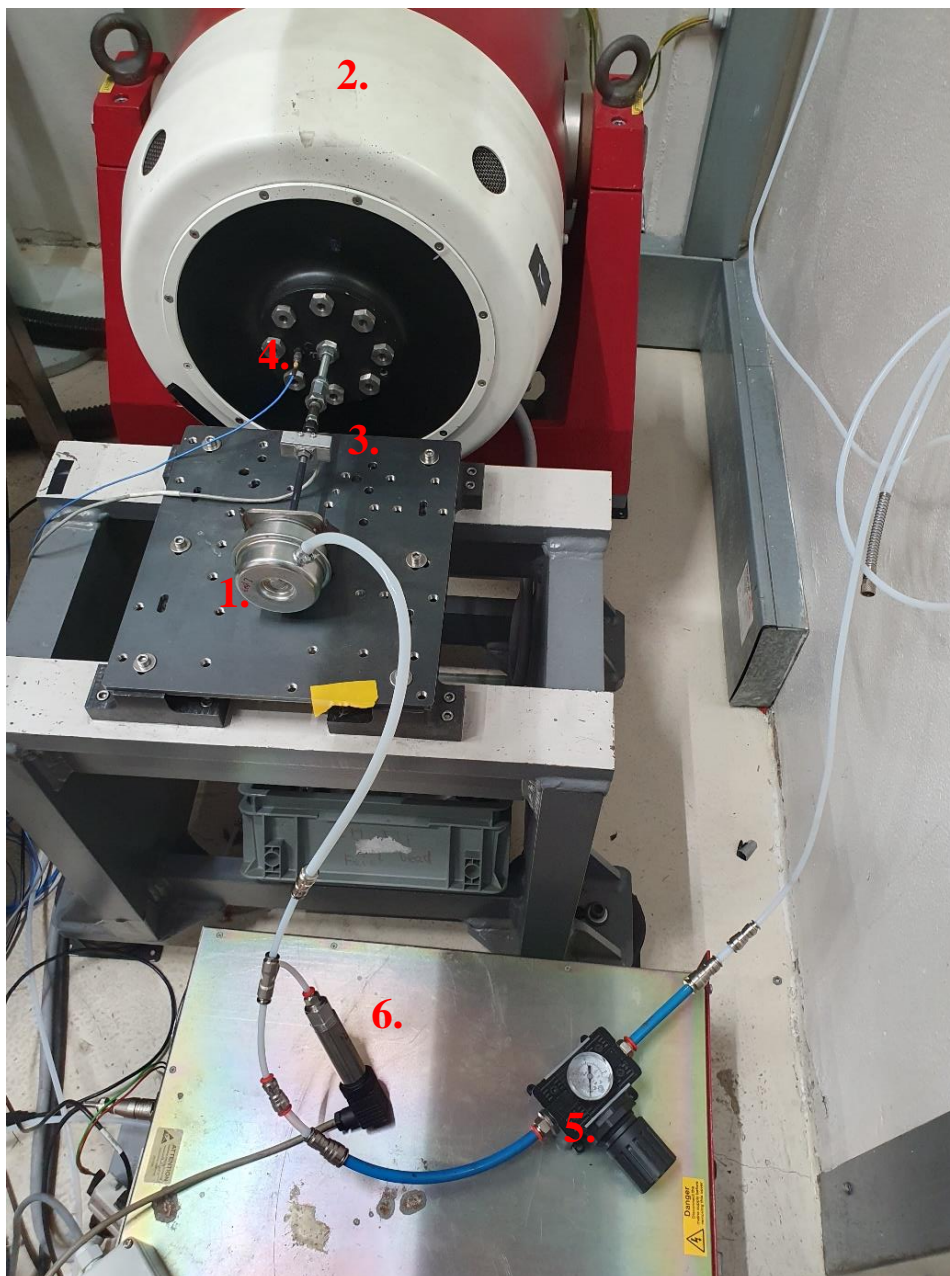
Na shaker byl dále přilepen pomocí včelího vosku jednoosý akcelerometr, který poskytuje zpětnou vazbu mezi shakerem a měřícím počítačem shakeru vybaveným programem Puma od společnosti Spectral Dynamics, kde se specifikují konkrétní parametry shakeru jako frekvence, posuv, typ signálu atd.



Obr. 40: Jednoosý akcelerometr přilepený včelím voskem na shaker.

Z důvodu potřeby časové synchronizace všech zařízení a snímačů, tzn. shakeru, tenzometrického snímače a snímače tlaku do jedné časové osy, byla využita datová sběrnice cDAQ-9174 od společnosti National Instruments, která umožňuje sběr dat v reálném čase. Sběrnice je vybavena 4 sloty pro měřicí moduly. Z důvodu různých rozsahů napětí na výstupu z daných snímačů byl pro každý snímač využit vlastní měřicí modul. Do prvního měřicího modulu byl vyveden signál z akcelerometru, který byl při výstupu od shakeru pro tyto účely rozdvojen. Druhý modul sbíral signál ze snímače tlaku a ve třetím slotu byl zapojen tenzometrický snímač.

Protože na tenzometrický snímač může mít vliv teplota, tak byl zapojen 20 minut před zahájením experimentálního měření, aby se zahřál na teplotu okolí.



Obr. 41: Sestavený měřicí řetězec: 1. pneumatický aktuátor, 2. shaker, 3. tenzometrický snímač, 4. akcelerometr, 5. redukční ventil a 6. snímač tlaku.

5.6 SYNCHRONIZACE A SOFTWAREVÉ PROSTŘEDÍ

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, problém byl, že všechny snímače a zařízení tzn. shaker, tenzometrický snímač a snímač tlaku neměřily v jedné stejné časové ose ale každý ve své, což způsobovalo určité zpoždění měřených dat od jednoho snímače oproti druhému a měřená data tedy nekorelovala. K řešení problému byla použita datová sběrnice cDAQ-9174 od společnosti National Instruments, kde byly do třech samostatných modulů vyvedeny signály z akcelerometru, tenzometrického snímače a snímače tlaku. Datová sběrnice cDAQ-9174 zahajuje měření dat pro všechny zapojené moduly se stejnou časovou značkou, tedy ve stejný

časový okamžik, čímž byla zaručená časová synchronizace měřených signálů zrychlení, tlaku a síly.

5.6.1 KALIBRACE TENZOMETRICKÉHO SNÍMAČE

Tenzometrický snímač bylo potřeba ještě před zahájením měření zkalibrovat. Kalibrace byla provedena pomocí oficiálně kalibrovaných závaží o hmotnostech $m_1 = 5 \text{ kg}$ a $m_2 = 10 \text{ kg}$, která byla zavěšena na tenzometrický snímač a poté byly odečteny hodnoty napětí pro určité zatížení. Síly byly vypočteny pomocí jednoduchých rovnic:

$$F_1 = m_1 \cdot g = 5 \cdot 9,81 = 49,05 \text{ N}, \quad (12)$$

$$F_2 = m_2 \cdot g = 10 \cdot 9,81 = 81,10 \text{ N}. \quad (13)$$

Pro tyto známé síly byly odečteny hodnoty napětí, přičemž dále byla odečtena hodnota napětí nezátíženého tenzometrického snímače, čímž byla zjištěna nula, a následně byly matematicky dopočítány hodnoty napětí pro záporné hodnoty sil, čímž vznikla lineární závislost napětí na síle. Tyto hodnoty byly nahrány do programu LabVIEW a bylo tak nastaveno vyhovující měřítko tenzometrického snímače pro experimentální měření, protože bylo dopředu očekáváno, že maximální amplitudy sil nepřekročí hodnotu 100 N.

Tab. 1: Kalibrační tabulka tenzometrického snímače zadaná do programu LabVIEW.

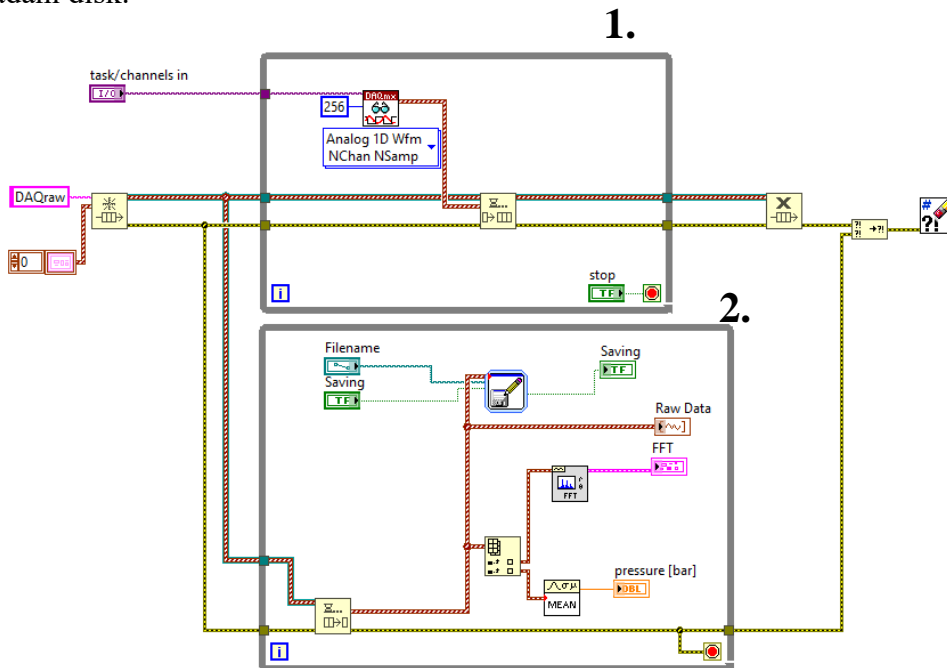
Napětí [μV]	Síla [N]
-9	0
217	49,05
-235	- 49,05
434	98,1
-452	- 98,1

5.6.2 VYTVORENÍ SOFTWAREVÉHO PROSTŘEDÍ V PROGRAMU LABVIEW

LabVIEW je grafické programovací prostředí od společnosti National Instruments, které inženýři používají k vývoji automatizovaných výzkumných, ověřovacích a výrobních testovacích systémů. Využívá grafické programování, kde uživatelé spojují ikony a grafické prvky do blokových diagramů podle svých potřeb [38]. V obsáhlé knihovně je možné vybírat z široké palety ikon nebo prvků, přičemž každá ikona nebo prvek reprezentují určitou funkci nebo operaci (např. matematickou operaci nebo komunikaci s hardwarem).

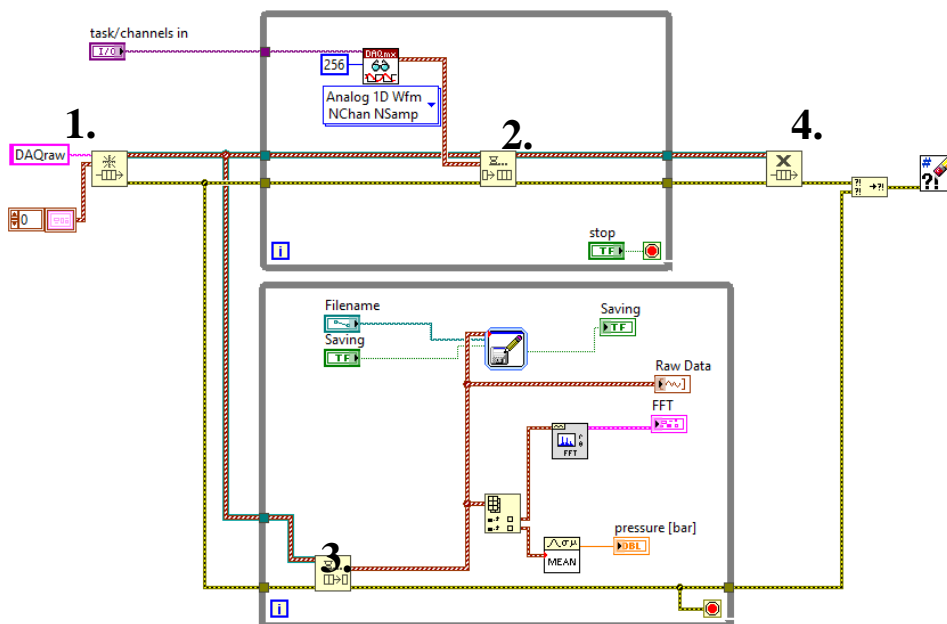
Program LabVIEW byl tedy zvolen pro softwarovou úpravu potřebnou pro vytvoření prostředí pro ukládání a zobrazování měřeného signálu. Blokový diagram byl rozdělen do dvou smyček, kde první (vrchní) smyčka na Obr. 42 označená č. 1 je zodpovědná za vyčítání dat z datové

sběrnice a druhá (spodní) smyčka označená č. 2 má na starosti zpracování a zobrazení dat a jejich ukládání disk.



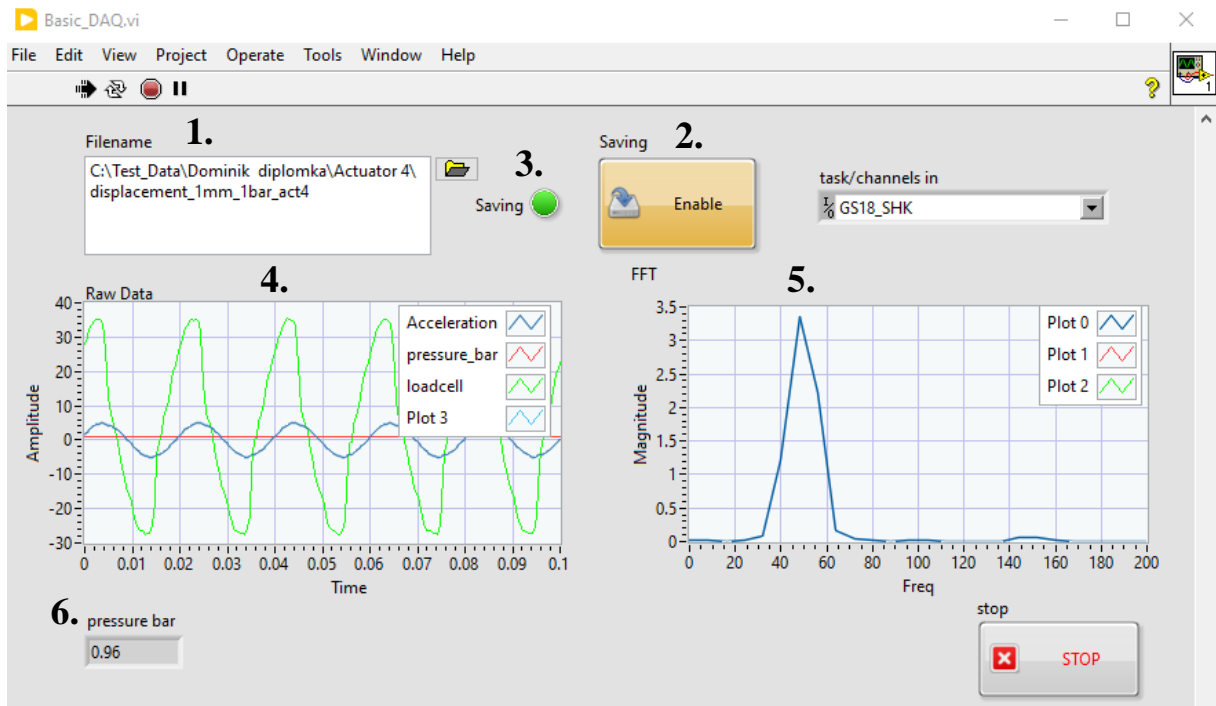
Obr. 42: Blokový diagram schématu měření tlaku, zrychlení a síly v jedné časové ose s ukládáním dat v programu LabVIEW s popsány smyčkami 1 a 2.

Pro zpracování signálu se v těchto případech měření signálu využívá datová struktura pro dočasné ukládání dat s názvem „Fronta a zásobník“, známější pod anglickou zkratkou FIFO (First In First Out). Její využití je detailněji popsáno na Obr. 43.

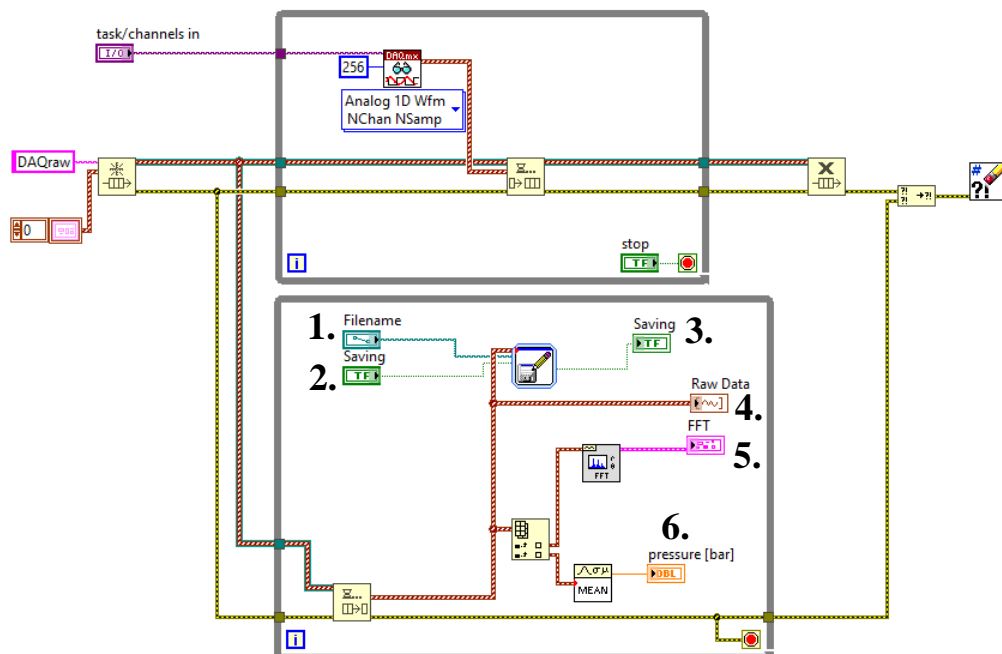


Obr. 43: Využití FIFO paměti: 1. inicializaci FIFO, 2. zápis dat do FIFO, 3. vyčítání dat z FIFO a 4. zrušení FIFO.

Při porovnání Obr. 44 a Obr. 45 lze vidět, jak bylo vytvořeno v blokovém diagramu prostředí pro uživatele, ve kterém se zobrazují měřená data v reálném čase a ve kterém je možné data uložit a souboru dat zadat cestu, kam se má uložit.



Obr. 44: Prostředí v programu LabVIEW, které vidí uživatel při experimentálním měření: 1. umožňuje zadat cestu, kam se mají data uložit, 2. tlačítko zahajující a ukončující ukládání dat, 3. kontrolka ukazující, kdy se data ukládají a kdy ne, 4. zobrazení měřených dat v reálném čase, 5. zobrazení frekvenčního spektra pomocí FFT a 6. číselné zobrazení hodnot tlaku v reálném čase.



Obr. 45: Zobrazení prostředí z Obr. 41 v blokovém diagramu.

5.7 PROVEDENÍ TECHNICKÉHO EXPERIMENTU

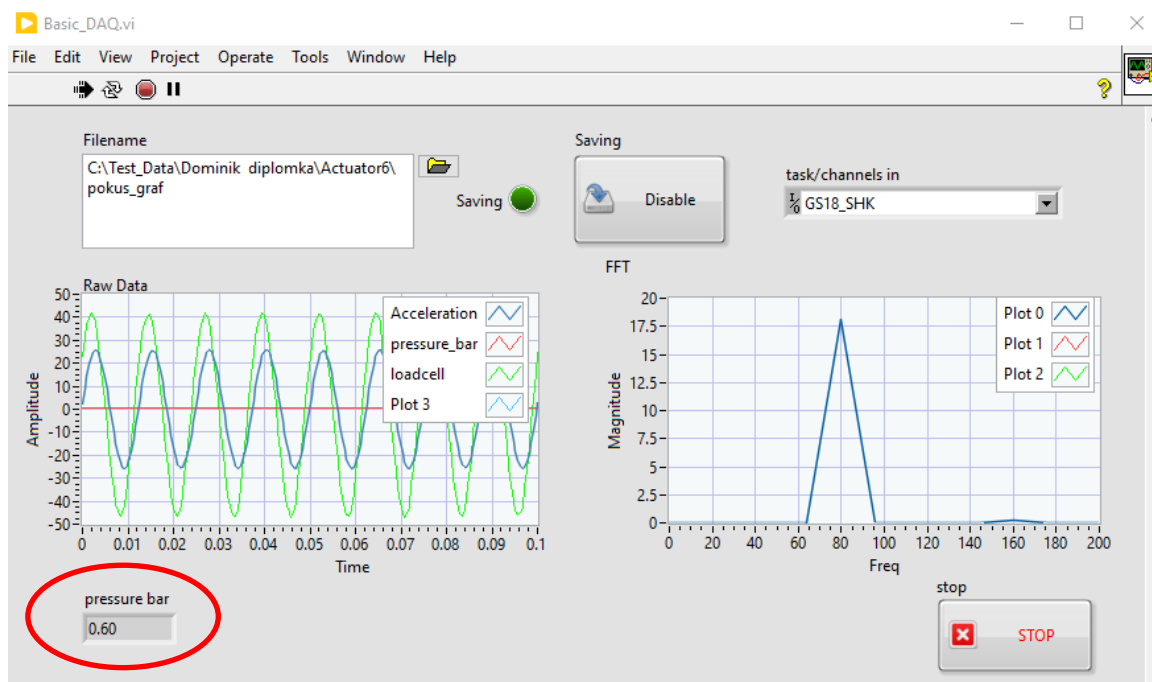
Po sestavení celého měřicího řetězce, upevnění všech snímačů a softwarové přípravě následovalo spuštění experimentální měření a získání dat. Měření bylo ovládáno a spouštěno z dvou na sobě nezávislých počítačů. První byl stolní počítač s programem Puma od společnosti Spectral Dynamics, který ovládal shaker a byly do něj zadány tyto parametry:

- frekvenční rozsah jednoho sweepu na 10 – 100 Hz,
- lineární průběh zvyšování frekvencí na daném frekvenčním rozsahu,
- čas jednoho sweepu na 90 s,
- posuv na: 0,5 mm; 1 mm a 2 mm.

Je potřeba upřesnit, že při nastavení posuvu např. na hodnotu 1 mm shaker koná pohyb v rozmezí od -0,5 mm až po +0,5 mm, čili zadaná hodnota posuvu 1 mm je od maxima po minimum.

Druhým počítačem byl notebook s nainstalovaným programem LabVIEW, který umožňoval ukládání dat a do kterého byly také vyvedeny signály z datové sběrnice cDAQ-9174, což v případě signálu ze snímače tlaku, který byl v LabVIEW číselně zobrazován v reálném čase viz Obr. 46, umožňovalo přesnější nastavení požadovaného tlaku v pneumatickém aktuátoru. Do tohoto notebooku s programem LabVIEW byly zadány tyto parametry:

- konstantní ukládání vzorků v čase,
- vzorkovací frekvence $f_{vz} = 2\,048\text{ Hz}$,
- max. a min. hodnoty pro tenzometrický snímač, snímač tlaku a akcelerometr,
- kalibrační tabulka pro tenzometrický snímač určená pro dané rozmezí -100 až 100 N,
- citlivost akcelerometru na 10,5 mV/g.



Obr. 46: Prostřední v softwaru LabVIEW ukazující aktuálně měření aktuátoru č. 6 při frekvenci 80 Hz a zobrazující v grafu měřená data zrychlení, tlaku a síly v reálném čase. V červeném kolečku je zobrazena číselná hodnota tlaku v reálném čase.

Parametry, které se v průběhu testů ručně měnily byly posuv a tlak. Byly vybrány tři posuvy – 0,5 mm; 1 mm a 2 mm; a tři tlaky – 0,6 baru; 1 bar a 1,2 baru, čímž vzniklo 9 různých nastavení aktuátoru pro experimentální měření. Pro těchto 9 různých nastavení pro každý z deseti připravených aktuátorů byly v reálném čase při začátku ve stejném časovém okamžiku měřeny tři parametry - zrychlení, tlak a síla. Tyto parametry se při vzorkovací frekvenci 2 048 Hz ukládaly do textového souboru, což při čase testu 90 sekund znamenalo, že při každém měření bylo uloženo 184 320 hodnot jak pro zrychlení, tak pro tlak i pro sílu.

5.7.1 PRŮBĚH MĚŘENÍ

Před každým měřením bylo potřeba našroubovat pneumatický aktuátor do tenzometrického snímače, dále jej připojit k stlačenému vzduchu a natlakovat jej na požadovaný tlak, čímž se aktuátor vysunul o určitou vzdálenost. Až poté bylo možné držák aktuátoru napevno uchytit k měřicí desce shakeru. Při takto upevněném a natlakovaném aktuátoru bylo možné v programu Puma ručně nastavit posuv shakeru na určitou vzdálenost a zahájit test. Následně bylo potřeba na měřicím notebooku v programu LabVIEW zahájit ukládání měřených dat. Po změření všech třech požadovaných posuvů bylo potřeba držák uvolnit, změnit tlak v aktuátoru na další požadovaný a pevně jej uchytit na nové pozici. Při pohybu aktuátoru po natlakování bylo využito posunu držáku aktuátoru na měřicí desce v daných drážkách, ale při změně tlaku z 0,6 baru na 1,2 baru bylo potřeba posunout i přímo měřicí deskou shakeru.



Obr. 47: Deset upravených pneumatických aktuátorů využitých pro účely experimentálního měření.

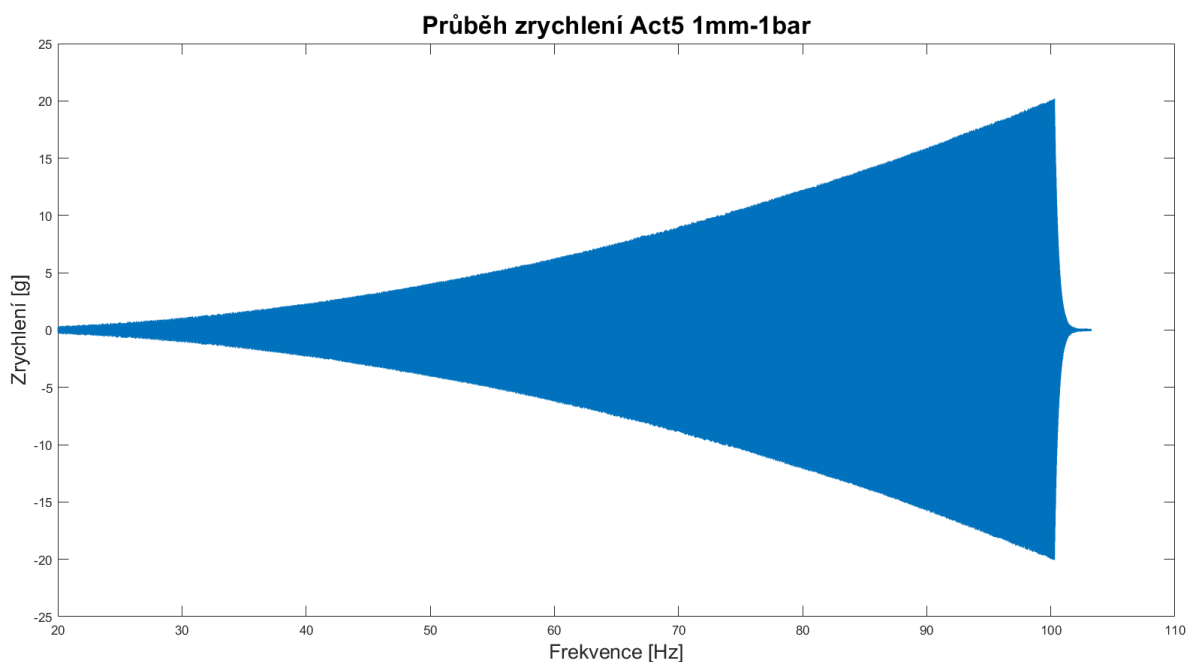
Po naměření všech kombinací tlaků a posuvů v závislosti na změně frekvence byl shaker vypnut, došlo k demontáži měřeného pneumatického aktuátoru, který byl nahrazen dalším a celé měření se stejným postupem se opakovalo.

Celkem bylo provedeno 12 testů, z nichž dva první musely být ze zpracování vyjmuty, protože se během druhého měřeného aktuátoru zjistilo, že tenzometrický snímač je rozbitý a musel být nahrazen novým. Po kalibraci nového tenzometrického snímače pokračovalo měření podle předem popsaného scénáře.

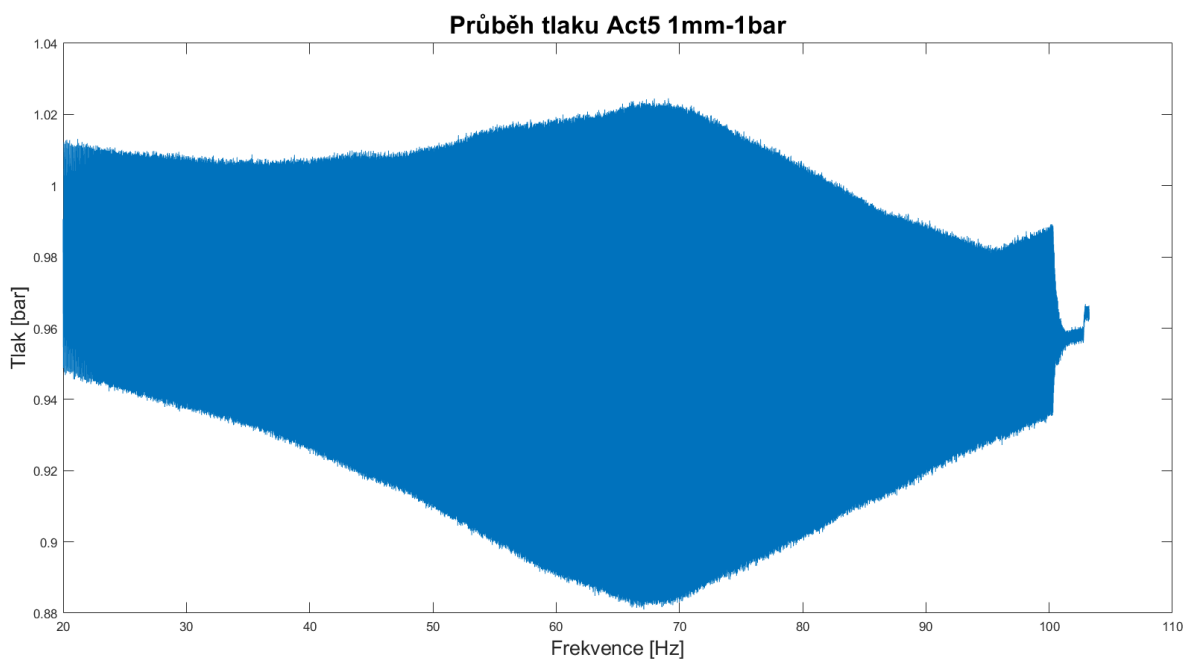
6 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Po ukončení experimentálního měření bylo potřeba zpracovat naměřená data a vyhodnotit je. V technickém experimentu bylo měřeno 10 pneumatických aktuátorů a pro každý z nich se měnily 3 různé tlaky (0,6 baru; 1 bar; a 1,2 baru) a 3 různé posuvy (0,5 mm; 1 mm a 2 mm), což vycházelo na 9 různých kombinací na jeden měřený aktuátor. Výsledkem tedy bylo 90 textových souborů s experimentálně naměřenými daty. Každý ze souborů obsahoval minimálně 184 320 hodnot pro zrychlení, sílu i tlak, jelikož každý test probíhal 90 sekund a měl vzorkovací frekvenci $f_{vz} = 2\,048\text{ Hz}$. Každý test aktuátoru měl nastavený sweep, při kterém projel frekvenční rozsah 10 – 100 Hz s lineárním zvyšováním po dobu 90 sekund. Jelikož ale nebyly dva počítače (jeden stolní ovládající shaker a druhý notebook se softwarem LabVIEW) spolu propojeny a synchronizovány, tak byl během měření ručně zakliknut proces zahájení a ukončení ukládání dat, což vedlo k chybě. Z naměřených dat se ukázalo, že se nepodařilo zahájit ukládání dat přímo od 10 Hz, jak bylo původně zamýšleno, ale rozsah chybovosti se pohyboval v rozmezí 2-5 Hz, čili ukládání dat bylo spuštěno až v rozmezí frekvencí 12-15 Hz. Z tohoto důvodu bylo určeno, že veškeré hodnoty použitelné pro grafy a tabulky v této diplomové práci nakonec budou v upraveném rozmezí 20 – 100 Hz, pro která spolehlivě existují naměřená data.

Na Obr. 48, Obr. 49 a Obr. 50 jsou vidět průběhy zrychlení, tlaku a síly pro pneumatický aktuátor č. 5 při nastaveném posuvu 1 mm a tlaku 1 bar při rostoucí frekvenci od 20 Hz až po maximální nastavenou hranici 100 Hz, kdy došlo k vypnutí shakeru. Při nastaveném posuvu 1 mm se shaker pohybuje v rozmezí: -0,5 mm až +0,5 mm, což způsobuje sinusový průběh všech měřených veličin.

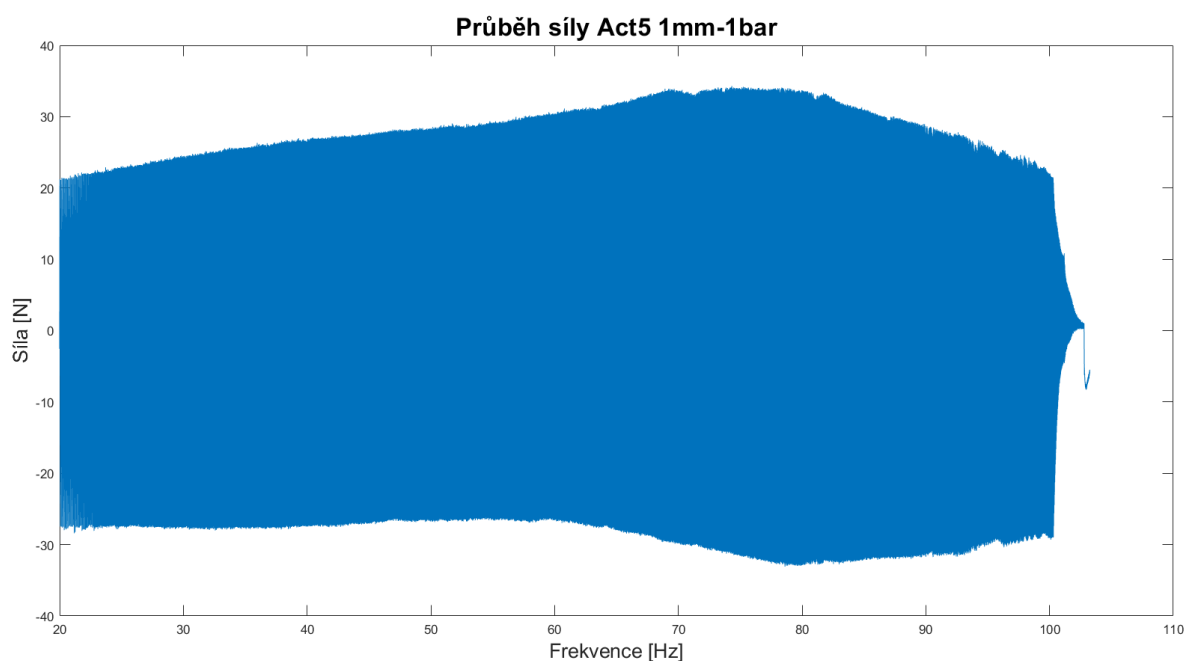


Obr. 48: Průběh zrychlení pneumatického aktuátoru č. 5 při nastaveném posuvu 1 mm a tlaku 1 bar.



Obr. 49: Průběh tlaku pneumatického aktuátoru č. 5 při nastaveném posuvu 1 mm a tlaku 1 bar.

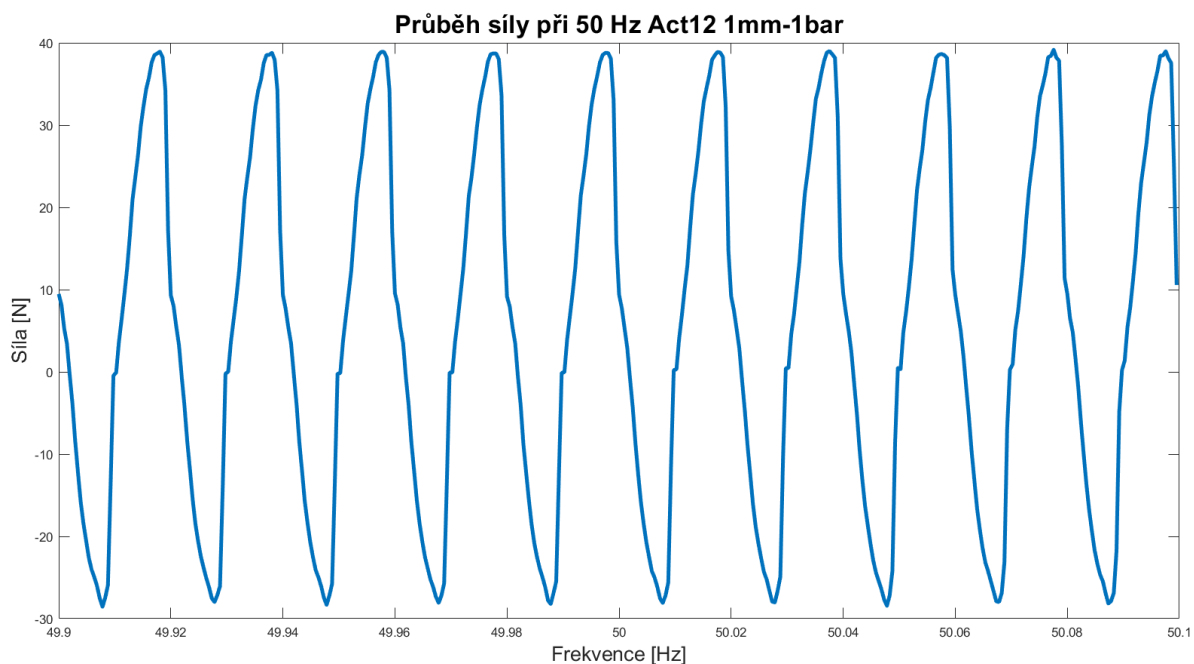
U průběhu tlaku na Obr. 49 je vidět, že během testu docházelo ke kolísání nastaveného tlaku. V tomto konkrétním případě v rozmezí 0,881 až 1,025 baru, přičemž k těmto maximálním výchylkám dochází v rozmezí 60 - 70 Hz. Průměrný tlak během tohoto konkrétního testu byl 0,96 baru. Na průběhu síly na Obr. 50 lze pozorovat, že ve frekvenčním rozsahu 60 – 80 Hz dochází k nárůstu maximálních amplitud síly, což může být způsobeno např. vlastní frekvencí aktuátoru v tomto frekvenčním rozsahu.



Obr. 50: Průběh síly pneumatického aktuátoru č. 5 při nastaveném posuvu 1 mm a tlaku 1 bar.

6.1 ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT SÍLY

Z dat naměřených pomocí tenzometrického snímače bylo potřeba vyříznout určité kousky signálu při konkrétních frekvencích, aby bylo možné zjistit, jaká síla je potřebná pro posunutí táhlem pneumatického aktuátoru pro dané nastavení tzn. pro daný tlak, posuv a frekvenci. Bylo určeno rozmezí $-0,1$ až $+0,1$ Hz pro každou danou hodnotu frekvence např. pro frekvenci 50 Hz byla vyříznuta data od 49,9 Hz po 50,1 Hz a z tohoto rozmezí byla odečtena průměrná hodnota maximálních amplitud od nuly, aby se našla maximální síla potřebná pro posunutí táhla aktuátoru při dané frekvenci a nastavení. Obr. 51 ukazuje průběh síly ve výše zmíněném rozmezí 49,9 – 50,1 Hz a lze si všimnout, že ne vždy se podařilo určit nulu, kolem které se vine sinusová křivka síly, přímo v číselné nule, tudíž v tomto případě bylo potřeba provést offset nuly do hodnoty 5,3 N a z této hodnoty určit maximální amplitudu, která činila $\pm 33,9$ N.



Obr. 51: Průběh síly při frekvenci 50 Hz při posuvu 1 mm a nastaveném tlaku 1 bar pro aktuátor č. 12.

A tímto způsobem, tedy nalezením maximální amplitudy síly potřebné při dané frekvenci pro posun táhla aktuátoru, bylo zpracováno všech 9 různých možností nastavení tlaku a posuvu pro všech 10 pneumatických aktuátorů. Vzniklo tak 9 tabulek porovnávajících experimentálně naměřené hodnoty pro daný posuv a daný tlak u deseti aktuátorů. Během porovnání výsledků bylo zjištěno, že i když se jedná o deset úplně stejných nových pneumatických aktuátorů, tak se nedá s jistotou říci, že jsou naprosto identické a mohlo při výrobním procesu dojít k menším odlišnostem při skládání jednotlivých aktuátorů. Druhým a možná závažnějším důvodem pro rozdílné výsledky je fakt, že nebylo vždy možné měření naprosto identicky opakovat stejně jako na předchozím měřeném aktuátoru, protože vždy bylo potřebné celý měřicí řetězec rozmontovat, povolit veškerá uchycení, odpojit od přívodu tlaku a opět vše složit a utáhnout, a i když byl kladen důraz na co nejpřesnější opakování měření, tak mohlo docházet k tomu, že ne vždy byly veškeré komponenty utaženy nebo našroubovány úplně identicky stejně jako v předešlém měření, čímž došlo k rozdílným hodnotám amplitud naměřené síly. Při porovnání těchto devíti tabulek je možné vyčíst závislosti síly na frekvenci, na tlaku v aktuátoru nebo na posuvu aktuátoru.

Tab. 2: Hodnoty maximálních amplitud síly v [N] pro posuv 2 mm a tlak 0,6 baru při různých frekvencích pro všech deset měřených pneumatických aktuátorů.

Frekvence [Hz]	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Act3_2mm_06bar	42.97	43.43	42.18	40.98	41.73	44.83	45.69	42.36	34.87
Act4_2mm_06bar	43.79	44.86	44.18	42.90	43.96	46.53	48.08	44.47	37.52
Act5_2mm_06bar	39.79	41.22	41.09	41.39	42.00	44.49	45.78	41.56	36.50
Act6_2mm_06bar	43.06	43.45	41.96	40.71	41.33	43.64	44.29	40.89	33.80
Act7_2mm_06bar	43.46	44.52	43.46	42.85	43.24	45.16	45.89	42.14	34.99
Act8_2mm_06bar	39.34	41.32	42.73	45.52	46.21	49.55	49.11	48.86	38.02
Act9_2mm_06bar	45.62	46.34	46.79	48.32	47.55	53.06	56.20	49.12	47.71
Act10_2mm_06bar	40.70	43.16	42.99	43.41	45.78	50.85	49.32	48.56	45.89
Act11_2mm_06bar	38.86	40.49	40.23	39.76	40.66	43.31	42.76	41.92	33.24
Act12_2mm_06bar	44.40	44.95	44.55	42.50	43.29	45.92	45.94	42.79	36.56
PRŮMĚR_2mm_06bar:	42.20	43.37	43.01	42.83	43.57	46.73	47.31	44.27	37.91

V Tab. 2 je možné vidět hodnoty maximálních amplitud sil pro konkrétní posuv a tlak v aktuátoru při jednotlivých frekvencích a ve spodním řádku je udělaný průměr z těchto naměřených hodnot použitý pro vykreslení závislosti v grafech. V tomto konkrétním případě nastavení pro posuv 2 mm a tlak 0,6 baru docházelo k maximální odchylce naměřených hodnot od průměrných hodnot v rozmezí 2,79 – 9,8 N, což v přepočtu na procenta vychází na rozmezí 6,4 – 22,5 % rozdílu od průměrné hodnoty maximální amplitudy síly.

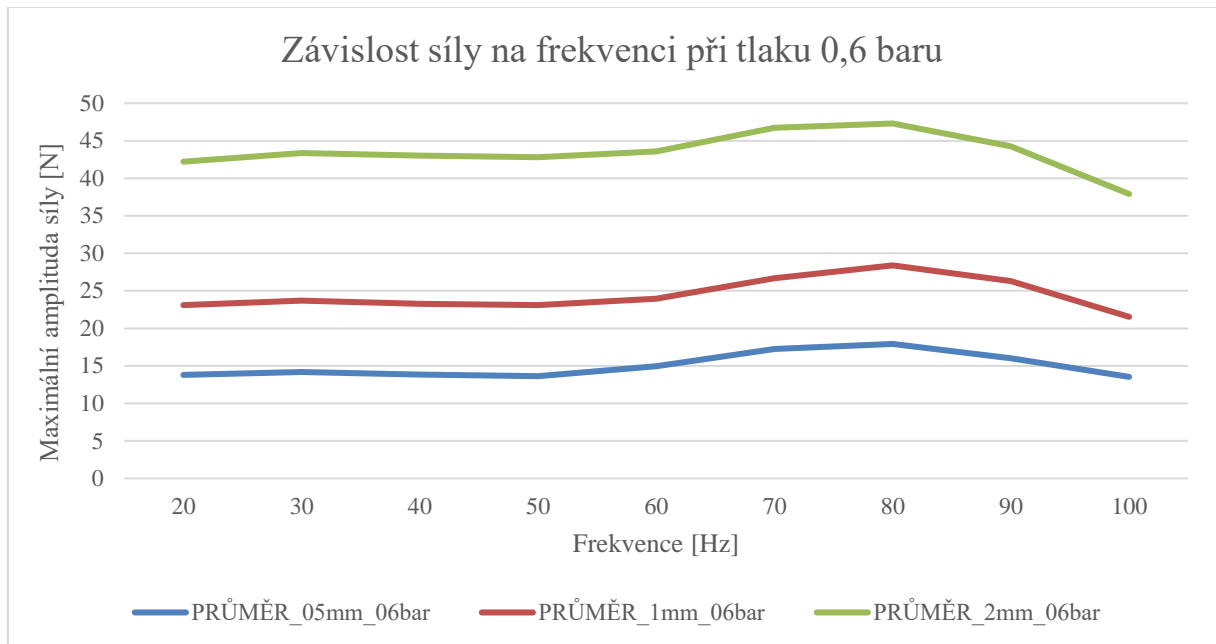
Tab. 3: Hodnoty maximálních amplitud síly v [N] pro posuv 0,5 mm a tlak 0,6 baru při různých frekvencích pro všech deset měřených pneumatických aktuátorů.

Frekvence [Hz]	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Act3_05mm_06bar	13.33	13.55	13.02	12.57	13.55	15.73	16.33	14.28	12.06
Act4_05mm_06bar	14.47	14.85	14.44	14.03	15.14	16.98	17.93	16.18	13.96
Act5_05mm_06bar	12.70	13.13	12.86	12.77	14.16	16.78	16.91	14.99	12.65
Act6_05mm_06bar	12.41	12.52	11.92	11.71	12.45	14.65	14.96	13.34	10.85
Act7_05mm_06bar	13.43	13.83	13.26	13.43	14.38	16.60	17.30	14.89	13.14
Act8_05mm_06bar	11.63	11.69	11.39	11.12	12.46	14.50	15.57	13.45	11.26
Act9_05mm_06bar	18.17	18.57	18.04	17.91	19.04	21.21	22.56	20.50	18.32
Act10_05mm_06bar	14.79	16.15	16.60	16.89	20.41	23.48	23.25	21.06	16.48
Act11_05mm_06bar	12.24	12.48	12.37	12.20	13.52	15.57	16.52	15.07	12.10
Act12_05mm_06bar	14.93	15.17	14.31	13.72	14.41	17.27	17.90	16.44	14.49
PRŮMĚR_05mm_06bar:	13.81	14.19	13.82	13.63	14.95	17.27	17.92	16.02	13.53

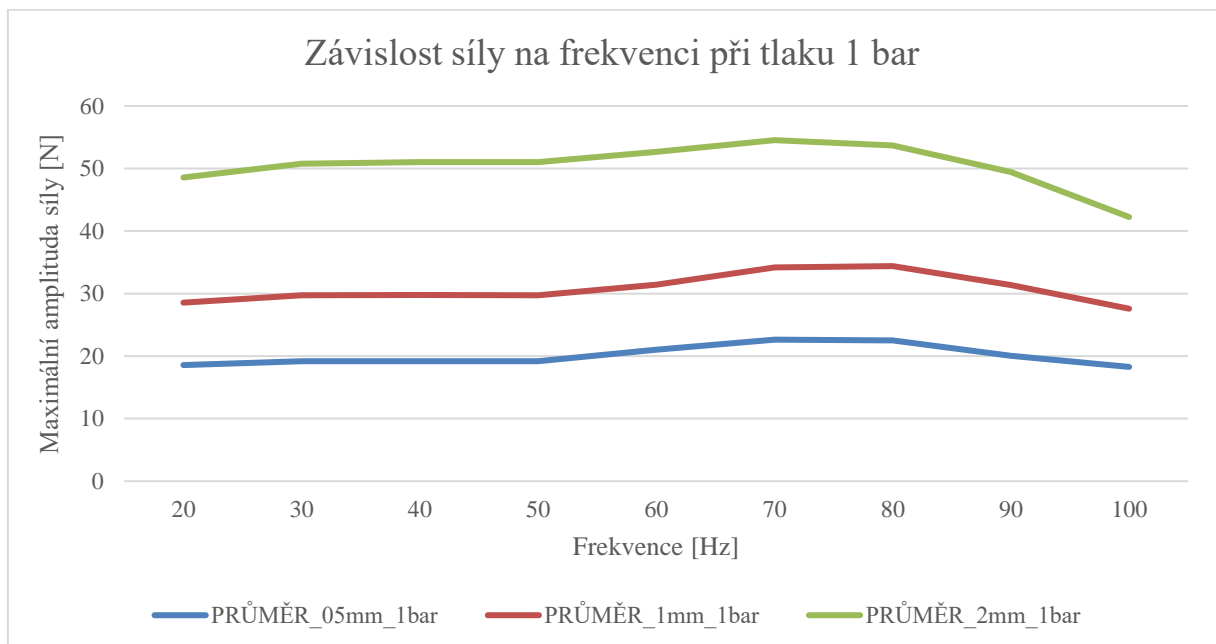
V Tab. 3, která ukazuje hodnoty maximální amplitudy síly pro nastavení znamenající posuv 0,5 mm a tlak 0,6 baru, tedy pro stejný tlak jako v předchozí Tab. 2 ale pro menší posuv, lze pozorovat menší hodnoty síly, protože logicky bude potřeba menší síla k menšímu posuvu, ale dochází zde naopak k větší výchylce a rozdílnosti výsledků, protože se zde pohybuje maximální výchylka od průměrných hodnot amplitud sil v rozmezí 2,18 – 6,2 N, což ale v procentuálním

vyjádření znamená rozmezí 14,5 – 41,3 % rozdílu od průměrné hodnoty maximální amplitudy síly, takže odchylka je zde skoro dvojnásobná v porovnání s posuvem 2 mm, kde dochází k naměření vyšších hodnot sil.

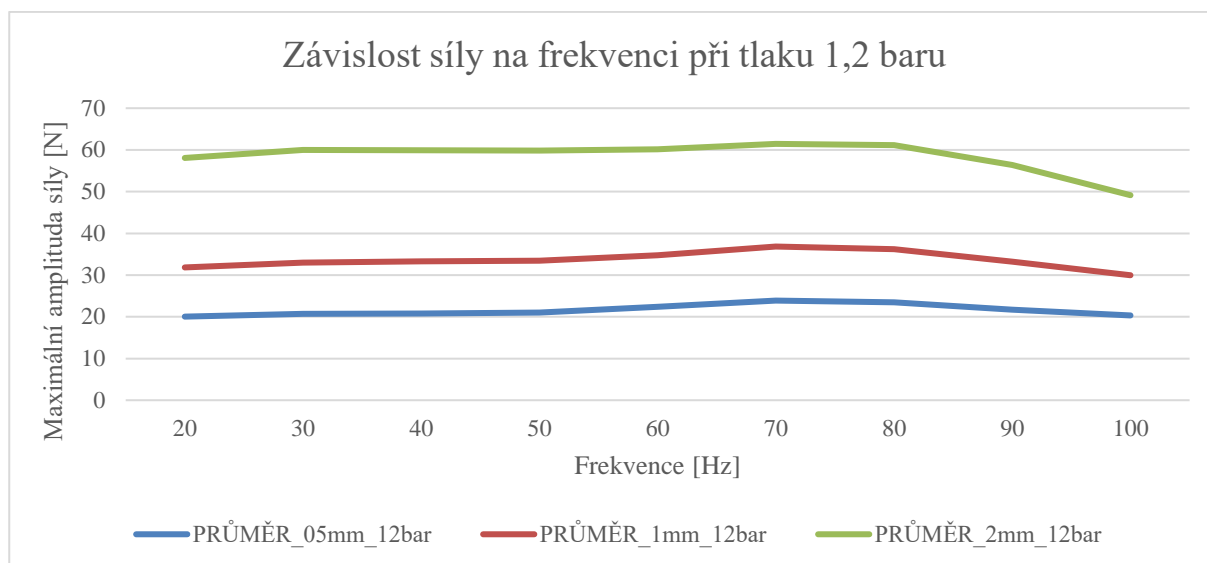
6.1.1 ZÁVISLOST SÍLY NA FREKVENCI PŘI STEJNÉM TLAKU



Obr. 52: Závislost maximální amplitudy síly na frekvenci při stejném tlaku 0,6 baru a při odlišných posuvech.



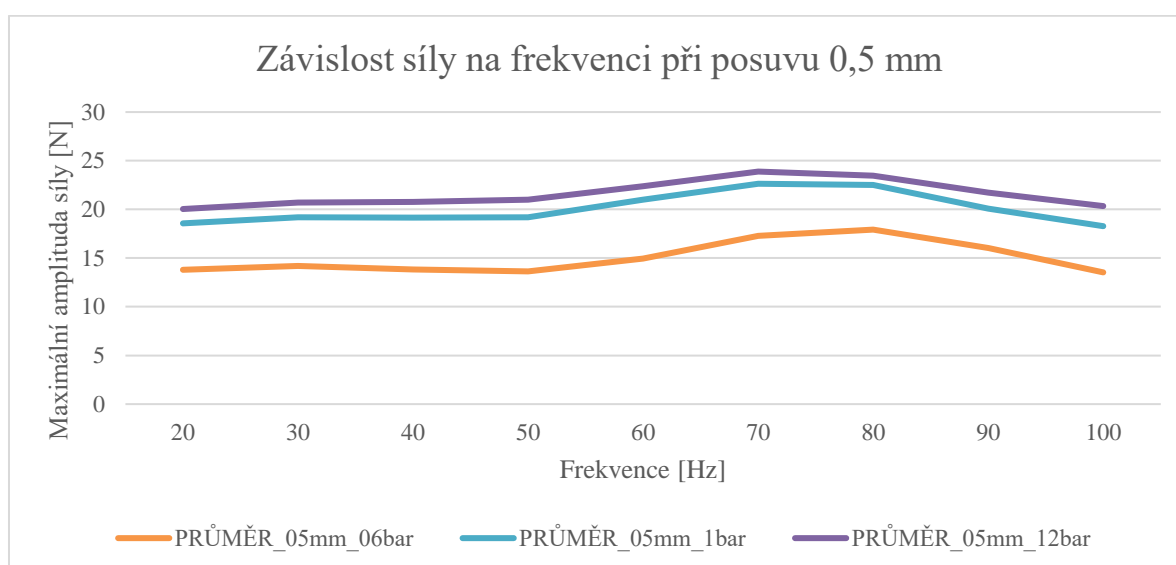
Obr. 53: Závislost maximální amplitudy síly na frekvenci při stejném tlaku 1 bar a při odlišných posuvech.



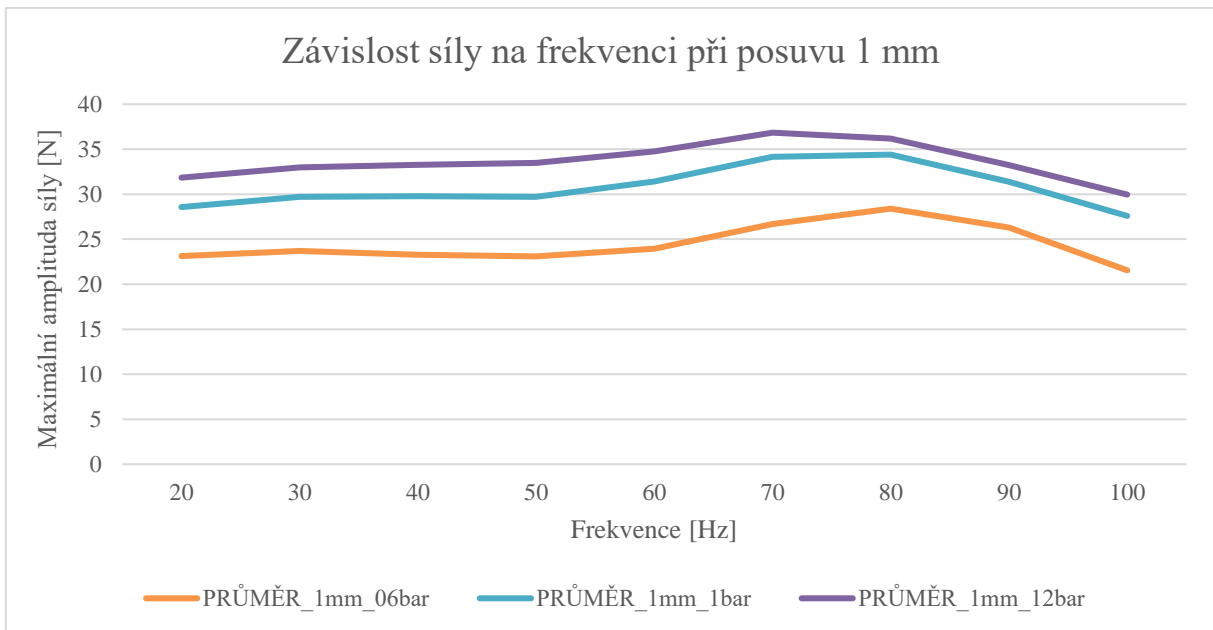
Obr. 54: Závislost maximální amplitudy síly na frekvenci při stejném tlaku 1,2 baru a při odlišných posuvech.

Z daných závislostí zobrazených na Obr. 52, Obr. 53 a Obr. 54 lze pozorovat logický jev, a to že čím větší je posuv táhla aktuátoru, tím větší je na tento úkon potřeba síla. Lze také pozorovat, že průběh sil je v rozmezí 20 – 60 Hz přibližně konstantní, ale mezi 70 až 90 Hz dochází najednou k nárůstu síly, přičemž za touto hranicí dojde opět k poklesu měřené síly. Tento jev si lze vysvětlit tak, že v tomto rozmezí má pneumatický aktuátor určitou vlastní frekvenci, kdy dochází k menšímu tlumení systému a maximální amplituda síly tedy vzroste. Při srovnání Obr. 52, Obr. 53 a Obr. 54 si lze všimnout, že tento jev je potlačen při vyšším tlaku, kdy při tlaku 1,2 baru dojde k daleko menší výchylce síly mezi 60 a 70 Hz než při tlaku 0,6 baru.

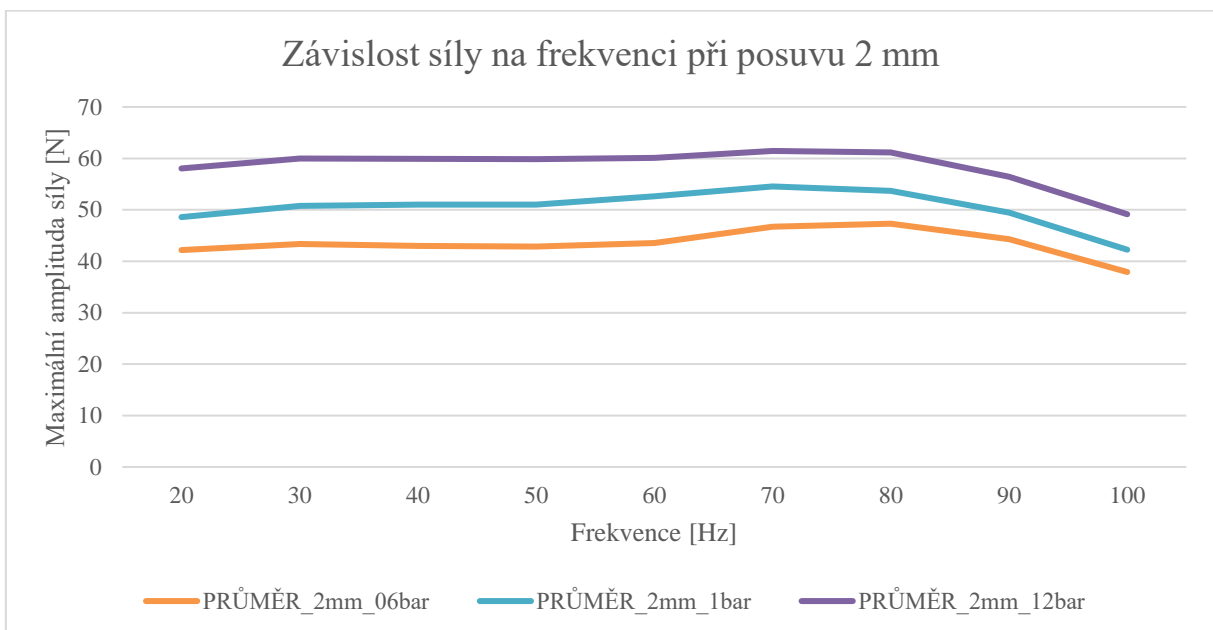
6.1.2 ZÁVISLOST SÍLY NA FREKVENCI PŘI STEJNÉM POSUVU



Obr. 55: Závislost maximální amplitudy síly na frekvenci při stejném posuvu 0,5 mm a rozdílných hodnotách tlaku.



Obr. 56: Závislost maximální amplitudy síly na frekvenci při stejném posuvu 1 mm a rozdílných hodnotách tlaku.

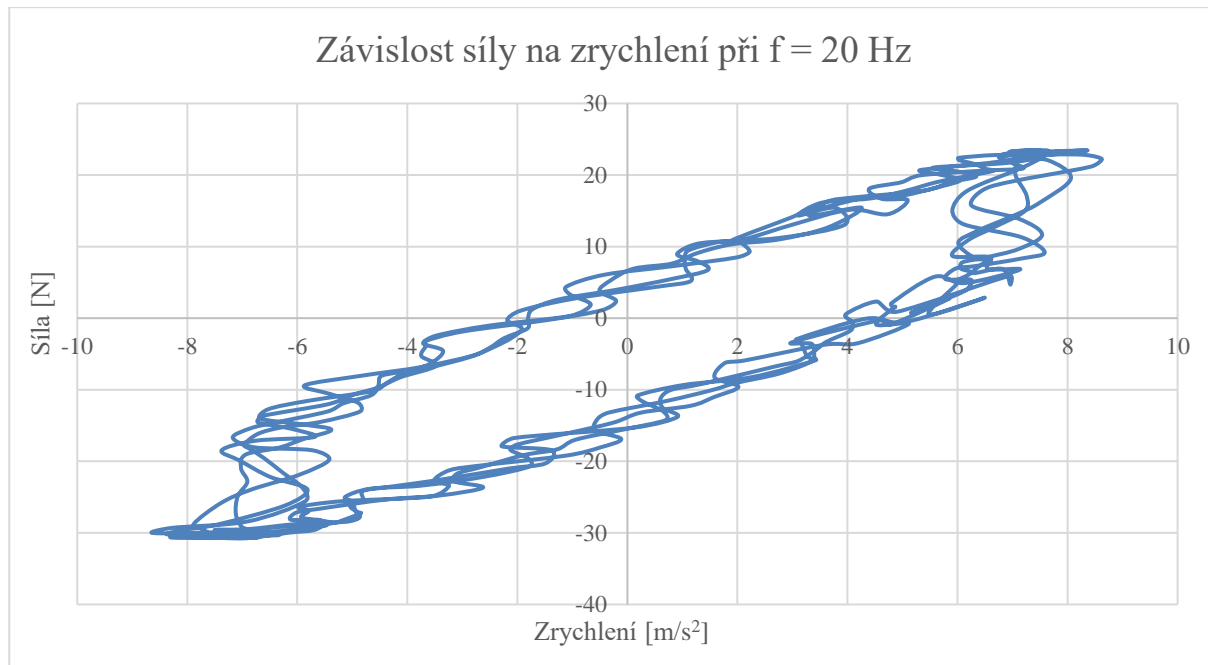


Obr. 57: Závislost maximální amplitudy síly na frekvenci při stejném posuvu 2 mm a rozdílných hodnotách tlaku.

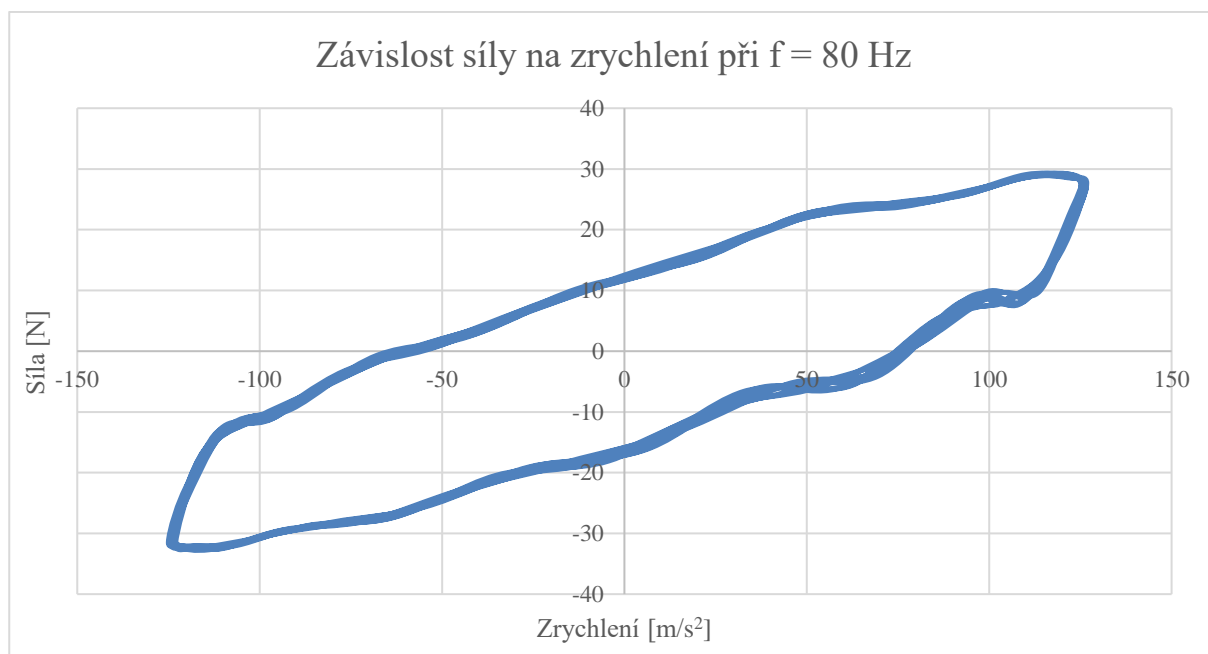
Ze všech třech grafů ukazujících závislost síly na frekvenci při stejném posuvu je patrné, že tlak ve všech třech případech sehrává stejnou roli, tedy že čím vyšší je tlak v aktuátoru, tím větší je potřebná síla pro posuv táhla daného aktuátoru. V případě konkrétně prvních dvou grafů na Obr. 55 a Obr. 56 lze pozorovat, že je patrný i rozdíl v tlacích, kdy fialová křivka (1,2 baru) a modrá křivka (1 bar) jsou si blíže, protože rozdíl v tlacích je jen 0,2 baru, zatímco v případě modré křivky (1 bar) a oranžové křivky (0,6 baru), kde je rozdíl tlaku dvojnásobný, tedy 0,4 baru, tak jsou křivky od sebe více vzdáleny, což opět dokazuje závislost maximální amplitudy síly na natlakování pneumatického aktuátoru.

6.1.3 ZÁVISLOST SÍLY NA ZRYCHLENÍ

Na Obr. 58 a Obr. 59 lze pozorovat jev, při kterém dochází při zvyšování frekvence k „vyhlazení“ křivky závislosti síly na zrychlení. Křivka této závislosti připomíná nepravidelnou elipsu.



Obr. 58: Závislost síly na zrychlení při frekvenci 20 Hz z naměřených dat aktuátoru č. 6 pro posuv 1 mm a tlak 1 bar.

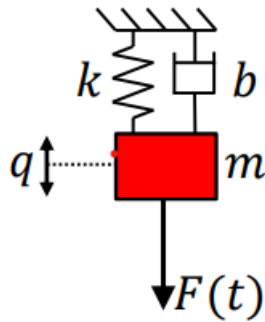


Obr. 59: Závislost síly na zrychlení při frekvenci 80 Hz z naměřených dat aktuátoru č. 6 pro posuv 1 mm a tlak 1 bar.

6.2 VÝPOČET TUHOSTI A TLUMENÍ SYSTÉMU

Z experimentálně naměřených dat bylo potřeba extrahovat hodnoty tuhosti a tlumení v závislosti na frekvenci. K tomuto účelu bylo potřeba vytvořit matematický model, který dokáže z naměřeného signálu tyto hodnoty vypočítat.

Vycházelo se ze základního modelu kmitání s jedním stupněm volnosti, který obsahuje jednu pružinu s tuhostí k [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$], jeden tlumič s tlumením b [$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$] a těleso o hmotnosti m [kg], které se pomocí síly F [N] vychýlí o výchylku x [m].



Obr. 60: Schéma systému kmitání s jedním stupněm volnosti.

Tento systém se řídí rovnicí pro sílu F vycházející z 2. Newtonova pohybového zákona:

$$F = m\ddot{x} + b\dot{x} + kx. \quad (14)$$

Sinové a kosinové rovnice pro výchylku harmonického pohybu lze rozdělit na imaginární a reálnou složku:

$$x = x_o \sin(\omega t + \varphi) = x_{Re} + ix_{im}, \quad (15)$$

přičemž stejně můžeme rozdělit i rovnici pro budící sílu

$$F = F_o \sin(\omega t + \gamma) = F_{Re} + iF_{im}. \quad (16)$$

Pro vybranou úhlovou frekvenci ω se rovnice zapíše v komplexní proměnné, čímž získáme vztah:

$$\widehat{F}_o = \widehat{x}_o(m\omega^2 - ib\omega + k), \quad (17)$$

kde \widehat{x}_o [m] je komplexní amplituda výchylky, \widehat{F}_o [N] je amplituda budící síly a ω je úhlová frekvence [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$].

Roznásobením závorky dostaneme:

$$\widehat{F}_o = \widehat{x}_o(-ib\omega + k) + \widehat{x}_om\omega^2, \quad (18)$$

ze které vyjádřením komplexní tuhosti $c_{KOMPLEX}$ dostaneme vztah:

$$-ib\omega + k = c_{KOMPLEX} = \frac{\widehat{F}_0}{\widehat{x}_0} - m\omega^2. \quad (19)$$

Tuhost systému získáme z reálné části rovnice:

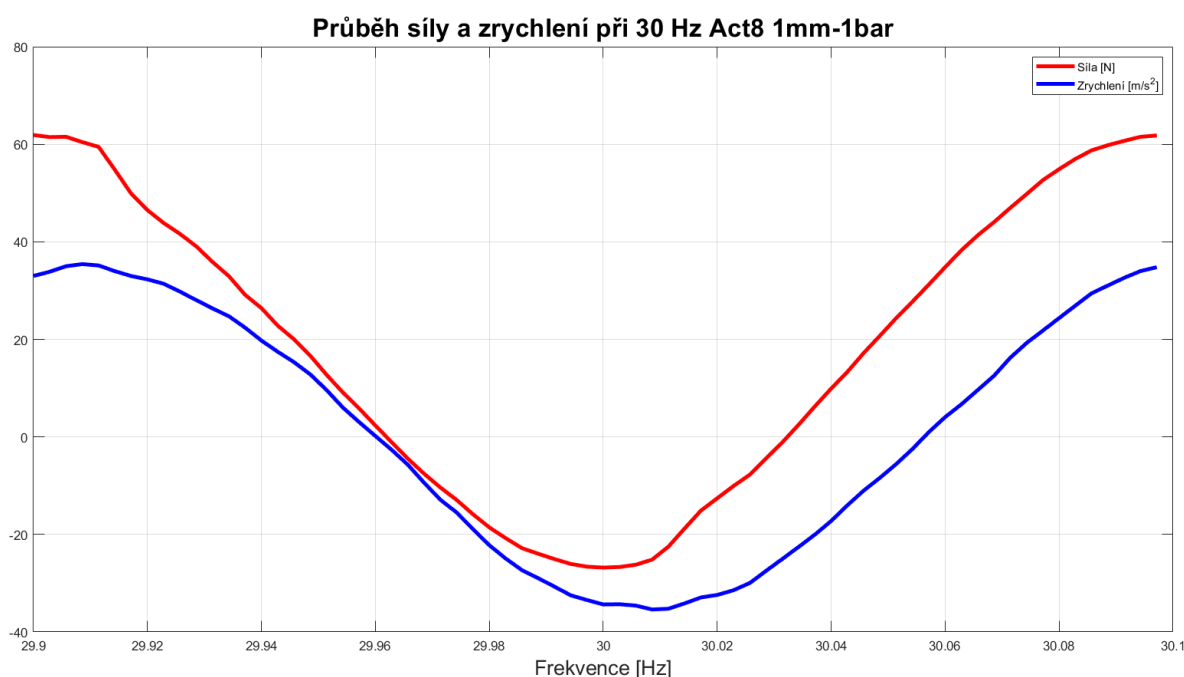
$$k = \text{real}(c_{komplex}). \quad (20)$$

Tlumení systému získáme z imaginární složky rovnice:

$$b = -\frac{1}{\omega} \text{imag}(c_{komplex}). \quad (21)$$

Na základě těchto rovnic byl vytvořen skript v programu Matlab, který byl využit pro počítání hodnot tuhostí a tlumení pro jednotlivé zadané frekvence. Pro každý z aktuátorů bylo tedy potřeba vyříznout jednu periodu naměřeného signálu pro každou z daných frekvencí a vložit ji do tohoto skriptu v Matlabu, čímž došlo k analýze signálu a výpočtu konkrétní hodnoty tuhosti a tlumení. Z vypočtených dat byla následně vytvořena frekvenční závislost tuhosti a tlumení měřeného pneumatického aktuátoru.

Matlabovský skript pro výpočet tuhosti a tlumení je součástí přílohy.



Obr. 61: Srovnání průběhu síly a zrychlení při frekvenci 30 Hz pro aktuátor č. 8 při nastavení posuvu 1 mm a tlaku 1 bar.

Na Obr. 61 je vidět jedna konkrétní vyříznutá sinusová perioda skutečného naměřeného signálu a lze na ní pozorovat, že síla a zrychlení mají odlišné, lehce zpožděné maximální výchylky, což je dáno právě již zmíněným tlumením, které je nutné z naměřeného signálu vypočítat. Kdyby v měřeném systému nedocházelo k tlumení, tak by maximální výchylky naměřené síly a zrychlení byly v jednom stejném bodě.

6.2.1 VYHODNOCENÍ TUHOSTI SYSTÉMU

Jelikož většina vinutých pružin využívaných v pneumatických aktuátorech má tuhost někde v rozmezí 11 000 – 15 000 N/m, lze v případě vypočtených hodnot tuhosti pozorovat, že tyto vinuté pružiny hrají v celkové tuhosti systému pneumatického aktuátoru asi třetinovou roli. V případě tuhosti tohoto typu aktuátoru se ukázalo, že daleko větší vliv na celkovou tuhost má vzduchová pružina vytvořená stlačeným vzduchem v aktuátoru.

Tab. 4: Hodnoty tuhosti k [N/m] pro všechny měřené pneumatické aktuátory pro posuv 1 mm a tlak 1 bar.

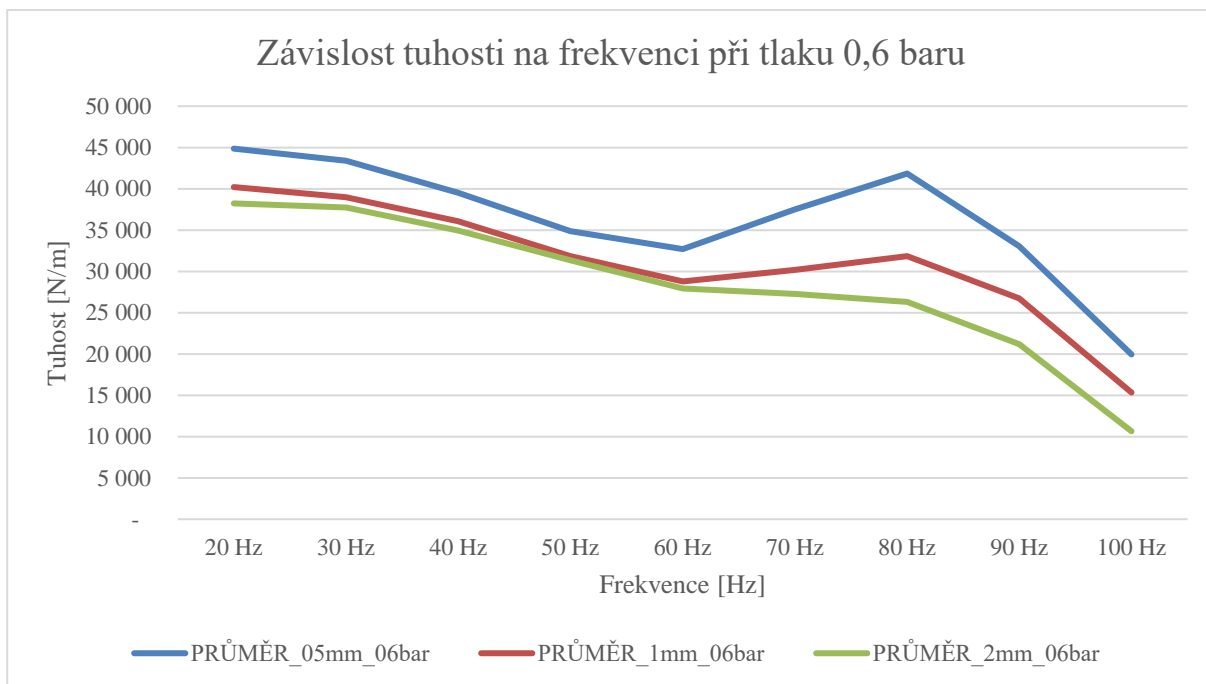
Frekvence [Hz]	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	70 Hz	80 Hz	90 Hz	100 Hz
Act_3_1mm_1bar	46 523	45 773	43 477	40 051	37 511	40 497	36 948	28 929	17 649
Act_4_1mm_1bar	49 346	47 194	45 519	42 148	41 242	44 006	42 665	35 208	22 237
Act_5_1mm_1bar	45 201	41 574	41 431	39 516	37 866	40 159	39 333	31 732	21 032
Act_6_1mm_1bar	48 003	47 709	44 103	41 334	38 451	40 353	39 992	31 025	18 697
Act_7_1mm_1bar	48 506	48 462	45 824	44 088	41 667	45 698	43 969	33 200	22 152
Act_8_1mm_1bar	46 613	45 733	43 004	41 322	39 771	41 653	40 084	31 042	20 097
Act_9_1mm_1bar	51 821	53 404	48 435	46 912	41 697	44 911	43 560	33 886	21 372
Act_10_1mm_1bar	43 068	42 085	37 695	34 678	32 262	37 167	34 789	26 214	18 023
Act_11_1mm_1bar	41 581	41 130	38 750	35 057	30 066	27 474	23 696	16 516	6 152
Act_12_1mm_1bar	54 551	53 451	49 081	44 519	43 211	45 778	37 032	33 211	22 372
PRŮMĚR_1mm_1bar	47 521	46 651	43 732	40 963	38 374	40 770	38 207	30 096	18 978

Zbytek tabulek pro hodnoty tuhostí pro všechny kombinace měřených parametrů je součástí přílohy.

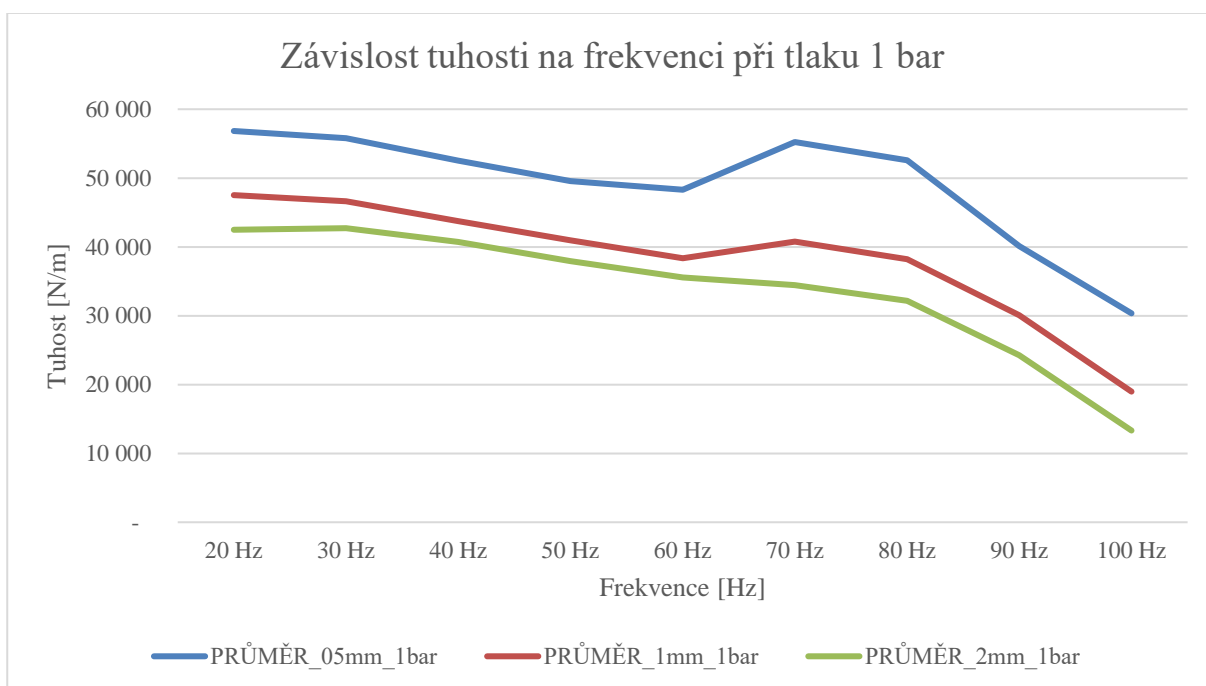
ZÁVISLOST TUHOSTI NA FREKVENCI PŘI STEJNÉM TLAKU

Na Obr. 62, Obr. 63 a Obr. 64 lze pozorovat závislosti tuhostí na frekvenci při stejném tlaku ale různých posuvech táhla aktuátoru. Na všech třech grafech je vidět, že nejvyšších hodnot tuhosti je dosahováno při nejmenším posuvu 0,5 mm. Zároveň lze v grafech pozorovat jev, při kterém při nejmenším posuvu 0,5 mm dochází v rozmezí 60 - 80 Hz k razantnímu vzrůstu hodnot tuhosti, zatímco při posuvu 2 mm je tento jev skoro potlačen. Tyto jevy si lze vysvětlit nejspíše tím, že při posuvu 0,5 mm dodává shaker měřenému systému menší kinetickou energii, a tak dochází k většímu kolísání hodnot, zatímco při posuvu 2 mm je systému dodávána větší kinetická energie a kolísání hodnot tuhosti se výrazně eliminuje.

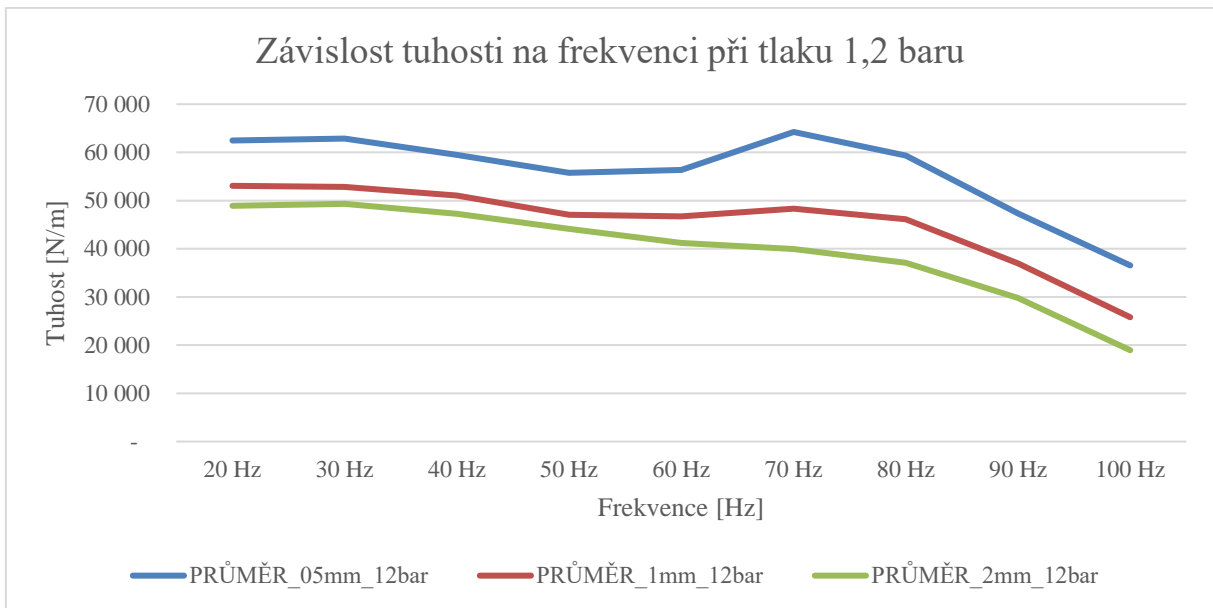
Teorie říká, že při rostoucí frekvenci by měla tuhost systému růst, pokud na něj nemá vliv teplota. Naopak když teplota roste, tuhost systému se snižuje. Jelikož ale měření probíhalo za konstantní pokojové teploty 25 °C, která na výsledky měření nemohla mít vliv, tak zde nejspíš dochází k vlivu zahřívání ať už pryžové membrány nebo stlačeného vzduchu uvnitř aktuátoru při rostoucí frekvenci, což ovlivňuje hodnoty tuhosti. Protože ve všech třech případech tlaku zde dochází viditelně k výraznému snižování tuhosti v závislosti na rostoucí frekvenci.



Obr. 62: Závislost tuhosti na frekvenci při stejném tlaku 0,6 baru a při odlišných posuvech.



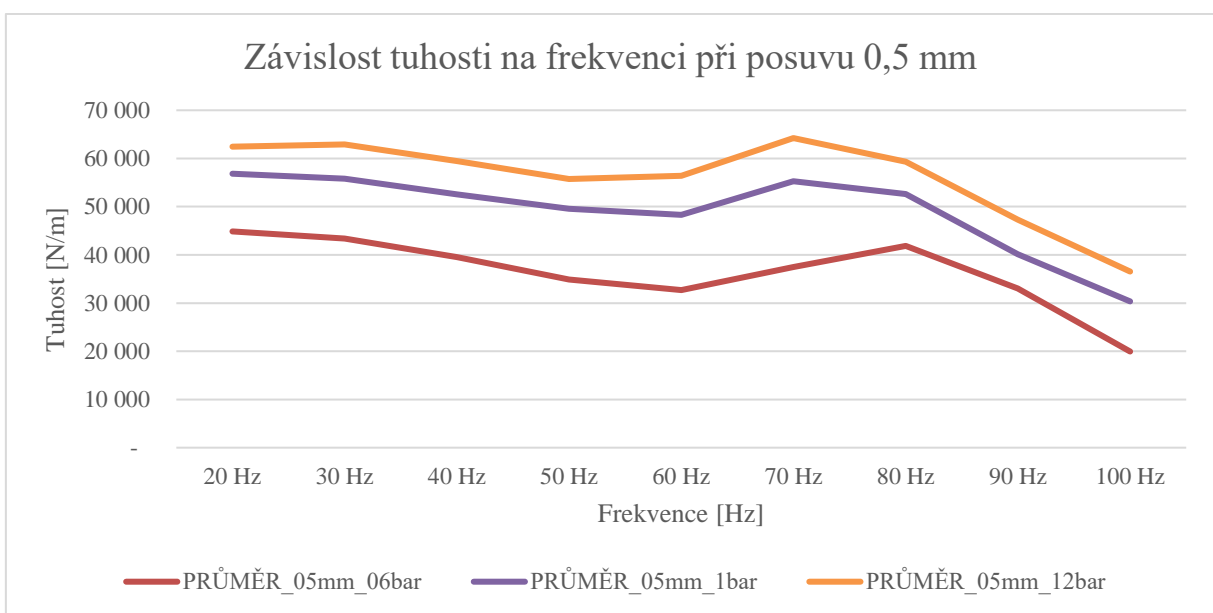
Obr. 63: Závislost tuhosti na frekvenci při stejném tlaku 1 bar a při odlišných posuvech.



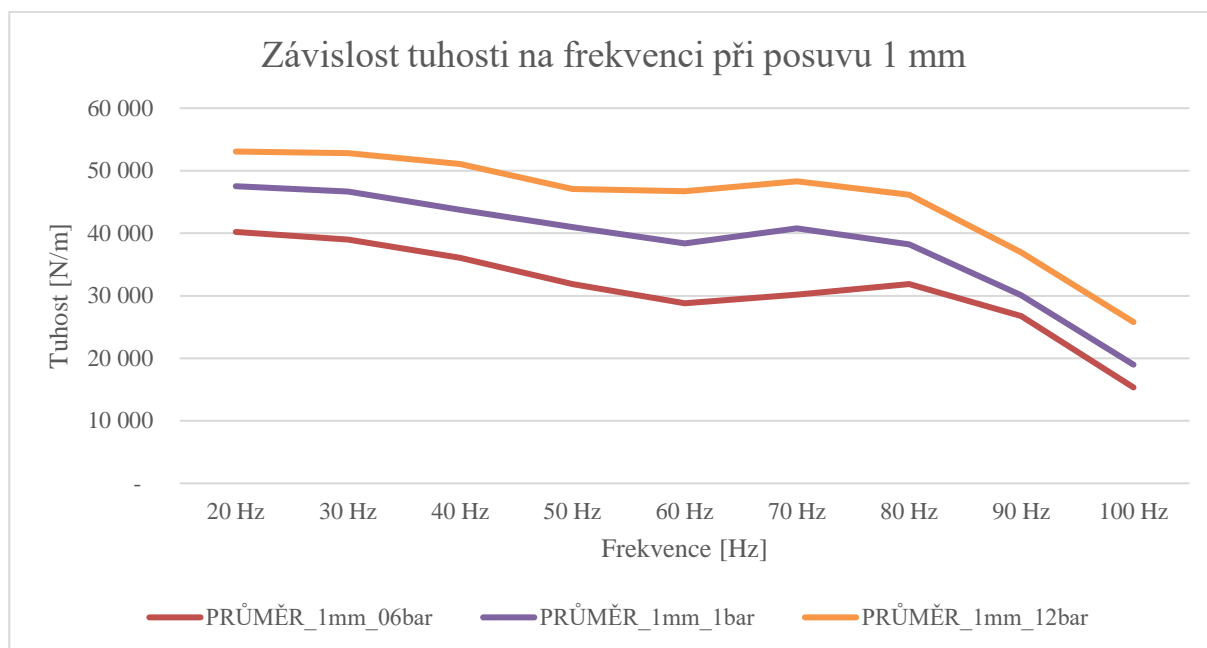
Obr. 64: Závislost tuhosti na frekvenci při stejném tlaku 1,2 baru a při odlišných posuvech.

ZÁVISLOST TUHOSTI NA FREKVENCI PŘI STEJNÉM POSUVU

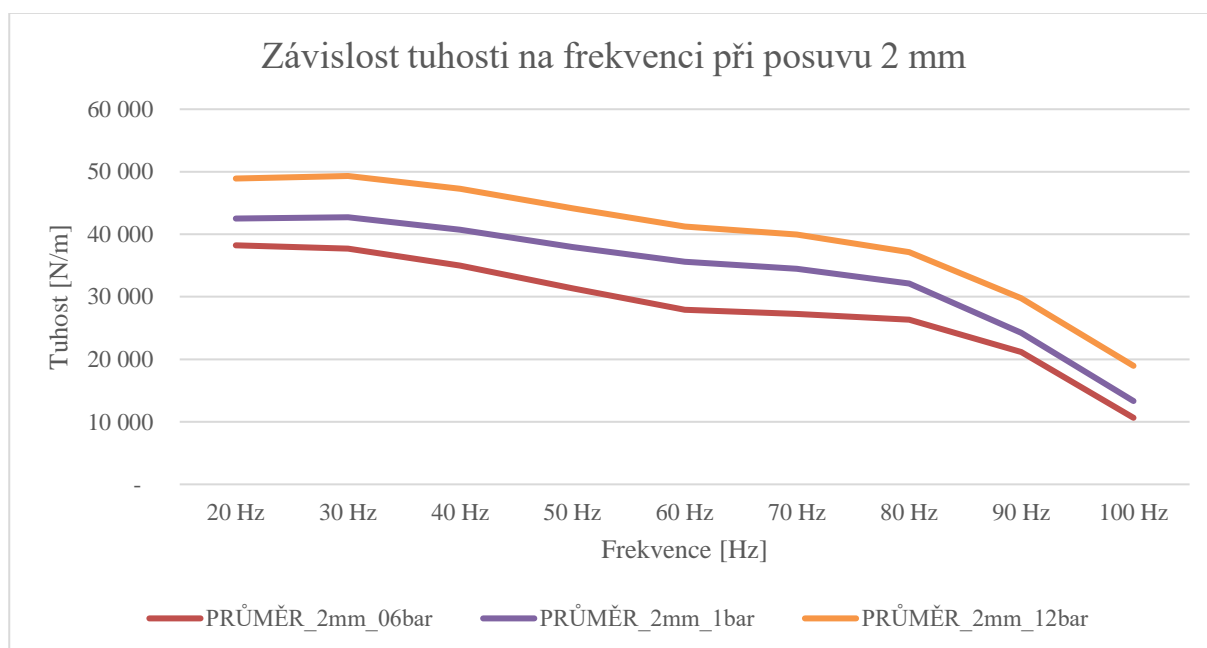
Při zobrazení závislosti tuhosti na frekvenci při stejném posuvu lze pozorovat vliv tlaku v aktuátoru na jeho tuhost. Z průběhů zobrazených na Obr. 65, Obr. 66 a Obr. 67 lze vyčíst, že čím vyšší tlak je v pneumatickém aktuátoru, tím vyšší má tuhost, protože se v něm vytvoří vzduchová pružina. Jak již bylo zmíněno v kapitole výše, lze zde opět pozorovat, že při posuvu 0,5 mm dochází k výraznému nárůstu hodnot tuhosti ve frekvenčním rozsahu 60 – 80 Hz, zatímco v případě posuvu 2 mm lze pozorovat daleko rovnoměrnější pokles tuhosti v závislosti na frekvenci při všech třech variantách tlaku v aktuátoru. Opět zde lze navíc pozorovat, že při rostoucí frekvenci tuhost systému klesá.



Obr. 65: Závislost tuhosti na frekvenci při stejném posuvu 0,5 mm a při různých tlacích.



Obr. 66: Závislost tuhosti na frekvenci při stejném posuvu 1 mm a při různých tlacích.



Obr. 67: Závislost tuhosti na frekvenci při stejném posuvu 2 mm a při různých tlacích.

6.2.2 VYHODNOCENÍ TLUMENÍ SYSTÉMU

Po výpočtu hodnot tlumení z naměřeného signálu přes skript v Matlabu bylo vytvořeno 9 tabulek závislosti tlumení na frekvenci, přičemž každá z tabulek obsahuje hodnoty pro konkrétní posuv a konkrétní tlak. Z těchto tabulek obsahující hodnoty tlumení z reálných experimentálně změřených dat se vytváří průměrná hodnota tlumení pro daný posuv a daný tlak v závislosti na frekvenci a tyto průměrné hodnoty jsou poté využity ke grafickému vykreslení závislosti tlumení v závislosti na frekvenci. Zbytek tabulek je součástí přílohy.

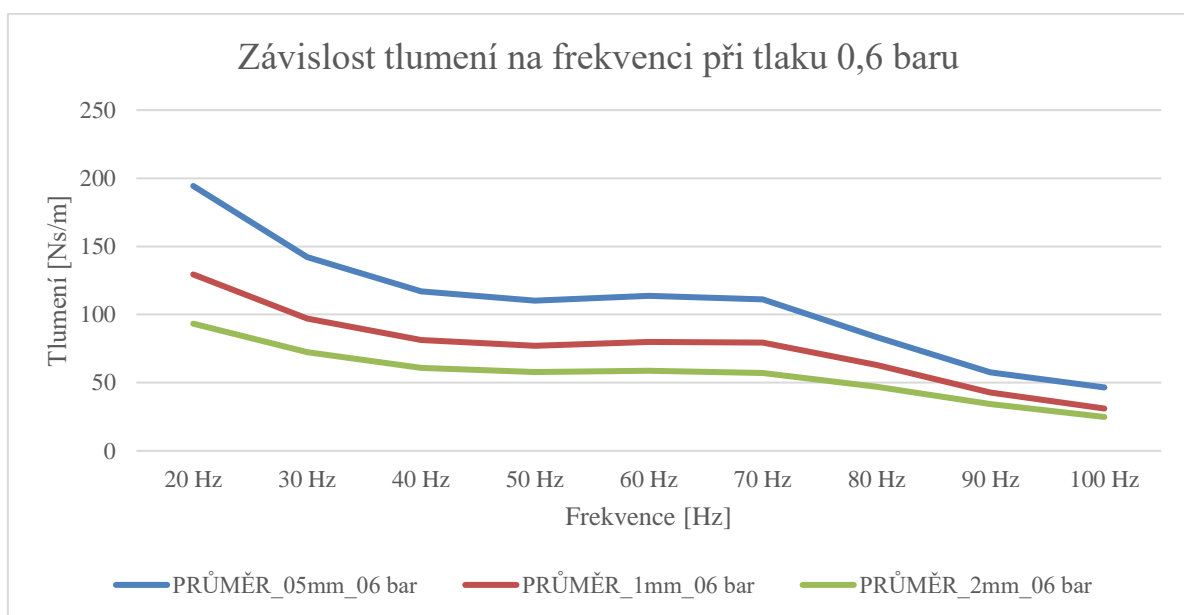
Tab. 5: Tabulka ukazující hodnoty tlumení b [Ns/m] pro všechny pneumatické aktuátory pro posuv 1 mm a tlak 1 bar.

Frekvence [Hz]	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	70 Hz	80 Hz	90 Hz	100 Hz
Act_3_1mm_1bar	159.5	117.7	93.9	86.8	86.9	75.6	60.0	40.1	31.3
Act_4_1mm_1bar	245.0	185.4	146.9	128.9	123.4	108.1	88.2	64.9	58.2
Act_5_1mm_1bar	162.5	136.3	114.0	102.4	100.6	93.2	70.9	51.4	41.1
Act_6_1mm_1bar	168.0	123.0	100.9	88.1	87.9	80.0	58.8	42.8	33.9
Act_7_1mm_1bar	225.7	161.5	131.3	112.6	110.6	96.0	74.3	59.3	46.2
Act_8_1mm_1bar	213.9	164.8	135.1	119.4	113.8	99.0	76.4	57.9	46.8
Act_9_1mm_1bar	327.7	217.4	170.1	139.8	134.3	115.7	91.8	72.0	61.7
Act_10_1mm_1bar	201.2	159.0	130.3	122.9	113.1	106.0	86.3	64.2	50.7
Act_11_1mm_1bar	86.8	74.2	69.4	70.0	72.6	64.9	54.9	46.5	39.4
Act_12_1mm_1bar	259.8	187.6	148.6	129.9	118.7	104.8	86.1	62.2	51.6
PRŮMĚR_1mm_1bar	205.0	152.7	124.1	110.1	106.2	94.3	74.8	56.1	46.1

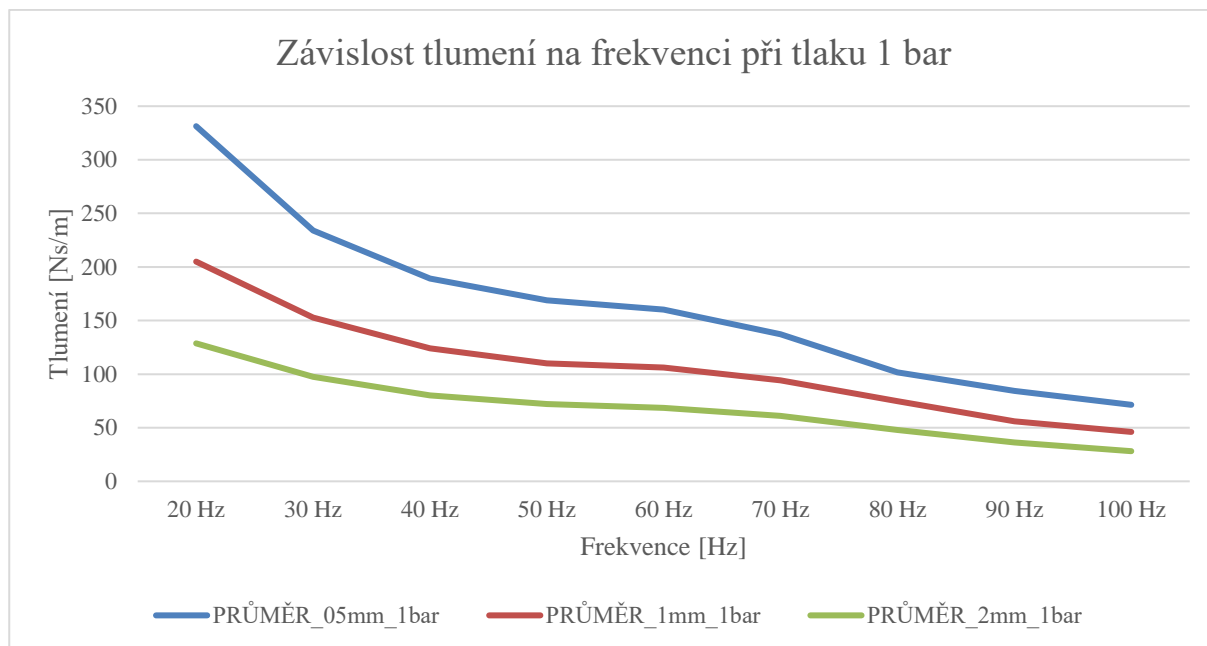
ZÁVISLOST TLUMENÍ NA FREKVENCI PŘI STEJNÉM TLAKU

Na Obr. 68, Obr. 69 a Obr. 70 lze sledovat závislosti tlumení na frekvenci při stejném tlaku ale pro různé posuvy, přičemž z grafů vyplývá, že nejvyšších hodnot tlumení bylo dosaženo pro posuv 0,5 mm, zatímco při posuvu 2 mm se dosahovalo nejnižších hodnot, tedy úplně stejně jako v případě tuhosti. Vysvětlení je opět možné přes kinetickou energii dodanou systému, kdy zřejmě s rostoucí dodanou kinetickou energií, která bude v případě posuvu 2 mm vyšší než v případě posuvu 0,5 mm, dochází k potlačení tlumení daného systému. Proto je v případě posuvu 2 mm dosahováno nejmenších hodnot tlumení.

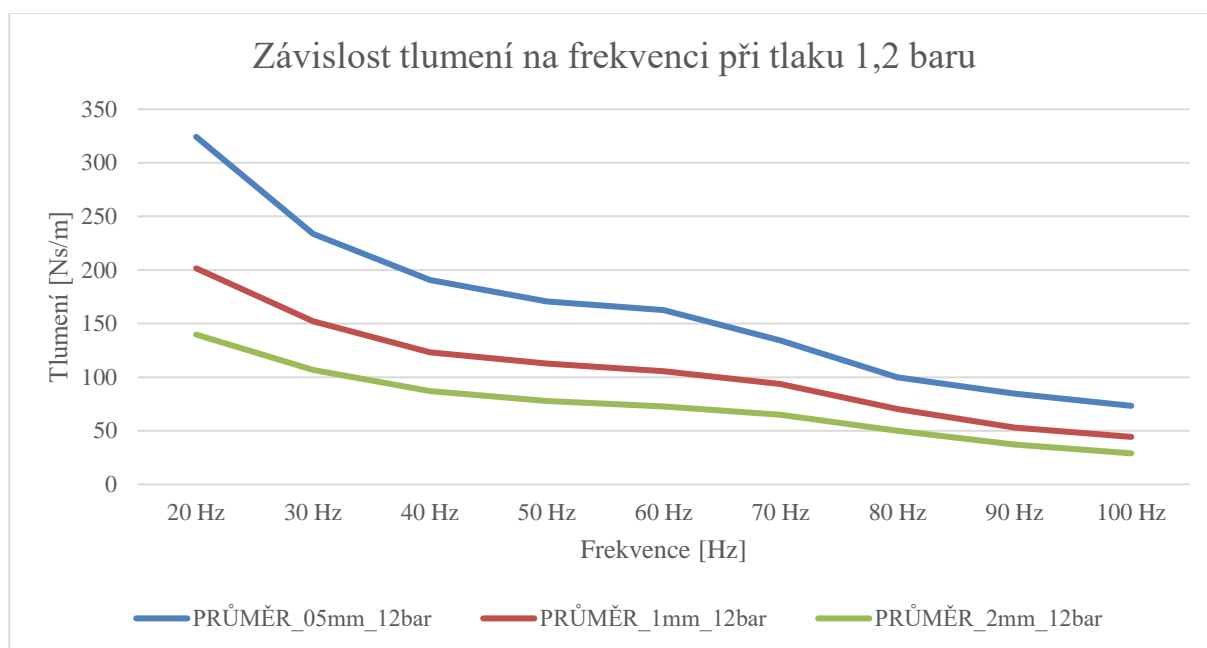
V případě tlumení teorie říká, že tlumení s rostoucí frekvencí i rostoucí teplotou klesá, čemuž tak je i v tomto případě. Protože ve všech variantách tlaků i dále posuvů tlumení s rostoucí frekvencí klesá.



Obr. 68: Závislost tlumení na frekvenci při stejném tlaku 0,6 baru a při odlišných posuvech.



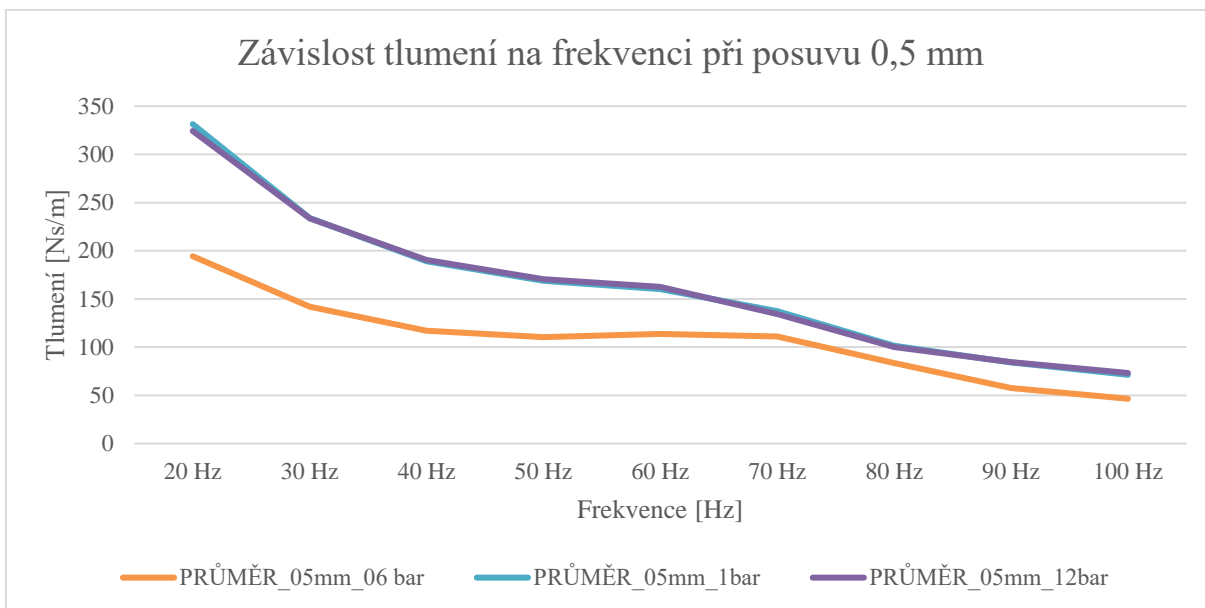
Obr. 69: Závislost tlumení na frekvenci při stejném tlaku 1 bar a při odlišných posuvech.



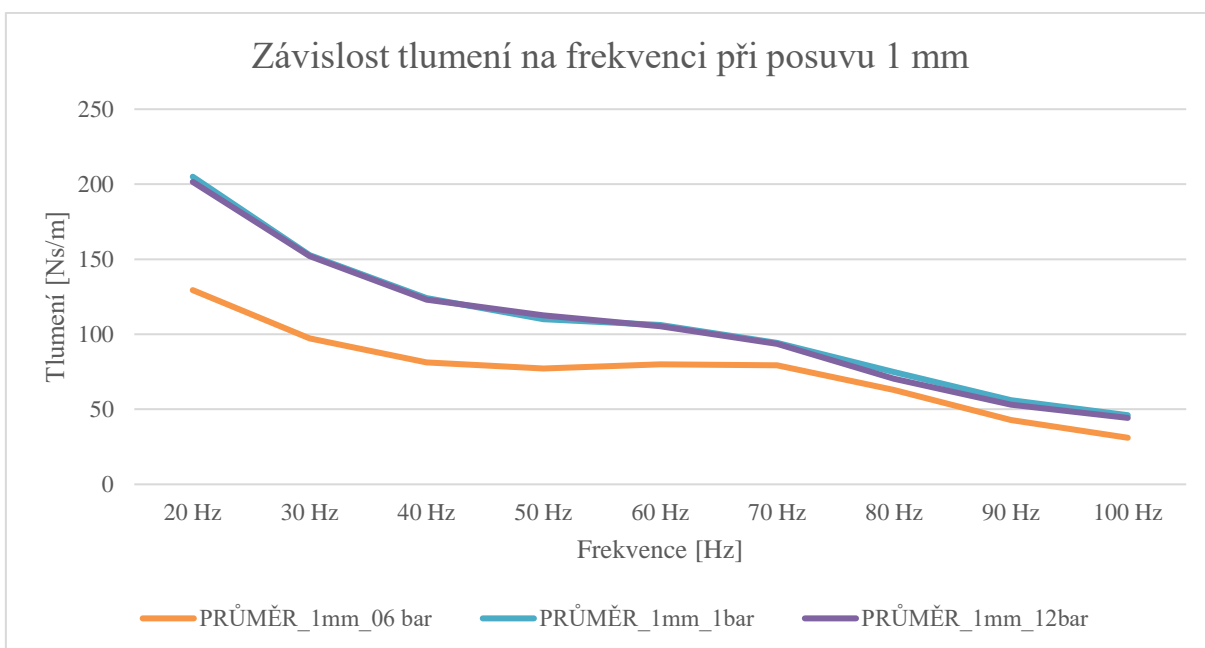
Obr. 70: Závislost tlumení na frekvenci při stejném tlaku 1,2 baru a při odlišných posuvech.

ZÁVISLOST TLUMENÍ NA FREKVENCI PŘI STEJNÉM POSUVU

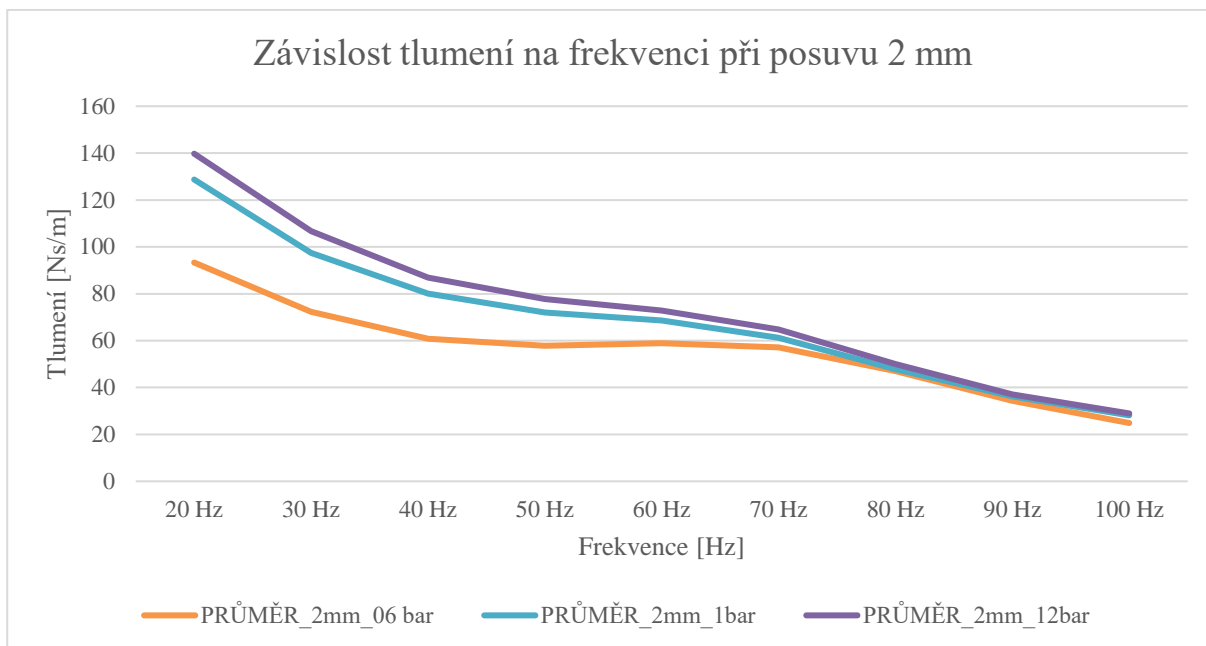
Při pozorování vlivu tlaku na tlumení lze vidět, že ve všech třech případech, tedy na Obr. 71, Obr. 72 i Obr. 73, jsou průběhy tlaků 1 bar a 1,2 baru téměř naprosto identické. Nejmenších hodnot tlumení je dosahováno pro tlak 0,6 baru. U všech třech grafů si lze všimnout, že od frekvence 70 Hz a výše, dochází k přiblížení všech křivek k sobě a jejich téměř stejnému průběhu, přičemž čím větší je posuv, tím jsou si křivky v tomto frekvenčním rozsahu blíže.



Obr. 71: Závislost tlumení na frekvenci při stejném posuvu 0,5 mm a při různých tlacích.



Obr. 72: Závislost tlumení na frekvenci při stejném posuvu 1 mm a při různých tlacích.



Obr. 73: Závislost tlumení na frekvenci při stejném posuvu 2 mm a při různých tlacích.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zaměřuje na regulaci turbodmychadel pomocí obtokového ventilu ovládaného pneumatickým aktuátorem. Hlavním cílem této diplomové práce je vytvoření metodiky pro stanovení dynamických charakteristik pneumatického aktuátoru turbodmychadla.

Pneumatický aktuátor je zodpovědný za regulaci plnicích tlaků turbodmychadla, tak aby docházelo k optimálnímu výkonu vozidla a co nejnižší spotřebě paliva. Pro zaručení co nejoptimálnějšího chodu turbodmychadla je potřeba přesně pochopit, jak pneumatický aktuátor pracuje a co jej ovlivňuje. Proto je důležité zaměřit se na dynamické charakteristiky tohoto aktuátoru jako je například vliv tlumení, které mohou při nesprávné interpretaci ohrozit správnou regulaci plnicích tlaků turbodmychadla. Řešení této problematiky je stále aktuálním tématem ve společnosti Garrett Motion.

V diplomové práci je navržena nová metodika laboratorního měření dynamických charakteristik pneumatického aktuátoru s vyhodnocením naměřených dat a získáním závislosti tuhosti a tlumení pneumatického aktuátoru na frekvenci při různých variantách nastavení tlaku a posuvu. Jedná se o první takto zpracovanou metodiku, která ukazuje přesný postup experimentálního měření dat skutečného pneumatického aktuátoru a následné zpracování naměřených dat s cílem lépe porozumět dynamickým vlastnostem tohoto aktuátoru. Metodika obsahuje návrh simulace pohybu aktuátoru, vhodný výběr snímačů, úpravu aktuátoru pro potřeby měření, vytvoření softwarového prostředí pro měření a ukládání dat a matematický model pro zpracování naměřených dat.

Je potřeba zdůraznit, že veškerá měření pneumatického aktuátoru byla prováděna za pokojové teploty 25 °C a veškeré naměřené a vypočtené hodnoty jsou tedy validní pouze pro tuto počáteční podmínku a neodpovídají hodnotám, kterých se dosahuje na turbodmychadle za provozu, kdy se teplota kompresorové části, kde zpravidla bývá umístěn pneumatický aktuátor, pohybuje okolo 200 °C.

Při zahájení procesu sběru a ukládání dat se ukázalo, že uživatel sám o sobě není schopen zaručit přesnou synchronizaci počítače ovládajícího shaker a počítače připojeného k datové sběrnici, tudíž zde docházelo k vzniku chyby, kdy nebylo zahájeno ukládání dat od předem požadované frekvence 10 Hz ale docházelo k zahájení ukládání dat někde mezi 12 až 15 Hz. Tento problém by se dal pro budoucí měření eliminovat propojením a synchronizací dvou počítačů použitých při měření.

Z hlediska přípravy se jedná o ne moc časově náročnou metodiku, kterou lze připravit na spuštění v řádu hodin. Časová náročnost měření závisí na času jednoho testu a počtu měřených aktuátorů. Při návrhu metodiky měření byla důležitým požadavkem časová synchronizace všech snímačů do jedné časové osy, aby nedocházelo ke zpoždění signálu z jednoho ze snímačů a naměřená data tak spolu nekorelovala. Tento problém byl vyřešen vyvedením všech tří snímačů (každého do samostatného modulu) do datové sběrnice cDAQ-9174, která zahajuje měření a ukládání dat s jednou časovou značkou pro všechny moduly, tedy v jedné časové ose. Tato komponenta bohužel prodražuje celou metodiku, protože cena jedné takové datové sběrnice se pohybuje okolo 70 000 Kč.

Pro budoucí úsporu snímačů by se dalo místo tenzometrického snímače a akcelerometru použít v práci zmíněnou impedanční hlavu kombinující tyto dva snímače do jednoho. Nevýhodou

tohoto řešení je ale další zvýšení nákladů na proces měření, protože tenzometrický snímač a akcelerometr jsou výrazně levnější než impedanční hlava.

Celkově lze říci, že tato navržená metodika je vhodná pro účely měření dynamických charakteristik pneumatického aktuátoru a přináší další cenné poznatky k porozumění jeho chování a jeho dalšího využití pro regulaci turbodmychadel. Představuje univerzální, ucelený a systematický postup pro měření dynamických vlastností tohoto typu aktuátoru, který může být aplikován na jakýkoliv typ pneumatického aktuátoru. Navržené postupy a vypočtené výsledky poslouží jako základ k dalšímu pochopení dynamických charakteristik pneumatického aktuátoru a budou dále využity ve společnosti Garrett Motion ve vývoji a simulacích nových turbodmychadel s obtokovým ventilem regulovaným pomocí tohoto typu aktuátoru.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] RITCHIE, Hannah. Cars, planes, trains: where do CO2 emissions from transport come from?. *Our World in Data* [online]. Říjen 2020 [cit. 2022-11-28]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport>
- [2] TURBO EXPLANATION. In: *Mitsubishi Turbocharger* [online]. [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: <https://www.turbocharger.mtee.eu/turbo-knowledge/turbo-explanation/>
- [3] How a Turbo Works - Basic. In: *Garrett Advancing Motion* [online]. Zář 2020 [cit. 2022-11-04]. Dostupné z: <https://www.garrettmotion.com/knowledge-center-category/oem/basic/>
- [4] NGUYEN-SCHÄFER, Hung. *Rotordynamics of Automotive Turbochargers*. Druhé vydání. Ludwigsburg, Německo: Springer, 2015. ISBN 978-3-319-17643-7
- [5] DHINES, B., P.V. INBA NAATHAN a G. ANAND KUMAR. Conversion Of Pneumatic To Electrically Actuated Waste Gated Turbo Charger. *International Journal for Scientific Research & Development* [online]. 2014(1) [cit. 2022-11-18]. Dostupné z: https://www.academia.edu/6914363/pneumatic_actuator_force_pressure_stroke_length
- [6] Broadest Turbo Range. In: *Garrett Motion* [online]. [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: <https://www.garrettmotion.com/turbocharger-technology/how-a-turbo-works/broadest-turbo-range/>
- [7] MILLER, Jay. *Turbo: Real World High-Performance Turbocharger Systems*. Michigan, USA: CarTech, 2008. ISBN 978-1932494297
- [8] Diving into the Distinctions Between Turbo Types. *Garrett Advancing Motion* [online]. Březen 2022 [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: <https://www.garrettmotion.com/knowledge-center-category/turbo-replacement/diving-into-the-distinctions-between-turbo-types/>
- [9] WIBMER, Michael, Timo SCHMIDT a Bodo DURST. Simulation of Turbocharger Wastegate Dynamics. *MTZ worldwide* [online]. Leden 2015, 76, 28-31 [cit. 2022-11-11]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1007/s38313-014-1009-8](https://doi.org/10.1007/s38313-014-1009-8)
- [10] What Does An External Wastegate Do?. In: *Garrett Advancing Motion* [online]. Duben 2022 [cit. 2022-11-11]. Dostupné z: <https://www.garrettmotion.com/knowledge-center-category/racing-and-performance/what-does-an-external-wastegate-do/>
- [11] ELECTRONIC BOOST PRESSURE CONTROL- TURBOCHARGER ACTUATOR TESTING. In: *Hella* [online]. [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: <https://www.hella.com/techworld/us/Technical/Car-electronics-and-electrics/Electronic-boost-pressure-control-turbocharger-actuator-testing-61101/>
- [12] TurboSmart IWGHP 35PSI Internal Wastegate Actuator - Universal. In: *ModBargains* [online]. USA [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: <https://modbargains.com/turbosmart-iwghp-35psi-internal-wastgate-actuator-universal/>

- [13] 8 facts about Garrett turbocharged engines. *Garrett Advancing Motion* [online]. Listopad 2022 [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: <https://www.garrettmotion.com/knowledge-center-category/turbo-replacement/8-facts-about-garrett-turbocharged-engines/>
- [14] Turbochargers boost performance. In: *Perkins* [online]. [cit. 2023-01-31]. Dostupné z: https://www.perkins.com/en_GB/aftermarket/maintenance/product-offering/turbochargers-boost-performance.html
- [15] Small Wastegate Turbochargers for Diesel Engines. In: *Garrett Motion* [online]. [cit. 2023-01-31]. Dostupné z: <https://www.garrettmotion.com/turbocharger-technology/diesel-turbochargers/small-wastegate-turbochargers-for-diesel-engines/>
- [16] BorgWarner Supplies R2S® Turbocharging Technology for Volvo Cars New Engine Platform. *BorgWarner* [online]. Říjen 2014 [cit. 2023-01-26]. Dostupné z: <https://www.borgwarner.com/newsroom/press-releases/2014/10/22/borgwarner-supplies-r2s-turbocharging-technology-for-volvo-cars-new-engine-platform>
- [17] Boosting Technologies. In: *BorgWarner* [online]. [cit. 2023-01-26]. Dostupné z: <https://www.borgwarner.com/technologies/boosting-technologies>
- [18] VALÁŠEK, Michael, Vladimír STEJSKAL a Jiří BŘEZINA. *Mechanika A*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 978-80-01-02890-2.
- [19] VALÁŠEK, Michael, Zbyněk ŠIKA a Václav BAUMA. *Mechanika B*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02919-0.
- [20] Load Cells & Force Sensors. *Omega* [online]. [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://www.omega.com/en-us/resources/load-cells>
- [21] An Overview of Load Cells. *Tacuna Systems* [online]. Colorado, USA, Duben 2023 [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://tacunasystems.com/knowledge-base/an-overview-of-load-cells/>
- [22] The Versatile Strain Gauge Load Cell. *Tacuna Systems* [online]. Colorado, USA [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://tacunasystems.com/knowledge-base/the-versatile-strain-gauge-load-cell/>
- [23] HOFFMANN, Karl. *An Introduction to Measurements using Strain Gages*. Darmstadt, Německo: Hottinger Baldwin Messtechnik, 2000.
- [24] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Piezoelektrický jev. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2023 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/419-vysvetleni-jevu>
- [25] Force Measurement Glossary. *Tacuna Systems* [online]. Colorado, USA, Duben 2023 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://tacunasystems.com/knowledge-base/force-measurement-glossary/>
- [26] Piezoelectric load cell, force transducer (Fz ±6 kN / ±1.35 k lbf) / 9311C. *Kistler* [online]. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/INT/en/p/piezoelectric-load-cell-force-transducer-fz-±6-kn-±1.35-k-lbf-9311c/000000000018037810>

- [27] How to Measure Acceleration?. *Omega* [online]. [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.omega.com/en-us/resources/accelerometers>
- [28] Types of Accelerometers. *Omega* [online]. [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.omega.com/en-us/resources/accelerometers-types>
- [29] SMITH, Grant Maloy. Measuring Shock and Vibration with Accelerometer Sensors. *DEWESoft* [online]. Leden 2022 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://dewesoft.com/blog/measure-shock-vibration-with-accelerometers>
- [30] Damping materials and their performance measurement. *Ono Sokki* [online]. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: https://www.onosokki.co.jp/English/hp_e/whats_new/SV_rpt/damp/damp_4.htm
- [31] AF Impedance Head - AF/50/5, AF/100/10. *DJB Instruments* [online]. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.djbinstruments.com/products/instrumentation/view/af-impedance-head>
- [32] Impedance Head for Measuring Driving Force. *Metromatics* [online]. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://metromatics.com.au/product/impedance-head-for-measuring-driving-force/>
- [33] SMITH, Grant Maloy. Data Acquisition (DAQ) - The Ultimate Guide. *DEWESoft* [online]. Červen 2022 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://dewesoft.com/blog/what-is-data-acquisition>
- [34] Signal Conditioning – What is it & How does it work?. *Metromatics* [online]. [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://metromatics.com.au/what-is-signal-conditioning/>
- [35] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Zkreslení aliasing. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2023 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/index.php/main.article/view/1366-zkresleni-aliasing>
- [36] AIR COOLED SHAKERS. *Data Physics* [online]. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.dataphysics.com/products/shakers-and-accessories/air-cooled-shakers/>
- [37] Miniature, Low Profile, Tension & Compression Load Cells. *Omega* [online]. [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.omega.com/en-us/force-and-strain-measurement/load-cells/lc703/p/LCM703-500>
- [38] What Is LabVIEW?. *National Instruments* [online]. [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/shop/labview.html>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

AAF		Anti-aliasing filtr
A/D		Analogově-digitální převodník
ADC		Analog-to-digital converter
DAQ		Sběr dat
DAS		Data acquisition
FET		Unipolární tranzistor (Field-effect transistor)
FFT		Fast Fourier Transform
FIFO		First In, First Out
GF		Gauge factor
VNT		Variable Nozzle Turbine
\widehat{x}_o	[m]	Komplexní amplituda výchylky
\widehat{F}_o	[N]	Amplituda budící síly
A	[m ²]	Plocha desek kapacitního snímače
b	[N·s·m ⁻¹]	Tlumení
C	[F]	Kapacita
d	[m]	Vzdálenost mezi deskami kapacitního snímače
F	[N]	Budící síla
F_1	[N]	Gravitační síla závaží č. 1
F_2	[N]	Gravitační síla závaží č. 2
f_{max}	[Hz]	Maximální frekvence signálu
f_{vz}	[Hz]	Vzorkovací frekvence
G	[-]	Citlivostní faktor (Gauge factor)
g	[m·s ⁻²]	Gravitační zrychlení
I	[A]	Proud

k	$[\text{N}\cdot\text{m}^{-1}]$	Tuhost
L	$[\text{m}]$	Původní délka drátu tenzometru
m	$[\text{kg}]$	Hmotnost tělesa
m_1	$[\text{kg}]$	Hmotnost závaží č. 1
m_2	$[\text{kg}]$	Hmotnost závaží č. 2
R	$[\Omega]$	Odpor
R_1	$[\Omega]$	Odpor na Wheatsonově můstku
R_2	$[\Omega]$	Odpor na Wheatsonově můstku
R_3	$[\Omega]$	Odpor na Wheatsonově můstku
V	$[\text{V}]$	Napětí
V_{ex}	$[\text{V}]$	Budící napětí
V_o^+	$[\text{V}]$	Napětí na Wheatsonově můstku
V_o^-	$[\text{V}]$	Napětí na Wheatsonově můstku
x	$[\text{m}]$	Výchylka
ΔL	$[\text{m}]$	Změna délky drátu tenzometru
ΔR	$[\Omega]$	Změna odporu drátu tenzometru
ε	$[-]$	Poměrné prodloužení
ε_2	$[\text{F}\cdot\text{m}^{-1}]$	Permitivita dielektrika
ω	$[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]$	Úhlová frekvence

PŘÍLOHA

Tab. 1: Hodnoty tlumení [N·s/m] pro posuv 0,5 mm a tlak 0,6 baru.

Frekvence [Hz]	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	70 Hz	80 Hz	90 Hz	100 Hz
Act_3_05 mm_06bar	178	120	99	92	102	99	74	46	35
Act_4_05mm_06bar	209	156	129	120	122	118	89	62	50
Act_5_05 mm_06bar	194	151	124	119	120	118	87	62	53
Act_6_05 mm_06bar	131	95	72	76	82	84	59	35	29
Act_7_05mm_06bar	204	144	117	111	117	113	83	61	51
Act_8_05mm_06bar	119	94	84	82	90	91	66	46	33
Act_9_05mm_06bar	349	245	198	172	161	156	125	89	76
Act_10_05mm_06bar	208	153	126	118	122	118	89	65	50
Act_11_05mm_06bar	158	121	105	104	108	103	79	54	42
Act_12_05mm_06bar	215	158	134	123	125	121	93	64	52
PRŮMĚR_05mm_06 bar	196	144	119	112	115	112	84	58	47

Tab. 2: Hodnoty tlumení [N·s/m] pro posuv 1 mm a tlak 0,6 baru.

Frekvence [Hz]	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	70 Hz	80 Hz	90 Hz	100 Hz
Act_3_1mm_06bar	118	85	71	68	73	74	59	37	26
Act_4_1mm_06bar	148	110	91	83	86	85	70	48	33
Act_5_1mm_06bar	130	108	87	85	86	85	69	47	35
Act_6_1mm_06bar	95	66	57	56	64	65	50	32	22
Act_7_1mm_06bar	138	95	80	76	77	76	59	39	32
Act_8_1mm_06bar	80	67	62	61	67	66	53	34	23
Act_9_1mm_06bar	217	152	121	111	107	103	85	63	45
Act_10_1mm_06bar	134	107	88	83	86	87	64	47	36
Act_11_1mm_06bar	105	84	74	71	74	73	57	39	27
Act_12_1mm_06bar	132	97	77	74	75	74	69	46	30
PRŮMĚR_1mm_06 bar	130	97	81	77	79	79	64	43	31

Tab. 3: Hodnoty tlumení [N·s/m] pro posuv 2 mm a tlak 0,6 baru.

Frekvence [Hz]	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	70 Hz	80 Hz	90 Hz	100 Hz
Act_3_2 mm_06bar	84	63	53	51	55	53	44	32	23
Act_4_2mm_06bar	106	79	65	61	64	60	50	37	25
Act_5_2 mm_06bar	99	80	67	63	63	60	49	35	26
Act_6_2 mm_06bar	73	55	46	46	50	49	40	28	18
Act_7_2mm_06bar	105	78	63	59	59	56	45	33	24
Act_8_2mm_06bar	84	67	58	54	55	54	44	32	24
Act_9_2mm_06bar	113	84	70	67	66	66	56	41	31
Act_10_2mm_06bar	94	75	64	61	61	60	51	40	28
Act_11_2mm_06bar	81	70	60	56	57	55	44	31	24
Act_12_2mm_06bar	86	65	55	53	56	54	45	33	24
PRŮMĚR_2mm_06 bar	93	72	60	57	59	57	47	34	25

Tab. 4: Hodnoty tlumení [N·s/m] pro posuv 0,5 mm a tlak 1 bar.

Frekvence [Hz]	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	70 Hz	80 Hz	90 Hz	100 Hz
Act_3_05 mm_1bar	225	163	141	121	126	104	75	56	45
Act_4_05mm_1bar	455	321	263	223	206	181	135	110	102
Act_5_05 mm_1bar	288	212	174	165	158	139	104	90	76
Act_6_05 mm_1bar	270	199	150	136	130	109	80	63	52
Act_7_05mm_1bar	377	267	203	182	157	145	103	93	71
Act_8_05mm_1bar	356	252	196	181	170	145	106	85	78
Act_9_05mm_1bar	510	329	266	224	219	181	140	114	92
Act_10_05mm_1bar	385	272	228	205	188	162	124	112	95
Act_11_05mm_1bar	116	91	81	83	88	71	46	37	30
Act_12_05mm_1bar	488	310	240	212	203	168	124	102	85
PRŮMĚR_05mm_1bar	347	242	194	173	164	140	104	86	73

Tab. 5: Hodnoty tlumení [N·s/m] pro posuv 1 mm a tlak 1 bar.

Frekvence [Hz]	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	70 Hz	80 Hz	90 Hz	100 Hz
Act_3_1mm_1bar	159.5	117.7	93.9	86.8	86.9	75.6	60.0	40.1	31.3
Act_4_1mm_1bar	245.0	185.4	146.9	128.9	123.4	108.1	88.2	64.9	58.2
Act_5_1mm_1bar	162.5	136.3	114.0	102.4	100.6	93.2	70.9	51.4	41.1
Act_6_1mm_1bar	168.0	123.0	100.9	88.1	87.9	80.0	58.8	42.8	33.9
Act_7_1mm_1bar	225.7	161.5	131.3	112.6	110.6	96.0	74.3	59.3	46.2
Act_8_1mm_1bar	213.9	164.8	135.1	119.4	113.8	99.0	76.4	57.9	46.8
Act_9_1mm_1bar	327.7	217.4	170.1	139.8	134.3	115.7	91.8	72.0	61.7
Act_10_1mm_1bar	201.2	159.0	130.3	122.9	113.1	106.0	86.3	64.2	50.7
Act_11_1mm_1bar	86.8	74.2	69.4	70.0	72.6	64.9	54.9	46.5	39.4
Act_12_1mm_1bar	259.8	187.6	148.6	129.9	118.7	104.8	86.1	62.2	51.6
PRŮMĚR_1mm_1bar	205.0	152.7	124.1	110.1	106.2	94.3	74.8	56.1	46.1

Tab. 6: Hodnoty tlumení [N·s/m] pro posuv 2 mm a tlak 1 bar.

Frekvence [Hz]	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	70 Hz	80 Hz	90 Hz	100 Hz
Act_3_2 mm_1bar	103	78	63	60	59	52	40	31	22
Act_4_2mm_1bar	147	106	87	80	77	69	54	42	34
Act_5_2 mm_1bar	117	95	81	72	67	59	46	36	27
Act_6_2 mm_1bar	105	77	62	57	55	51	38	28	20
Act_7_2mm_1bar	141	106	84	75	72	64	52	37	28
Act_8_2mm_1bar	138	111	90	81	76	67	51	39	33
Act_9_2mm_1bar	173	121	98	87	81	71	55	45	38
Act_10_2mm_1bar	147	111	95	79	75	65	57	38	31
Act_11_2mm_1bar	87	72	60	57	55	52	36	30	21
Act_12_2mm_1bar	160	109	90	84	80	72	57	44	35
PRŮMĚR_2mm_1bar	132	99	81	73	70	62	49	37	29

Tab. 7: Hodnoty tlumení [N·s/m] pro posuv 0,5 mm a tlak 1,2 baru.

Frekvence [Hz]	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	70 Hz	80 Hz	90 Hz	100 Hz
Act_3_05 mm_12bar	179	138	113	106	107	89	62	45	38
Act_4_05mm_12bar	562	370	290	250	229	197	146	120	109
Act_5_05 mm_12bar	202	155	130	126	125	103	75	59	49
Act_6_05 mm_12bar	260	191	150	138	129	110	77	64	54
Act_7_05mm_12bar	355	254	204	181	175	147	111	90	86
Act_8_05mm_12bar	384	293	237	203	192	159	115	101	95
Act_9_05mm_12bar	493	341	284	244	225	179	150	140	105
Act_10_05mm_12bar	395	287	235	212	199	159	121	110	98
Act_11_05mm_12bar	88	74	72	74	80	66	43	32	25
Act_12_05mm_12bar	507	345	290	252	231	183	154	143	107
PRŮMĚR_05mm_12bar	343	245	201	179	169	139	105	91	77

Tab. 8: Hodnoty tlumení [N·s/m] pro posuv 1 mm a tlak 1,2 baru.

Frekvence [Hz]	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	70 Hz	80 Hz	90 Hz	100 Hz
Act_3_1mm_12bar	135	106	87	79	78	69	50	34	27
Act_4_1mm_12bar	310	225	178	155	139	125	97	73	64
Act_5_1mm_12bar	137	117	101	97	91	81	61	43	36
Act_6_1mm_12bar	143	114	86	83	81	70	50	38	30
Act_7_1mm_12bar	225	168	128	119	112	102	77	55	49
Act_8_1mm_12bar	247	179	147	132	122	109	82	67	56
Act_9_1mm_12bar	332	224	176	158	141	121	93	75	61
Act_10_1mm_12bar	210	166	138	125	118	107	81	66	54
Act_11_1mm_12bar	74	70	66	65	68	61	40	27	21
Act_12_1mm_12bar	253	177	145	130	121	107	80	65	53
PRŮMĚR_1mm_12bar	207	155	125	114	107	95	71	54	45

Tab. 9: Hodnoty tlumení [N·s/m] pro posuv 2 mm a tlak 1,2 baru.

Frekvence [Hz]	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	70 Hz	80 Hz	90 Hz	100 Hz
Act_3_2 mm_12bar	113	84	68	61	58	49	37	27	20
Act_4_2mm_12bar	185	138	109	96	87	79	61	47	39
Act_5_2 mm_12bar	108	91	78	70	67	59	44	33	24
Act_6_2 mm_12bar	104	75	62	57	55	50	39	28	23
Act_7_2mm_12bar	162	123	98	86	81	71	58	42	32
Act_8_2mm_12bar	143	112	92	84	82	71	54	42	34
Act_9_2mm_12bar	204	147	116	103	91	80	63	47	38
Act_10_2mm_12bar	159	121	98	85	78	73	56	42	30
Act_11_2mm_12bar	80	70	61	58	57	51	39	26	20
Act_12_2mm_12bar	145	114	94	85	83	73	55	43	35
PRŮMĚR_2mm_12bar	140	107	88	78	74	66	51	38	30

Tab. 10: Hodnoty tuhosti [N/m] pro posuv 0,5 mm a tlak 0,6 baru.

Frekvence [Hz]	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	70 Hz	80 Hz	90 Hz	100 Hz
Act_3_05 mm_06bar	45 073	44 485	39 774	35 700	32 367	38 296	40 833	32 739	20 243
Act_4_05mm_06bar	48 929	46 457	42 438	36 997	34 668	39 336	45 787	37 112	23 120
Act_5_05 mm_06bar	42 613	39 557	37 545	32 138	32 118	35 364	40 853	31 763	17 371
Act_6_05 mm_06bar	43 599	41 713	38 624	33 301	30 245	34 929	37 974	29 506	15 471
Act_7_05mm_06bar	42 288	43 800	39 642	36 190	31 796	36 360	43 188	30 745	17 951
Act_8_05mm_06bar	41 449	39 918	35 747	31 750	28 972	35 544	40 028	29 320	17 215
Act_9_05mm_06bar	55 381	54 649	49 684	45 018	43 414	46 730	49 309	45 849	31 918
Act_10_05mm_06bar	41 576	39 449	35 815	30 808	30 359	35 686	40 310	29 247	17 193
Act_11_05mm_06bar	42 861	40 598	36 384	32 020	30 324	35 283	38 249	31 142	19 041
Act_12_05mm_06bar	48 079	45 748	41 652	36 197	33 871	38 502	44 989	36 347	22 408
PRŮMĚR_05mm_06bar	45 185	43 637	39 731	35 012	32 813	37 603	42 152	33 377	20 193

Tab. 11: Hodnoty tuhosti [N/m] pro posuv 1 mm a tlak 0,6 baru.

Frekvence [Hz]	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	70 Hz	80 Hz	90 Hz	100 Hz
Act_3_1mm_06bar	41 433	40 457	36 943	32 451	28 837	29 844	33 091	27 386	15 677
Act_4_1mm_06bar	41 901	40 695	37 388	33 971	30 172	31 228	33 642	29 360	17 816
Act_5_1mm_06bar	38 421	36 441	34 841	30 474	27 962	29 577	31 804	26 829	15 068
Act_6_1mm_06bar	42 134	40 838	37 139	32 823	29 149	29 644	32 059	25 638	13 457
Act_7_1mm_06bar	40 342	39 277	35 984	31 369	28 406	29 415	31 506	25 196	12 914
Act_8_1mm_06bar	38 218	37 522	34 276	30 523	27 762	31 143	31 209	26 254	14 503
Act_9_1mm_06bar	44 945	44 058	40 750	36 263	33 240	35 438	35 278	29 864	21 096
Act_10_1mm_06bar	36 516	35 274	33 850	29 130	26 704	27 156	27 964	26 034	15 685
Act_11_1mm_06bar	37 953	36 405	33 416	29 683	26 941	28 113	30 116	24 193	11 795
Act_12_1mm_06bar	43 680	41 205	37 941	34 211	30 488	31 785	34 002	29 912	16 543
PRŮMĚR_1mm_06bar	40 554	39 217	36 253	32 090	28 966	30 334	32 067	27 066	15 455

Tab. 12: Hodnoty tuhosti [N/m] pro posuv 2 mm a tlak 0,6 baru.

Frekvence [Hz]	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	70 Hz	80 Hz	90 Hz	100 Hz
Act_3_2 mm_06bar	40 334	39 205	36 013	31 959	28 859	28 470	27 326	21 838	11 255
Act_5_2 mm_06bar	35 699	35 416	33 440	29 965	27 185	26 284	24 650	20 072	10 307
Act_4_2mm_06bar	39 311	38 817	36 124	32 395	28 756	28 411	28 120	22 578	12 732
Act_6_2 mm_06bar	41 080	39 900	36 706	32 504	29 299	28 142	26 368	21 347	10 905
Act_7_2mm_06bar	39 090	38 802	36 069	31 910	28 663	27 618	26 192	20 153	9 625
Act_8_2mm_06bar	36 257	36 399	33 590	30 622	27 990	27 228	25 647	20 690	9 671
Act_9_2mm_06bar	40 277	39 183	35 969	32 245	25 373	26 911	28 289	22 622	15 452
Act_10_2mm_06bar	36 128	35 813	33 436	30 238	27 809	27 359	25 754	23 228	9 453
Act_11_2mm_06bar	35 904	36 009	33 326	30 316	27 327	24 973	24 518	18 148	6 404
Act_12_2mm_06bar	41 731	40 018	36 978	32 703	29 450	28 437	26 845	21 521	11 105
PRŮMĚR_2mm_06bar	38 581	37 956	35 165	31 486	28 071	27 383	26 371	21 220	10 691

Tab. 13: Hodnoty tuhosti [N/m] pro posuv 0,5 mm a tlak 1 bar.

Frekvence [Hz]	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	70 Hz	80 Hz	90 Hz	100 Hz
Act_3_05 mm_1bar	52 837	52 441	48 223	47 077	44 087	50 981	46 467	36 367	26 894
Act_4_05mm_1bar	63 719	63 352	59 365	57 618	59 708	63 500	64 534	54 726	40 250
Act_5_05 mm_1bar	53 508	50 173	48 408	45 705	47 305	52 803	50 395	39 446	32 791
Act_6_05 mm_1bar	53 884	53 214	50 939	47 660	45 391	53 709	48 712	38 680	25 584
Act_7_05mm_1bar	58 903	58 157	55 985	52 610	57 994	57 155	57 022	38 318	34 092
Act_8_05mm_1bar	57 723	56 561	55 885	51 663	49 661	58 374	56 280	46 495	31 646
Act_9_05mm_1bar	71 519	72 392	65 426	64 260	50 087	64 837	62 773	49 186	43 134
Act_10_05mm_1bar	55 439	53 445	48 723	43 011	44 603	54 642	50 178	30 735	23 398
Act_11_05mm_1bar	44 007	42 312	39 733	36 293	35 765	41 215	37 004	27 181	15 353
Act_12_05mm_1bar	65 308	64 789	59 789	58 081	60 111	63 728	64 894	55 231	40 890
PRŮMĚR_05mm_1bar	57 685	56 684	53 247	50 398	49 471	56 094	53 826	41 637	31 403

Tab. 14: Hodnoty tuhosti [N/m] pro posuv 1 mm a tlak 1 bar.

Frekvence [Hz]	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	70 Hz	80 Hz	90 Hz	100 Hz
Act_3_1mm_1bar	46 523	45 773	43 477	40 051	37 511	40 497	36 948	28 929	17 649
Act_4_1mm_1bar	49 346	47 194	45 519	42 148	41 242	44 006	42 665	35 208	22 237
Act_5_1mm_1bar	45 201	41 574	41 431	39 516	37 866	40 159	39 333	31 732	21 032
Act_6_1mm_1bar	48 003	47 709	44 103	41 334	38 451	40 353	39 992	31 025	18 697
Act_7_1mm_1bar	48 506	48 462	45 824	44 088	41 667	45 698	43 969	33 200	22 152
Act_8_1mm_1bar	46 613	45 733	43 004	41 322	39 771	41 653	40 084	31 042	20 097
Act_9_1mm_1bar	51 821	53 404	48 435	46 912	41 697	44 911	43 560	33 886	21 372
Act_10_1mm_1bar	43 068	42 085	37 695	34 678	32 262	37 167	34 789	26 214	18 023
Act_11_1mm_1bar	41 581	41 130	38 750	35 057	30 066	27 474	23 696	16 516	6 152
Act_12_1mm_1bar	54 551	53 451	49 081	44 519	43 211	45 778	37 032	33 211	22 372
PRŮMĚR_1mm_1bar	47 521	46 651	43 732	40 963	38 374	40 770	38 207	30 096	18 978

Tab. 15: Hodnoty tuhosti [N/m] pro posuv 2 mm a tlak 1 bar.

Frekvence [Hz]	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	70 Hz	80 Hz	90 Hz	100 Hz
Act_3_2 mm_1bar	43 825	43 652	41 783	38 256	35 777	35 296	31 963	24 231	13 855
Act_4_2mm_1bar	44 370	44 618	42 257	39 233	36 899	36 932	34 161	26 913	16 320
Act_5_2 mm_1bar	41 154	42 023	40 092	38 131	35 941	36 191	33 323	25 708	15 349
Act_6_2mm_1bar	44 904	45 014	42 425	39 248	36 710	35 120	32 385	24 823	14 010
Act_7_2mm_1bar	43 760	43 550	41 940	38 854	36 358	35 397	31 407	25 061	13 822
Act_8_2mm_1bar	40 535	41 065	40 392	37 771	35 786	34 894	32 482	25 015	12 782
Act_9_2mm_1bar	44 468	44 887	42 225	39 281	36 844	37 154	34 528	24 877	12 743
Act_10_2mm_1bar	39 788	39 795	36 778	35 210	32 730	29 304	29 982	22 374	12 904
Act_11_2mm_1bar	39 713	39 875	38 629	35 464	33 213	29 813	29 069	19 271	8 142
Act_12_2mm_1bar	47 095	47 147	44 657	39 899	37 085	35 743	32 681	25 129	15 116
PRŮMĚR_2mm_1bar	42 961	43 163	41 118	38 135	35 734	34 584	32 198	24 340	13 504

Tab. 16: Hodnoty tuhosti [N/m] pro posuv 0,5 mm a tlak 1,2 baru.

Frekvence [Hz]	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	70 Hz	80 Hz	90 Hz	100 Hz
Act_3_05 mm_12bar	52 722	53 616	51 139	47 641	48 395	53 785	47 591	38 813	27 028
Act_4_05mm_12bar	71 536	75 759	72 268	70 996	66 754	75 248	75 296	66 722	55 858
Act_5_05 mm_12bar	52 323	51 437	48 832	45 392	46 371	54 454	48 985	37 208	28 445
Act_6_05 mm_12bar	58 069	58 433	55 525	50 727	53 442	58 524	55 688	41 736	31 217
Act_7_05mm_12bar	89 177	91 865	88 137	80 911	79 019	81 584	78 266	70 451	51 598
Act_8_05mm_12bar	66 116	63 621	60 522	59 453	57 002	67 405	65 980	54 758	33 555
Act_9_05mm_12bar	72 225	72 070	66 927	65 571	67 401	77 922	59 610	44 932	48 079
Act_10_05mm_12bar	54 514	54 858	51 042	42 595	48 975	63 131	62 352	40 240	33 274
Act_11_05mm_12bar	45 423	44 384	40 764	38 282	40 024	46 043	40 303	30 762	19 807
Act_12_05mm_12bar	69 372	74 308	70 156	69 211	64 233	73 265	73 290	65 378	54 284
PRŮMĚR_05mm_12bar	63 148	64 035	60 531	57 078	57 162	65 136	60 736	49 100	38 315

Tab. 17: Hodnoty tuhosti [N/m] pro posuv 1 mm a tlak 1,2 baru.

Frekvence [Hz]	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	70 Hz	80 Hz	90 Hz	100 Hz
Act_3_1mm_12bar	48 827	49 125	47 355	44 466	42 680	44 819	41 310	32 423	21 250
Act_4_1mm_12bar	55 119	54 380	53 461	50 604	48 727	52 203	49 671	42 024	32 657
Act_5_1mm_12bar	47 453	45 920	44 279	41 965	41 697	44 358	41 351	32 780	22 137
Act_6_1mm_12bar	50 433	49 496	50 288	46 686	46 136	47 827	43 682	32 593	21 413
Act_7_1mm_12bar	81 173	79 587	77 251	68 694	66 057	64 896	60 527	52 821	39 318
Act_8_1mm_12bar	49 951	50 692	47 880	46 268	46 433	47 711	47 363	38 812	24 652
Act_9_1mm_12bar	54 239	56 330	53 669	45 895	49 491	51 456	49 903	37 564	29 399
Act_10_1mm_12bar	46 126	45 687	43 801	39 778	40 817	40 607	42 155	33 032	22 722
Act_11_1mm_12bar	44 270	44 054	41 509	39 155	38 328	40 827	39 332	30 597	18 581
Act_12_1mm_12bar	58 839	56 235	55 553	51 321	49 123	52 598	50 011	43 456	32 935
PRŮMĚR_1mm_12bar	53 643	53 151	51 505	47 483	46 949	48 730	46 531	37 610	26 506

Tab. 18: Hodnoty tuhosti [N/m] pro posuv 2 mm a tlak 1,2 baru.

Frekvence [Hz]	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	70 Hz	80 Hz	90 Hz	100 Hz
Act_3_2 mm_12bar	60 943	59 806	55 380	51 433	45 547	43 901	39 531	31 539	22 423
Act_4_2mm_12bar	47 841	48 191	47 263	44 531	42 389	41 829	39 882	32 078	20 213
Act_5_2 mm_12bar	46 237	46 601	44 642	42 234	39 833	39 380	36 840	29 572	19 058
Act_6_2 mm_12bar	56 735	58 108	54 300	50 633	45 656	42 646	38 736	29 439	20 237
Act_7_2mm_12bar	44 970	45 760	45 022	42 534	40 347	39 818	35 479	29 075	17 846
Act_8_2mm_12bar	44 170	45 164	43 971	41 689	38 182	39 668	37 718	30 240	18 361
Act_9_2mm_12bar	49 113	49 288	47 201	42 323	41 737	40 935	38 605	31 142	18 742
Act_10_2mm_12bar	41 937	42 640	41 328	38 859	36 826	32 654	31 475	26 045	16 074
Act_11_2mm_12bar	48 219	48 329	46 412	43 079	40 396	38 946	35 860	28 956	17 658
Act_12_2mm_12bar	52 037	52 457	50 312	47 689	44 913	43 045	39 212	30 741	19 472
PRŮMĚR_2mm_12bar	49 220	49 634	47 583	44 500	41 583	40 282	37 334	29 883	19 008

```
clear
clc

%% PODMINKY MERENI
freq = 20; % frekvence [Hz]
mass = 0.05; % pohybující se hmota [kg]
omega = 2*pi*freq;

%% VYSELEKTOVANI JEDNOHO CYKLU
SAMPLES = (1:1:22)';
FORCE = load('Force20.txt');
ACC = load('Acc20.txt');
plot(SAMPLES, FORCE, 'r', SAMPLES, ACC, 'b')

%% ANALYZA NAMERENEHO SIGNALU
n=length(ACC);
q=((1:n)-ones(1,n))';
A1_acc=(2/n)*ACC'*sin(q*2*pi/n); %imag (sinove) složky zrychlení
B1_acc=(2/n)*ACC'*cos(q*2*pi/n); %real (cosinove) složky zrychlení

A2_force=(2/n)*FORCE'*sin(q*2*pi/n); %imag (sinove) složky síly
B2_force=(2/n)*FORCE'*cos(q*2*pi/n); %real (cosinove) složky síly

%% Komplexní amplituda zrychlení, vychylky a síly
ACC_C = (1i*A1_acc+B1_acc);
DISP_C = (1i*A1_acc+B1_acc)/(omega^2);
FORCE_C = (1i*A2_force+B2_force);

ckomplex = FORCE_C/DISP_C - mass*omega^2; % komplexní tuhost

%% VYSLEDEK
stiffness = real(ckomplex);
damping = -imag(ckomplex)/omega;
disp(['Tuhost pro danou frekvenci buzení ' num2str(omega) ' rad/s je '
num2str(stiffness) ' N/m' ]);
disp(['Tlumení pro danou frekvenci buzení ' num2str(omega) ' rad/s je '
num2str(damping) ' Ns/m' ]);
```