

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Disertační práce

k získání akademického titulu Ph.D.

ve studijním oboru

Aplikovaná mechanika

Ing. David Církľ

Mechanické vlastnosti polyuretanové pěny

Školitel: prof. RNDr. Jan Šklíba, CSc.

Studijní program: P2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 3901V003 Aplikovaná mechanika

Zaměření: Inženýrská mechanika

Datum státní doktorské zkoušky: 26.9.2000

Datum odevzdání práce: 29.9.2005

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146134539

Annotation

Mechanical properties of polyurethane foam

Polyurethane (PU) foam is predominantly used in driver seat production. For computer simulated statical or dynamical comfort of seating it is necessary to describe its properties in sufficient degree which this work deals with. Except some properties known before there was identified linear course of damping force dissipated work on frequency of harmonic kinematic excitation, and independency of damping force extreme on the same parameter. Measurement done in vacuum chamber indicates that contribution of flowing air through opened cells polyurethane is negligible with regard to material dumping.

Method of damping force approximation in analytical form was developed.

Furthermore rheologic model of polyurethane foam has been drawn up and verified by harmonic and triangle kinematic excitation.

Although the complete car seat is far more complicated system its behavior shows qualitatively the same properties as the specimen of PU foam.

keywords

driver seat, polyurethane foam, rheological model, vacuum chamber

Seznam použitých veličin

a	[1]	exponent funkce tlumicí síly
a_{ji}	[-]	koefficient polynomu
b_a	[-]	koefficient funkce tlumicí síly
c_i	[-]	konstanta tlumiče
f	[Hz]	frekvence kmitu
f_T	[1]	koefficient smykového tření
f_{T0}	[1]	konstanta koefficientu smykového tření
h_p, h_i	[m]	výška válce
h_0	[m]	výška stlačeného vzorku PU materiálu s předpokladem uzavřených pórů
k_u	[1/m]	konstanta únosnosti
m_u	[N]	mez únosnosti
n_p, n_{0i}	[1]	polytropický exponent daného pneumatického válce
n_i	[1]	exponent rychlosti nelineárního tlumiče
p_1	[Pa]	tlak tekutiny uvnitř válce
p_2	[Pa]	tlak tekutiny v okolí válce
r_0	[m]	poloměr výfukového otvoru
t	[s]	čas
t_N	[s]	doba náběhu
v	[m/s]	rychlost
v_{ti}	[m/s]	rychlost deformace i -tého prvku
x	[m]	poloha
x_e	[m]	poloha extrému
$\bar{x}_e$	[m]	průměrná poloha extrému
x_{ti}	[m]	deformace i -tého prvku
A	[m]	amplituda kmitu
A_0	[m]	střední hodnota kmitu
F	[N]	celková síla
F_t	[N]	tlumicí síla
F_{ti}	[N]	tlumicí síla i -tého prvku
F_T	[N]	třecí síla
F_{tv}	[N]	složka tlumicí síly způsobená vyfukováním a nasáváním vzduchu
F_V	[N]	vratná síla
F_{Vt}	[N]	síla, tvořící základ pro výpočet třecí síly
G	[kg/s]	hmotnostní průtok
R	[J/kg K]	měrná plynová konstanta
S_0	[m ²]	plocha průřezu výfukového otvoru
S_1	[m ²]	plocha průřezu pístu
T	[s]	perioda kmitu
T_1	[K]	teplota uvnitř válce
T_2	[K]	teplota okolí válce

V_0	[m ³]	objem nestlačeného válce
V_1	[m ³]	okamžitý objem stlačovaného válce
W_d	[J]	práce tlumicí síly
W_V	[J]	práce vratné síly
δ_R	[%]	procentuální míra relaxace
δ_W	[1]	poměr práce tlumicí síly vůči práci vratné síly
$\overline{\delta x_e}$	[%]	průměrná procentuální odchylka polohy extrému
ε	[1]	poměrná deformace
ε_r	[1]	redukovaná poměrná deformace
κ	[1]	adiabatický exponent
μ	[1]	koeficient průtoku
ρ_1	[kg/m ³]	hustota tekutiny ve válci
ρ_2	[kg/m ³]	hustota tekutiny v okolí válce
ω	[1/s]	úhlová rychlost
$\overline{\Delta x_e}$	[m]	průměrná odchylka polohy extrému

Obsah

Úvod	11
1 Vlastnosti vzorku polyuretanového materiálu	13
1.1 Vzorek polyuretanového materiálu	13
1.2 Měřicí zařízení	14
1.3 Silová odezva vzorku na kinematické buzení	17
1.3.1 Zatěžování harmonickým budícím signálem	17
1.3.1.1 Vratná síla	19
1.3.1.2 Tlumení	20
1.3.1.3 Problém nezávislosti extrému tlumicí síly na frekvenci	20
1.3.1.4 Problém lineární závislosti práce tlumicí síly na frekvenci	21
1.3.2 Zatěžování trojúhelníkovým budícím signálem	38
1.3.3 Relaxace napětí	40
1.3.4 Netypické průvodní jevy deformace	42
1.4 Závěr kapitoly	43
2 Pokus o změření vlivu vzduchu na tlumení	46
2.1 Konstrukce vakuové komory	46
2.2 Zkušební s měřením	47
2.2.1 Měření snímačem Rukov	47
2.2.2 Měření třmenovým snímačem	51
2.2.3 Poznatky a východiska	51
2.2.3.1 Závislost snímače síly Rukov na okolním tlaku	51
2.2.3.2 Třmenový snímač síly jako tepelně izolovaná soustava	51
2.2.3.3 Změna teploty při vytváření vakua	54
2.2.3.4 Zahřívání pěny při zatěžování	54
2.2.3.5 Vysávání píště	57
2.3 Dosažené výsledky	57
2.4 Možnost simulace vlivu vzduchu	58
2.5 Závěr kapitoly	62

3	Explicitní formulace tlumicí síly	63
3.1	Určení exponentu a	63
3.2	Určení koeficientu b_a	66
3.3	Závěr kapitoly	76
4	Sestavení simulačního modelu PU pěny	77
4.1	Vratná síla	77
4.1.1	Fáze I. - borcení struktury materiálové matrice	77
4.1.2	Fáze II. a III. - přechování základního materiálu	77
4.2	Tlumicí síla	78
4.3	Výsledky simulace modelu PU pěny	81
4.3.1	Odezva na harmonické buzení - obecné naladění modelu	81
4.3.2	Odezva na trojúhelníkové buzení - speciální naladění modelu	94
4.4	Zhodnocení modelu	94
5	Měření na konkrétním sedáku	99
5.1	Uspořádání experimentu	99
5.1.1	Měřicí hrot	100
5.1.2	Kontakt mezi sedákem a snímačem	102
5.2	Naměřené výsledky	106
5.3	Závěr kapitoly	126
	Závěr	127
	Literatura	129
	A Výkres sestavení vakuové komory	132
	B Vzduchový válec s výfukem do okolí	135

Úvod

Polyuretanová (PU) pěna je již tradičním a velmi rozšířeným materiálem používaným v mnoha oblastech. Zcela dominantně se prosadil při výrobě automobilových sedaček, kde zprostředkovává kontakt mezi sedačkou a sedící osobou. Patří tedy do skupiny II. vibroizolačního stupně. Jeho mechanické vlastnosti zásadním způsobem ovlivňují komfort sezení jak ve statickém, tak v dynamickém stavu. Zkoumáním podmínek, kterým je sedící osoba v jedoucím automobilu vystavena a jejich účinků na lidský organismus se dlouhou dobu zabýval Výzkumný ústav motorových vozidel (VÚMV) v Praze, Státní výzkumný ústav pro stavbu strojů (SVÚSS), Výzkumný ústav dopravní Praha a další. Důkazem toho jsou technické zprávy [7] až [19]. Počátky výzkumu lze sledovat již v 60 letech minulého století. Významnou motivací v této oblasti byla snaha poznat a v možné míře eliminovat negativní dopady vibrací na řidiče užitkových vozidel. Zde vzhledem k předpokládané dlouhodobé expozici vibracemi může docházet např. ke zvýšené únavě, která hrozí snížením pozornosti, zhoršení podmínek k ovládání vozidla nebo až k zdravotním komplikacím.

Zmíněné výzkumy vedly k sestavování simulačních modelů odpruženého sedadla s dynamickou zátěží. Odpružení mohlo být zajištěno např. nůžkovým nebo paralelogramovým mechanismem s pneumatickou pružinou. Dynamickou zátěž prezentovala např. dvouhmotová soustava s tlumiči a pružinami. I když celkový simulační model je poměrně komplikovaný, byl sestaven na základě poznatých a ověřených mechanických vlastností jednotlivých subsystémů. Vlastnosti polyuretanové pěny zde však byly v prvním přiblížení nahrazeny lineárními pružinami a tlumiči. V simulačním modelu tedy chyběla realistická reprezentace vlastností PU pěny jakožto velmi nelineárního materiálu.

Cílem této práce tedy bylo formulovat základní mechanické vlastnosti PU pěny a sestavit jejich simulační model.

Patrně vlivem společenských změn výzkum vlastností PU pěny ve výzkumných ústavech v České republice v podstatě zanikl. Proto má nejmladší relevantní tuzemský pramen v souhrnu použité literatury datování roku 1990. Jinak tomu bylo v zahraničí. Lze pozorovat, že z původní motivace ochrany zdraví řidičů z povolání užitkových automobilů se tato problematika přenáší i do sektoru osobních automobilů, kde již, vzhledem k daleko menší úrovni vibrací, není klíčovým problémem ochrana posádky před negativními zdra-

votními následky, ale zvyšování již dosti vysoké úrovně komfortu. To je pravděpodobně dáno silnou konkurencí na trhu. Proto má tento druh výzkumu možnost uplatnění i u nás.

Práce na vývoji simulačního modelu PU pěny v zahraničí je dokumentována množstvím publikací - např. [20] až [27]. Z nich je patrná snaha o hledání cesty, jak tento problém vůbec uchopit. Jedna část autorů užívá metodu kontinua, druhá část problém řeší modelem se soustředěnými parametry, přičemž stupeň komplikovanosti v přístupu je v některých případech velmi rozdílný. Verifikace modelů je často provedena na omezené množině testovacích dějů. Přístup jednotlivých autorů je zpravidla predikován aplikační oblastí.

Kapitola 1

Vlastnosti vzorku polyuretanového materiálu

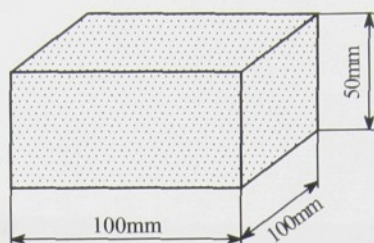
1.1 Vzorek polyuretanového materiálu

Obecně o způsobu výroby polyuretanové pěny a jejím chemickém složení hovoří např. literatura [31]. Struktura a mechanické vlastnosti polyuretanového materiálu jsou dány chemickým složením a vzájemným poměrem jednotlivých komponent. Připravuje se z polyesterů se dvěma hydroxylovými skupinami na koncích, izokyanátu a vody. Reakcí vody s diizokyanáty se uvolňuje kysličník uhličitý, který vytváří pěnovou strukturu. Vznikající polymer současně během vypěňování tuhne. Podle složení výchozí směsi lze připravit pěny měkké, polotuhé a tuhé. Měkké PU pěny jsou u nás známé pod označením "Molitan".

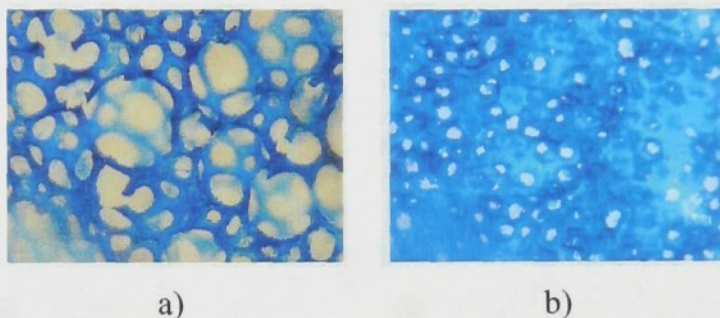
V závislosti na chemickém složení směsi lze vyrobit pěny označující se zkratkou TDI nebo MDI, přičemž obě varianty mohou být v provedení s otevřenými nebo uzavřenými póry. Zkušební vzorky (viz obr. 1.1) pocházejí z podniku Gumotex Břeclav, který se zaměřuje na produkci sedáků a opěráků z polyuretanových pěn. Mají tvar kvádrů o rozměrech (100x100x50) mm. Jsou vyrobeny z materiálu TDI s hustotou 55 kg/m^3 a otevřenými póry.

Typické pro tyto výrobky je, že v blízkosti povrchu se struktura liší od struktury vnitřní, kde je základní materiál protkán navzájem propojenými dutinami (původně bublinky vzniklé při zpěňování). Při deformaci hmoty se jimi vzduch může volně pohybovat. Povrch je tvořen daleko méně prodyšnou slupkou, která částečně unikání vzduchu brání. Jednotlivé zkušební vzorky byly vyřezány z většího celku. Proto mají některé kvádry tvořeny stěny pouze řezem vnitřní struktury a u jiných může být některá ze stěn tvořena slupkou. Pro experimenty byly vybírány vzorky z vnitřních oblastí polotovaru, aby tento fakt neovlivňoval měřené vlastnosti.

Na obr. 1.2 je řez vnitřní strukturou vzorků a pro porovnání též slupka s daleko menším počtem pórů. Množství a velikost bublinek odpovídá nepřímě úměrně hustotě materiálu.



Obrázek 1.1: Vzorek polyuretanového materiálu



Obrázek 1.2: a) řez vnitřní strukturou, b) povrchová slupka, zvětšeno 4×, vzorek 4A

1.2 Měřicí zařízení

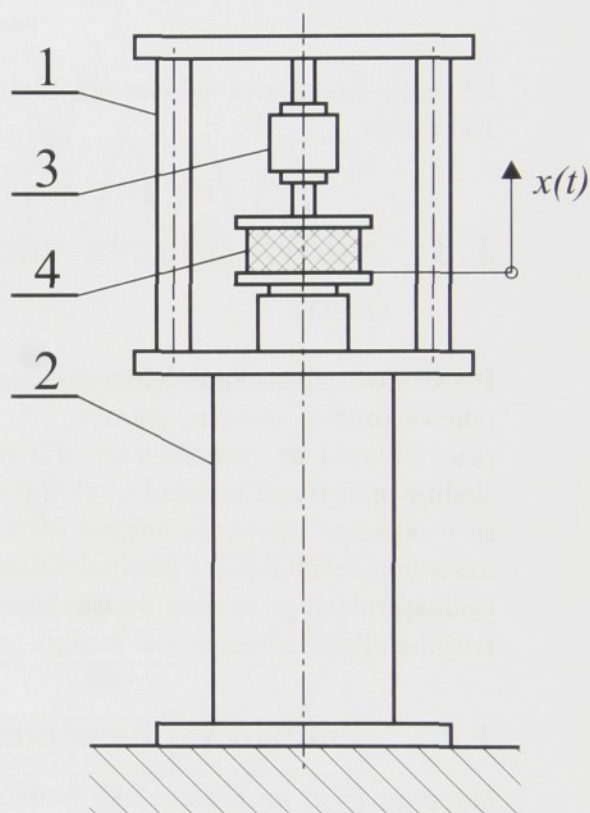
Hlavním zdrojem informací pro posuzování vlastností tohoto materiálu je experimentální měření. To je prováděno v hydrodynamické zkušebně (HDL Doubí). Zkušební stav ve své původní podobě je zachycen na obr. 1.3. Z důvodů, které jsou popsány v kap. 2 byl v průběhu času zkonstruován nový zkušební stav (obr. 1.4 vlevo), který má kromě menších zástavbových rozměrů i vyšší tuhost. To také příznivě ovlivňuje hodnotu vlastní rezonanční frekvence rámu.

Použité snímače k měření síly jsou tenzometrické. Jedná se buď o typ s rozsahem do 1.5 kN nebo Rukov HP 21, 2.2 kN, výr. číslo 04384. Hydraulický válec je typu AHS 25-250 (jmenovitá síla 25 kN, max. celkový zdvih 250 mm), max. pracovní tlak 28 MPa.

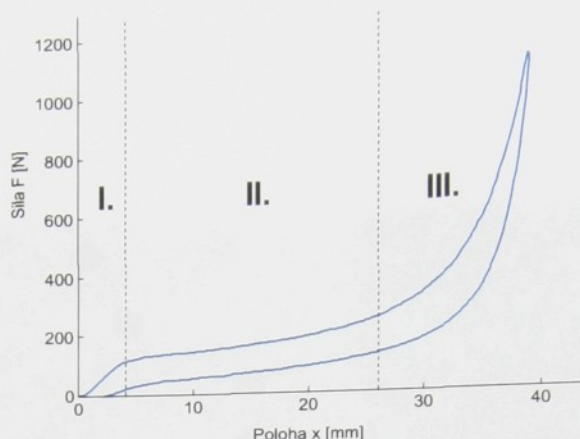
Vzorek polyuretanového materiálu je vložen mezi dvě rovnoběžné ocelové desky (viz obr. 1.4).



Obrázek 1.3: Velký zkušební rám



Obrázek 1.4: Malý zkušební rám, vlevo: reálné provedení, vpravo: schéma: 1–rám, 2–hydraulický válec, 3–snímač síly, 4–vzorek polyuretanového materiálu



Obrázek 1.5: Silová odezva na trojúhelníkové buzení s rychlostí přibližně 150 mm/s

1.3 Silová odezva vzorku na kinematické buzení

Při stlačování vzorku polohovým signálem (např. trojúhelníkovým) má silová odezva průběh uvedený na obr. 1.5. Zde jsou rozlišitelné 3 charakteristické fáze. Oblast I. se vyznačuje téměř lineárním náběhem z nulových hodnot. Následuje opět téměř lineární a velmi pozvolný nárůst síly v oblasti II. Tato fáze se v odborné literatuře nazývá *plateau*. Interval III. se vyznačuje prudkým nárůstem měřené síly s předpokládanou svislou asymptotou. V následujících podkapitolách je uveden podrobnější rozbor silové odezvy na harmonické a trojúhelníkové kinematické buzení.

1.3.1 Zatěžování harmonickým budícím signálem

Odezvou $F(x)$ na harmonický budící signál (1.1) u takovýchto materiálů je křivka na obr. 1.7. Hydraulický válec nejprve najíždí z počáteční polohy 0 na střední hodnotu A_0 a kolem této střední hodnoty kmitá s amplitudou A . Výsledkem je hysterezní křivka, která se vlivem rychlé relaxace posouvá v souřadném systému dolů.

$$x(t) = A_0 + A \sin[\omega(t - t_N)], \quad \omega = 2\pi f, \quad f = 1/T, \quad (1.1)$$

kde:

A_0 – je střední hodnota kmitu,

A – je amplituda kmitu,

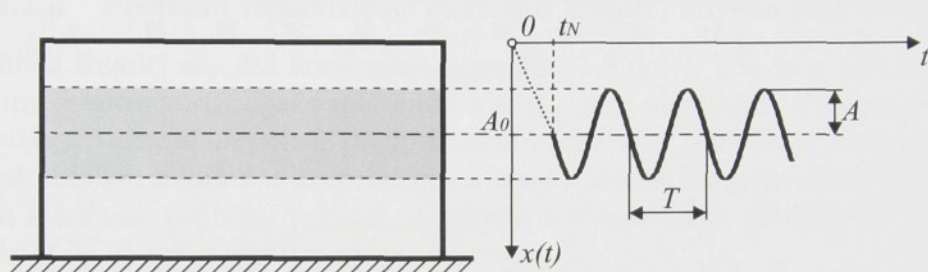
T – je perioda kmitu,

f – je frekvence kmitu,

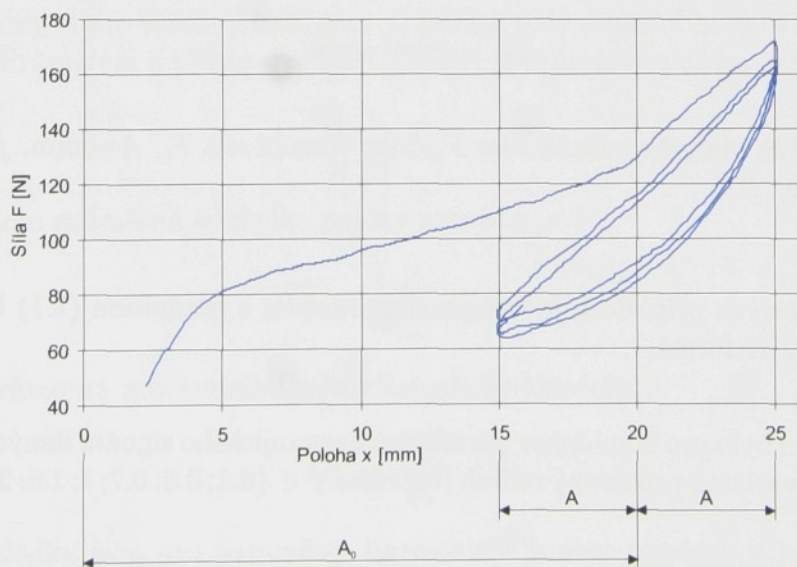
t_N – je čas náběhu z nulové polohy.

A_0 [mm]	A [mm]				
	1	3	5	7	10
20	x	-	x	-	x
25	x	x	x	x	-
30	x	x	x	x	-

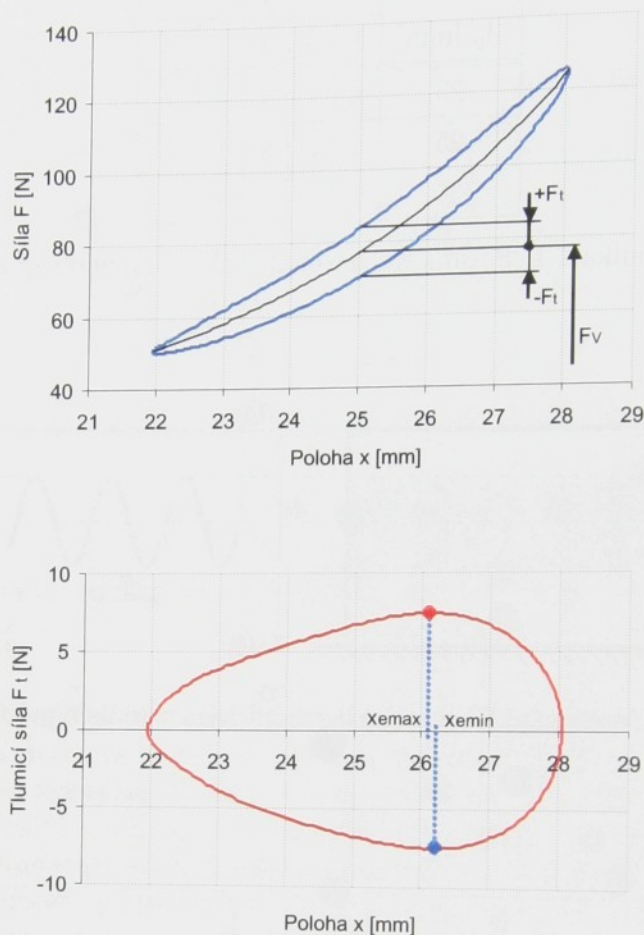
Tabulka 1.1: Parametry harmonického budicího signálu



Obrázek 1.6: Zatěžování PU vzorku harmonickým signálem polohy s náběhem



Obrázek 1.7: Silová odezva polyuretanu na harmonický budicí signál ($f=3\text{Hz}$, $A=5\text{mm}$, $A_0=20\text{mm}$)



Obrázek 1.8: Nahoře: celková síla F , dole: tlumicí síla F_t , $A=5\text{mm}$, $f=3\text{Hz}$, $A_0=25\text{mm}$

V některých případech je výhodnější pracovat s předpisem (1.1) bez ná-
běhu, tedy ve formě

$$x(t) = A_0 + A \sin(\omega t). \quad (1.2)$$

Měřeno bylo pro kombinace parametrů harmonického signálu daných tab. 1.1
a v každé variantě pro široký rozsah frekvencí $f \in \{0.1; 0.5; 0.7; 1; 1.5; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10\}$ Hz

1.3.1.1 Vratná síla

Vratná síla F_v , je v této kapitole reprezentována skeletovou čarou hyste-
rezní smyčky (viz obr. 1.8 nahoře). V tomto pojetí není přímo měřitelná při
kvazistatickém zatěžování z důvodu silné časové závislosti silové odezvy. Na
základě této úvahy definujeme vratnou i tlumicí sílu současně.

1.3.1.2 Tlumení

Tlumení je patrně z největší části způsobeno vlastním útlumem PU materiálu. Dalším faktorem je to, že struktura hmoty molitanu je pórovitá; bublinky jsou vzájemně propojeny kanálky. Při stlačování vzorku jimi vzduch uniká ven do okolí a při odlehčování je nasáván zpět. To se také neobejde bez energetických ztrát. Svůj význam zde má jistě i tření, neboť stěny pórů přicházejí během deformace do kontaktu, materiál je pýchován.

Z výše uvedeného předpokladu o síle vratné vyplývá, že průběh tlumicí síly F_t při stlačování a odlehčování je kolem vratné síly rozložen symetricky. Graf tlumicí síly vyjádřený v závislosti na dráze je na obr. 1.8 dole.

1.3.1.3 Problém nezávislosti extrému tlumicí síly na frekvenci

Průběh tlumicí síly má hruškovitý tvar (obr. 1.8 dole), kde jsou patrné extrémy označeny x_{emin} jako minimum a x_{emax} jako maximum. Protože byl v závislosti tlumení na poloze předpokládán symetrický průběh, je malý rozdíl mezi polohou minima a maxima, způsobený v některých případech vystižením středního průběhu pomocí polynomu s -tého stupně, zredukován vztahem (1.3) na tzv. polohu extrému x_e .

$$x_e = \frac{1}{2}(x_{emin} + x_{emax}) \quad (1.3)$$

V takto vymezeném smyslu jsou na obr. 1.13 až 1.33 zobrazeny grafy jak síly celkové, tak tlumicí pro všechny naměřené případy.

Z těchto grafů byla odečtena veličina x_e v rámci jednoho předpětí A_0 a amplitudy A pro všechny frekvence f , celkem tedy dvanáct hodnot z jednoho grafu. Průměrem z těchto dvanácti hodnot je průměrná poloha extrému $\overline{x_e}$:

$$\overline{x_e} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ei}, \quad n = 12. \quad (1.4)$$

Potom průměrná odchylka polohy extrému je

$$\overline{\Delta x_e} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\overline{x_e} - x_{ei}| \quad (1.5)$$

a průměrná procentuální odchylka polohy extrému

$$\overline{\delta x_e} = \frac{\overline{\Delta x_e}}{\overline{x_e}} \cdot 100. \quad (1.6)$$

Výsledky jsou pro parametry harmonické funkce uvedeny v tab. 1.2. Z prostého pohledu na zmíněné grafy lze usoudit, že pozice extrému x_e se se změnou frekvence při zachování střední hodnoty a amplitudy příliš nemění a soustřeďují se v omezeném intervalu. Tato domněnka je podepřena provedeným rozбором. Průměrná procentuální odchylka poloh jednotlivých extrémů $\overline{\delta x_e}$ se od hodnoty průměrného extrému $\overline{x_e}$ pohybuje v mezích 0.42 až 1.81

A_0 [mm]	A [mm]	$\bar{x}_e$ [mm]	$\overline{\Delta x_e}$ [mm]	$\overline{\delta x_e}$ [%]
20	5	21.87	0.37	1.70
	10	26.36	0.48	1.81
25	3	26.07	0.12	0.47
	5	27.53	0.14	0.53
	7	29.60	0.14	0.47
30	3	31.41	0.25	0.79
	5	33.34	0.15	0.46
	7	35.37	0.15	0.42

Tabulka 1.2: Průměrná poloha extrému tlumicí síly $\bar{x}_e$ a její odchylky

%, navíc chaoticky - nemá systematický vývoj v závislosti na vstupních parametrech budicího signálu. Zřejmě se tedy jedná o rozptýl měření. Z toho plyne, že je důvodné považovat, v rámci jedné střední hodnoty a amplitudy, polohu extrému x_e za nezávislou na budicí frekvenci, tedy za konstantní.

Tato analýza nebyla provedena pro hysterezní smyčky s amplitudou signálu 1 mm, pro neustálenost charakteru jejich tvaru, jak je patrné z grafů. To je dáno spíše podmínkami měření, než vlastnostmi PU materiálu.

1.3.1.4 Problém lineární závislosti práce tlumicí síly na frekvenci

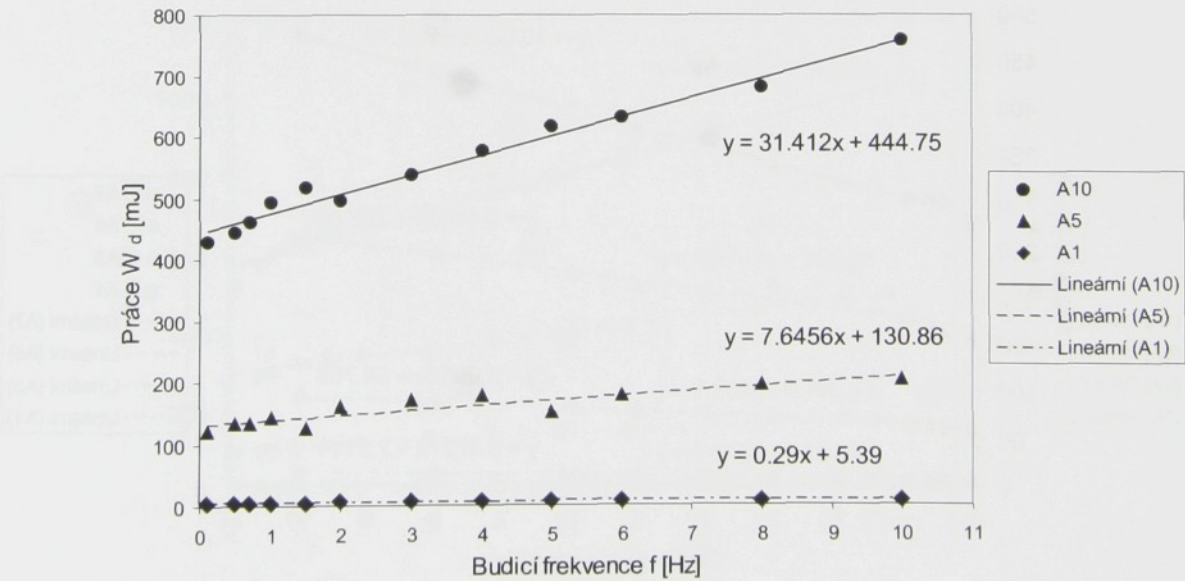
Obsahem plochy hysterezní smyčky, jak uvádí vztah (1.7), je práce ztracená za jeden kmit vlivem tlumení W_d . Byla provedena analýza závislosti velikosti práce tlumicí síly v rámci jedné periody na frekvenci budicího signálu pro jednotlivé střední hodnoty a amplitudy, jak uvádí tab. 1.1. Získané výsledky jsou zaznamenány v tab. 1.3, 1.4, 1.5 a v grafickém vyjádření pak na obr. 1.9, 1.10, 1.11.

Z uvedeného vyplývá, že průběh práce tlumicí síly lze pro danou střední hodnotu a amplitudu velmi dobře proložit lineární funkcí.

$$W_d = \oint F_t dx. \quad (1.7)$$

Práce W_d [mJ]			
f [Hz]	A [mm]		
	1	5	10
0.1	4.80	121.91	428.79
0.5	5.31	134.34	443.70
0.7	5.49	134.52	461.69
1	5.18	142.31	494.47
1.5	5.61	125.02	519.02
2	6.49	159.63	496.62
3	6.99	169.41	539.33
4	7.38	177.66	576.61
5	7.51	150.34	617.93
6	6.64	177.15	632.98
8	7.74	194.98	680.26
10	7.68	202.68	758.69

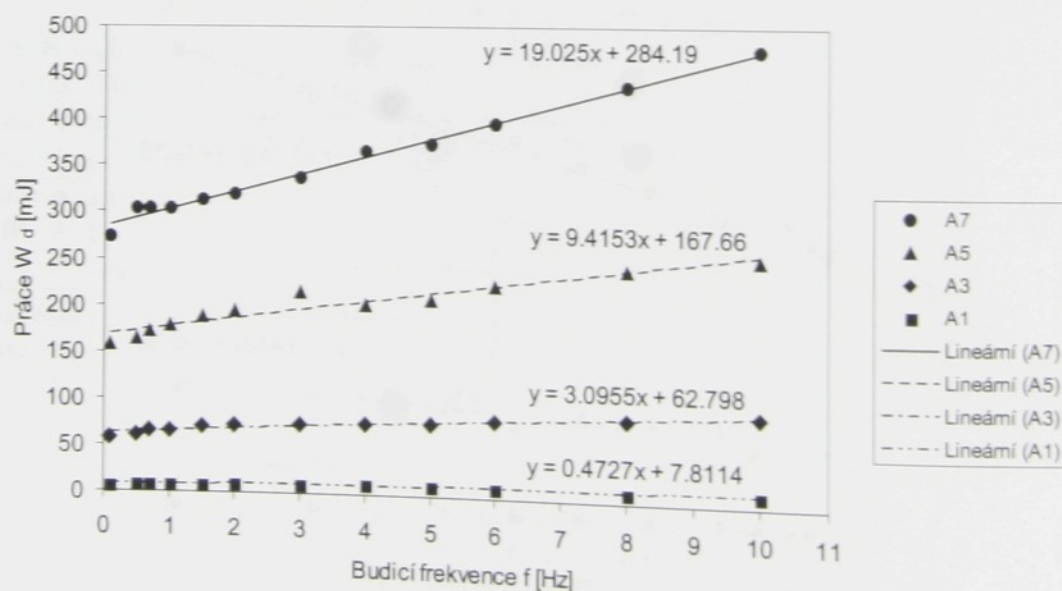
Tabulka 1.3: Práce tlumicí síly W_d v závislosti na frekvenci budicího signálu f ; $A=(1, 5, 10)$ mm, $A_0=20$ mm



Obrázek 1.9: Práce tlumicí síly W_d v závislosti na frekvenci budicího signálu f ; $A=(1, 5, 10)$ mm, $A_0=20$ mm

Práce W_d [mJ]				
f [Hz]	A [mm]			
	1	3	5	7
0.1	6.88	57.86	157.33	273.72
0.5	7.90	61.71	164.42	303.18
0.7	8.24	66.34	171.83	303.22
1	8.41	66.16	177.89	304.47
1.5	8.54	70.10	187.40	312.85
2	9.03	72.43	194.08	320.01
3	8.97	73.87	214.77	337.95
4	10.98	75.66	202.35	366.31
5	10.56	77.65	209.09	374.81
6	10.53	81.46	225.57	396.55
8	11.27	87.09	244.06	437.13
10	12.18	92.63	256.69	475.31

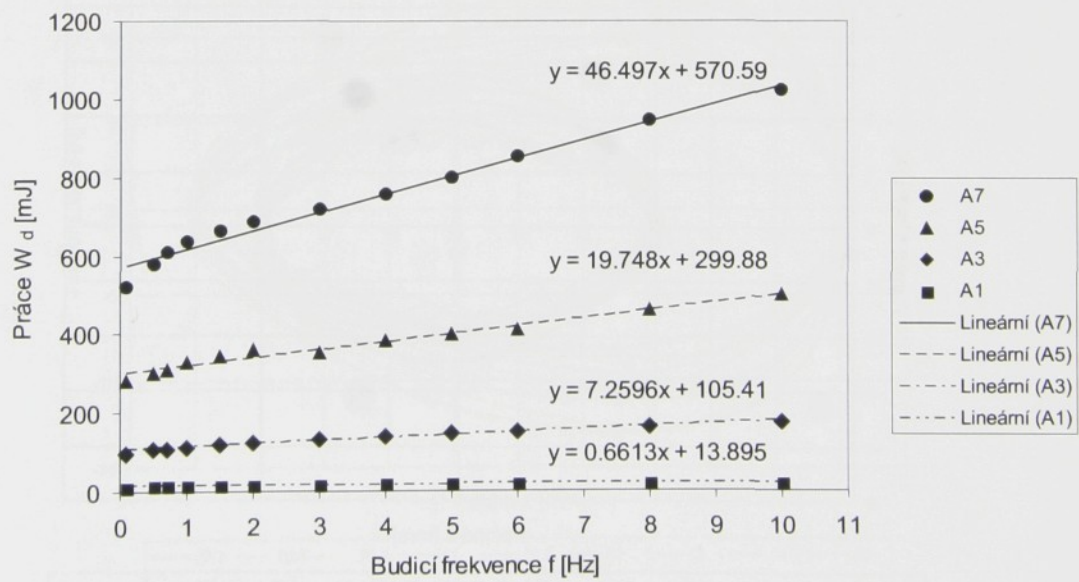
Tabulka 1.4: Práce tlumicí síly W_d v závislosti na frekvenci budicího signálu f ; $A=(1, 3, 5, 7)$ mm, $A_0=25$ mm



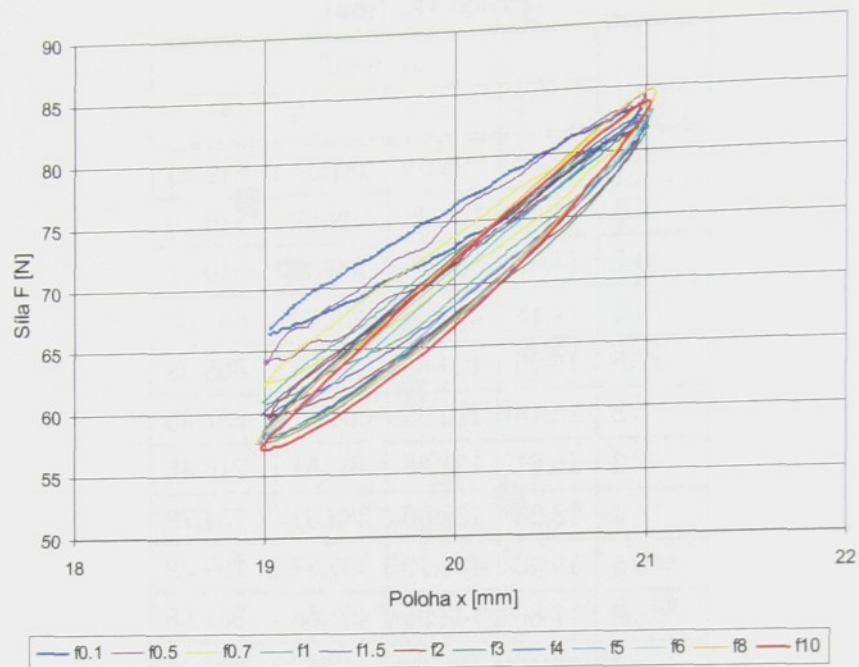
Obrázek 1.10: Práce tlumicí síly W_d v závislosti na frekvenci budicího signálu f ; $A=(1, 3, 5, 7)$ mm, $A_0=25$ mm

Práce W_d [mJ]				
f [Hz]	A [mm]			
	1	3	5	7
0.1	12.92	96.08	281.91	519.69
0.5	14.04	108.28	302.57	580.29
0.7	14.56	107.28	309.32	610.31
1	14.15	113.22	329.69	636.90
1.5	15.05	120.63	343.56	665.38
2	13.73	122.98	358.87	687.60
3	16.61	131.88	352.51	716.45
4	18.24	138.00	383.62	754.79
5	19.40	145.70	397.87	799.39
6	17.80	148.95	407.68	851.88
8	18.40	161.64	460.42	944.45
10	19.50	173.71	496.06	1023.50

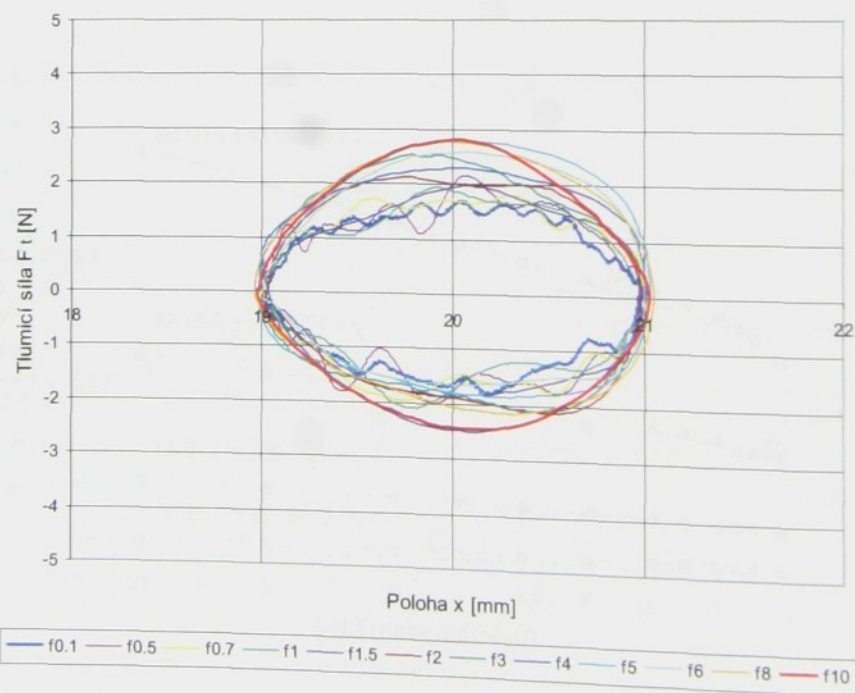
Tabulka 1.5: Práce tlumicí síly W_d v závislosti na frekvenci budícího signálu f ; $A=(1, 3, 5, 7)$ mm, $A_0=30$ mm



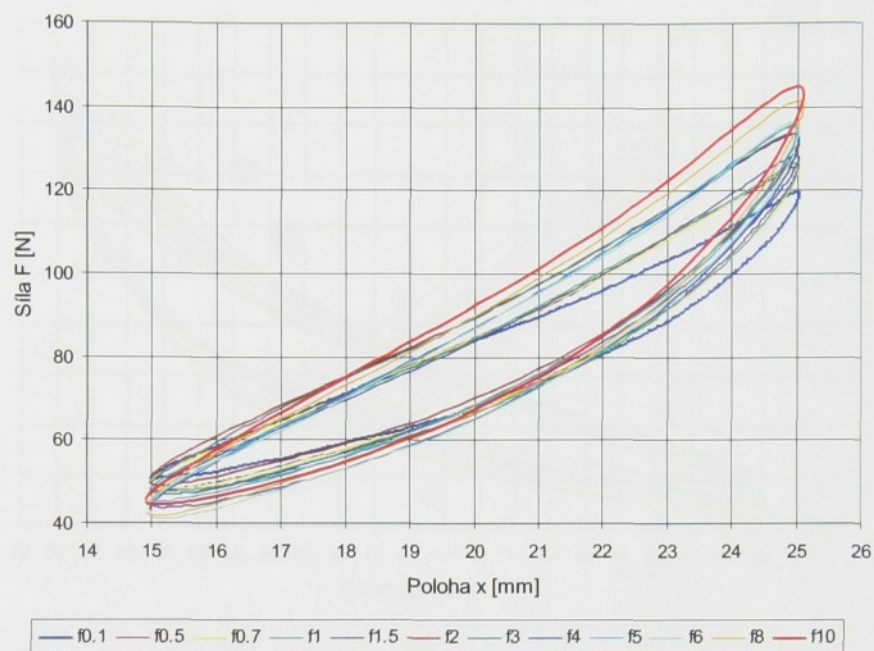
Obrázek 1.11: Práce tlumicí síly W_d v závislosti na frekvenci budícího signálu f ; $A=(1, 3, 5, 7)$ mm, $A_0=30$ mm



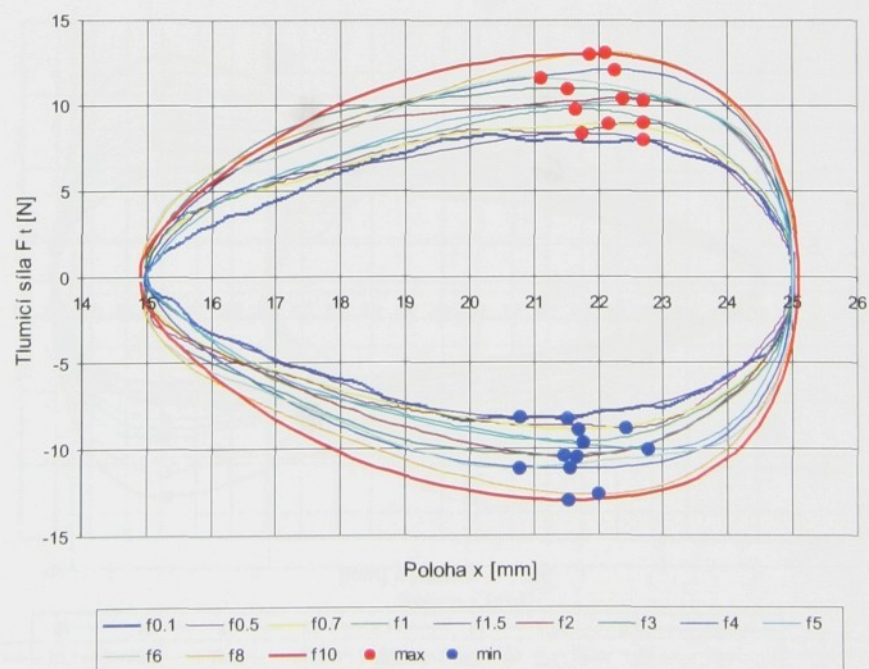
Obrázek 1.12: Celková síla F , $A=1\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=20\text{mm}$



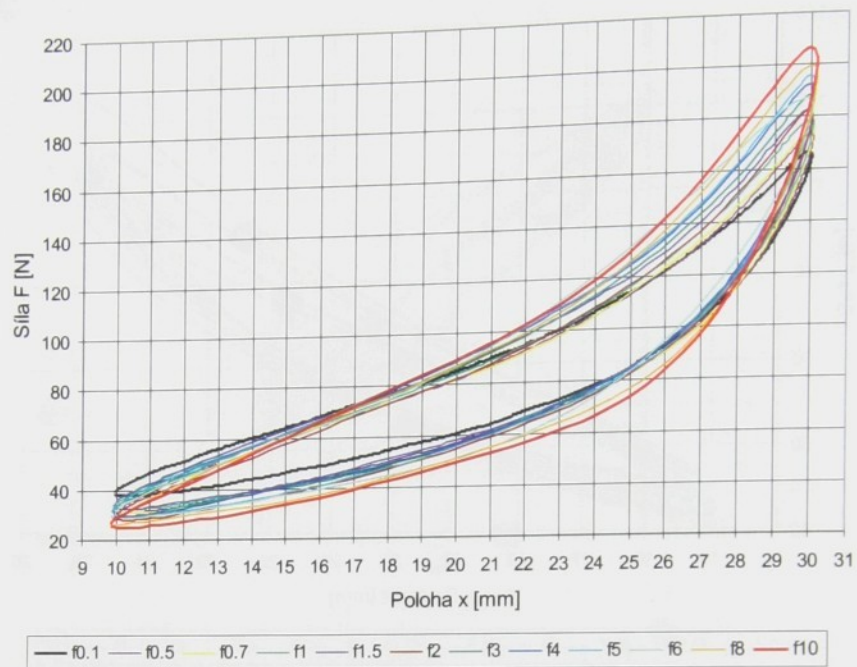
Obrázek 1.13: Tlumicí síla F_t , $A=1\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=20\text{mm}$



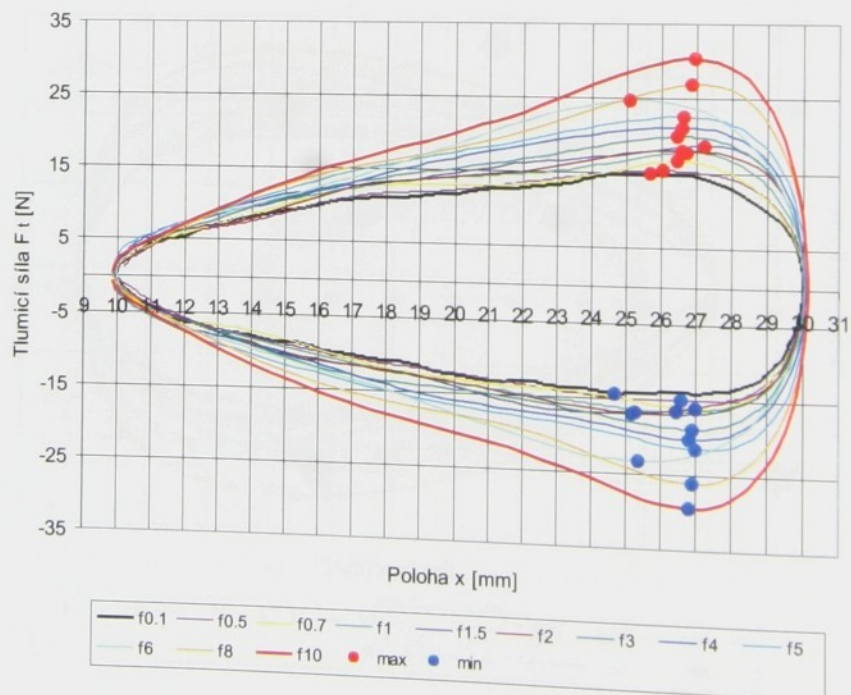
Obrázek 1.14: Celková síla F , $A=5\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=20\text{mm}$



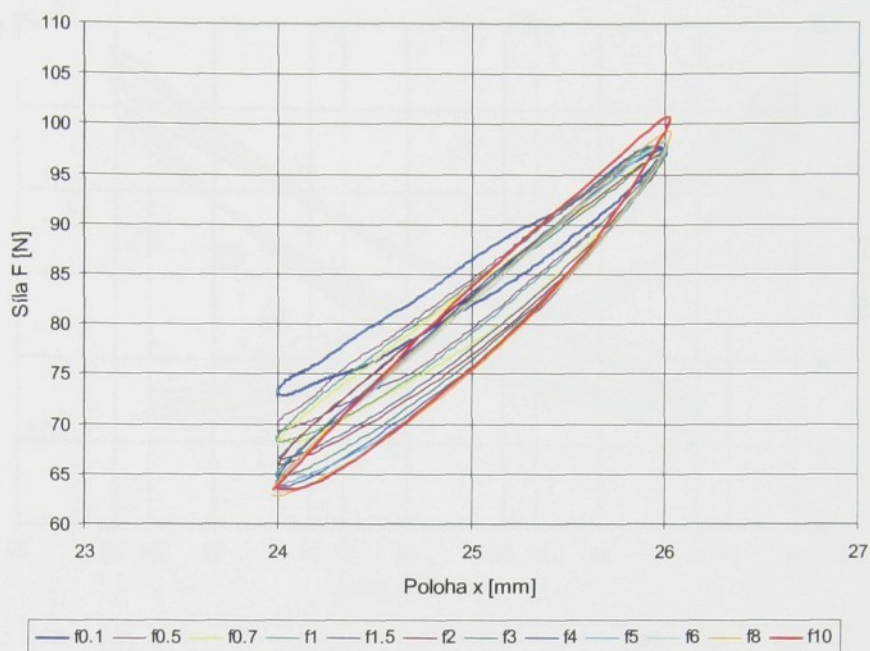
Obrázek 1.15: Tlumičí síla F_t , $A=5\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=20\text{mm}$



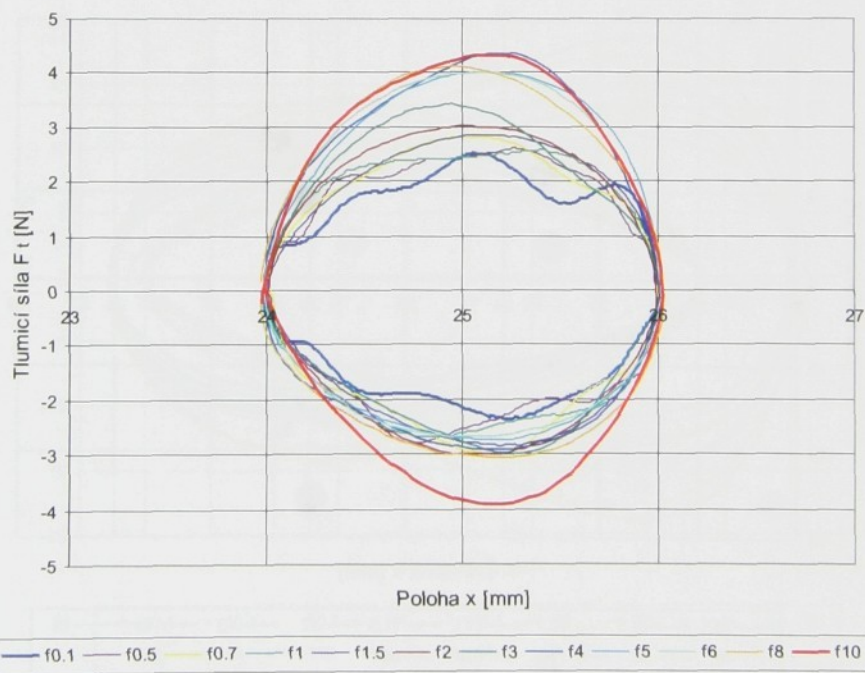
Obrázek 1.16: Celková síla F , $A=10\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=20\text{mm}$



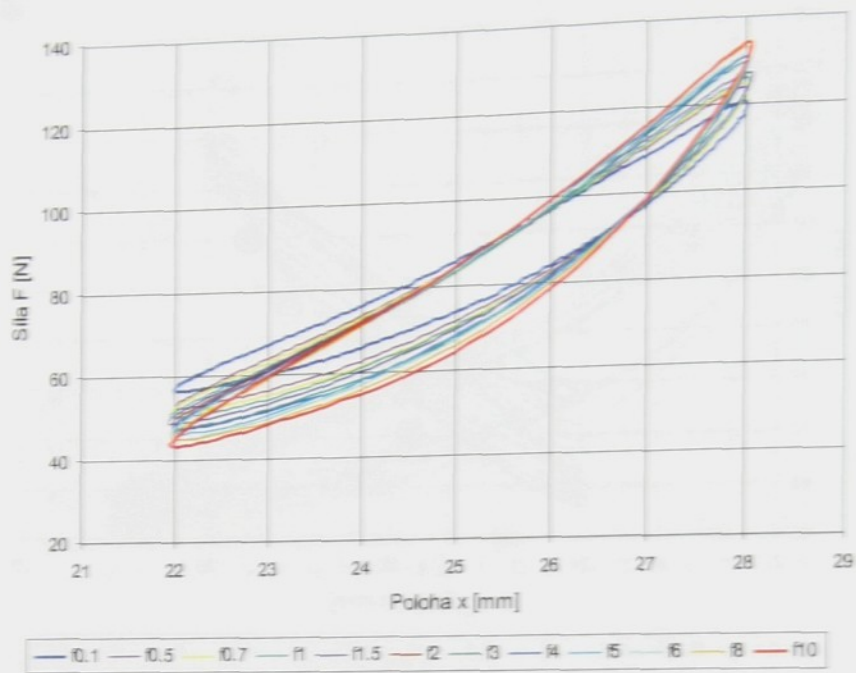
Obrázek 1.17: Tlumičí síla F_t , $A=10\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=20\text{mm}$



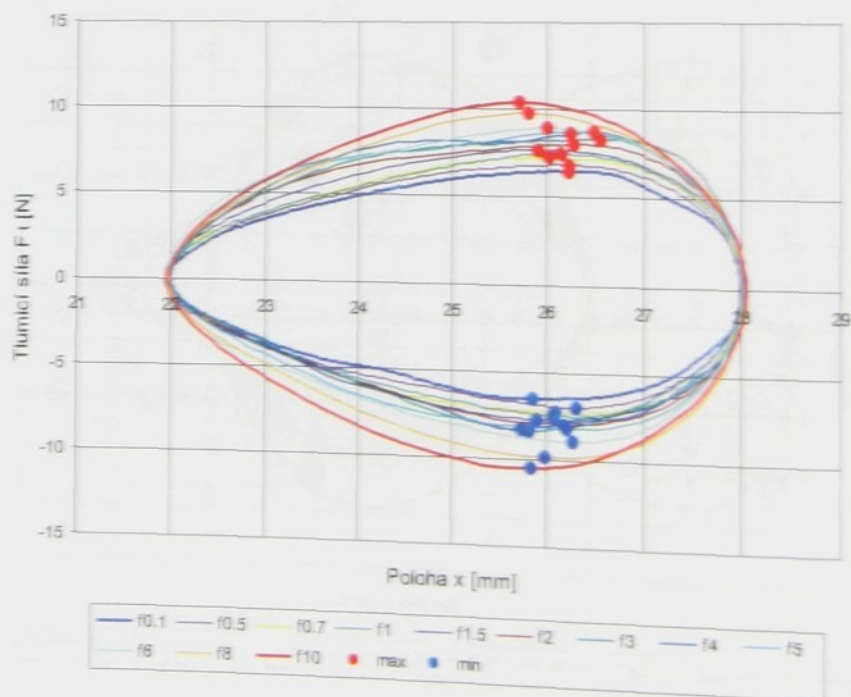
Obrázek 1.18: Celková síla F , $A=1\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=25\text{mm}$



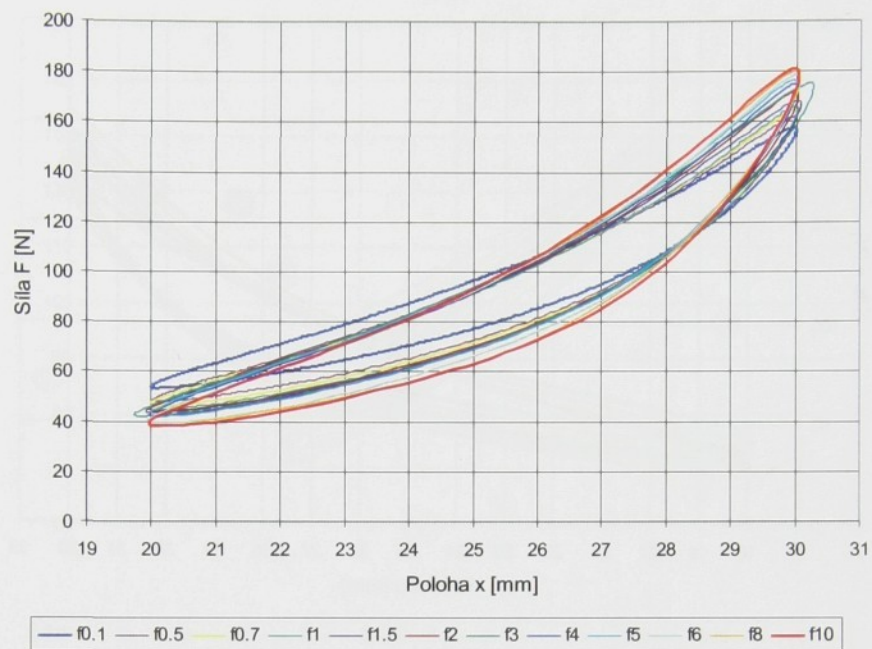
Obrázek 1.19: Tlumící síla F_t , $A=1\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=25\text{mm}$



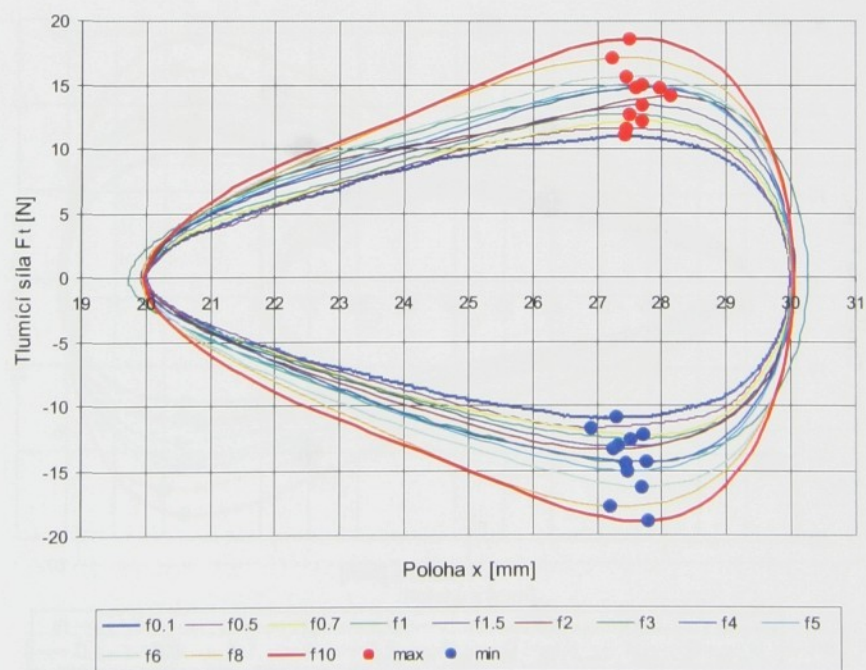
Obrázek 1.20: Celková síla F , $A=3\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=25\text{mm}$



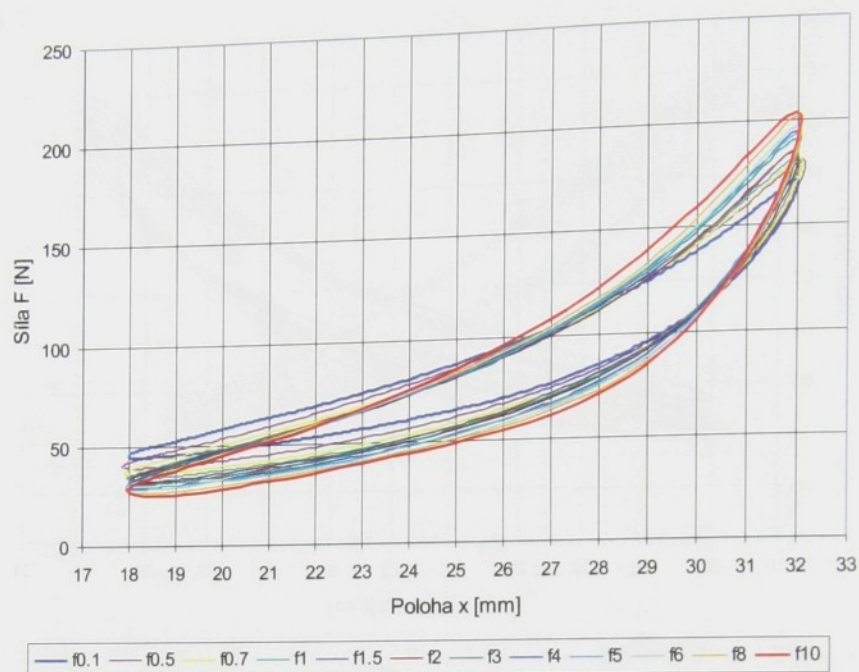
Obrázek 1.21: Tlumičí síla F_t , $A=3\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=25\text{mm}$



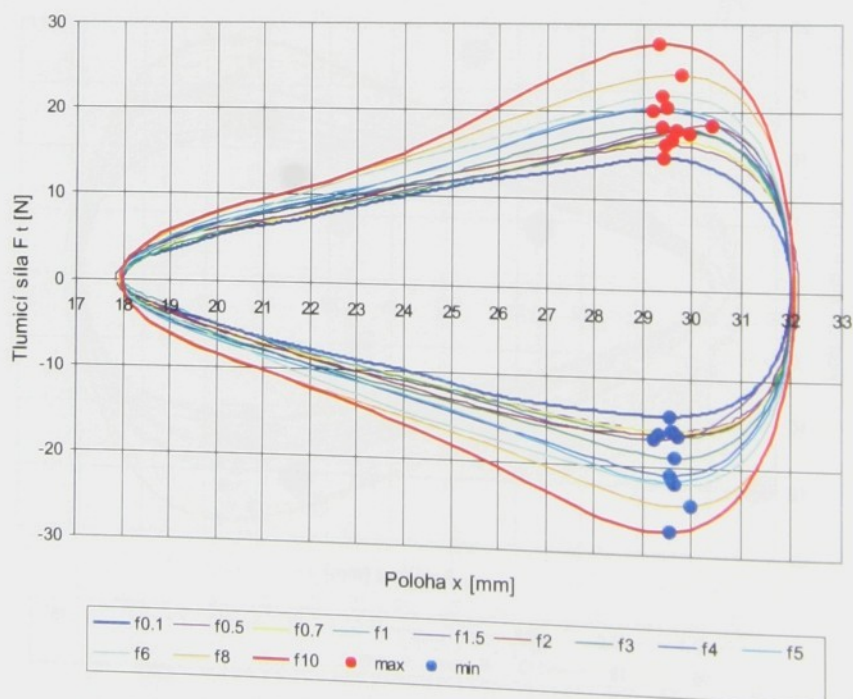
Obrázek 1.22: Celková síla F , $A=5\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=25\text{mm}$



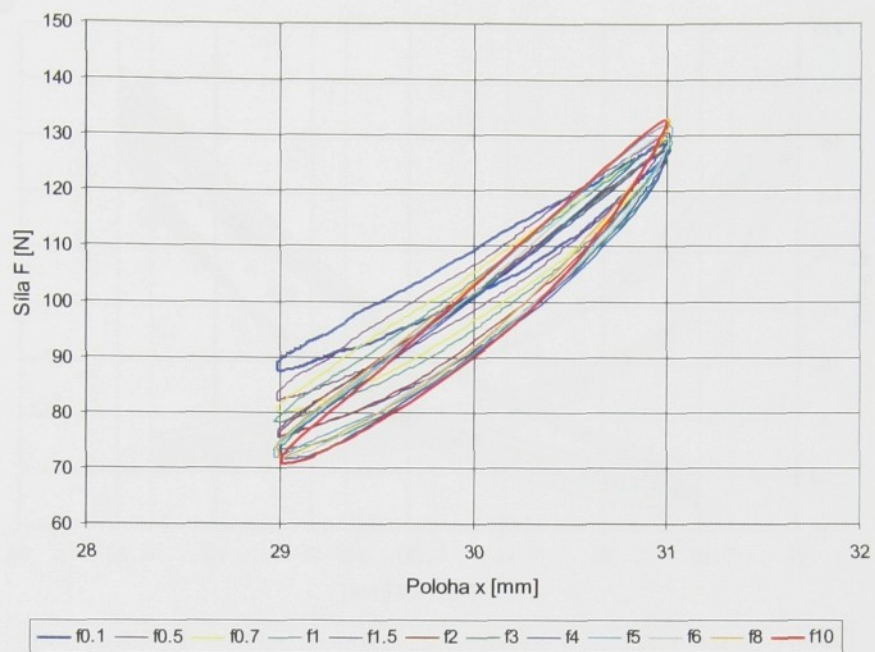
Obrázek 1.23: Tlumící síla F_t , $A=5\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=25\text{mm}$



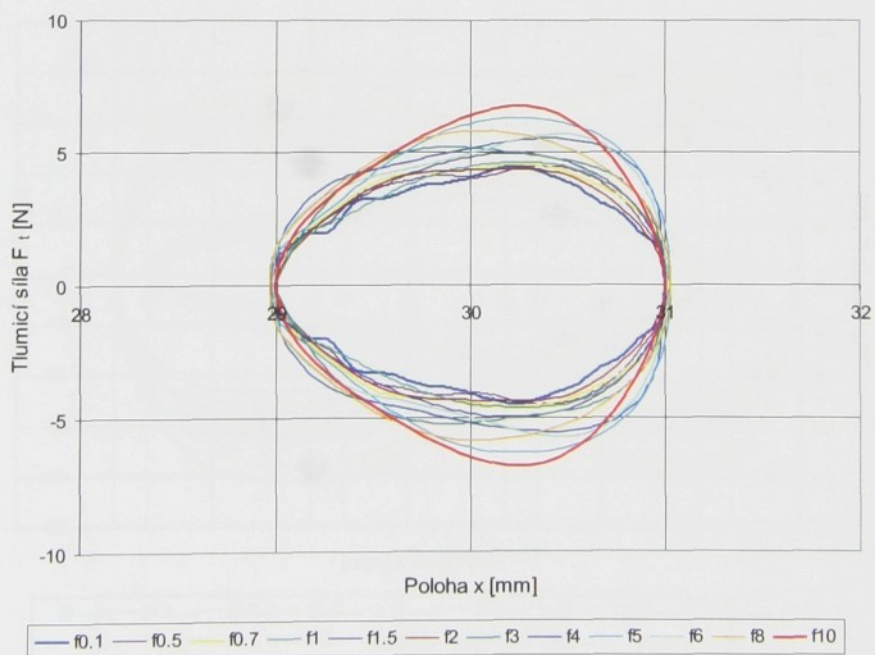
Obrázek 1.24: Celková síla F , $A=7\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=25\text{mm}$



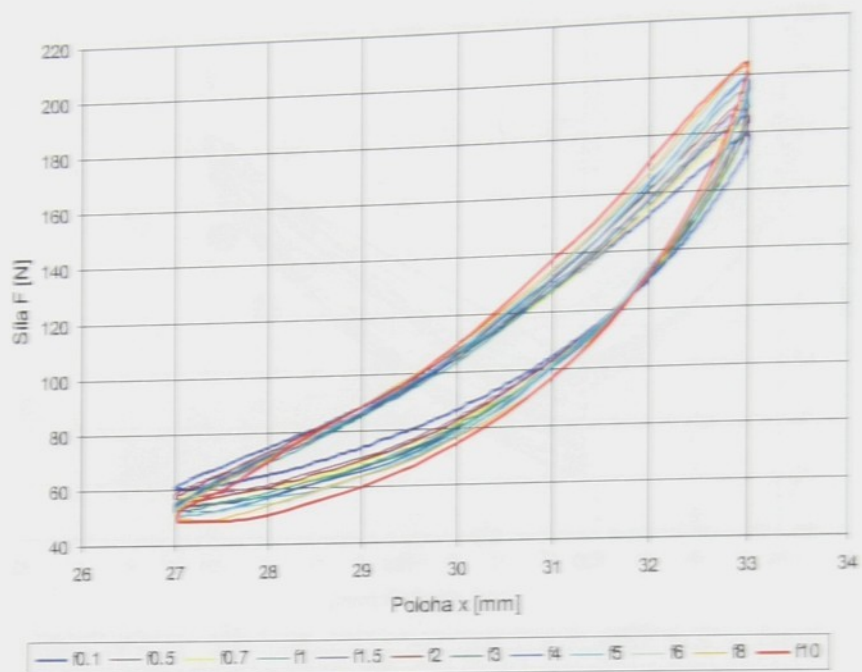
Obrázek 1.25: Tlumičí síla F_t , $A=7\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=25\text{mm}$



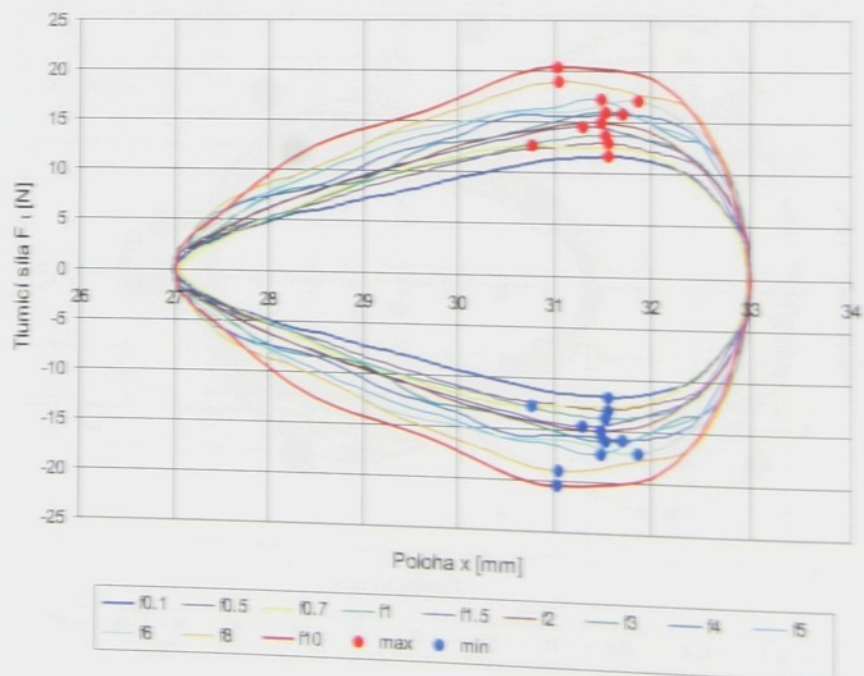
Obrázek 1.26: Celková síla F , $A=1\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=30\text{mm}$



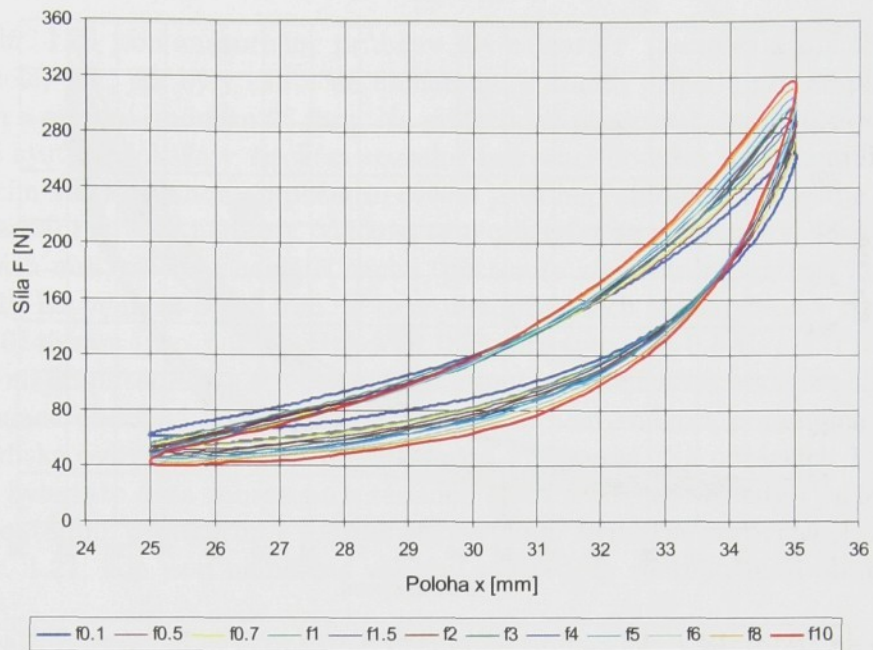
Obrázek 1.27: Tlumicí síla F_t , $A=1\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=30\text{mm}$



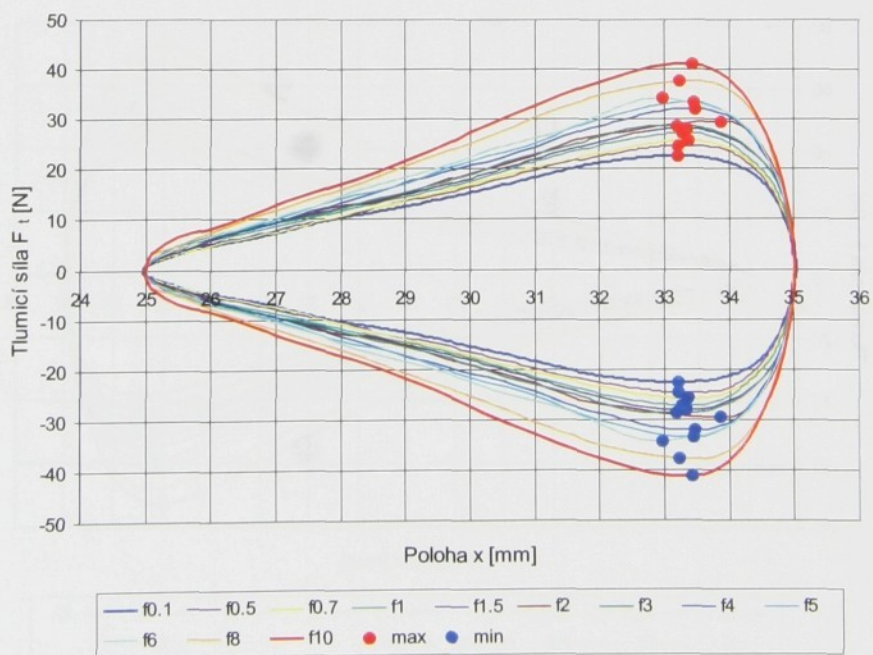
Obrázek 1.28: Celková síla F , $A=3\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=30\text{mm}$



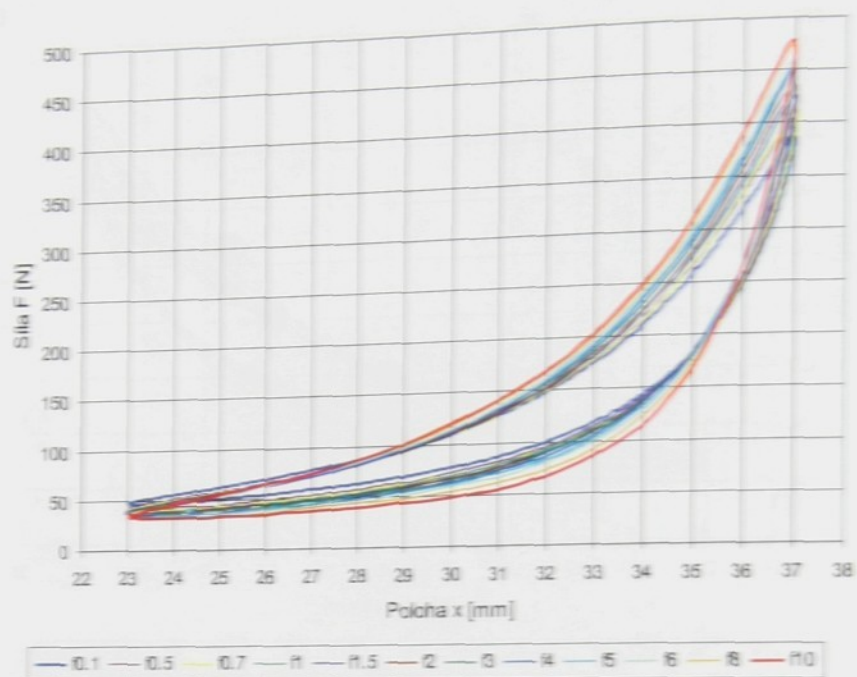
Obrázek 1.29: Tlumičí síla F_t , $A=3\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=30\text{mm}$



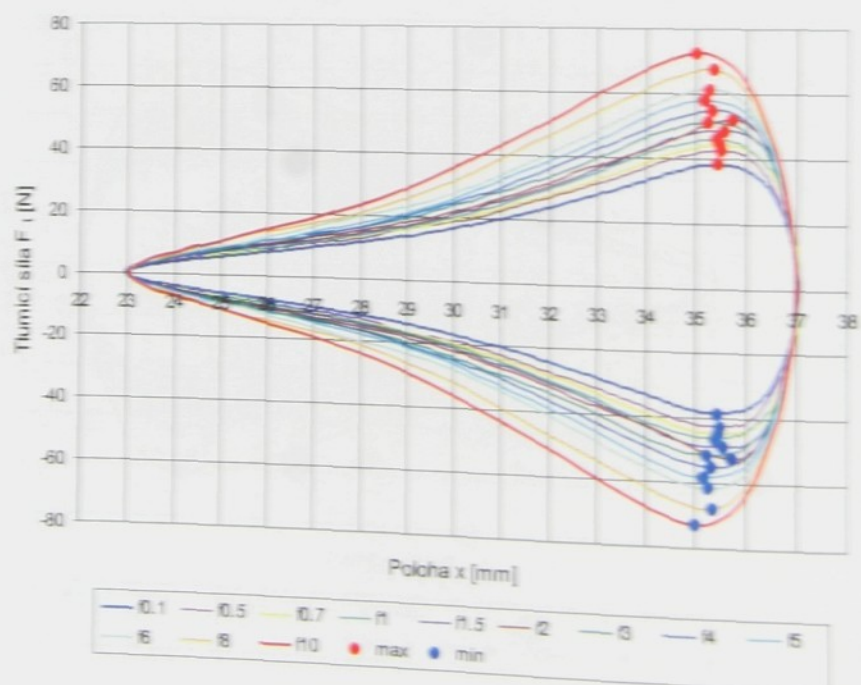
Obrázek 1.30: Celková síla F , $A=5\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=30\text{mm}$



Obrázek 1.31: Tlumicí síla F_t , $A=5\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=30\text{mm}$



Obrázek 1.32: Celková síla F , $A=7\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=30\text{mm}$

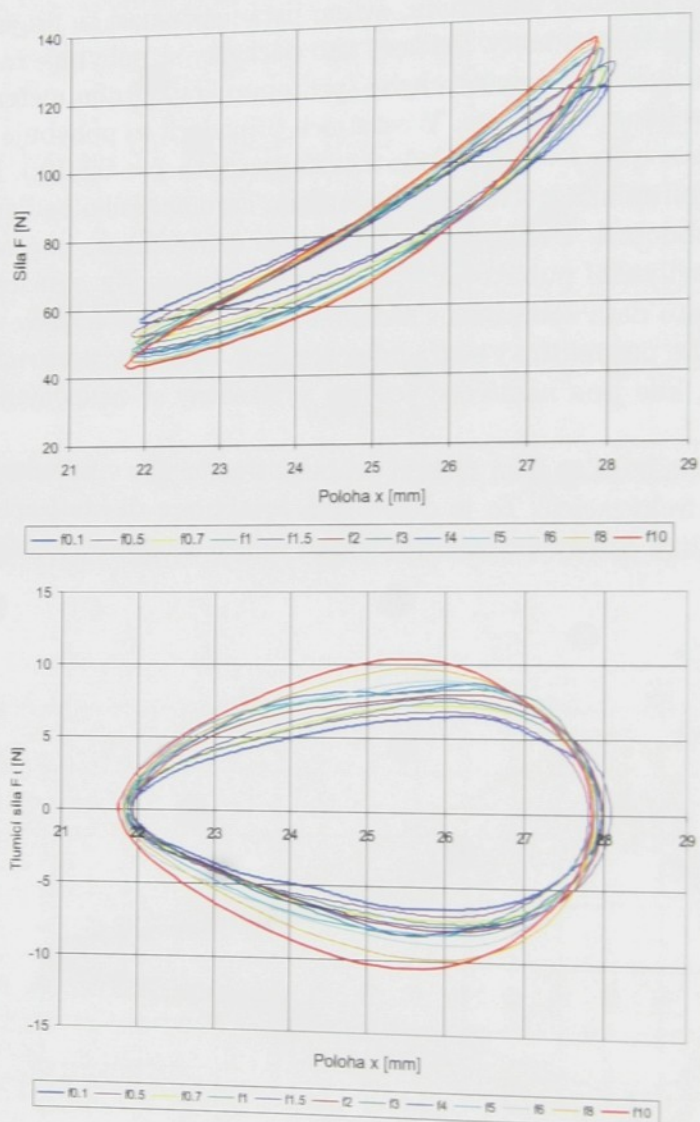


Obrázek 1.33: Tlumičí síla F_t , $A=7\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=30\text{mm}$

Poznámka

Na obr. 1.34 jsou znázorněny průběhy síly celkové F (nahore) a síly tlumicí F_t (dole) tak, jak byly skutečně naměřeny. V tomto případě pro amplitudu 3 mm a střední hodnotu 25 mm. Na grafech lze pozorovat, že zpětnovazební řídicí systém dokáže v širokém rozsahu frekvencí dodržet na hydraulickém budicím válci žádanou amplitudu, ovšem jistá nepřesnost se projevuje v nedodržování střední hodnoty. Velikost této odchylky se pohybuje řádově v desetínách mm, přičemž největší chyba (při tomto konkrétním měření) má pro $f = 10$ Hz velikost 0.202 mm. V ostatních případech se pohybuje v rozmezí od 0.0145 mm (pro $f = 1.5$ Hz) do 0.1825 mm (pro $f = 0.5$ Hz). Při měření s jinými amplitudami a středními hodnotami harmonického budicího signálu je situace obdobná. Podle autora této práce není velikost popsaných chyb z hlediska ovlivnění publikovaných závěrů významná. Na obrázcích 1.12 až 1.33, byla tato data zobrazena s žádanou střední hodnotou, tedy vystředěna horizontálním posunutím v souřadném systému. Je možné porovnat obr. 1.20 a obr. 1.21, kde jsou naměřené veličiny vystředěny se zmíněným obrázkem 1.34.

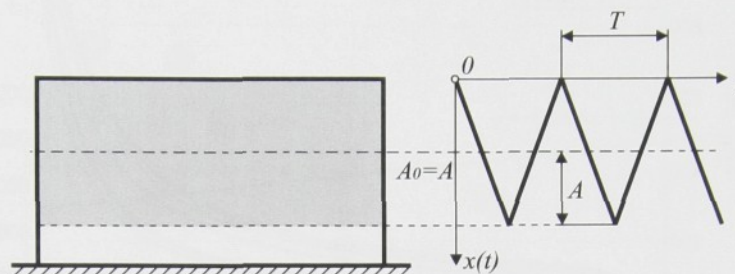
Další poznámka se týká zvlnění průběhů tlumicí síly v závislosti na dráze při nižších frekvencích. To je důsledkem kombinace diskretizačního šumu, nastavení filtrů pro vyhlazení naměřených veličin a velikosti vzorkovací frekvence.



Obrázek 1.34: Skutečně naměřená data. Nahoře: Celková síla F . Dole: Tlumi-
cí síla F_t , $A=3\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=25\text{mm}$

v [mm/s]	1.56	29.64	70.2	149.76	199.68
f [Hz]	0.01	0.19	0.45	0.96	1.28

Tabulka 1.6: Rychlost, resp. frekvence budicího trojúhelníkového signálu (1.8)



Obrázek 1.35: Zatěžování vzorku trojúhelníkovým signálem (1.8)

1.3.2 Zatěžování trojúhelníkovým budicím signálem

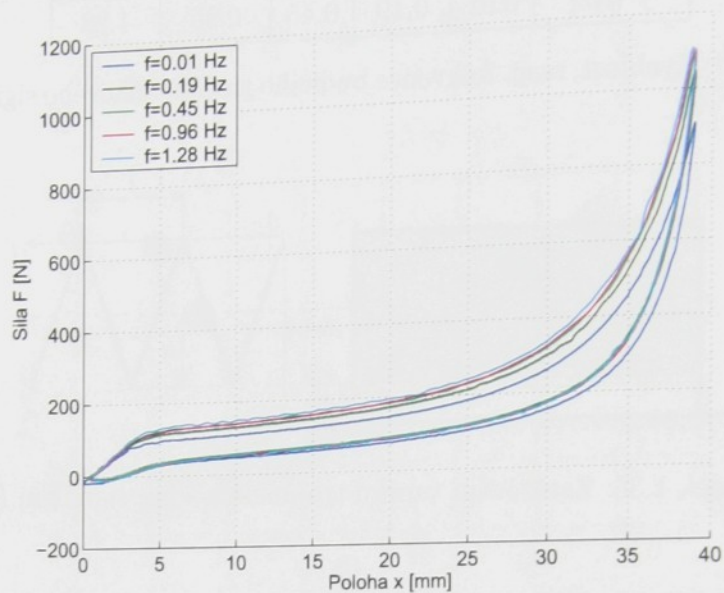
Vzorek byl při tomto experimentu zatěžován trojúhelníkovým signálem podle rovnice (1.8), kde střední hodnota kmitu A_0 je rovna amplitudě A (viz obr. 1.35). Při amplitudě 19.5 mm je tedy vzorek maximálně stlačen o $2A$, tedy o 39 mm. Rozsah rychlostí, resp. frekvencí je uveden v tab. 1.6. Pohybuje se v podstatně nižších hodnotách (přibližně desetkrát) než u signálu harmonického v kap. 1.3.1. Důvodem toho je, že u takto velkých stlačení je vyvozována mnohem větší síla (až 1100 N) a v kombinaci s požadavkem na trojúhelníkový průběh polohy vznikají velké nároky na dynamické chování zatěžovacího ústrojí. Volba neceločíslných hodnot rychlosti v je dána možnostmi řídicího programu.

$$x(t) = \begin{cases} \frac{4A}{T}(t - nT) & \text{pro } t \in \langle nT; nT + T/2 \rangle \\ -\frac{4A}{T}(t - (n+1)T) & \text{pro } t \in \langle nT + T/2; (n+1)T \rangle \end{cases}, \quad (1.8)$$

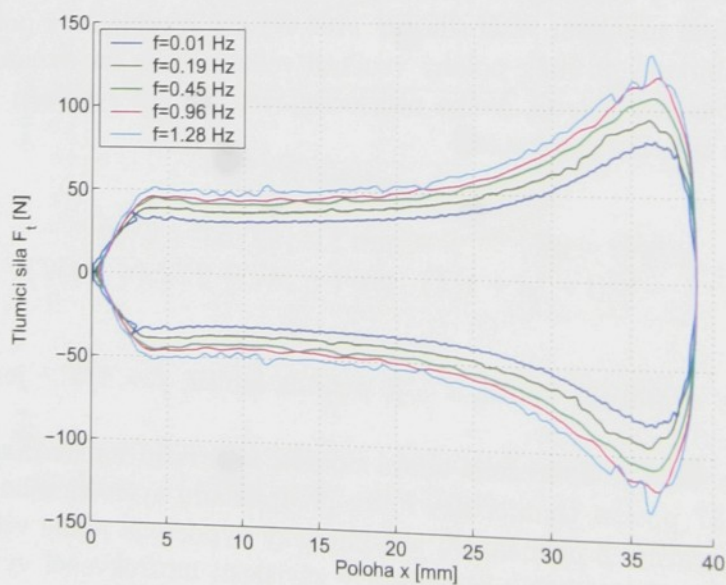
kde:

A – je amplituda kmitu, T – je perioda kmitu, $f = 1/T$ – je frekvence kmitu, $n = 0, 1, 2, \dots, \infty$.

Na obr. 1.36 je zobrazena silová odezva materiálu na uvedené buzení. Na obr. 1.37 potom tlumicí síla F_t za předpokladu symetrického rozložení kolem síly vratné. Z průběhu F_t je numericky vypočtena podle vztahu (1.7) práce tlumicí síly za jednu periodu a v závislosti na frekvenci vynesena do grafu 1.38 a uvedena v tab 1.7. Projevují se zde stejné tendence jako při buzení harmonickým signálem, tedy ukazuje se, že tuto závislost lze považovat za lineární. Stejně tak při pohledu na graf tlumicí síly F_t lze předpokládat nezávislost jejího extrému na frekvenci.



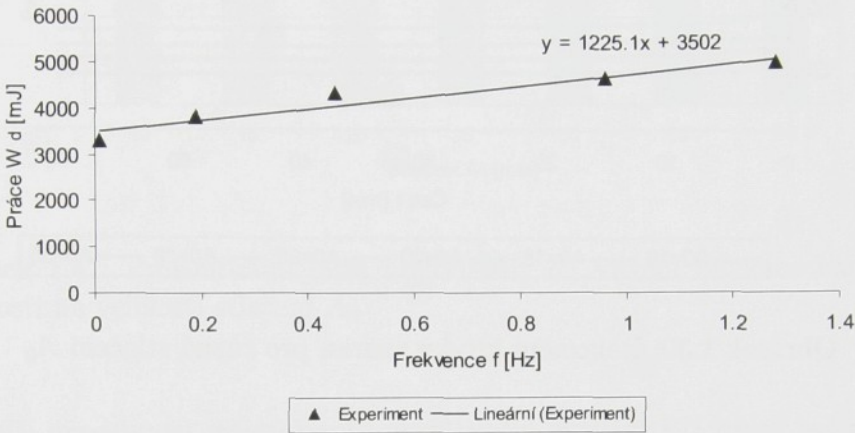
Obrázek 1.36: Celková síla F , $A=19.5\text{mm}$, $f=(0.01\div 1.28)\text{Hz}$, $A_0=19.5\text{mm}$



Obrázek 1.37: Tlumičí síla F_t , $A=19.5\text{mm}$, $f=(0.01\div 1.28)\text{Hz}$, $A_0=19.5\text{mm}$

f [Hz]	0.01	0.19	0.45	0.96	1.28
W_d [mJ]	3279	3804.3	4337.8	4637.4	4992.2

Tabulka 1.7: Práce tlumicí síly W_d v závislosti na frekvenci budicího signálu f ; $A=19.5\text{mm}$, $f=(0.01\div 1.28)\text{Hz}$, $A_0=19.5\text{mm}$



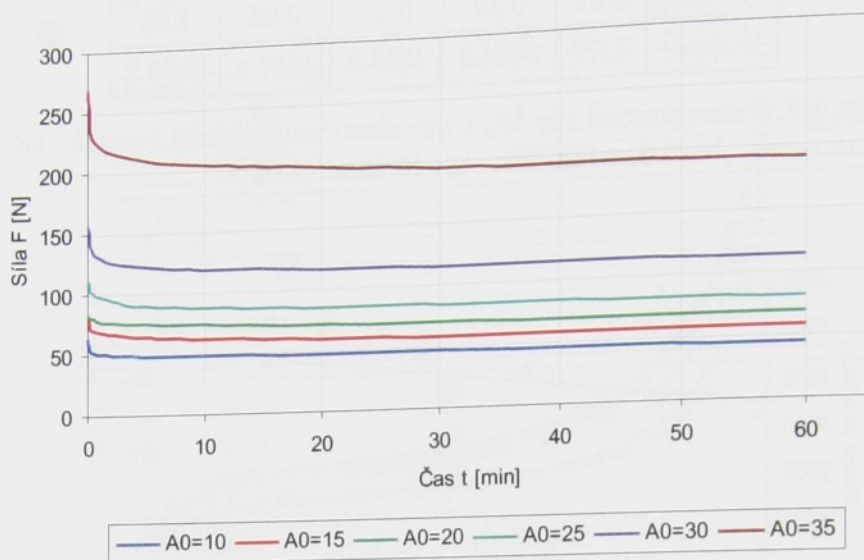
Obrázek 1.38: Práce tlumicí síly W_d v závislosti na frekvenci budicího signálu f ; $A=19.5\text{mm}$, $f=(0.01\div 1.28)\text{Hz}$, $A_0=19.5\text{mm}$

1.3.3 Relaxace napětí

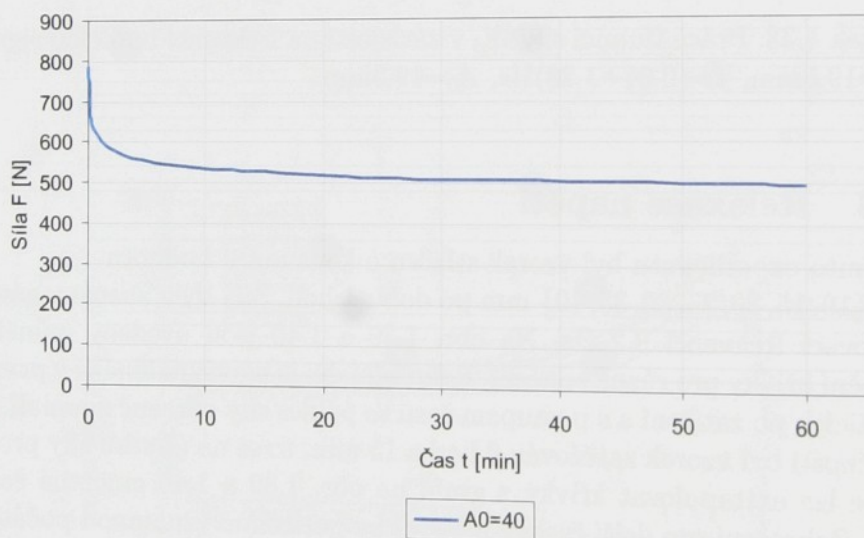
Při tomto experimentu byl vzorek stlačen o konstantní hodnotu $A_0 \in \{10, 15, 20, 25, 30, 35, 40\}$ mm po dobu 1 hod. Síla byla zaznamenávána vzorkovací frekvencí 0.2 Hz. Na obr. 1.39 a 1.40 jsou uvedeny naměřené relaxační křivky pro různá stlačení. Relaxační děj je nejvýznamnější v prvních okamžicích po zatížení a s postupem času se pokles síly výrazně zpomalí. (Ve skutečnosti byl vzorek zatěžován 6 hod a 15 min, to se na úbytku síly projeví tak, že lze extrapolovat křivky z grafů na obr. 1.39 a 1.40 omezené časem 1 hod. Zobrazení pro delší časový interval by potlačilo významnou počáteční změnu síly.)

Z uvedených grafů je patrné, že pokles síly způsobený relaxací napětí ve vzorku je značný. Pro jeho kvantifikaci byla zvolena procentuální míra δ_R vyjádřená rozdílem počáteční hodnoty síly $F_S = F(t = 0)$ a koncové hodnoty $F_K = F(t = 1 \text{ hod})$ (po relaxaci) vztaheným k počáteční síle, jak uvádí vzorec (1.9). Hodnoty δ_R jsou uspořádány v tab. 1.8 a na obr. 1.41 a dosahují velikosti mezi 27 a 37 %. Z tohoto intervalu vybočuje hodnota pro $A_0 = 20$ mm, což je zřejmě způsobeno chybou měření.

$$\delta_R = \frac{F_S - F_K}{F_S} \cdot 100\%. \tag{1.9}$$



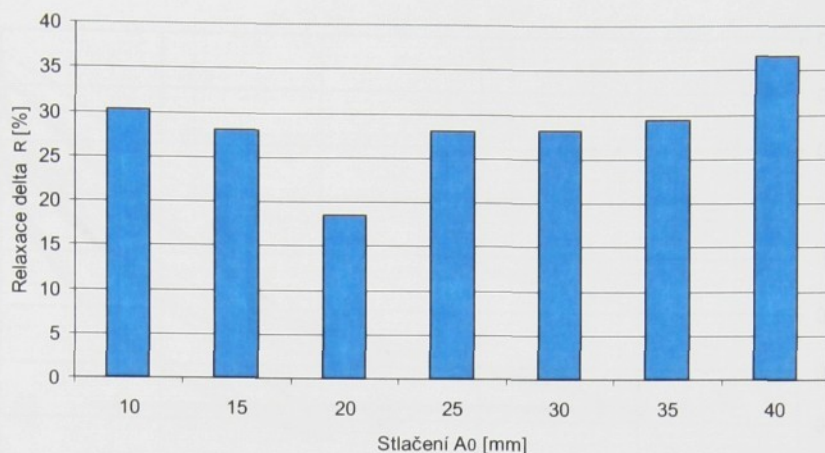
Obrázek 1.39: Relaxační křivky vzorku pro různá stlačení A_0



Obrázek 1.40: Relaxační křivka vzorku pro stlačení $A_0 = 40$ mm

A_0 [mm]	10	15	20	25	30	35	40
δ_R [%]	30.3	27.9	18.4	28.1	28.2	29.4	36.5

Tabulka 1.8: Procentuální míra úbytku síly δ_R vlivem relaxace napětí v závislosti na velikosti stlačení A_0



Obrázek 1.41: Procentuální míra úbytku síly δ_R vlivem relaxace napětí v závislosti na velikosti stlačení A_0

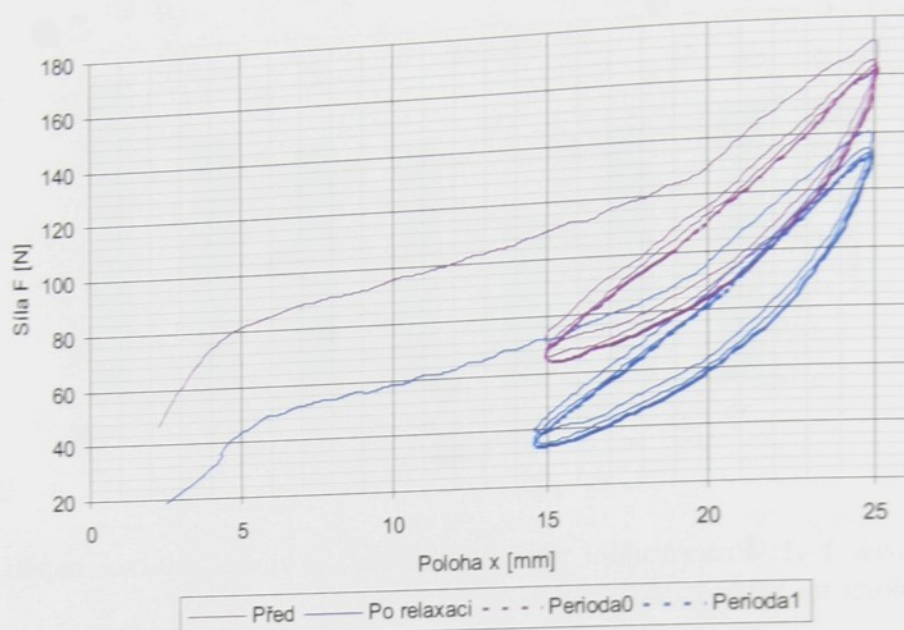
Další experiment, který popisuje relaxační chování PU pěny, byl proveden stlačením vzorku o hodnotu 20 mm po dobu 6 hod a 15 min. Před touto relaxací a po ní byl proměřen harmonickým signálem polohy s náběhem podle (1.1). Porovnání obou průběhů je na obr. 1.42. Je vidět že relaxace nemá vliv na charakter silové odezvy, pouze se celá křivka posune dolů o téměř konstantní hodnotu pohybující se kolem 30 N.

K porovnání práce tlumicí síly během jedné periody před a po relaxaci byly vybrány odpovídající si hysterezní smyčky označené na obr. 1.42 *Perioda0* a *Perioda1*. Práce tlumicí síly před relaxací je 189.7 mJ a po relaxaci 170.1 mJ. Jedná se tedy o úbytek přibližně 10 %. Celková síla F se ve zkoumaných periodách snížila vzhledem k původním hodnotám o $18 \div 48$ %.

1.3.4 Netypické průvodní jevy deformace

Polyuretanové pěny patří mezi materiály, které mají Poissonovo číslo blízké nule. To znamená, že při stlačování vzorku, jak je naznačeno na obr. 1.4, ve směru souřadnice x nedochází k deformaci v příčném směru. To je zřejmě dáno tím, že v případě pěny s otevřenými póry je v objemu materiálu dostatek vnitřního prostoru. U tohoto materiálu tedy neplatí zákon zachování objemu při deformaci.

Dalším pozorovatelným jevem je nehomogenní rozložení poměrné deformace ve směru stlačování. Na stěnu nedeformovaného vzorku vysokého 50 mm byla nakreslena úhlopříčka (na obr. 1.43 čerchovaně). Po stlačení vzorku o polovinu výšky, tedy na 25 mm, by si při rovnoměrně rozložené deformaci úhlopříčka zachovala přímkový tvar (čárkovaně) a poměrná deformace by činila 50 %. Skutečnost je taková, že úhlopříčka přejde ve spojitou křivku



Obrázek 1.42: Porovnání dvou průběhů celkové síly F při zatěžování harmonickým signálem polohy ($f=3\text{Hz}$, $A=5\text{mm}$, $A_0=20\text{mm}$) před relaxací a potom (6hod a 15min) - statická relaxace

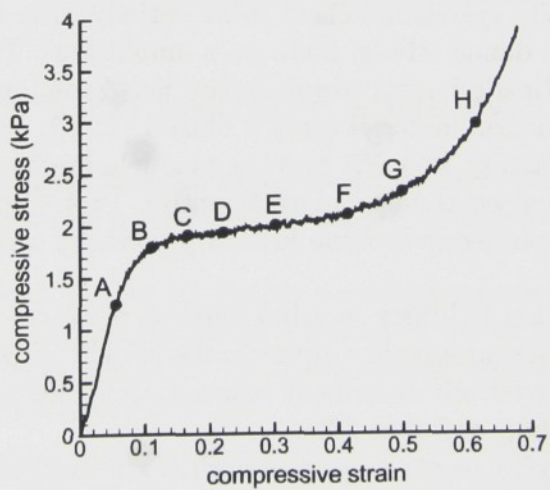
(plnou čarou). V tomto případě se materiál více pěchuje ve střední oblasti než na okrajích. Velmi podrobná měření provedla v tomto směru dvojice autorů Wang, Cuitino prezentovaná v článku [20]. Užitím korelace rastrových obrázků povrchu nedeformovaného a deformovaného vzorku získali polygony četností poměrných deformací při konkrétních velikostech stlačení vzorku. Vzorek pěnového materiálu s nízkou hustotou (21 kg/m^3) byl stlačován v jedné ose. Napěťová odezva je na obr. 1.44. Zastoupeny jsou zde všechny oblasti: počáteční (téměř) lineární, následovaná oblastí s malým, opět téměř lineárním nárůstem napětí (*plateau*) a navazuje strmá část napěťové odezvy. Místa, ve kterých byla provedena analýza rozložení poměrných deformací, jsou označena písmeny A až H. Odpovídajícími písmeny jsou značeny příslušné polygony četností na obr. 1.45. Z uvedeného vyplývá, že je velký rozdíl mezi lokální a průměrnou relativní deformací vzorku. Pro identický experiment s PU pěnou o hustotě (72 kg/m^3) byla tato disproporce menší.

1.4 Závěr kapitoly

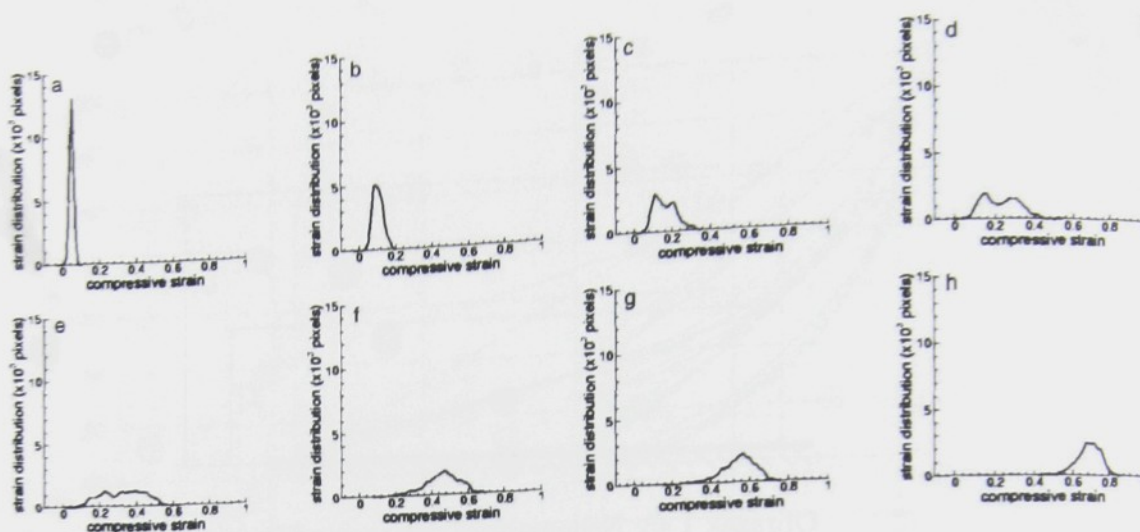
V této kapitole byly konstatovány některé mechanické vlastnosti vzorku PU pěny. Kromě obecně známých, jako jsou charakteristické fáze silové odezvy při deformaci, Poissonovo číslo blízké 0 nebo nehomogenní poměrná deformace



Obrázek 1.43: Nehomogenní deformace PU vzorku



Obrázek 1.44: Závislost napětí–poměrná deformace polyuretanové pěny s nízkou hustotou (21 kg/m^3) a otevřenými póry (převzato z [20])



Obrázek 1.45: Polygony četností výskytu poměrné deformace pěny s nízkou hustotou (21 kg/m^3) a otevřenými póry (převzato z [20])

materiálu, zde byly uvedeny důležité poznatky o charakteru tlumicí síly.

Polyuretanová pěna vykazuje při deformaci x velmi nelineární silovou odezvu F . V kontrastu s tímto bylo ukázáno, že poloha extrému tlumicí síly je anebo ji lze považovat za nezávislou na frekvenci harmonického budicího signálu pro danou střední hodnotu a amplitudu. Druhým důležitým závěrem je, že práce tlumicí síly vykonaná během jedné periody roste s budicí frekvencí lineárně (opět pro danou střední hodnotu a amplitudu). Tytéž vlastnosti se projevily i v případě buzení trojúhelníkového. Z toho je zřejmé, že tento obecně vzato nelineární materiál (tedy v oblasti (x, F)) vykazuje silné lineární chování v oblasti (f, W_d) . Při vytváření modelu mechanických vlastností PU pěny činí simulace tlumení největší potíže. Proto jsou tyto poznatky užitečnými a zároveň jednoduchými kritérii pro tvorbu a verifikaci takového modelu.

Dalším vlastností PU pěny je velmi výrazné relaxační chování. Největší změny v měřené síle nastávají v prvních okamžicích zatížení. Zajímavé je, že procentuální úbytek síly způsobený relaxací není příliš závislý na velikosti deformace a pohybuje se kolem 30%.

Hysterezní smyčky se při rostoucí frekvenci kinematického buzení napřimují.

Kapitola 2

Pokus o změření vlivu vzduchu na tlumení

Na počátku prací popsaných v této kapitole stál logický předpoklad, že tlumicí vlastnosti polyuretanového materiálu jsou ovlivňovány, kromě tlumení materiálového, také účinkem proudícího vzduchu, jenž je z pěny při stlačování vyfukován a při odlehčování zpět nasáván. Zjištění, v jakém poměru jsou tyto dvě složky v celkové tlumicí síle zastoupeny, by mohlo být využito při tvorbě simulačního modelu. Proto byl ve zprávě [2] uveden záměr měřit silovou odezvu polyuretanového vzorku (obr. 1.1) ve vakuu. V následujících podkapitolách je popsáno užití měřicího zařízení, dosažené výsledky a důvody, které vedou k tomu, že tento přístup se nachází na samé hranici použitelnosti.

2.1 Konstrukce vakuové komory

K vykonání zmíněných zkoušek byla zkonstruována vakuová komora (viz obr. 2.1, výkres sestavení a kusovník je v příloze A). Skládá se z rámu, pláště a víka.

Plášť tvoří skleněný válec PZ DN300 o světlém průměru 300 mm a výšce 500 mm. Je z boritokřemičitého skla a zakoupen byl ve sklárnách Kavalier v Sázavě i s vhodným těsněním. Jde o standardně vyráběný díl pro stavbu průmyslových aparaturních soustav.

Víko komory musí umožňovat průchod měřících vodičů, k tomuto účelu slouží průchodové víko na obr. 2.2. Je zde 9 pinový konektor CANNON pro zapojení snímače síly a 4 další volitelné průchody. Nevyužité jsou utěsněny zátkou. V případě potřeby jím může procházet např. vodič termočlánku pro měření změn teplot v průběhu zatěžování PU vzorku; provedení je na obr. 2.3. Vodič je v průchodce zalepen epoxidovou pryskyřicí. Průchodka je na obr. 2.4 vlevo a zátka na témže obrázku vpravo.

Tuhý rám tvaru U je vyroben převážně z oceli 11 500. Při sejmutí víka a pláště může samostatně sloužit i pro zkoušky v atmosféře (viz obr. 2.6).

Použitá vývěva je z produkce polské firmy Tepro. Její motor má výkon

Název	A_0 [mm]	A [mm]	f [Hz]
sinus1	20	10	1
sinus2	20	5	3

Tabulka 2.1: Parametry harmonické budicí funkce (1.2)

0.55kW. Při prvních zkouškách bylo dosaženo 95 % vakua. Schéma zapojení vakuové komory je na obr. 2.5. Při vysávání vzduchu vývěvou je ventil 4 otevřen a ventil 3 uzavřen. Zpět se vzduch do komory vpouští ventilem 3 při uzavřeném ventilu 4. Komoru nelze napouštět vzduchem přes ventil 4 a vývěvu, neboť docházelo k vysávání oleje z vývěvy.

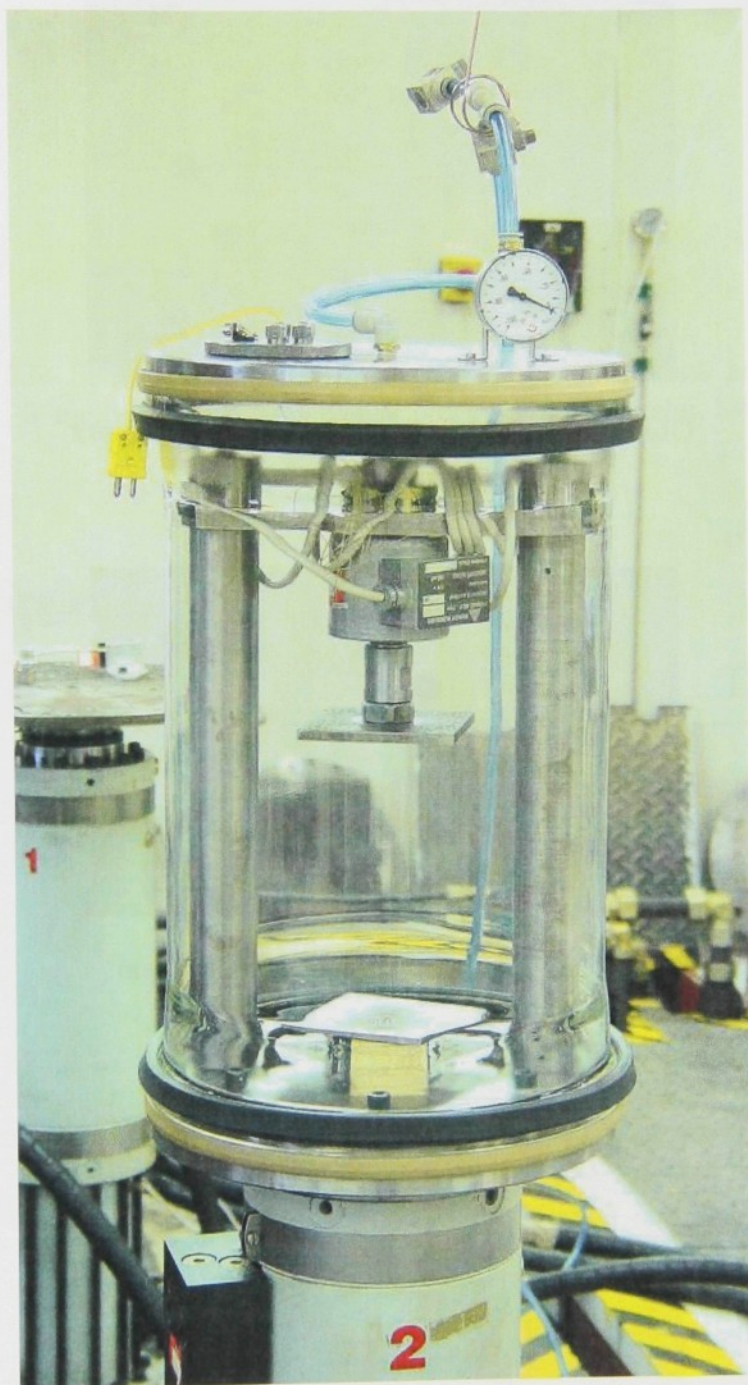
2.2 Zkušební s měřením

Pro první měření ve vakuové komoře bylo zvoleno zatěžování vzorku harmonickým signálem dle vztahu (1.2). Pro dva případy parametrů jsou označeny sinus1 a sinus2 (viz tab. 2.1).

2.2.1 Měření snímačem Rukov

Nejprve byl pro měření zvolen běžně používaný snímač síly Rukov (typ HP21, jmenovité zatížení 2.2 kN, napájení 20 V, jmenovitý signál 150 mA, výrobní číslo 04384). Na obr. 2.1 je zabudován v rámu vakuové komory. Směrnice snímače kalibrovaného v atmosférickém tlaku je 510 N/V. Na obr. 2.7 a obr. 2.8 je porovnání průběhů naměřených tímto snímačem jak v atmosféře (označeno Rukov.a.a, fialově), tak ve vakuu (označeno Rukov.a.v, tmavě modře); snímač byl kalibrován v atmosféře. Z odezvy je patrné, že zde nedochází k naplnění předpokladu, že vzhledem k výsledkům získaným v atmosféře, by ve vakuu měla být při stlačování síla menší a při odlehčování větší. V tomto případě se zdá, jako by pěna měla ve vakuu tužší charakteristiku. Po konzultaci s výrobcem snímače se ukázalo, že jeho deformační člen s tenzometry je umístěn ve vduhotěsném pouzdru z důvodu větší odolnosti proti vlhkému prostředí. Potom zřejmě, je-li snímač použit ve vakuu, dochází k deformaci vnitřního pouzdra a to může ovlivňovat charakteristiku snímače. Tato skutečnost vedla k myšlence zkalibrovat snímač Rukov ve vakuu. Konstanta snímače potom byla 491.69 N/V (97 % vakuum, termočlánekový snímač uvnitř komory ukazoval 24 st. C).

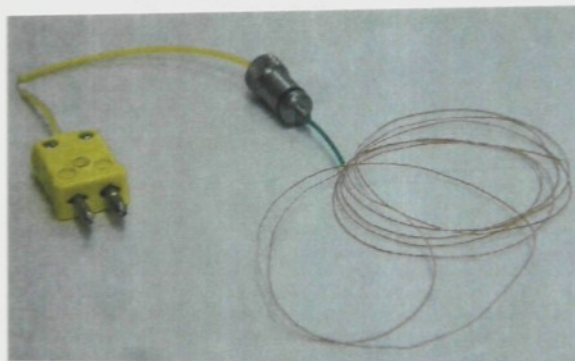
Výsledky měření s takto zkalibrovaným snímačem jsou též na obr. 2.7 a obr. 2.8 (označeno Rukov.v.v, oranžově) a opět plně neodpovídají výše uvedenému předpokladu o chování pěny ve vakuu. V případě signálu sinus2 při stlačování ve vyšších polohách je dokonce síla naměřená ve vakuu větší než v atmosféře. Proto bylo přikročeno k použití snímače, jehož konstrukce



Obrázek 2.1: Vakuová komora v hydrodynamické zkušebně TUL v Doubí



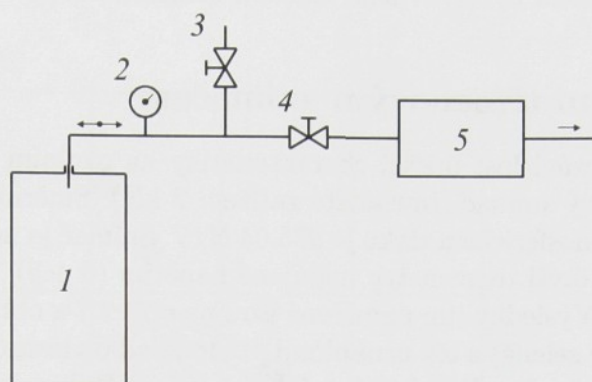
Obrázek 2.2: Průchodové víko vakuové komory



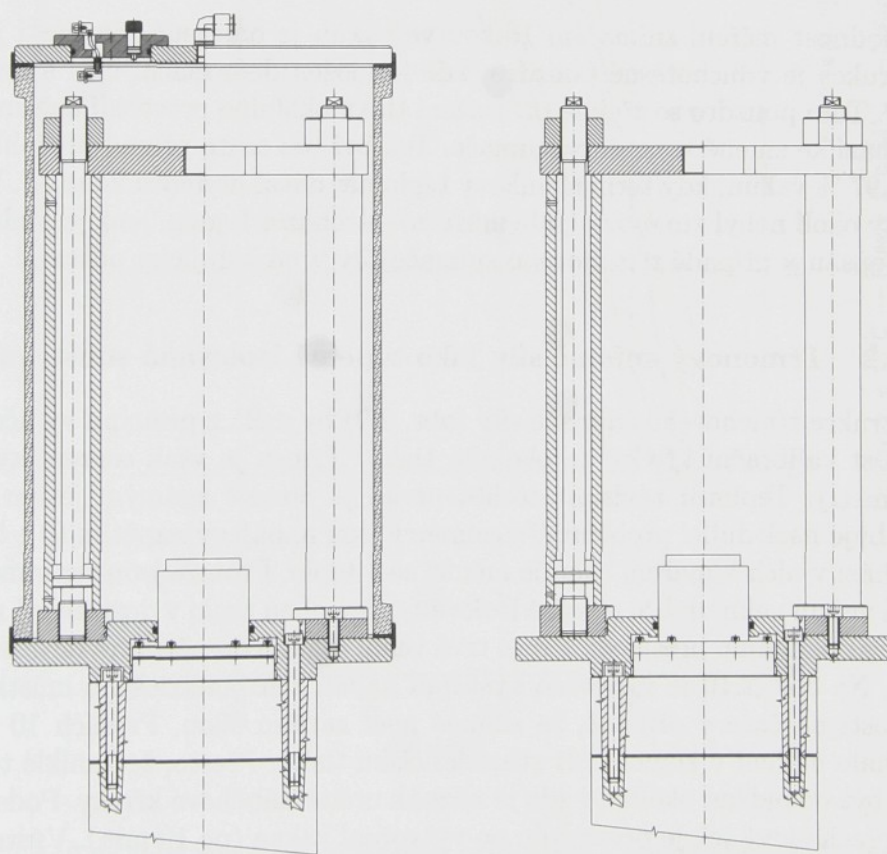
Obrázek 2.3: Průchodka s termočlánkem



Obrázek 2.4: vlevo: Průchodka, vpravo: zátka



Obrázek 2.5: Schéma zapojení vakuové komory: 1-vakuová komora, 2-vakuoměr, 3-napouštěcí ventil, 4-ventil pro vysávání vzduchu, 5-vývěva



Obrázek 2.6: Vlevo: částečný řez vakuovou komorou, vpravo: částečný řez nosným rámem vakuové komory

by z principu neměla být ovlivněna změnou atmosférického tlaku.

2.2.2 Měření třmenovým snímačem

Požadavek na nezávislost měřicí charakteristiky na okolním tlaku by mohl splňovat třmenový snímač (jmenovité zatížení 2 kN). Směrnice snímače kalibrovaného v atmosférickém tlaku je 985.04 N/V. Snímač je na obr. 2.9. Byly na něj umístěny čtyři tenzometry napájené napětím (0 ÷ 5) V. Nebyl kalibrován ve vakuu. Výsledky jím naměřené jsou na obr. 2.7 a obr. 2.8 (označeno třmen_a_v, světle zeleně) a též nenaplnují předpoklad o vlastnostech PU pěny ve vakuu. Liší se i od průběhů získaných snímačem Rukov kalibrovaným ve vakuu.

2.2.3 Poznatky a východiska

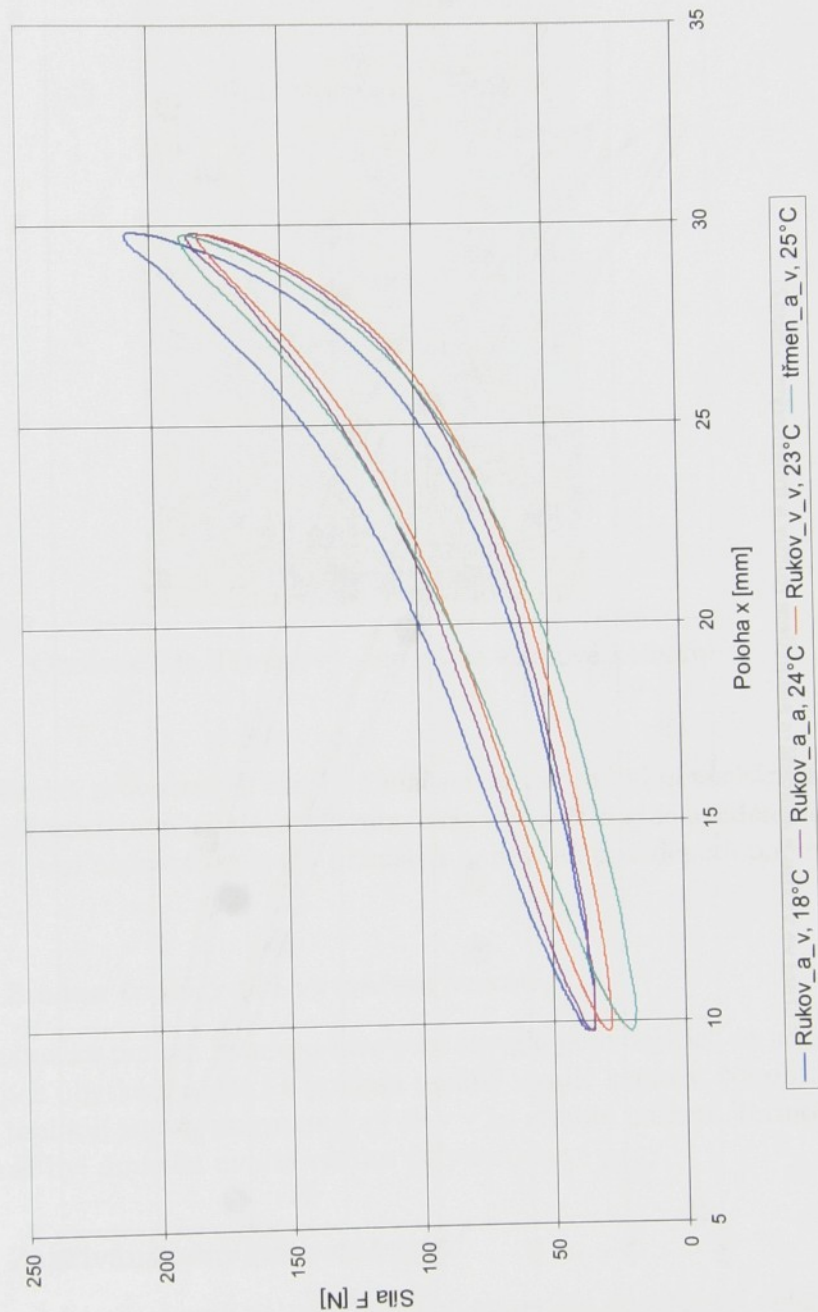
2.2.3.1 Závislost snímače síly Rukov na okolním tlaku

Věrohodnost měření snímačem Rukov ve vakuu je omezená. Součástí jeho konstrukce je vduchotěsné pouzdro, kde je uložen deformační člen s tenzometry. Toto pouzdro se zřejmě při snížení tlaku okolního prostředí deformuje a dochází ke změně konstanty snímače. Ten byl pro tento případ překalibrován v 97 % vakuu, kdy termočlánekový teploměr dával hodnotu 24 st. C. Vliv teploty okolí nebyl zmapován, ale může zde docházet k jevu, jenž je podrobněji popsán v případě třmenového snímače síly v následujícím odstavci.

2.2.3.2 Třmenový snímač síly jako tepelně izolovaná soustava

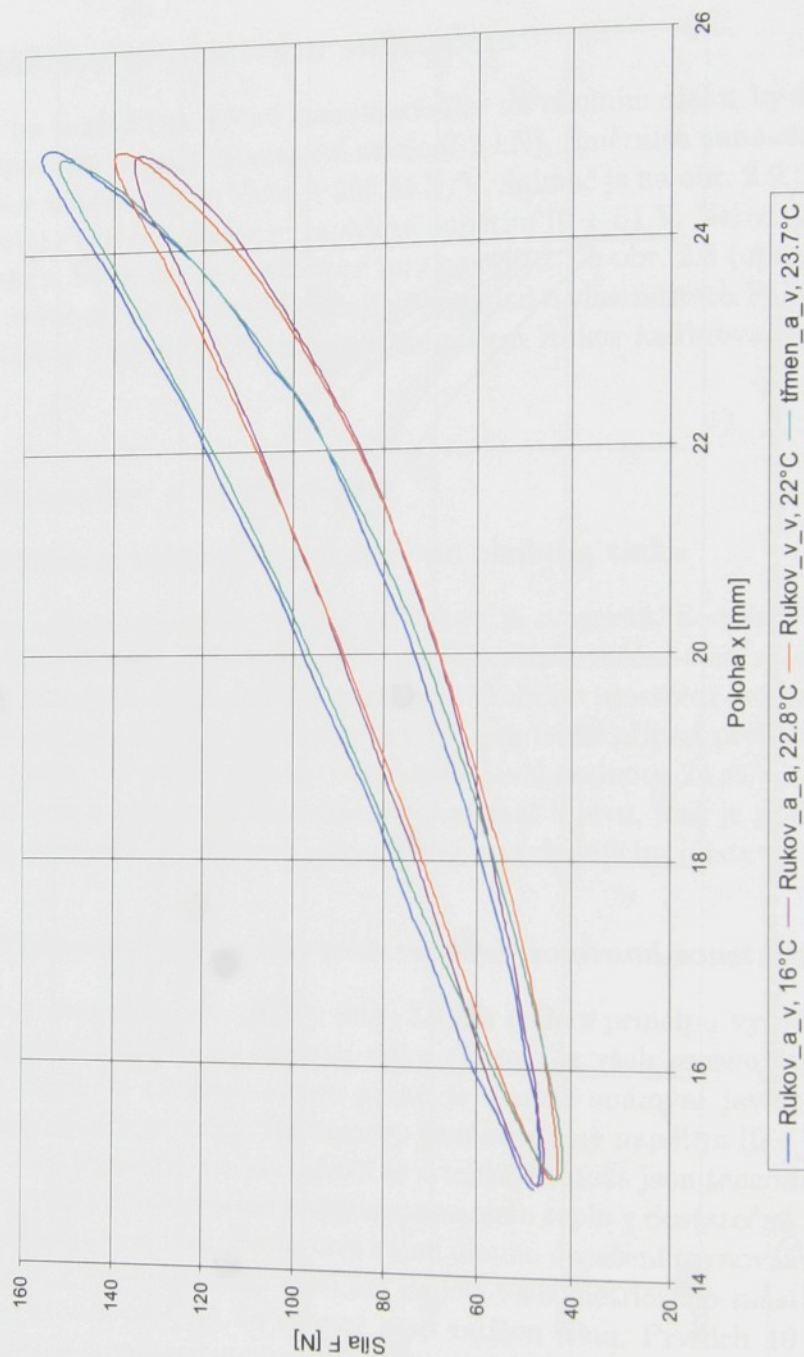
Konstrukce třmenového snímače síly (obr. 2.9) by měla z principu vylučovat závislost kalibrační křivky na okolním tlaku. Třmen je však osazen čtyřmi tenzometry. Teplotní závislost těchto prvků je obecně známým jevem. To způsobuje následující problém: Tenzometry jsou napájeny napětím (0 ÷ 5) V a dochází v nich k maření energie měnící se v teplo. Protože jsou tenzometry v 97% vakuu velmi dobře tepelně izolovány, nemohou teplo v dostatečné míře předávat okolnímu prostředí. Proto trvá velmi dlouho dosažení rovnovážného stavu. Na obr. 2.10 je vyneseno výstupní napětí tenzometrického můstku v závislosti na čase v případě, že snímač není zatížen silou. Prvních 10 min probíhalo měření v komoře při atmosférickém tlaku. Přesto, že vzniklé teplo může být odváděno okolím, i zde je náznak určité náběhové křivky. Podstatnější přechodový jev je pozorován po vytvoření vakua (po 10 min). Výstupní napětí se limitně blíží hodnotě kolem -0.13 V. Po přenásobení konstantou snímače kalibrovaného v atmosféře to znamená odchylku od původní nulové hodnoty o $-0.13 \text{ V} \cdot (-985.04 \text{ N/V}) \doteq 128 \text{ N}$; (konstanta snímače je ve skutečnosti, vzhledem k orientaci osy hydraulického válce, záporná). Ani po 50 min po vytvoření vakua není přechodový děj ukončen.

Měření ve vakuu a atmosféře snímačem Rukov a třmenovým (sinus1)



Obrázek 2.7: Naměřená silová odezva při buzení signálem sinus1 (v legendě je uvedena teplota naměřená uvnitř vzorku při experimentu)

Měření ve vakuu a atmosféře snímačem Rukov a třmenovým (sinus2)



Obrázek 2.8: Naměřená silová odezva při buzení signálem sinus2 (v legendě je uvedena teplota naměřená uvnitř vzorku při experimentu)



Obrázek 2.9: Třmenový snímač ve vakuové komoře

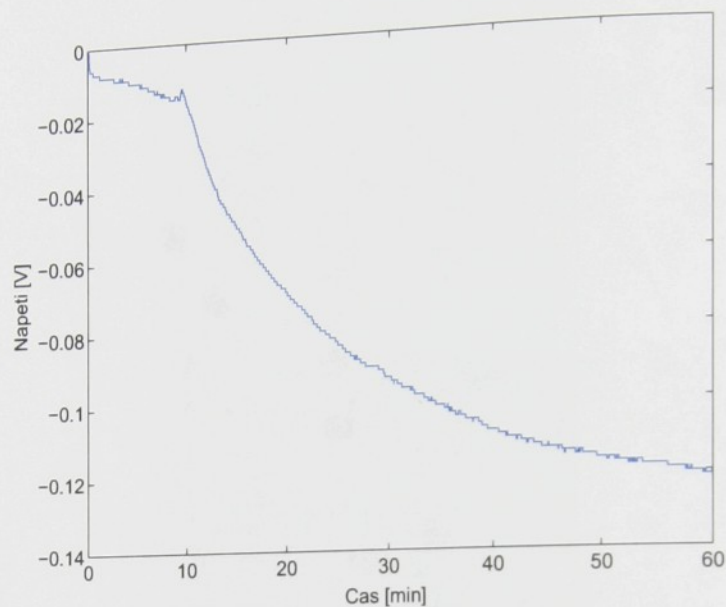
Při měřeních provedených tímto snímačem ve vakuu byl ponechán čas na ustálení teplotních poměrů pouze 45 min, což se ve světle výše uvedeného poznatku jeví jako nedostatečné, ale přírůstek napětí již pravděpodobně nebyl dramatický.

2.2.3.3 Změna teploty při vytváření vakua

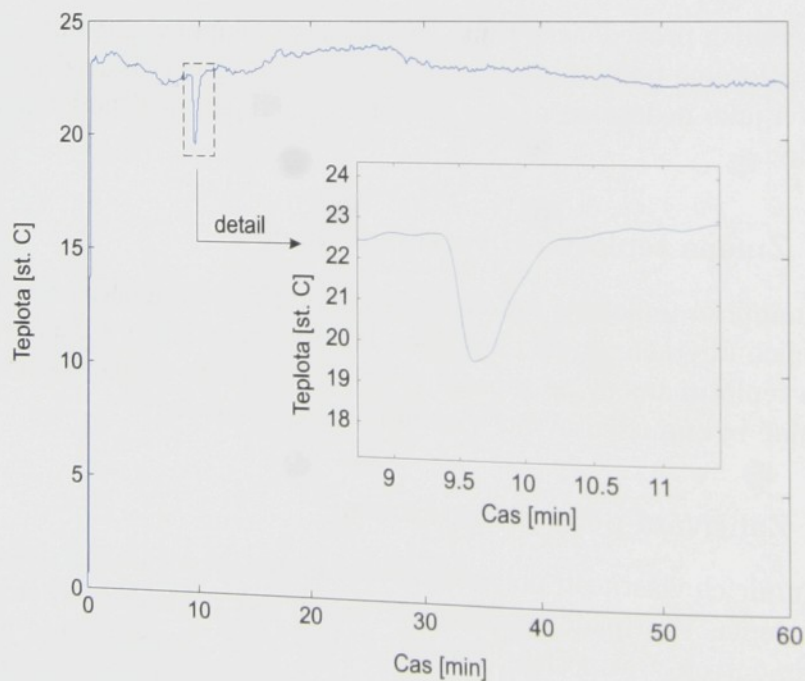
Termodynamická teplota je mírou kinetické energie pohybujících se molekul. Proto s jejich úbytkem dojde i k poklesu teploty uvnitř komory. Na obr. 2.11 je průběh teplotní změny po zapnutí vývěvy v 10 minutě měření. Termočlánekový snímač byl umístěn uvnitř vzorku polyuretanové pěny.

2.2.3.4 Zahřívání pěny při zatěžování

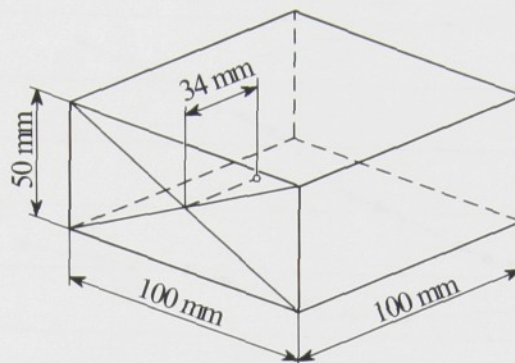
Vlivem tlumících vlastností polyuretanového materiálu dochází při deformaci ke vzniku tepla. V případě zatěžování ve vakuu se v pěně hromadí více, než při experimentech v atmosféře. Na obr. 2.13 je vidět nárůst teploty během měření pro obě varianty zatěžovacího signálu. Měl by odpovídat práci tlumících sil. Vzorek byl v průběhu vynesných 20 minut stlačován signály sinus1 a sinus2 se změnou frekvence $f \in \{0.1; 0.5; 0.7; 1; 1.5; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10\}$ Hz. Určitý čas si vyžádalo zadávání těchto parametrů a také s tím spojené změny v záznamovém programu (vzorkovací frekvence a délka záznamu). Odhadnutý



Obrázek 2.10: Výstupní napětí z tenzometrického můstku třmenového snímače



Obrázek 2.11: Průběh teploty v závislosti na čase, detail: reakce teploty na vytvoření vakua



Obrázek 2.12: Umístění termočlásku uvnitř vzorku PU pěny

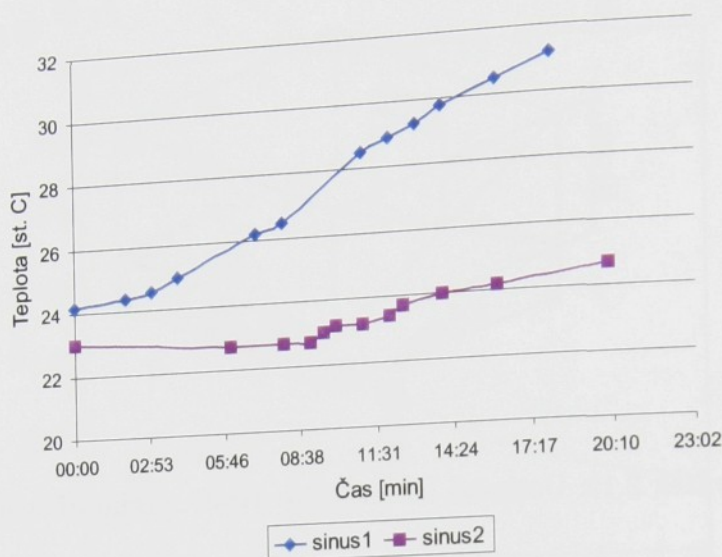
efektivní čas zatěžování byl tedy asi poloviční. Nárůst teploty v případě zatěžování signálem sinus1 je tedy téměř o 7 st. C během 10 minut a přibližně o 1.7 st. C pro signál sinus2.

Zvláště v první variantě je zvýšení teploty značné. To znemožňuje realizaci dlouhodobých měření, protože teplota jistě ovlivňuje mechanické vlastnosti PU pěny. Naproti tomu během několika málo cyklů se teplota téměř nezvyšuje, což by bylo vhodné pro měření krátkodobá. Mezi jednotlivá krátkodobá měření by ovšem bylo nutné zařazovat přestávky. Tím roste časová náročnost experimentu.

Protože v počátku zatěžování se u PU vzorku uplatňuje významná relaxace napětí, bylo po startu zatěžování nutné vyčkat (např. 30 s), až se pokles síly zastaví a až poté získávat data. Ve vakuu ovšem během čekání na odeznění relaxačního děje dojde k nárůstu teploty (asi o 0.5 st. C, pro signál sinus2). Relaxaci tedy zřejmě není možné provádět v dynamickém režimu. V úvahu by přicházelo např. stlačení na konstantní polohu a vyčkání po určitý čas. To opět zvyšuje časové nároky na provádění experimentů.

Původním záměrem měření teploty uvnitř vzorku termočláskem, bylo sledování teplotní změny materiálu během jedné periody zatěžovacího signálu (stlačení a odlehčení). Z toho důvodu bylo zvoleno čidlo s velmi malým hrotem a tedy malou teplotní setrvačností. Změna teploty během jednoho cyklu vzhledem k velikosti vlastního šumu měřicího řetězce však není identifikovatelná. Termočlánek byl v PU vzorku vsunut středem stěny do hloubky přibližně 34 mm (viz obr. 2.12).

Průměr vodičů termočlásku je pouze 127 μm . Velikost hrotu čidla je potom asi 0.25 mm. To se ovšem jeví jako nevýhodné, neboť je tento rozměr srovnatelný nebo i menší v porovnání s velikostí pórů v pěně a vzniká tak nejistota o kvalitě styku čidla a pěny.



Obrázek 2.13: Nárůst teploty uvnitř PU vzorku při zatěžování ve vakuu

2.2.3.5 Vysávání pístnice

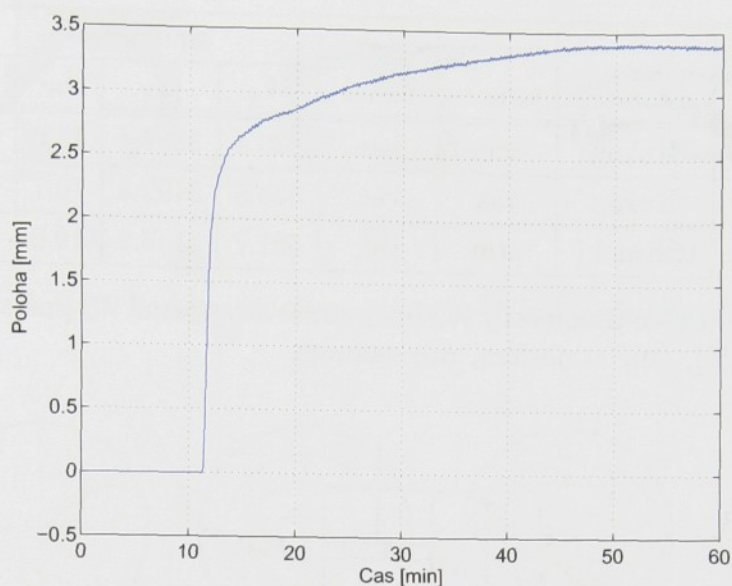
Tlak vzduchového sloupce působí na pístnici hydromotoru o průměru 80 mm silou přibližně 509 N. Vyčerpáním vzduchu z komory dojde tedy ke změně poměrů, na jaké byl seřízen jeho regulační obvod. Z prozatím získaných výsledků není patrné, že by to nějakým způsobem ovlivnilo jeho dynamiku. V opačném případě by bylo možné parametry regulační smyčky seřídit.

Pro ilustraci je zde uveden obr. 2.14. Při vypnutém hydraulickém obvodu byl v 10 minutě odčerpán vzduch z komory. Pístnice poté během následujících 50 min vyjela asi o 3.5 mm.

2.3 Dosažené výsledky

Přesto, že se tento přístup, díky doprovodným problémům ocitl na samé hranici použitelnosti, podařilo se získat výsledky s nezanedbatelnou vypovídající hodnotou. Důležitým parametrem δ_W je poměr práce tlumicí síly W_d vůči práci síly vratné W_V během jedné periody podle rovnice (2.1). Integrál W_V je počítán v mezích x_{min} a x_{max} a teoreticky pro daný typ kinematického buzení platí, že $x_{min} = A_0 - A$ a $x_{max} = A_0 + A$. Prakticky se ovšem integruje v mezích, které jsou dány dolní a horní úvratí budicího válce. Rozdíl mezi teoretickými (žadány) a skutečnými hodnotami je regulační odchylka.

Jestliže ve vakuu vymizí část tlumicí síly způsobené prouděním vzduchu, měl by se tento poměr vzhledem k měření v atmosféře zmenšit. Podmínkou pro správnost výpočtu je, aby kalibrační křivka snímače v atmosféře i ve vakuu byla lineární a také aby přírůstek rušivých vlivů na měřicí soustavu byl během jedné periody kmitu malý. První podmínka v obou prostředích



Obrázek 2.14: Vyjetí pístnice hydromotoru vlivem odčerpání vzduchu při vypnutém hydraulickém obvodu

splněna byla (s možnou různou směrnici) a také splnění druhé podmínky lze podle zkušeností předpokládat.

$$\delta_W = \frac{W_d}{W_V} = \frac{\oint F_t dx}{2 \int_{x_{min}}^{x_{max}} F_V dx}, \quad \text{kde teoreticky } x_{min} = A_0 - A, \quad x_{max} = A_0 + A. \quad (2.1)$$

Poměr δ_W byl vypočítán pro varianty uvedené v tab. 2.2. Při porovnání měření nazvanými *Rukov_a_a* s *Rukov_v_v* prakticky nedochází ke změně poměru práce tlumicí síly vůči práci síly vratné. To by znamenalo, že vliv proudění vzduchu na disipaci energie je zmíněnými prostředky neměřitelný a z našeho hlediska tedy zanedbatelný. Tento závěr je ale nutno učinit s jednou výhradou. Není známo, jaký vliv má vystavení PU materiálu vakuu na jeho vlastnosti. Z možných vlivů je třeba zmínit to, že vyčerpání vzduchu z komory je doprovázeno razantní změnou relativní vlhkosti prostředí směrem k minimálním hodnotám.

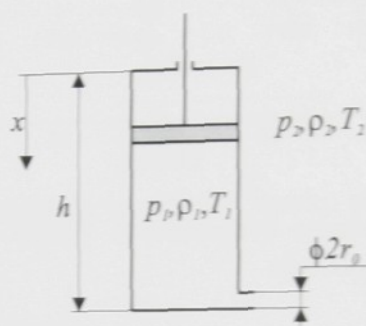
Při vyhodnocení naměřených průběhů *Rukov_a_a* a *třmen_a_v* vyplynulo, že poměr prací W_d a W_V se zvýšil. Vysvětlujeme to malou tuhostí třmenového snímače.

2.4 Možnost simulace vlivu vzduchu

Přestože podle závěru učiněném v předchozím odstavci je možné podíl proudícího vzduchu na tlumení zanedbat, bude dále uveden postup, jakým způ-

Označení měření	Snímač	Prostředí kalibrace	Prostředí měření	sinus1			sinus2		
				W_d	W_V	δ_W	W_d	W_V	δ_W
<i>Rukov.a.a</i>	Rukov	atm	atm	536.4	3367.4	15.9	166.6	1650.1	10.1
<i>Rukov.v.v</i>	Rukov	vak	vak	534.5	3192.4	16.7	169.1	1647.1	10.3
<i>třmen.a.v</i>	třmenový	atm	vak	597.7	3146.2	19.0	193.7	1746.1	11.1

Tabulka 2.2: Práce tlumicí síly W_d [mJ], práce síly vratné W_d [mJ], vzájemný poměr δ_W [%], atm-atmosféra, vak-vakuum



Obrázek 2.15: Schéma pneumatického válce s výfukem do okolí

sobem lze v modelu PU pěny tento jev zohlednit.

Pro stanovení této složky tlumicí síly byl zvolen zjednodušený model na obr. 2.15. Pneumatický válec má ve spodní části výfukový otvor o poloměru r_0 a ploše S_0 souhrnně reprezentující kanálky PU pěny. Složka tlumicí síly způsobená vyfukováním a nasáváním vzduchem F_{tv} je pak dána vztahem

$$F_{tv} = S_1(p_1 - p_{10}), \quad (2.2)$$

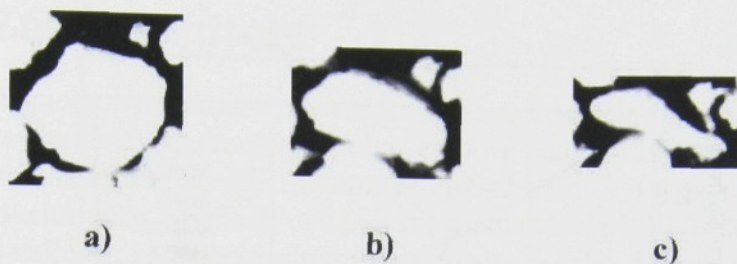
kde p_1 je okamžitý tlak vzduchu ve válci, p_{10} je tlak ve válci na počátku děje (tzn. atmosférický tlak) a S_1 je plocha pístu. Podrobné odvození výpočtu tlaku p_1 je uvedeno v příloze B a vede na nelineární diferenciální rovnici prvního řádu

$$dp_1 = \frac{\kappa G_2 R T_2 dt}{V_1} - \kappa p_1 \frac{dV_1}{V_1}. \quad (2.3)$$

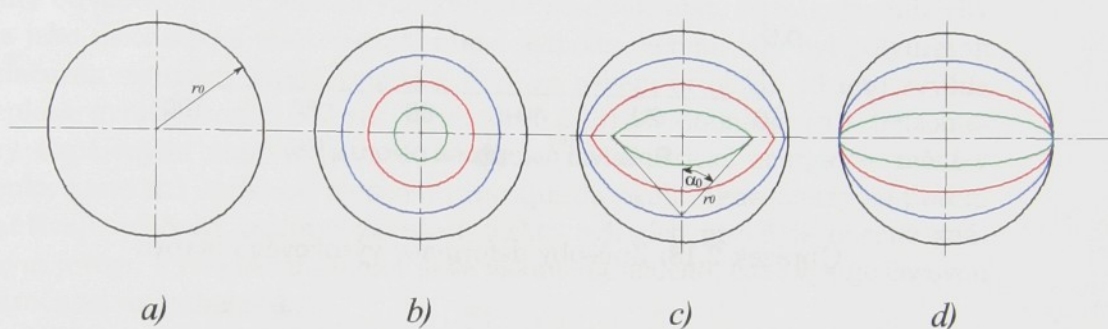
Průtok G_2 vzduchu z okolní atmosféry vyjádříme užitím vztahu:

$$G_2 = \mu S_0 p_2 \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa - 1} \frac{1}{RT_2} \left[\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} \quad \text{pro} \quad \left(\frac{p_1}{p_2} \right) > \beta_{kr} \quad (2.4)$$

nebo



Obrázek 2.16: Postupná deformace zatížené buňky (zvětšeno 10×)



Obrázek 2.17: Způsoby deformace výtokového otvoru

$$G_2 = \mu S_0 p_2 \sqrt{\frac{2}{RT_2} \frac{\kappa}{\kappa + 1} \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{2}{\kappa - 1}}} \quad \text{pro} \quad \left(\frac{p_1}{p_2} \right) \leq \beta_{kr}. \quad (2.5)$$

Kritický poměr tlaků β_{kr} je dán vztahem

$$\beta_{kr} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)_{kr}. \quad (2.6)$$

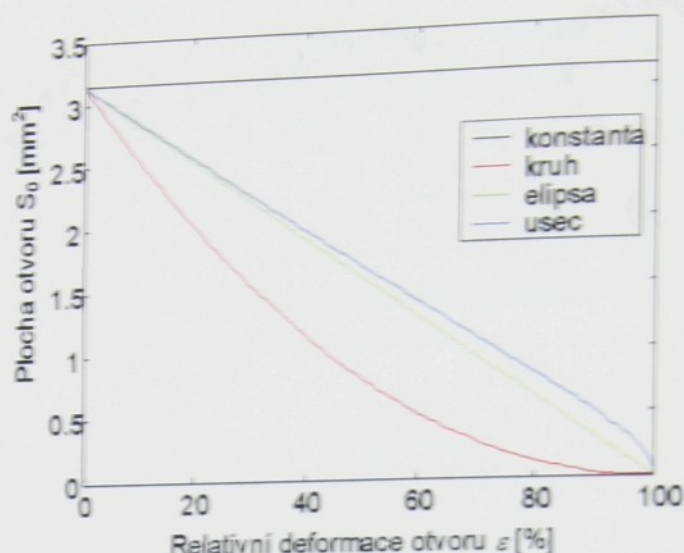
U stlačovaného PU materiálu dochází k deformaci buněk (obr. 2.16), což ovlivňuje plochu průřezu průtočných kanálků. Budeme předpokládat, že během deformace vzorku reprezentativní otvor:

a. Zůstává konstantní (obr. 2.17a)).

$$S_0 = \pi r_0^2 = \text{konst.} \quad (2.7)$$

b. Zachovává kruhový tvar (obr. 2.17b)). Poměrná deformace materiálu je definovaná vztahem

$$\varepsilon = \frac{h - x}{h}. \quad (2.8)$$



Obrázek 2.18: Způsoby deformace výtokového otvoru

Poloměr otvoru a plocha závislá na deformaci potom jsou

$$r(x) = r_0 \varepsilon, \quad S_0(x) = \pi r^2(x). \quad (2.9)$$

c. Zachovává tvar spojených kruhových úsečí (obr. 2.17c)). Potom poloviční úhel kruhové úseče α_0 a plocha otvoru S_0 jsou

$$\alpha_0 = \arccos(1 - \varepsilon), \quad S_0(x) = 2\pi r_0^2 \alpha_0 - r_0^2 (1 - \varepsilon) \sin \alpha_0. \quad (2.10)$$

d. Zachovává eliptický tvar (obr. 2.17d)).

$$r(x) = r_0 \varepsilon, \quad S_0(x) = \pi r_0 r(x). \quad (2.11)$$

Na obr. 2.18 je porovnání průběhu plochy výtokového otvoru v závislosti na relativní deformaci.

Pokud by bylo užitečné zohlednit fakt, že při stlačení pěnového vzorku na výšku h_0 jsou výfukové otvory již zcela uzavřeny a nemůže jimi proudit vzduch, potom by redukovaná poměrná deformace byla stanovena jako $\varepsilon_r = \frac{h-x-h_0}{h}$ a bylo by nutné provést odpovídající úpravy ve výše uvedených vztazích. Volba velikosti h_0 je na uživateli.

2.5 Závěr kapitoly

Vakuová komora byla zkonstruována za účelem kvantifikovat, v jakém poměru se na tlumicích vlastnostech polyuretanové pěny podílí vlastní tlumení materiálové matrice v poměru k tlumení způsobeném vyfukováním a nasáváním vzduchu póry v průběhu stlačování a odlehčování. Ukázalo se, že při měření ve vakuové komoře musíme vzít v úvahu mnoho doprovodných fyzikálních jevů, které ovlivňují získané výsledky. Jako největší problém se zatím jeví fakt, že vakuum (v našem případě 97 %) je dobrým tepelným izolantem. Teplo vzniklé disipací energie při deformaci vzorku nemůže být v dostatečné míře odváděno, roste teplota vzorku a lze předpokládat, že to může mít vliv na jeho mechanické vlastnosti. V rámci jednoho měření, kdy byl polyuretan stlačován signálem sinus1 (viz tab. 2.1), se během přibližně 10 min zvýšila teplota uvnitř vzorku o 7 st. C (viz obr. 2.13). Podobně je to s tenzometry napájenými napětím ($0 \div 5$) V. Zmařená elektrická energie se mění v teplo, které má sníženou možnost přestupu do okolí. Tenzometry se potom zahřívají, přičemž teplotní závislost těchto měřicích prvků je obecně známým jevem. Vyrovnávání teplot je ve vakuu zpomaleno, což zvyšuje časovou náročnost experimentů.

Vlivem popsaných faktorů, které ovlivňují měřené veličiny, stává se v podstatě ze zařízení měřicího, zařízení, které by bylo nutné poznat a proměřit.

Přes omezenou použitelnost tohoto postupu se však podařilo získat výsledky, které poměrně jednoznačně vedou k závěru, že vliv proudícího vzduchu na tlumení je zanedbatelný vzhledem k vlastnímu materiálovému útlumu.

Protože v průběhu prací byl již model popisující vliv vyfukování a nasávání vzduchu sestaven, je jeho koncepce výše uvedena, včetně respektování změny plochy průtočného otvoru v průběhu stlačování.

Kapitola 3

Explicitní formulace tlumicí síly

V literatuře, jako jsou např. technické průvodce [32] nebo [33], lze nalézt, že průběh tlumicí síly poddajných prvků, u kterých tlumení závisí na výchylce x a je realizováno disipací energie uvnitř materiálu, je možné popsat rovnici

$$F_t(x, \dot{x}) = b_a |x^a| \dot{x}. \quad (3.1)$$

Pro naše účely můžeme ve vztahu (3.1) vynechat absolutní hodnotu, neboť vzorek je pouze stlačován, tedy podle zvoleného souřadného systému je namáhán výhradně kladnými hodnotami polohy x . Budeme jej tedy používat ve formě

$$F_t(x, \dot{x}) = b_a x^a \dot{x}. \quad (3.2)$$

Parametr b_a ovlivňuje velikost plochy, kterou křivka ohraničuje a exponent a kromě toho ještě zakřivení. Numerický experiment (viz obr. 3.1) s alternativně měněným parametrem $a = 0, 1, 2, 3$ a např. až 6 ukazuje, že funkce je velmi flexibilní a její křivost lze ovlivňovat v míře více než dostatečnou. Pro konkrétní podobu budoucího signálu (1.2) je tedy třeba na základě experimentálních výsledků stanovit b_a a a .

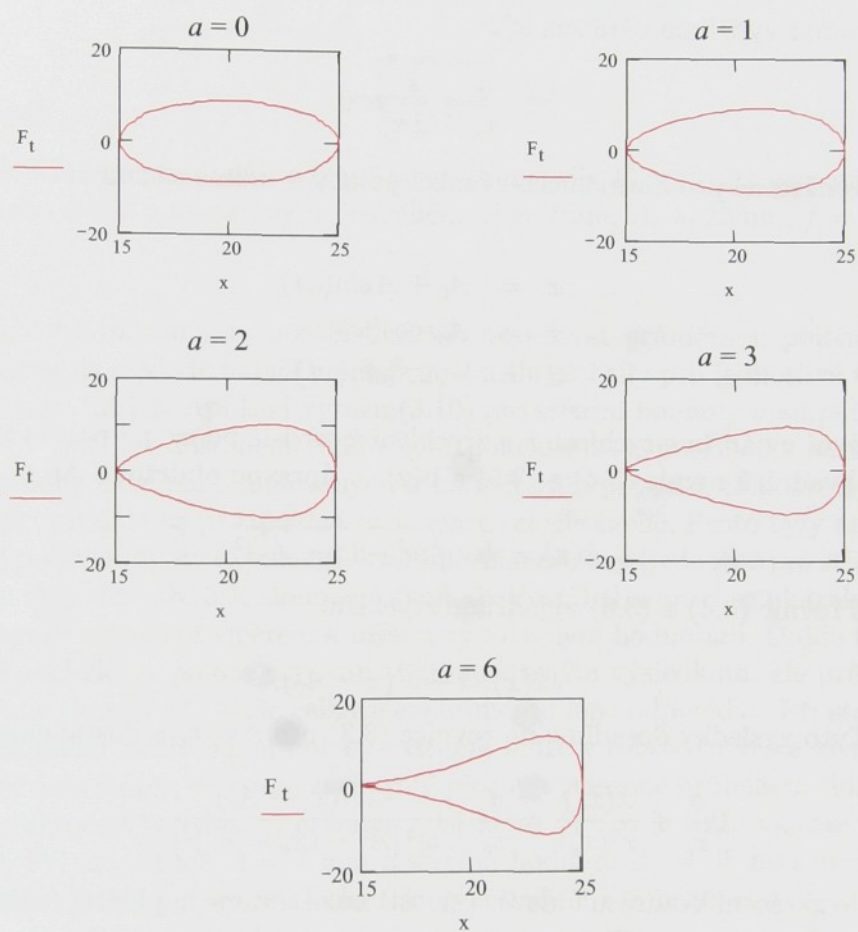
3.1 Určení exponentu a

Pro nalezení extrému funkce (3.2) položíme její derivaci podle x rovnu 0. Máme-li při vyšetřování jednoznačně přiřazeno x a $\dot{x}$ - např. zvolením určitého časového průběhu, lze vztah (3.2) považovat za funkci jedné proměnné. Polohu extrému označíme x_e .

$$\frac{dF_t}{dx} = b_a \left[a x_e^{(a-1)} \dot{x} + x_e^a \frac{d\dot{x}}{dx} \right] = 0,$$

kde

$$\frac{d\dot{x}}{dx} = \frac{d\dot{x}}{dx} \frac{dt}{dt} = \frac{d\dot{x}}{dt} \frac{dt}{dx} = \frac{\ddot{x}}{\dot{x}},$$



Obrázek 3.1: Variabilita funkce (3.2) pro náhradu tlumicí síly

protože

$$\frac{d\dot{x}}{dt} = \ddot{x} \quad \text{a} \quad \frac{dt}{dx} = \frac{1}{\dot{x}}.$$

Dostáváme tedy rovnici

$$a x_e^{(a-1)} \dot{x} + x_e^a \frac{\ddot{x}}{\dot{x}} = 0,$$

kterou vydělíme výrazem $x_e^a \dot{x}$:

$$\frac{a}{x_e} + \frac{\ddot{x}}{\dot{x}^2} = 0. \quad (3.3)$$

Konkrétně pro harmonickou funkci polohy x máme soustavu

$$x = A_0 + A \sin(\omega t), \quad (3.4)$$

$$\dot{x} = A\omega \cos(\omega t), \quad (3.5)$$

$$\ddot{x} = -A\omega^2 \sin(\omega t). \quad (3.6)$$

Nyní vyjádříme rychlost $\dot{x}$ a zrychlení $\ddot{x}$ závislé pouze na poloze x . Součtem kvadrátů rovnic (3.4) a (3.5) a běžnou úpravou obdržíme

$$\dot{x}(x) = \pm \omega \sqrt{A^2 - (x - A_0)^2}. \quad (3.7)$$

Z rovnic (3.4) a (3.6) vyjádříme zrychlení

$$\ddot{x}(x) = -\omega^2(x - A_0). \quad (3.8)$$

Tyto výsledky dosadíme do rovnice (3.3) pro $x = x_e$ a dostaneme

$$\frac{a}{x_e} + \frac{\ddot{x}(x_e)}{\dot{x}^2(x_e)} = \frac{a}{x_e} + \frac{-\omega^2(x_e - A_0)}{\omega^2[A^2 - (x_e - A_0)^2]} = 0.$$

Po zkrácení kvadrátu úhlové rychlosti ω dostáváme implicitní funkci (3.9), kterou je možno použít pro výpočet polohy extrému v průběhu tlumicí síly F_t . V této rovnici nevystupuje úhlová rychlost ω , resp. frekvence kmitů f .

Tím tedy bylo dokázáno, že předpis tlumicí síly (3.2) vykazuje pro harmonické buzení nezávislost polohy extrému na budicí frekvenci, což je v souladu s pozorováním uvedeným v kap. 1.

$$\frac{a}{x_e} - \frac{x_e - A_0}{A^2 - (x_e - A_0)^2} = 0 \quad (3.9)$$

Protože polohu extrému x_e lze odečíst z grafů tlumicí síly F_t , je možné rovnici (3.9) použít pro návrh exponentu a . Vyjádříme tedy

$$a = \frac{x_e - A_0}{A^2 - (x_e - A_0)^2} x_e. \quad (3.10)$$



Obrázek 3.2: Porovnání náhrady průběhu tlumicí síly F_t pro volbu exponentu $a = 3$ nebo $a = 5$ s naměřeným průběhem; $A = 7\text{mm}$, $A_0 = 25\text{mm}$, $f = 3\text{Hz}$

Za polohu extrému x_e potom budeme považovat průměrnou polohu $\bar{x}_e$ vypočtenou na základě naměřených průběhů tlumicí síly pro jednotlivé frekvence v kap. 1.3.1.3. Aplikací výrazu (3.10) pro střední hodnoty a amplitudy uvedené v tab. 3.1 dostaneme hodnoty exponentu a (výpočet). Ty zaručují shodu polohy extrému simulovaných a naměřených průběhů tlumicí síly. V dalším se omezíme na předpoklad exponentu celočíselného. Proto byly na základě výpočtu hodnoty exponentu kvalifikovaně zvoleny (jednotně pro střední hodnotu A_0); viz tab. 3.1, sloupec a (volba). V průběhu prací se ukázalo, že je lépe zvolit exponent směrem k nižším vypočteným hodnotám. Dojde tedy k mírné odchylce v poloze extrému vůči naměřeným výsledkům, ale průběh simulované tlumicí síly bude celkově experimentu lépe odpovídat. Při striktním požadavku na dodržení polohy extrému může v důsledku velké křivosti pro vyšší a docházet, ve snaze zachování plochy vymezené průběhem tlumicí síly, k překročení maxima a minima v hodnotě F_t . To je blíže ukázáno na obr. 3.2. Při amplitudě $A = 7\text{ mm}$ a střední hodnotě $A_0 = 25\text{ mm}$ vychází na základě výpočtu $a = 4.88$. Voleno je výhodněji $a = 3$ než $a = 5$.

3.2 Určení koeficientu b_a

Jak již bylo řečeno, práce tlumicí síly W_d po vykonání jedné periody je dána křivkovým integrálem tlumicí síly F_t podle dráhy:

$$W_d = \oint F_t dx.$$

Za F_t dosadíme obecný předpis (3.2):

$$W_d = \oint F_t dx = b_a \int x^a \dot{x} dx = b_a \int_0^{2\pi/\omega} x^a(t) \dot{x}(t) \frac{dx}{dt} dt, \quad (3.11)$$

A_0 [mm]	A [mm]	$\bar{x}_e$ [mm]	a (výpočet)	a (volba)
20	5	21.87	1.90	1
	10	26.36	2.81	
25	3	26.07	3.57	3
	5	27.53	3.74	
	7	29.60	4.88	
30	3	31.41	6.31	6
	5	33.34	8.06	
	7	35.37	9.39	

Tabulka 3.1: Výpočet a volba exponentu a užitím vztahu (3.10)

kde pro harmonický budící signál (1.2) můžeme popsat x a $\dot{x}$ časovými průběhy

$$x(t) = A_0 + A \sin(\omega t), \quad \dot{x}(t) = A\omega \cos(\omega t), \quad dx = A\omega \cos(\omega t)dt.$$

Výraz $2\pi/\omega$ v horní mezi integrálu představuje periodu kmitu T . Po dosazení dostaneme

$$W_d = b_a \int_0^{2\pi/\omega} [A_0 + A \sin(\omega t)]^a [A\omega \cos(\omega t)]^2 dt.$$

Výsledek tohoto integrálu závisí na volbě exponentu a funkce (3.2). Pro hodnoty $a = (0 \div 6)$ dostáváme vztahy uvedené v tab. 3.2. Z nich je patrná další vlastnost předpisu (3.2), která je v souladu s experimentálním pozorováním, a to lineární závislost práce W_d na frekvenci f .

V našem případě je velikost práce v závislosti na frekvenci $W_d = W_d(f)$ známou veličinou zjištěnou experimentálně v kap. 1. Lineární charakter této závislosti, jak je vidět na obr. 1.9, 1.10 a 1.11, lze popsat pro danou střední hodnotu A_0 a amplitudu A vztahem (3.12)

$$W_d(f) = a_{11}f + a_{10}, \quad (3.12)$$

kde hodnoty členů a_{11} a a_{10} jsou uspořádány v tabulce 3.3. Vyjádřením průběhů členů a_{11} a a_{10} z této tabulky v závislosti na amplitudě dostaneme dále funkce $a_{11} = a_{11}(A)$ a $a_{10} = a_{10}(A)$ (viz obr. 3.3) jako polynomy 3 stupně ve tvaru (3.13). Koeficienty polynomů jsou uvedeny v tab. 3.4. Dosazením do (3.12) s uvážením nulových koeficientů dostaneme vztah (3.14); tedy funkci práce tlumicí síly v závislosti na frekvenci a amplitudě pro uvažovanou střední hodnotu ($W_d = W_d(f, A)$).

$$a_{10}(A) = \sum_{i=0}^3 a_{2i}A^i, \quad a_{11}(A) = \sum_{i=0}^3 a_{3i}A^i. \quad (3.13)$$

a	W_d
0	$2\pi^2 b_a f A^2$
1	$2\pi^2 b_a f A^2 A_0$
2	$2\pi^2 b_a f A^2 \left(\frac{1}{4} A^2 + A_0^2\right)$
3	$2\pi^2 b_a f A^2 A_0 \left(\frac{3}{4} A^2 + A_0^2\right)$
4	$2\pi^2 b_a f A^2 \left(\frac{1}{8} A^4 + \frac{3}{2} A^2 A_0^2 + A_0^4\right)$
5	$2\pi^2 b_a f A^2 A_0 \left(\frac{5}{8} A^4 + \frac{5}{2} A^2 A_0^2 + A_0^4\right)$
6	$2\pi^2 b_a f A^2 \left(\frac{5}{64} A^6 + \frac{15}{4} A^2 A_0^4 + \frac{15}{8} A^4 A_0^2 + A_0^6\right)$

Tabulka 3.2: Práce tlumicí síly W_d pro zvolený exponent a

$$W_d(f, A) = (a_{33}A^3 + a_{32}A^2)f + a_{23}A^3 + a_{22}A^2. \quad (3.14)$$

Pokud máme určen průběh práce $W_d(f, A)$ na základě experimentu, je pro zvolenou střední hodnotu A_0 ve vztazích v tab. 3.2 jedinou neznámou hodnota koeficientu b_a . Můžeme tedy pro zvolené exponenty a vyjádřit:

pro $a = 1$:

$$b_a(f, A) = \frac{W_d(f, A)}{2\pi^2 f A^2 A_0}, \quad (3.15)$$

pro $a = 3$:

$$b_a(f, A) = \frac{W_d(f, A)}{2\pi^2 f A^2 A_0 \left(\frac{3}{4} A^2 + A_0^2\right)}, \quad (3.16)$$

pro $a = 6$:

$$b_a(f, A) = \frac{W_d(f, A)}{2\pi^2 f A^2 \left(\frac{5}{64} A^6 + \frac{15}{4} A^2 A_0^4 + \frac{15}{8} A^4 A_0^2 + A_0^6\right)}. \quad (3.17)$$

Potom tedy vztah pro tlumicí sílu (3.2) můžeme zapsat ve tvaru

$$F_t(x) = b_a(f, A) x^a \dot{x}. \quad (3.18)$$

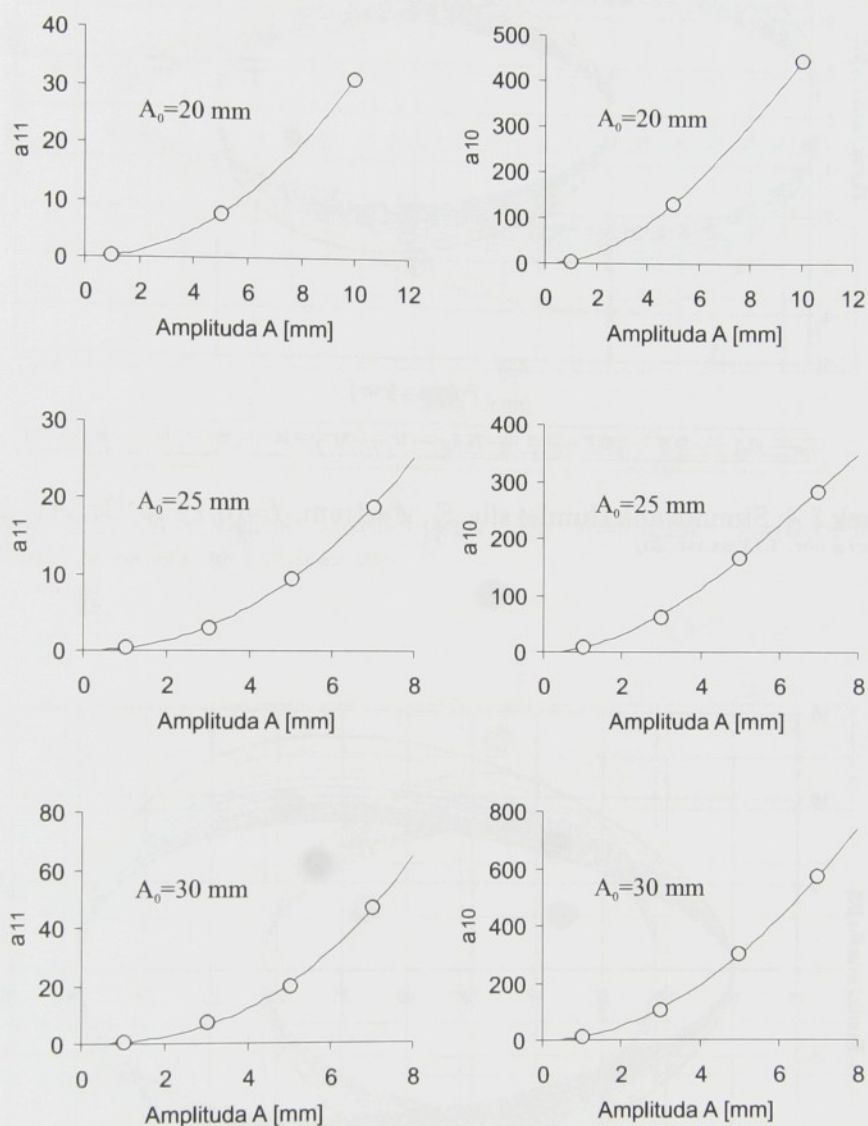
Jeho provedením při různých parametrech (f, A, A_0) harmonického budičího signálu (1.2) dostaneme grafy na obr. 3.4 až 3.14.

A_0 [mm]	A [mm]	a_{11} [mJ/Hz]	a_{10} [mJ]
20	1	0.29	5.39
	5	7.6456	130.86
	10	31.412	444.75
25	1	0.4727	7.8114
	3	3.0955	62.798
	5	9.4153	167.66
	7	19.025	284.19
30	1	0.6613	13.895
	3	7.2596	105.41
	5	19.748	299.88
	7	46.497	570.59

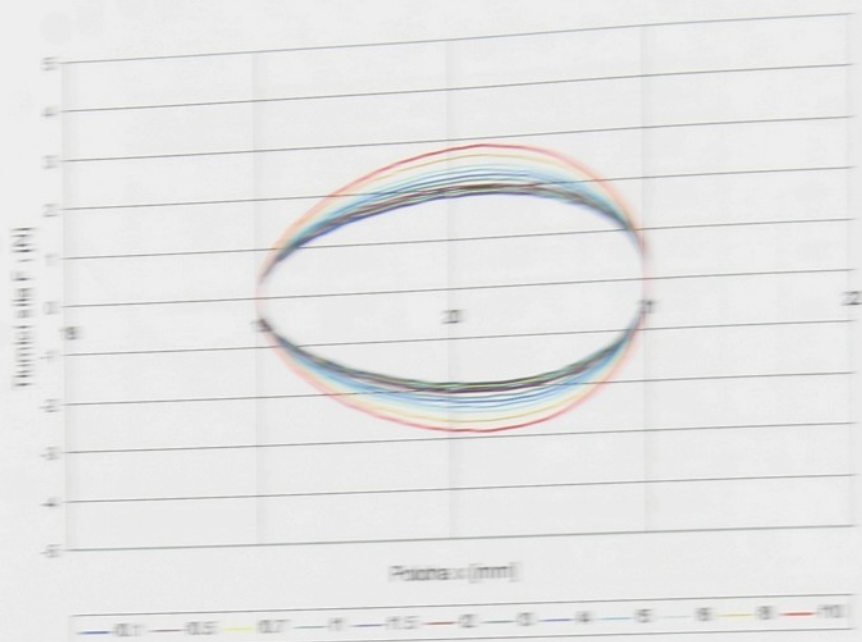
Tabulka 3.3: Hodnoty parametrů a_{11} a a_{10} pro přímkové nahrazení závislosti $W_d = W_d(f)$

A_0 [mm]	a_{23}	a_{22}	a_{21}	a_{20}
20	-0.1571009	6.01854676	0	0
25	-0.39268089	8.56259104	0	0
30	-0.11827303	12.48544775	0	0
A_0 [mm]	a_{33}	a_{32}	a_{31}	a_{30}
20	1.66142739E-3	0.29750646	0	0
25	7.57244655E-3	0.33563643	0	0
30	0.0627492	0.50579884	0	0

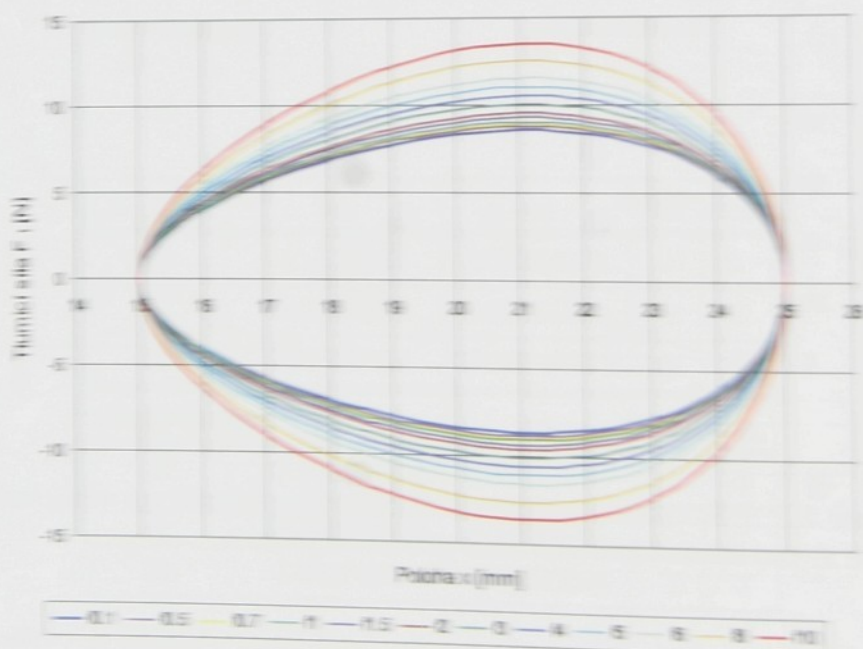
Tabulka 3.4: Hodnoty koeficientů polynomů pro vyjádření $a_{10}(A)$ a $a_{11}(A)$



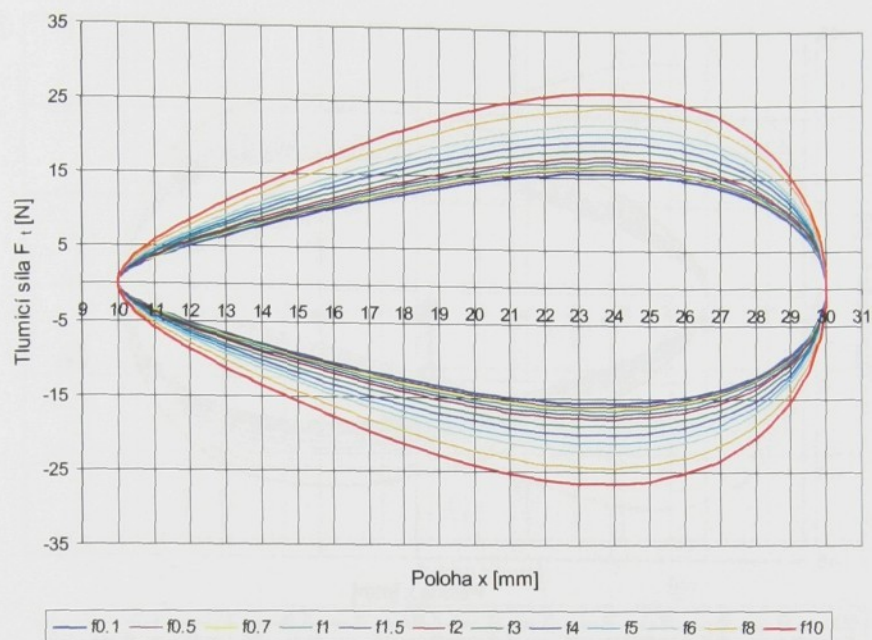
Obrázek 3.3: Polynomické nahrazení závislosti koeficientů a_{11} a a_{10} na amplitudě A pro střední hodnoty $A_0 \in \{20, 25, 30\}$ mm



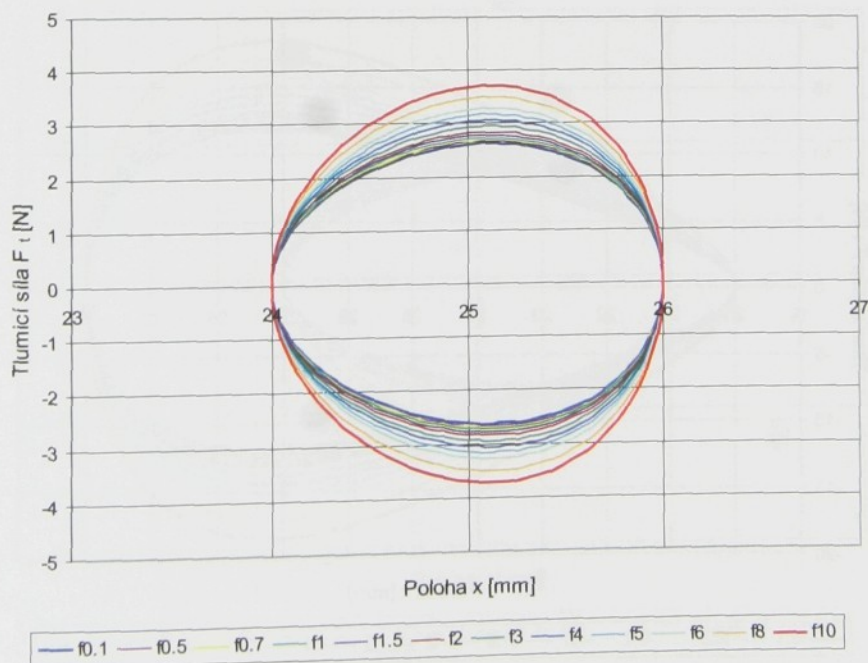
Obrázek 3.4: Simulovaná tlumicí síla F_d , $A=1\text{mm}$, $f=(0.1 \div 10)\text{Hz}$, $A_0=20\text{mm}$
(porovnej s obr. 1.13 na str. 25)



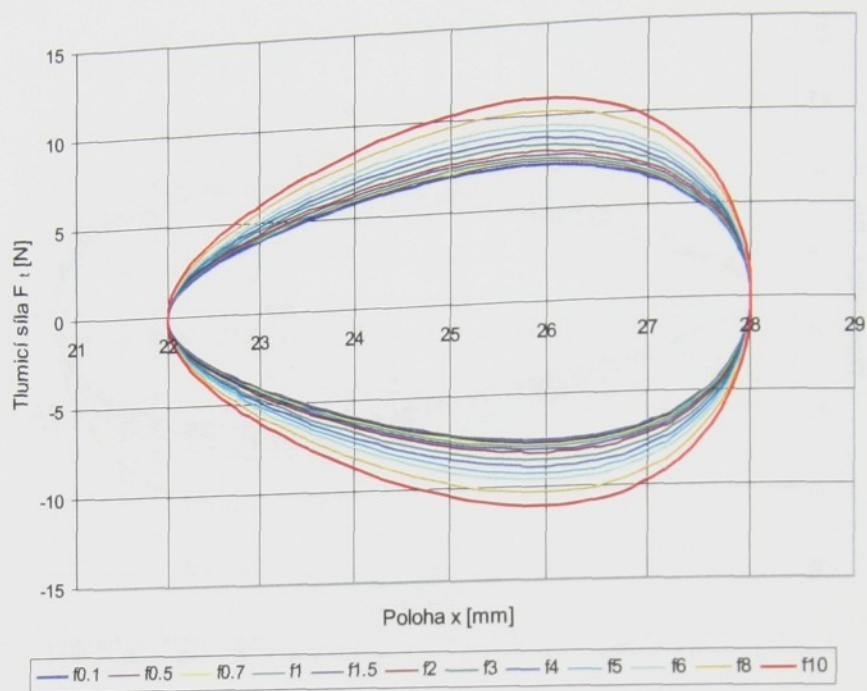
Obrázek 3.5: Simulovaná tlumicí síla F_d , $A=5\text{mm}$, $f=(0.1 \div 10)\text{Hz}$, $A_0=20\text{mm}$
(porovnej s obr. 1.15 na str. 26)



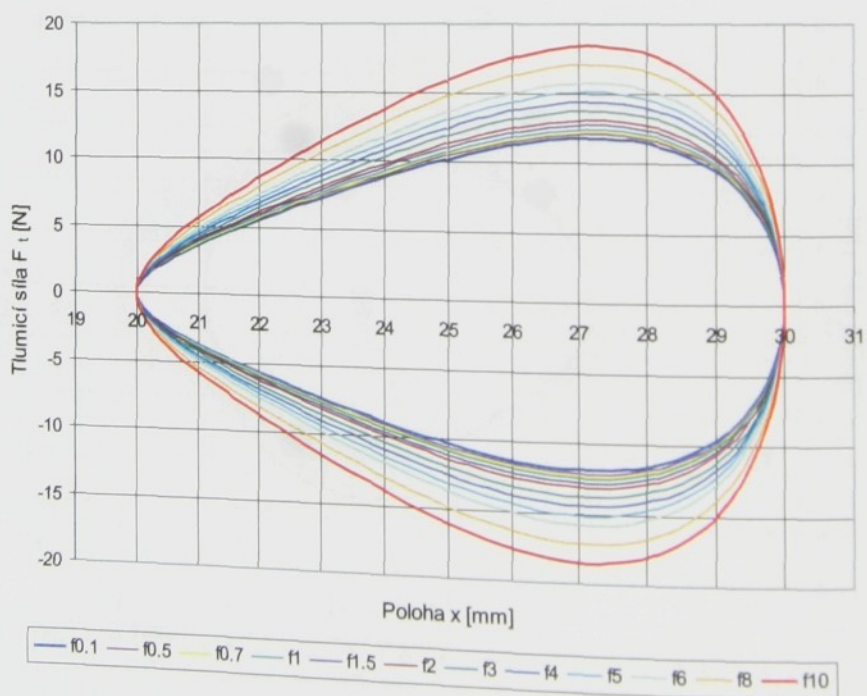
Obrázek 3.6: Simulovaná tlumicí síla F_t , $A=10\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=20\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.17 na str. 27)



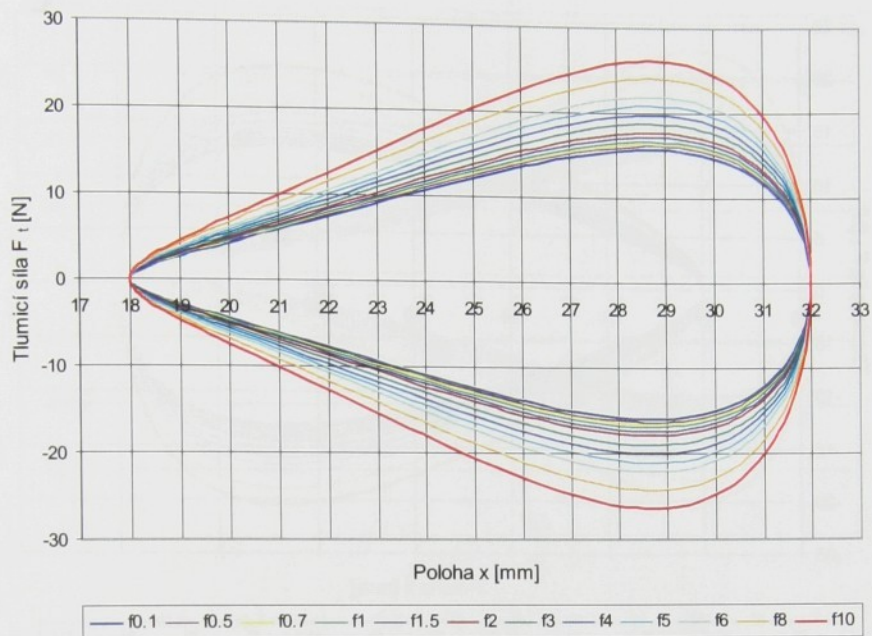
Obrázek 3.7: Simulovaná tlumicí síla F_t , $A=1\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=25\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.19 na str. 28)



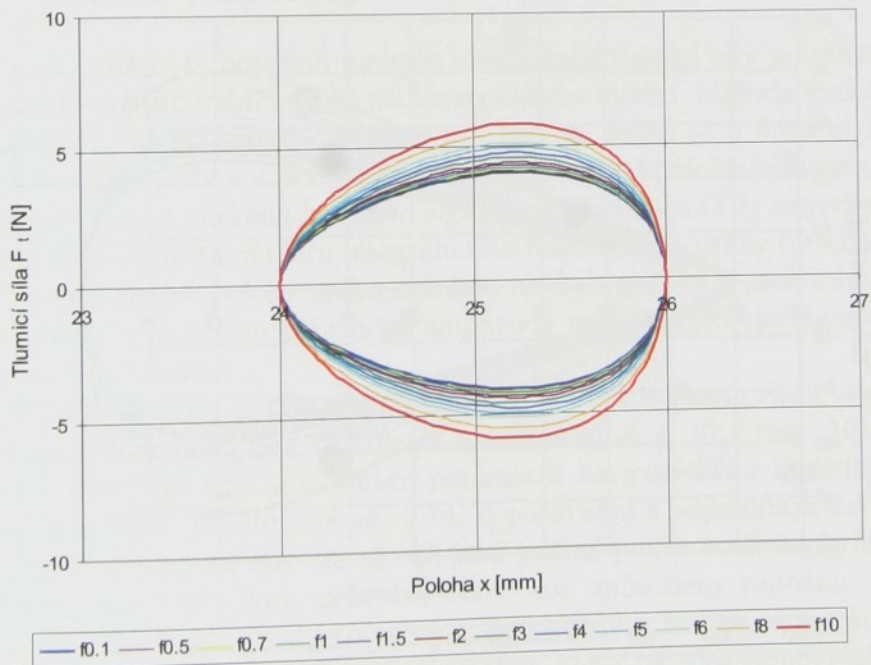
Obrázek 3.8: Simulovaná tlumicí síla F_t , $A=3\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=25\text{mm}$
(porovnej s obr. 1.21 na str. 29)



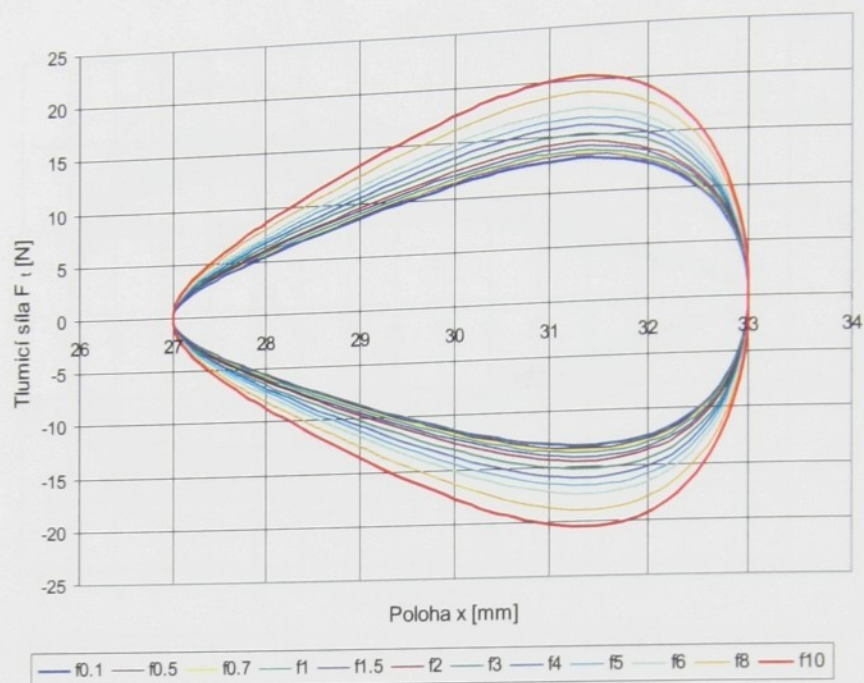
Obrázek 3.9: Simulovaná tlumicí síla F_t , $A=5\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=25\text{mm}$
(porovnej s obr. 1.23 na str. 30)



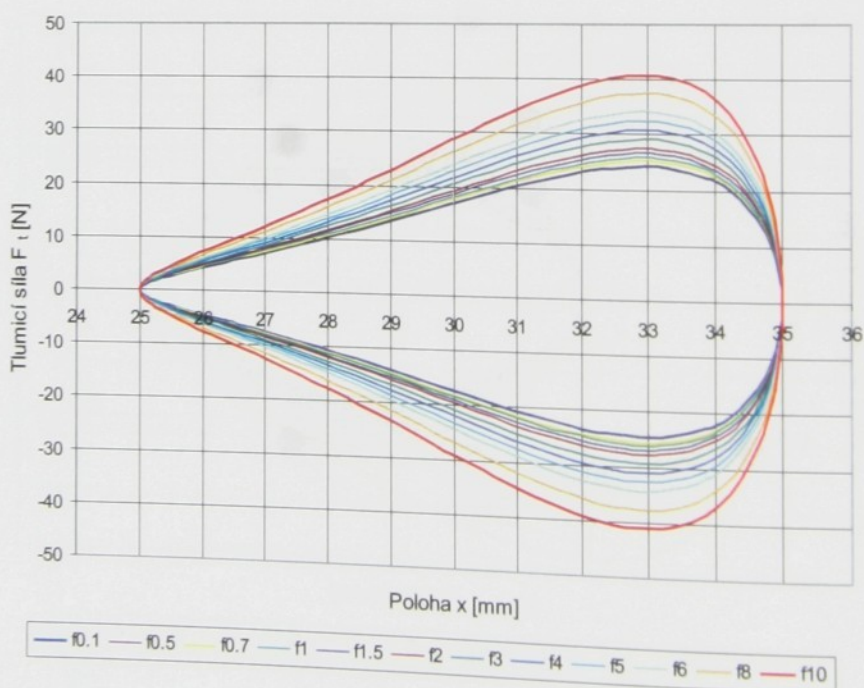
Obrázek 3.10: Simulovaná tlumicí síla F_t , $A=7\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=25\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.25 na str. 31)



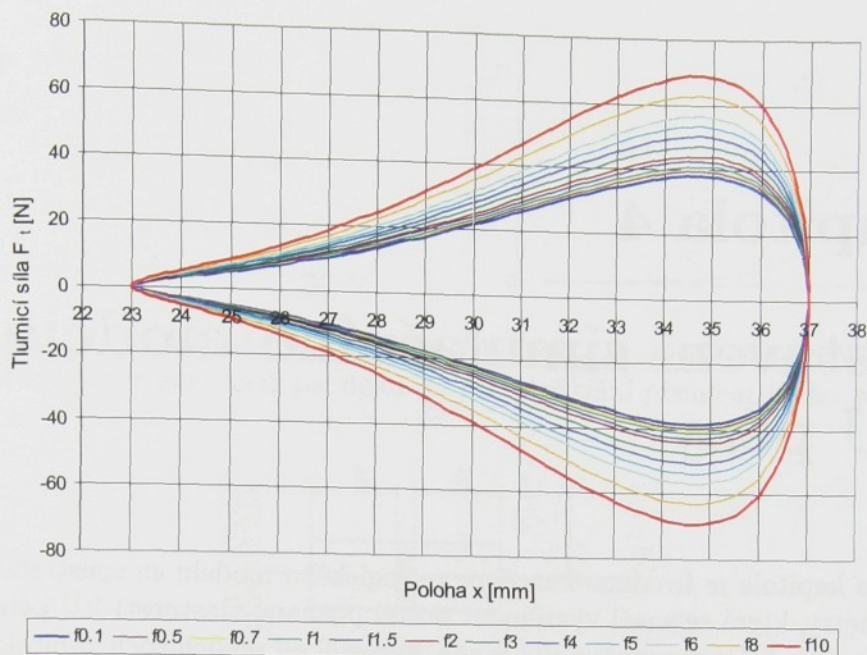
Obrázek 3.11: Simulovaná tlumicí síla F_t , $A=1\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=30\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.27 na str. 32)



Obrázek 3.12: Simulovaná tlumicí síla F_t , $A=3\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=30\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.29 na str. 33)



Obrázek 3.13: Simulovaná tlumicí síla F_t , $A=5\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=30\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.31 na str. 34)



Obrázek 3.14: Simulovaná tlumicí síla F_t , $A=7\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=30\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.33 na str. 35)

3.3 Závěr kapitoly

V této kapitole byla popsána metoda identifikace tlumicí síly polyuretano-
vého vzorku užitím vztahu (3.2) při harmonickém buzení. Metoda vychází ze
zjištěných vlastností vzorku popsaných v kap. 1. Jedná se o lineární závis-
lost práce tlumicí síly a v prvním přiblížení konstantní polohu jejího extrému
na frekvenci harmonického budicího signálu. Aproximace (3.2) se jeví vhod-
ným, protože linearita nárůstu integrálu této funkce podle dráhy (mechanická
práce) a nezávislost polohy jejího extrému na frekvenci byla prokázána. Ve-
likost integrálu je potom při změně amplitudy nutno zajišťovat stanovením
funkce $b_a = b_a(f, A)$.

Užití této metody je platné pro zvolenou střední hodnotu A_0 a velmi ši-
roký rozsah frekvencí $f \in \langle 0; 10 \rangle \text{ Hz}$ a amplitud $A \in \langle 0; 7 \text{ resp. } 10 \rangle \text{ mm}$.
Výsledky pro jednotlivé kombinace parametrů harmonického budicího sig-
nálu jsou uvedeny na obr. 3.4 až 3.14. Z porovnání s odpovídajícími grafy
naměřených veličin na str. 25 až 35 jsou patrné pouze malé odchylky jak
v průběhu, tak i v poloze extrému, které jsou způsobeny zejména celočí-
selnou volbou exponentu a pro všechny amplitudy a frekvence se shodnou
střední hodnotou A_0 . Volba reálné mocniny, která by více odpovídala vy-
počtenému exponentu a , by kromě možnosti snížení přesnosti v průběhu F_t
přinesla zesložnění výrazů a ztrátu přímé přehlednosti. Simulace odpovídají
experimentální datům s dostatečnou přesností.

Kapitola 4

Sestavení simulačního modelu PU pěny

V této kapitole je uvedena koncepce reologického modelu se soustředěnými parametry, která se snaží vystihnout dosud poznané vlastnosti PU pěny popsané v kap.1. Pojem vratné síly je zde, narozdíl od předchozích kapitol, opět chápán v klasické představě, tedy respektující elastické vlastnosti odděleně od viskózních a frikčních.

4.1 Vratná síla

4.1.1 Fáze I. - borcení struktury materiálové matrice

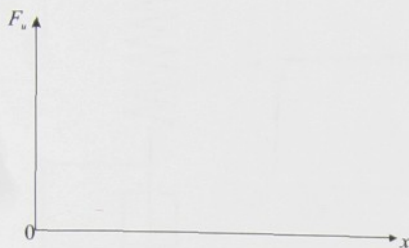
Jak již bylo řečeno, póry polyuretanového materiálu vytvářejí typickou strukturu, která je do jisté míry schopna odolávat tlakovému zatížení díky své vzpěrné pevnosti. Nedeformovaný tvar buňky je na obr. 2.16a), částečně deformovaný na obr. 2.16b); obr. 2.16c) odpovídá stavu, kdy jsou buňky natolik deformované, že byla překročena mez únosnosti struktury m_u (horizontální asymptota v obr. 4.4) a vzpěrná pevnost buněk přestává mít významný vliv na velikost vratné síly. Deformace lze považovat za elastické.

Tato fáze je aproximována funkcí (4.1) na obr. 4.1. F_u je přírůstek síly vlivem vzpěrné pevnosti struktury, m_u je mez únosnosti a k_u je koeficient únosnosti struktury.

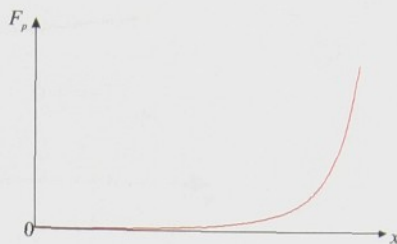
$$F_u = m_u(1 - \exp^{-k_u x}). \quad (4.1)$$

4.1.2 Fáze II. a III. - přechování základního materiálu

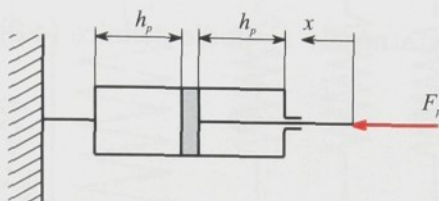
Po počátečním zborcení buněk základního materiálu dochází k dosedání jejich stěn a dále již ke kompresi materiálové matrice. Charakteristika této části je velice podobná průběhu síly při stlačování ideálního plynu, což vyjadřuje



Obrázek 4.1: Průběh síly únosnosti struktury F_u v závislosti na deformaci x



Obrázek 4.2: Průběh působící síly při stlačování pneumatického válce



Obrázek 4.3: Stlačování pneumatického válce

vztah (4.2) (viz obr. 4.2), kde S_p, p_p, h_p jsou konstanty modelu, přičemž h_p má význam polohy vertikální asymptoty na obr. 4.4.

$$F_p = p_p S_p \left[\left(\frac{h_p}{h_p - x} \right)^{n_p} - \left(\frac{h_p}{h_p + x} \right)^{n_p} \right]. \quad (4.2)$$

Celkový průběh vratné síly F_V je dán součtem (4.3) a zobrazen je na obr. 4.4.

$$F_V = F_u + F_p \quad (4.3)$$

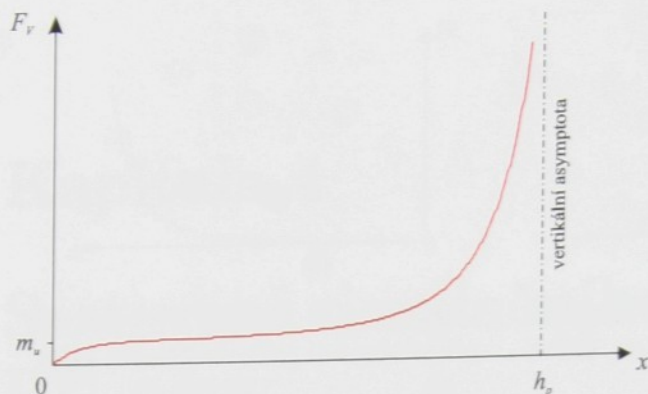
4.2 Tlumičí síla

Tlumení materiálové matrice bylo popsáno viskoelastickým členem Maxwellova typu na obr. 4.5. Pružina, ikdyž je z důvodu názornosti zobrazena jako vinutá, je uvažována jako nelineární (plynová) s polytropickou charakteristikou

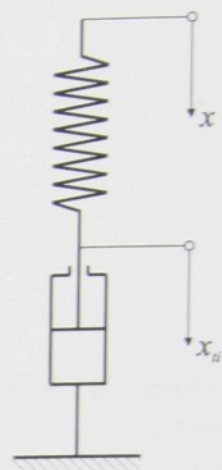
$$F_{ti} = p_{0i} S_{0i} \left[\left(\frac{h_i}{h_i - (x - x_{ti})} \right)^{n_{0i}} - \left(\frac{h_i}{h_i + (x - x_{ti})} \right)^{n_{0i}} \right]. \quad (4.4)$$

Následuje sériově řazený nelineární tlumič s konstantou tlumení c_i a exponentem n_i

$$F_{ti} = c_i v_{ti}^{n_i}, \quad i = 1 \dots m. \quad (4.5)$$



Obrázek 4.4: Průběh vratné síly F_v podle definice (4.3)



Obrázek 4.5: Viskoelastický člen Maxwellova typu

Diferenciální rovnice tohoto viskoelastického prvku je dána rovností sil v sériově řazených komponentech, tedy

$$p_{0i} S_{0i} \left[\left(\frac{h_i}{h_i - (x - x_{ti})} \right)^{n_{0i}} - \left(\frac{h_i}{h_i + (x - x_{ti})} \right)^{n_{0i}} \right] = c_i v_{ti}^{n_i}. \quad (4.6)$$

Po separaci proměnných je zde vyjádřen diferenciální přírůstek deformace tlumiče - rovnice je připravena k integraci:

$$dx_{ti} = \left\{ \frac{p_{0i} S_{0i}}{c_i} \left[\left(\frac{h_i}{h_i - (x - x_{ti})} \right)^{n_{0i}} - \left(\frac{h_i}{h_i + (x - x_{ti})} \right)^{n_{0i}} \right] \right\}^{\frac{1}{n_i}} dt. \quad (4.7)$$

Logický je předpoklad, že svoji úlohu v tlumení bude hrát i smykové tření. Při přechování struktury polyuretanu se bortící stěny pórů dostávají do vzájemného kontaktu a s narůstající deformací se po sobě smýkají. Tak lze zdůvodnit, že v submodelu bude participovat současně pasivní odpor s průběhem koeficientu smykového tření f_T , který byl v závislosti na rychlosti popsán funkcí arctan v kombinaci s mocninou funkcí podle rovnice (4.8) - viz obr. 4.6. Vlastností této funkce je, že při nulové rychlosti je síla smykového tření F_T nulová, což nemusí odpovídat skutečnosti, ale pro numerickou simulaci v okolí nulové rychlosti je to výhodné.

$$f_T = \frac{2f_{T0}}{\pi} \arctan(k_1 v) + k_2 |v|^{k_3} \text{sign}(v). \quad (4.8)$$

Základem pro stanovení třecí síly je uvažován součet síly vratné a tlumicí:

$$F_{Vt} = F_V + \sum_{i=1}^m F_{ti}. \quad (4.9)$$

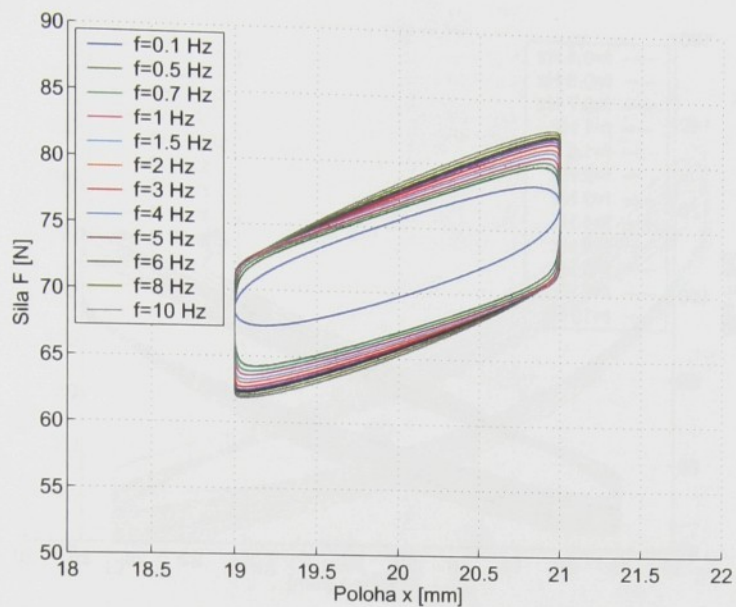
Simulovaná složka síly	Parametr	Fyzikální jednotka	Hodnota		
F_u	m_u	[N]	55		
	k_u	[N/m]	500		
F_p	S_p	[m ²]	0.025		
	p_p	[Pa]	100		
	n_p	[1]	4		
	h_p	[m]	0.052		
F_{ti}			$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
	S_{0i}	[m ²]	0.55	0.06	0.8
	p_{0i}	[Pa]	100		
	n_{0i}	[1]	0.8	3	0.5
	h_i	[m]	0.04		
	c_i	[kg/s]	12	50	100
	n_i	[1]	1	1	1/3
F_T	f_{T0}	[1]	0.07		
	k_1	[s/m]	2000		
	k_2	[kg/s]	0.25		
	k_3	[kg/s]	1.2		

Tabulka 4.1: Parametry modelu PU pěny pro simulaci odezvy na harmonický signál

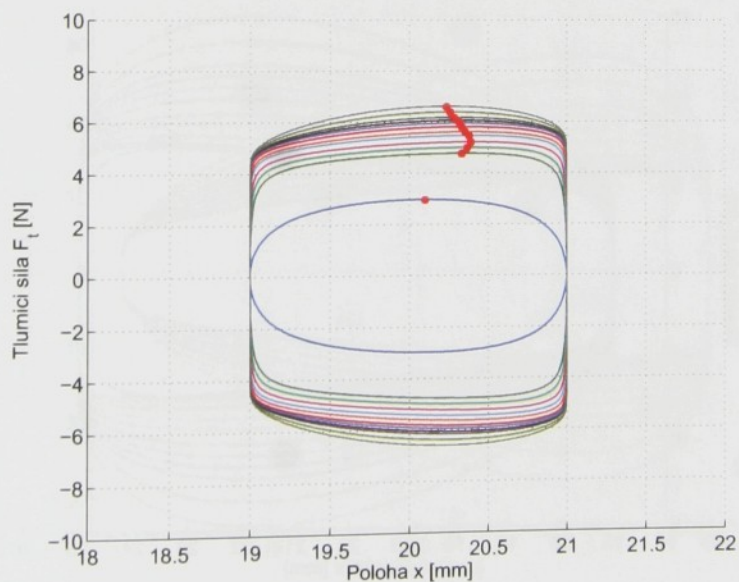
4.3 Výsledky simulace modelu PU pěny

4.3.1 Odezva na harmonické buzení - obecné naladění modelu

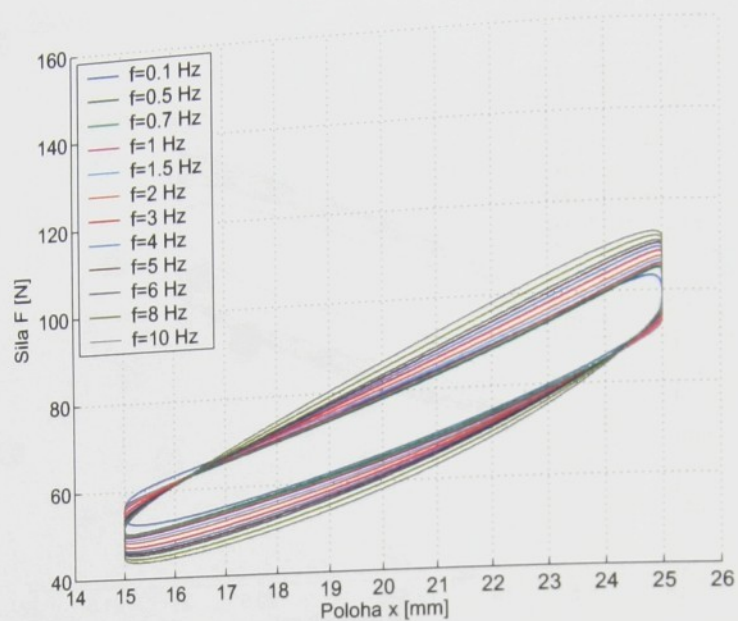
V této části verifikace byl model podroben harmonickému buzení (1.2) v rozsahu středních hodnot a amplitud daných tab. 1.1 a frekvencemi $f \in \{0.1; 0.5; 0.7; 1; 1.5; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10\}$ Hz. V tab. 4.1 jsou uvedeny hodnoty všech parametrů modelu. Na obr. 4.8 až 4.29 jsou zobrazeny simulované odezvy na zmíněné buzení, které je možno porovnávat se skutečně naměřenými signály na obr. 1.12 až 1.33 na stranách 25 až 35. Zatěžování polyuretanu se realizuje na velmi širokém rozsahu parametrů buzení: 20% až 74% relativní deformace, rozsah středních hodnot 20 mm až 30 mm, rozsah amplitud 1 mm až 7 mm, resp. 10 mm, při 100 násobné změně frekvence. Proto je nastavení modelu možno nazvat obecné.



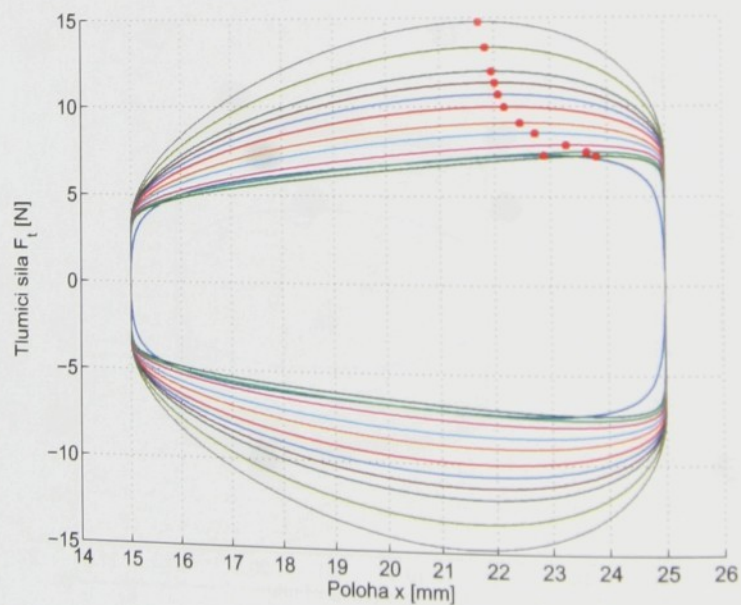
Obrázek 4.8: Simulovaná celková síla F , $A=1\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=20\text{mm}$
(porovnej s obr. 1.12 na str. 25)



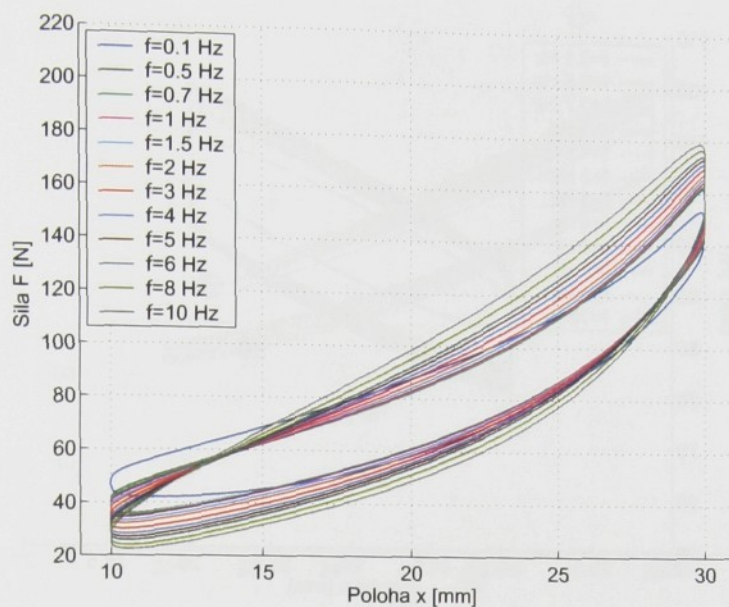
Obrázek 4.9: Simulovaná tlumicí síla F_t , $A=1\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=20\text{mm}$
(porovnej s obr. 1.13 na str. 25)



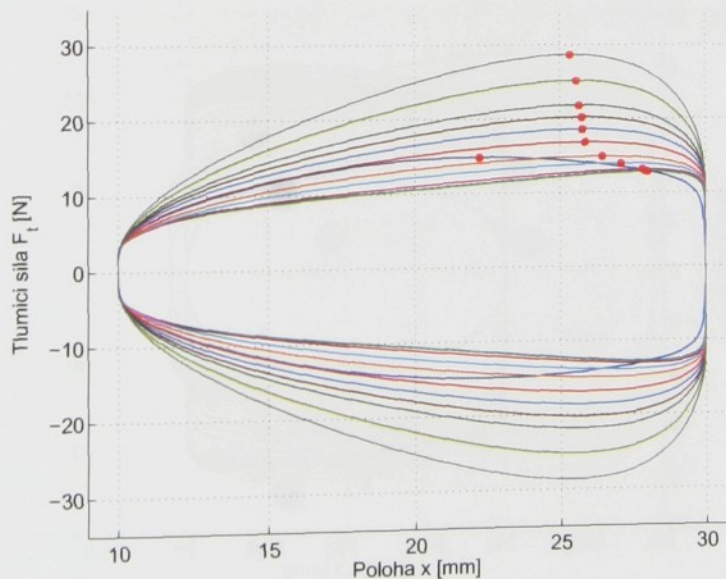
Obrázek 4.10: Simulovaná celková síla F , $A=5\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=20\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.14 na str. 26)



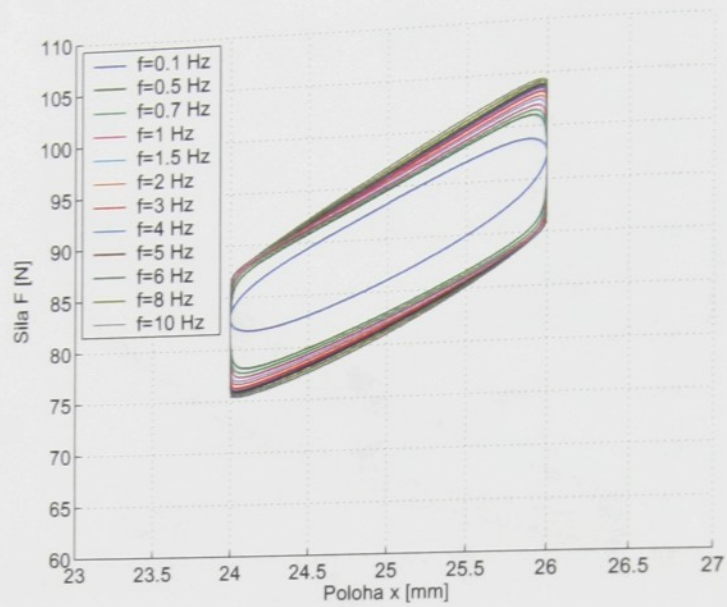
Obrázek 4.11: Simulovaná tlumicí síla F_t , $A=5\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=20\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.15 na str. 26)



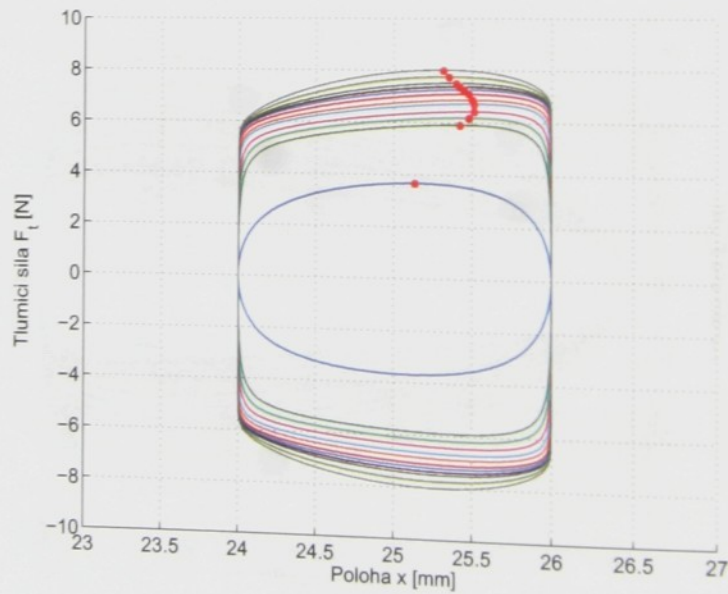
Obrázek 4.12: Simulovaná celková síla F , $A=10\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=20\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.16 na str. 27)



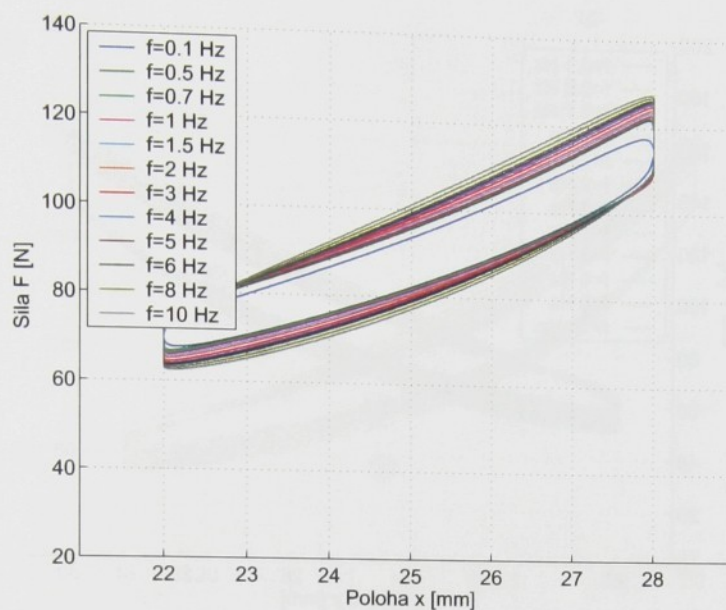
Obrázek 4.13: Simulovaná tlumicí síla F_t , $A=10\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=20\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.17 na str. 27)



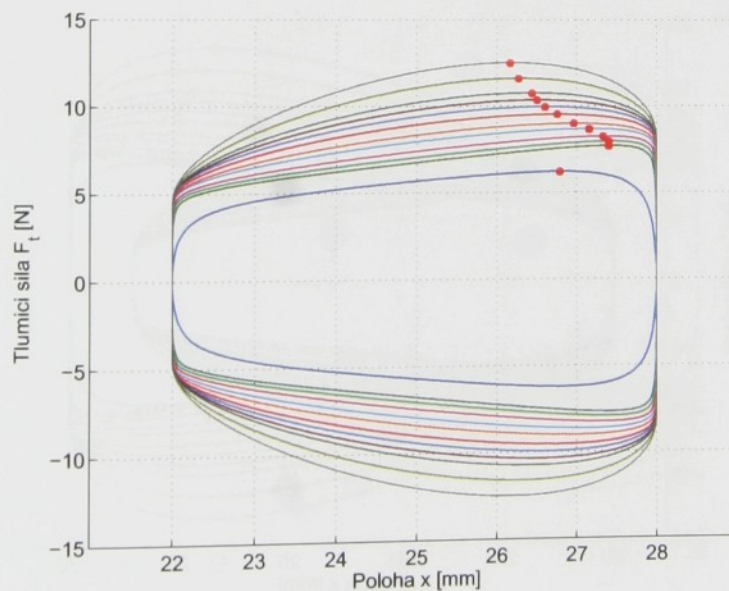
Obrázek 4.14: Simulovaná celková síla F , $A=1\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=25\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.18 na str. 28)



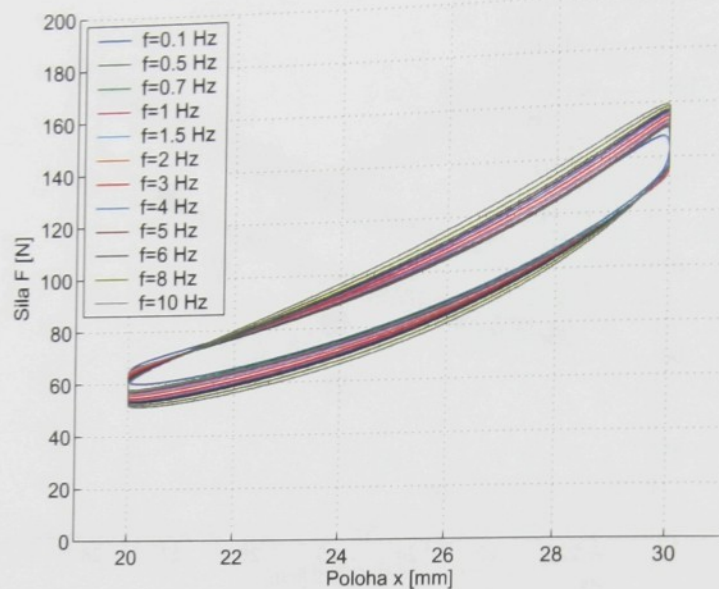
Obrázek 4.15: Simulovaná tlumicí síla F_t , $A=1\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=25\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.19 na str. 28)



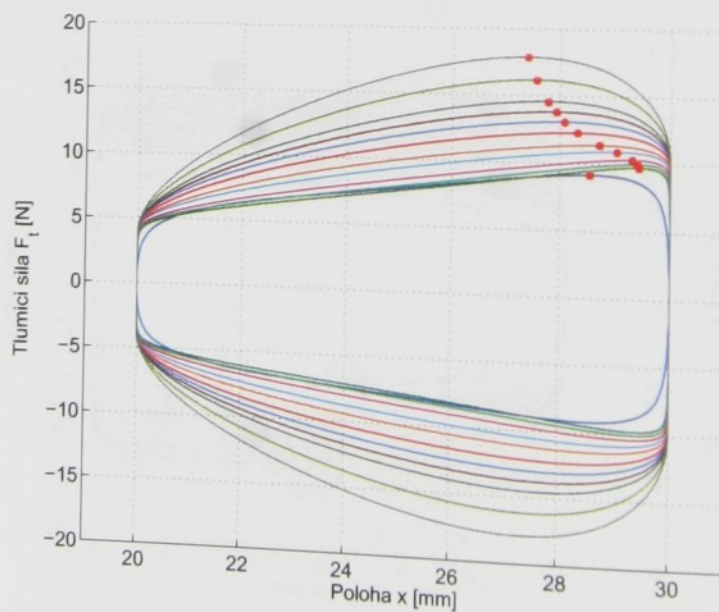
Obrázek 4.16: Simulovaná celková síla F , $A=3\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=25\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.20 na str. 29)



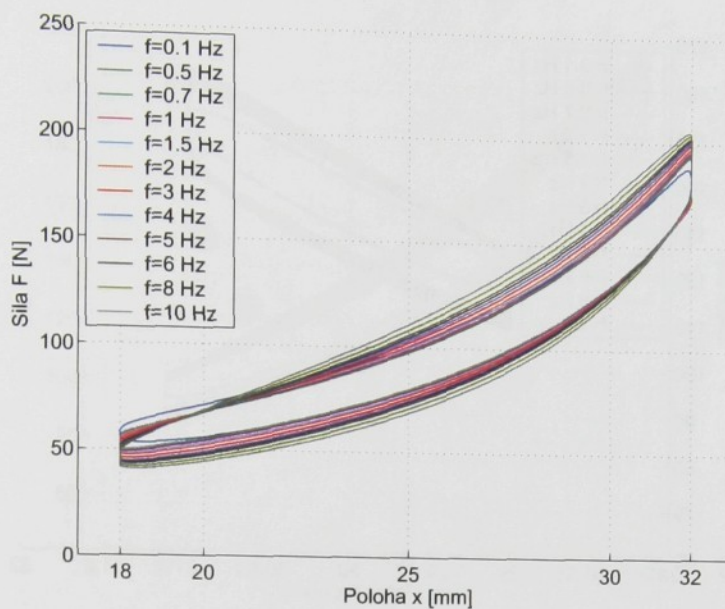
Obrázek 4.17: Simulovaná tlumicí síla F_t , $A=3\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=25\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.21 na str. 29)



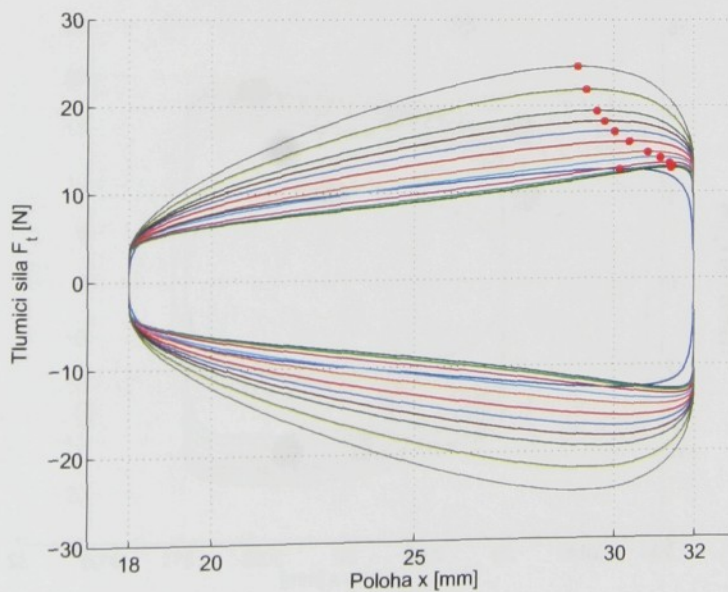
Obrázek 4.18: Simulovaná celková síla F , $A=5\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=25\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.22 na str. 30)



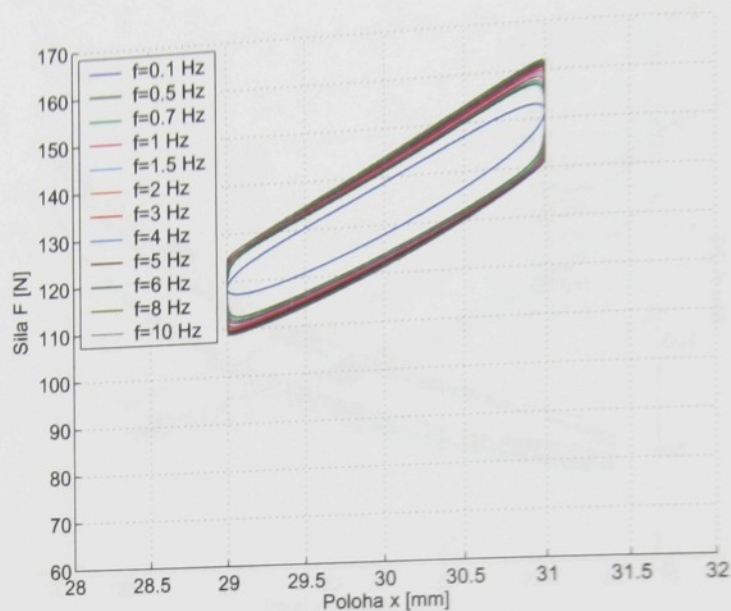
Obrázek 4.19: Simulovaná tlumicí síla F_t , $A=5\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=25\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.23 na str. 30)



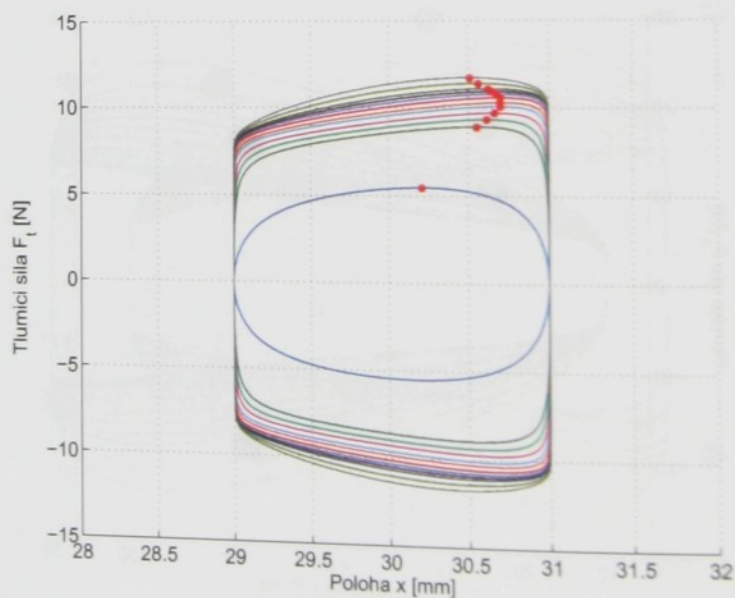
Obrázek 4.20: Simulovaná celková síla F , $A=7\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=25\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.24 na str. 31)



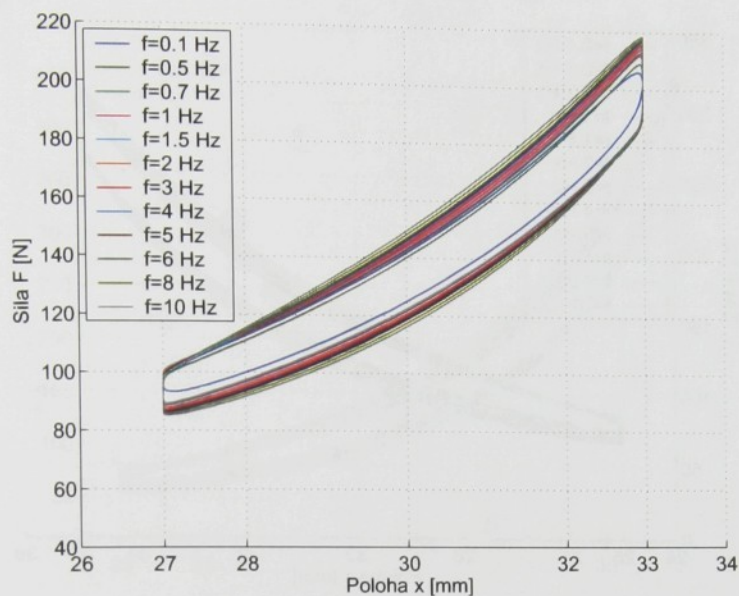
Obrázek 4.21: Simulovaná tlumicí síla F_t , $A=7\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=25\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.25 na str. 31)



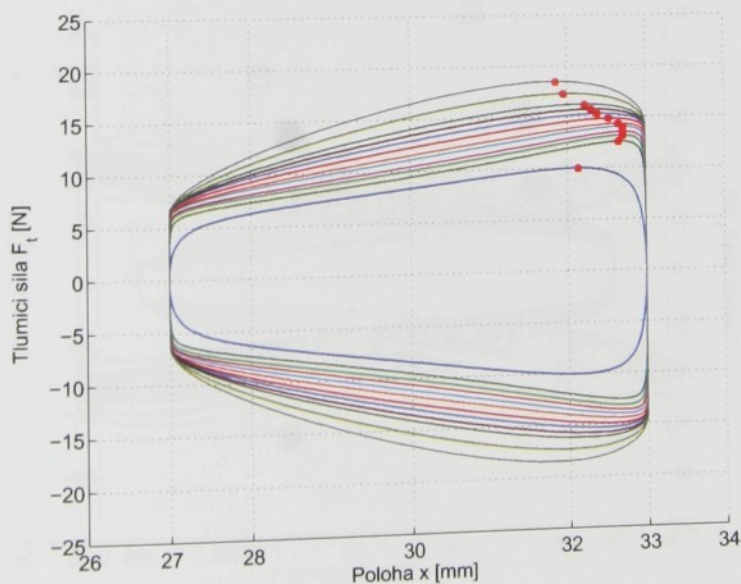
Obrázek 4.22: Simulovaná celková síla F , $A=1\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=30\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.26 na str. 32)



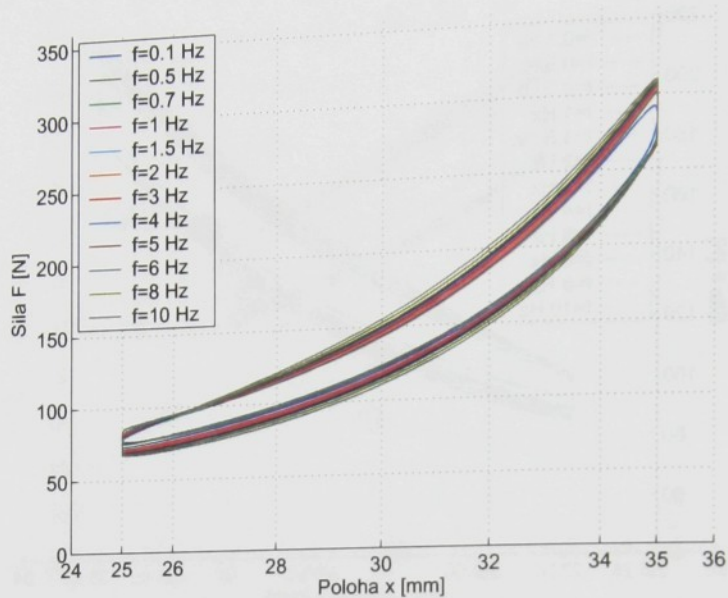
Obrázek 4.23: Simulovaná tlumicí síla F_t , $A=1\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=30\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.27 na str. 32)



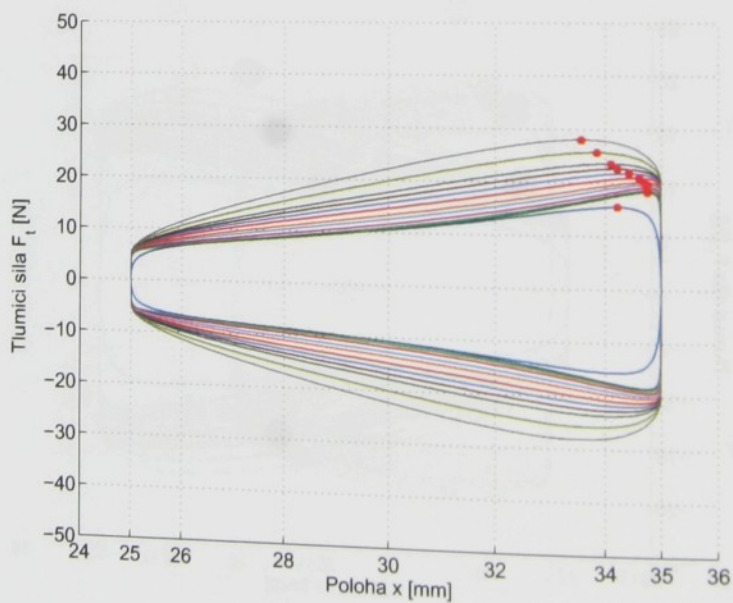
Obrázek 4.24: Simulovaná celková síla F , $A=3\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=30\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.28 na str. 33)



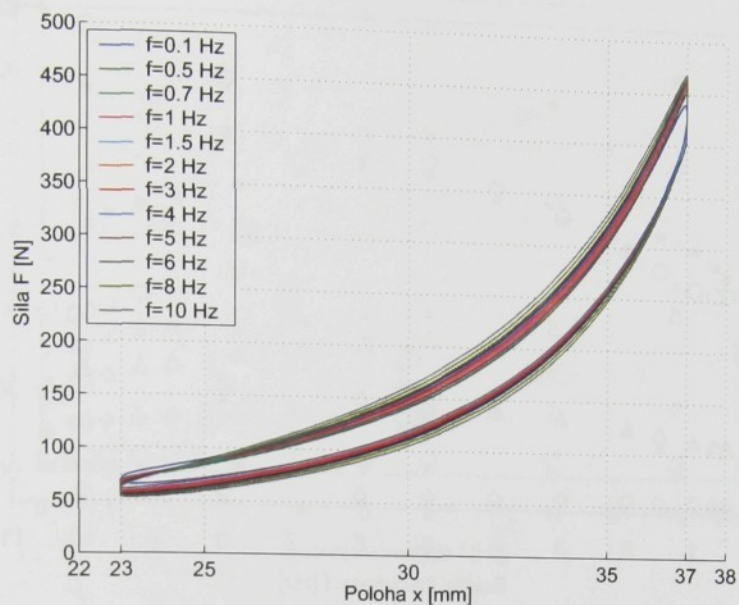
Obrázek 4.25: Simulovaná tlumicí síla F_t , $A=3\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=30\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.29 na str. 33)



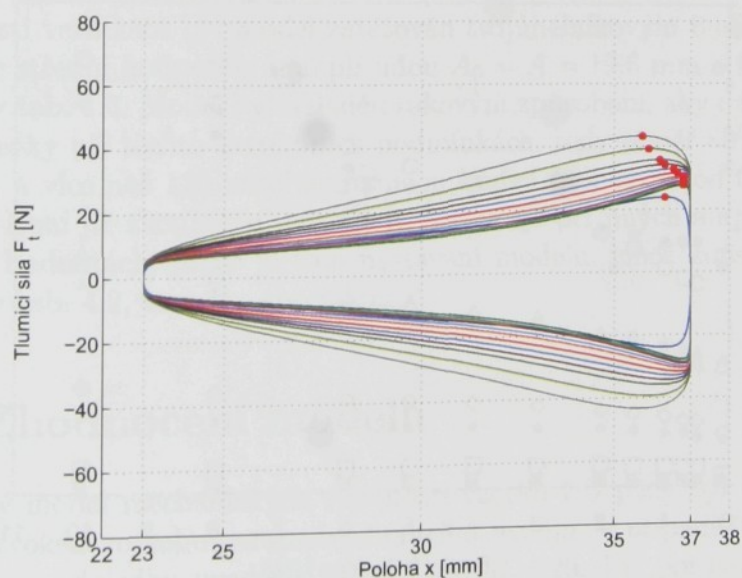
Obrázek 4.26: Simulovaná celková síla F , $A=5\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=30\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.30 na str. 34)



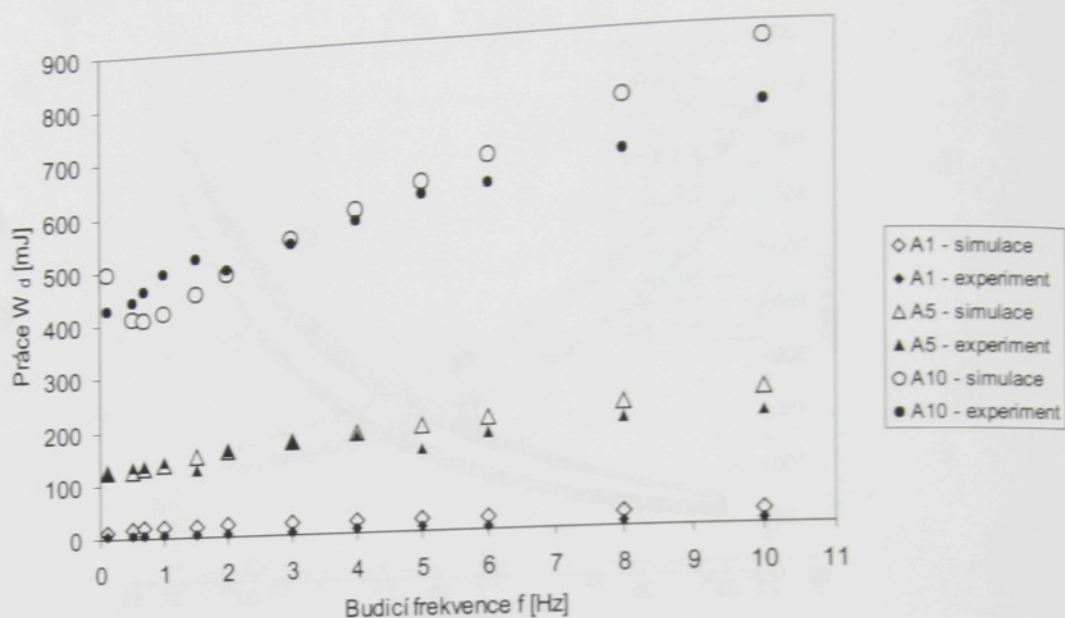
Obrázek 4.27: Simulovaná tlumicí síla F_t , $A=5\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=30\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.31 na str. 34)



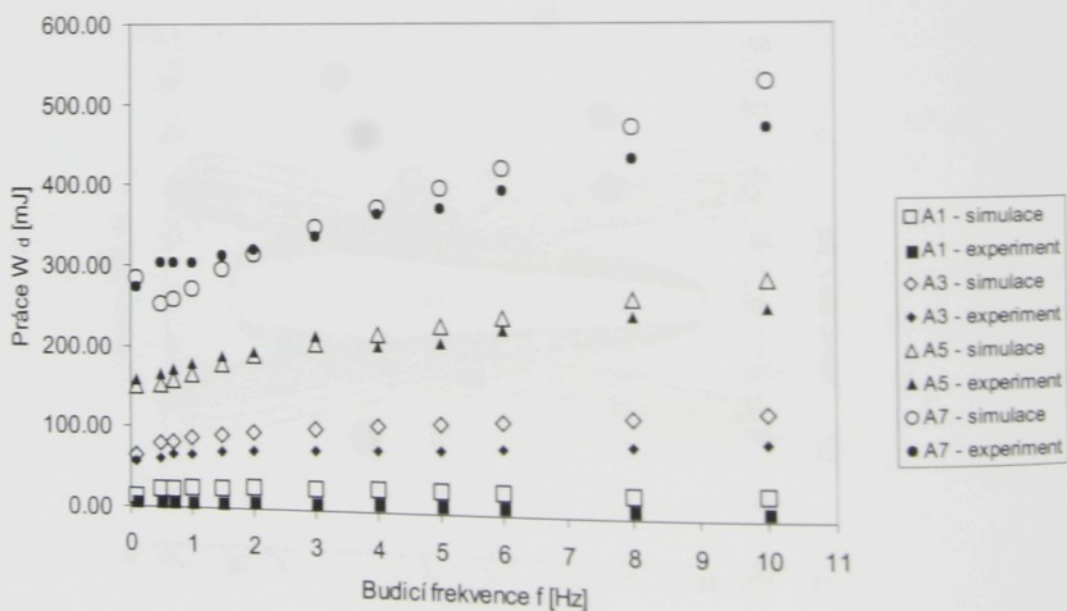
Obrázek 4.28: Simulovaná celková síla F , $A=7\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=30\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.32 na str. 35)



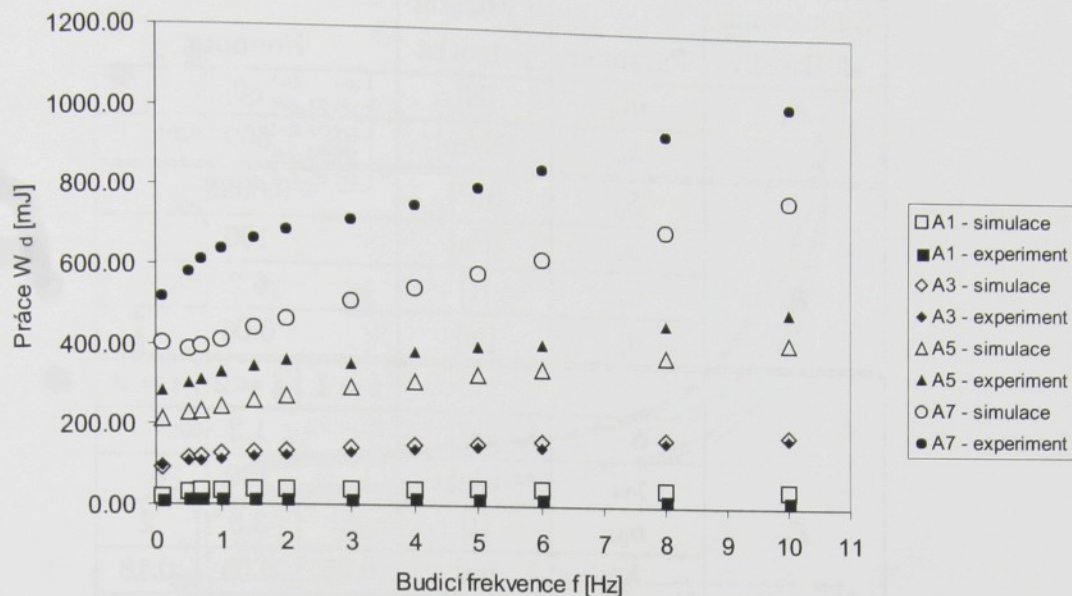
Obrázek 4.29: Simulovaná tlumicí síla F_t , $A=7\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=30\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.33 na str. 35)



Obrázek 4.30: Práce simulované a experimentálně zjištěné tlumicí síly W_d v závislosti na frekvenci budícího signálu f ; $A=(1, 5, 10)$ mm, $A_0=20$ mm



Obrázek 4.31: Práce simulované a experimentálně zjištěné tlumicí síly W_d v závislosti na frekvenci budícího signálu f ; $A=(1, 3, 5, 7)$ mm, $A_0=25$ mm



Obrázek 4.32: Práce simulované a experimentálně zjištěné tlumicí síly W_d v závislosti na frekvenci budicího signálu f ; $A=(1, 3, 5, 7)$ mm, $A_0=30$ mm

4.3.2 Odezva na trojúhelníkové buzení - speciální naladění modelu

V této části verifikace byl model zatěžován trojúhelníkovým budícím signálem 1.8 se střední hodnotou a amplitudou $A_0 = A = 19.5$ mm a frekvencích udaných v tab. 1.6. Model byl naladěn takovým způsobem, aby dal co nejlepší výsledky při těchto extrémních podmínkách, tedy téměř 80% relativní deformaci a více než 120 násobnou změnu budicí frekvence (od 0.01 Hz do 1.26 Hz). Není již zkoumáno, jak model vyhovuje při jiných amplitudách a středních hodnotách, proto je toto nastavení modelu, jehož konstanty jsou uvedeny v tab. 4.2, nazváno speciální.

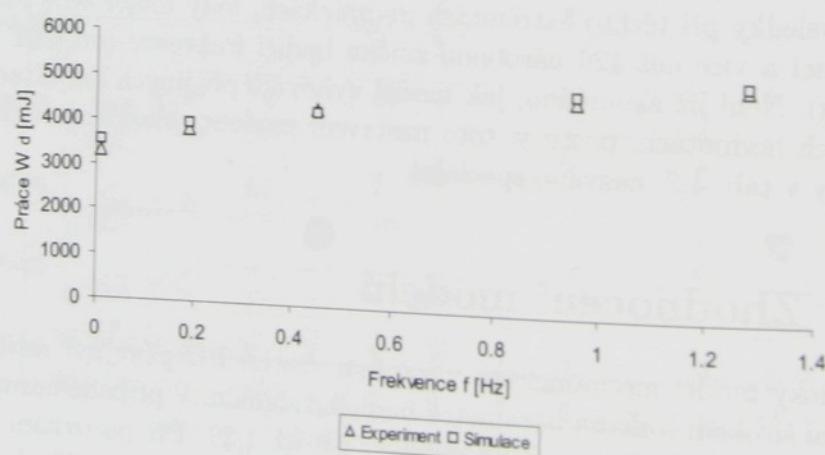
4.4 Zhodnocení modelu

Reologický model mechanických vlastností vzorku PU pěny byl verifikován na velmi širokém rozsahu parametrů budicího signálu. V případě harmonické excitace jsou výsledky uvedeny na obr. 4.8 až 4.29. Při porovnání s průběhy síly získanými experimentálně (obr. 1.12 až 1.33 na str. 25 až 35) lze konstatovat, že model respektuje chování PU pěny v mnoha ohledech:

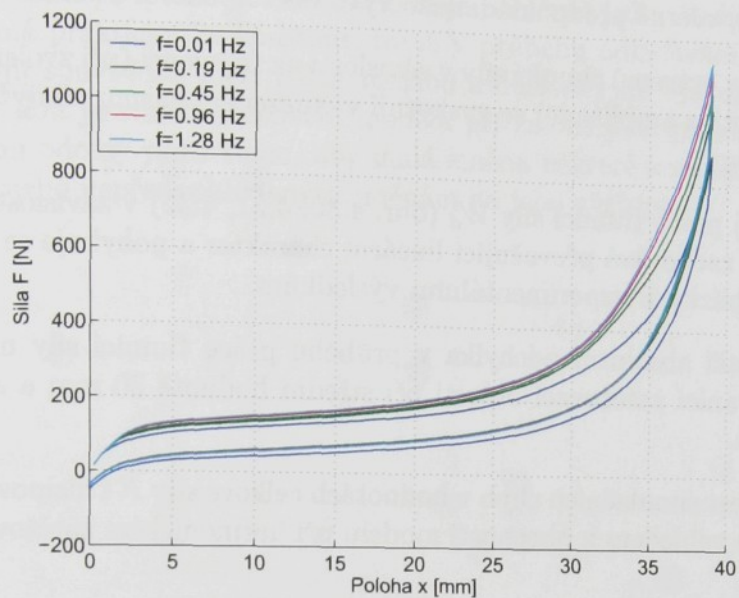
- Dodržuje charakteristické napřimování hysterezních smyček s rostoucí frekvencí.

Simulovaná složka síly	Parametr	Fyzikální jednotka	Hodnota		
F_u	m_u	[N]	80		
	k_u	[N/m]	600		
F_p	S_p	[m ²]	0.0095		
	p_p	[Pa]	100		
	n_p	[1]	6.2		
	h_p	[m]	0.06		
F_{ti}			$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
	S_{0i}	[m ²]	1.2		
	p_{0i}	[Pa]	100		
	n_{0i}	[1]	3	3.5	2
	h_i	[m]	0.05	0.05	0.18
	c_i	[kg/s]	50	300	300
	n_i	[1]	1/5	1/5	1/3
F_T	f_{T0}	[1]	0.05		
	k_1	[s/m]	5000		
	k_2	[kg/s]	0.2		
	k_3	[kg/s]	1		

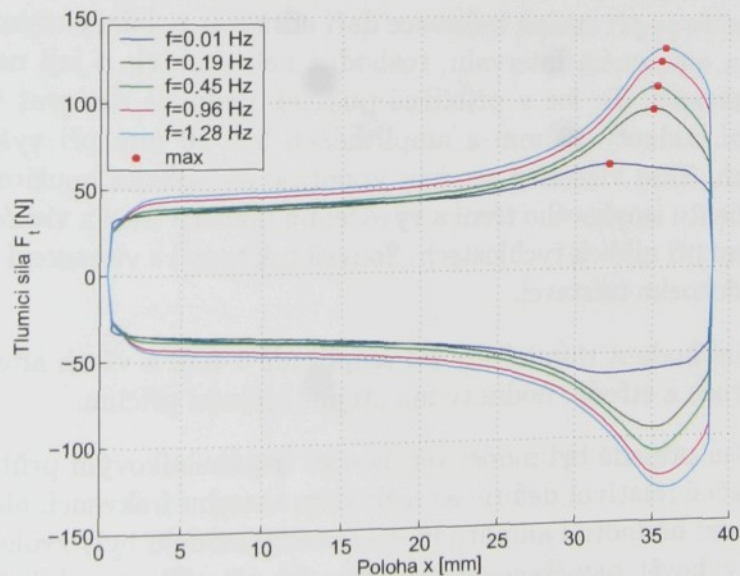
Tabulka 4.2: Parametry modelu PU pěny pro simulaci odezvy na trojúhelníkový signál



Obrázek 4.33: Porovnání práce naměřené a simulované tlumicí síly W_d v závislosti na frekvenci budícího signálu f ; $A=19.5\text{mm}$, $f=(0.01\div 1.28)\text{Hz}$, $A_0=19.5\text{mm}$



Obrázek 4.34: Simulovaná celková síla F , $A=19.5\text{mm}$, $f=(0.01\div 1.28)\text{Hz}$, $A_0=19.5\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.36 na str. 39)



Obrázek 4.35: Simulovaná tlumicí síla F_t , $A=19.5\text{mm}$, $f=(0.01\div 1.28)\text{Hz}$, $A_0=19.5\text{mm}$ (porovnej s obr. 1.37 na str. 39)

- Respektuje hruškovitý tvar průběhu tlumicí síly F_t v závislosti na poloze x , včetně předpokládaného vývoje s rostoucí frekvencí.
- Polohy extrémů tlumicí síly v závislosti na frekvenci (při zvolené střední hodnotě a amplitudě) se vyskytují v omezeném pásmu, ikdyž poměrně širokém.
- Vývoj práce tlumicí síly W_d (obr. 4.30, 4.31, 4.32) v závislosti na frekvenci zachovává převažující lineární charakter a pohybuje se v hodnotách blízkých experimentálním výsledkům.
- Největší absolutní odchylka v průběhu práce tlumicí síly nastává až na hranici zatěžovací oblasti při střední hodnotě 30 mm a amplitudě 7 mm.
- Velikost simulačních chyb v hodnotách celkové síly F i disipované práce W_d je vzhledem k obecnosti modelu při harmonickém zatěžování přijatelná.

Chování modelu se také samozřejmě v některých momentech od skutečnosti odchyluje:

- V důsledku strmého nárůstu koeficientu smykového tření v oblasti malých rychlostí dochází při reverzaci pohybu k neplynulé změně znaménka třecí síly. Projevuje se to více či méně hranatým tvarem hysterezních křivek v úvratích, který neodpovídá pozorování.
- Přesto, že se při změně frekvence daří udržovat polohu extrému tlumicí síly na omezeném intervalu, rozhodně nelze mluvit o její nezávislosti na frekvenci. Tu lze v přibližné podobě ojedinele sledovat v případech střední hodnoty 20 mm a amplitudách 5 a 10 mm při vyšších frekvencích. Tato vlastnost modelu je patrně způsobena použitou definicí koeficientu smykového tření a vyvážením poměru třecí a viskózní složky tlumení při nižších rychlostech. Souvisí tak tedy i s vlastností popsanou v předchozím odstavci.
- Zvýšení hodnot tlumicí síly při amplitudě 1 mm a všech alternativách frekvence a střední hodnoty má zřejmě stejnou příčinu.

V druhém případě byl model verifikován trojúhelníkovým průběhem polohy při značné relativní deformaci a širokém rozsahu frekvencí, ale pro konstantní střední hodnotu i amplitudu. Parametry modelu byly zvoleny s cílem co nejlépe vyhovět naměřenému průběhu síly při nižší variabilitě budicího signálu. Na chování v jiných oblastech zatěžování nebyl brán zřetel. Toto nastavení modelu je tedy označeno jako speciální. Bylo zde dosaženo velmi dobré shody simulace s experimentem, zejména v případě tlumicí síly F_t (viz obr. 4.34 a 4.35), přičemž průběh disipované práce v důsledku tlumení v závislosti na frekvenci se téměř shoduje s naměřenými hodnotami (obr. 4.33).

Kromě uvedených funkčních vlastností má model některé příjemné vlastnosti uživatelské, protože jeho konstrukce je poměrně jednoduchá a čitelná. Přestože má prakticky 24 konstant, lze si v průběhu odlaďování do značné míry osvojit souvislosti mezi jejich změnou a důsledky na výstupu modelu. Další výhodou je stabilita chování modelu při změně jeho parametrů. Model je velmi odolný proti tomu, aby malá změna některé konstanty vedla k zásadním nebo nepředpokládaným změnám na jeho výstupu.

Kapitola 5

Měření na konkrétním sedáku

Výsledné vibroizolační vlastnosti sedáku jsou kromě vlastností základního materiálu, tedy polyuretanu, ovlivňovány dalšími faktory. Těmi jsou tvarování polyuretanového polotovaru, ve kterém jsou ještě umístěny drátové prvky pro uchycení švů polstrování, látka polstrování a její vypnutí, přítomnost a poloha švů a případně také vložená netkaná textilie mezi polyuretanem a polstrováním.

Je patrné, že v důsledku těchto skutečností lze na sedáku rozlišit oblasti s podobnými předpoklady k určitému chování. Rozlišme tedy na sedáku oblasti tvrdé (místa švů a jejich nejbližší okolí), středně tvrdé (stabilizační okraj sedáku) a měkké (středová část sedáku ohraničená švy) viz obr. 5.3.

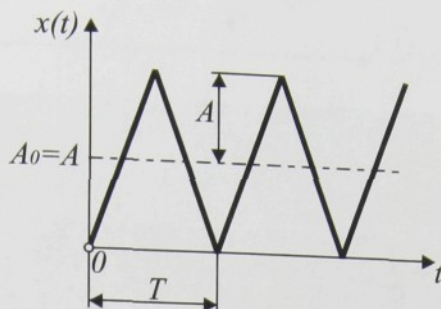
Na sedáku byla měřena silová odezva na trojúhelníkový budicí signál (1.8) v různých místech. Tato místa byla stanovena tak, aby se vyskytovala ve všech třech oblastech v logickém uspořádání. Soustava měřených míst je uvedena na obr. 5.3. Je zde 7 řad označených pořadovým číslem i a 3 sloupce rozlišených číslem j . Označení měřeného místa je potom i - j , takže např. místo v levém horním rohu je označeno 1.1 a v řadě následující 1.2 atd. V soustavě chybí bod 6.1. Blízko tohoto místa je šev zaoblen a zdá se být ještě o něco tužší než okolní body ve švu, což s sebou nese podle názoru autora vyšší riziko nevratného poškození v průběhu měření.

Protože má sedák rovinu symetrie, je předpokládáno, že i jeho vlastnosti jsou symetrické podle této roviny. Proto byla proměřena jen jeho polovina.

5.1 Uspořádání experimentu

Proměřován byl sedák s textilním potahem. Uspořádání experimentu je uvedeno na obr. 5.2. Sedák lze vůči měřicímu hrotu posouvat ve vodorovné rovině a ustavit ho tak, aby hrot byl se sedákem v kontaktu právě ve zvoleném bodě i - j .

V tvrdé oblasti sedáku bylo měřeno signály (1.8) s amplitudou $A = 5$ mm při frekvencích $f \in \{0.25, 2.5\}$ Hz. V měkké a středně tvrdé oblasti navíc ještě s amplitudou $A = 12.5$ mm při frekvencích $f \in \{0.1, 1, 2, 3\}$ Hz. Trojúhel-



Obrázek 5.1: Trojúhelníkový budicí signál

níkový signál má při amplitudě $A = 5 \text{ mm}$ a frekvenci $f = 0.25 \text{ Hz}$, resp. $f = 2.5 \text{ Hz}$, stejnou rychlost $\dot{x}$ jako při amplitudě $A = 12.5 \text{ mm}$ a frekvenci $f = 0.1 \text{ Hz}$, resp. $f = 1 \text{ Hz}$. Je to z toho důvodu, aby bylo možno pozorovat vliv změny amplitudy při stejné rychlosti na průběh měřené síly F . Signály s většími amplitudami než 5 mm nebyly v tvrdé oblasti sedáku používány, neboť by jejich užití mohlo vést k trvalému poškození sedáku. Navíc předpoklad takových deformací v běžném provozu zřejmě není opodstatněný.

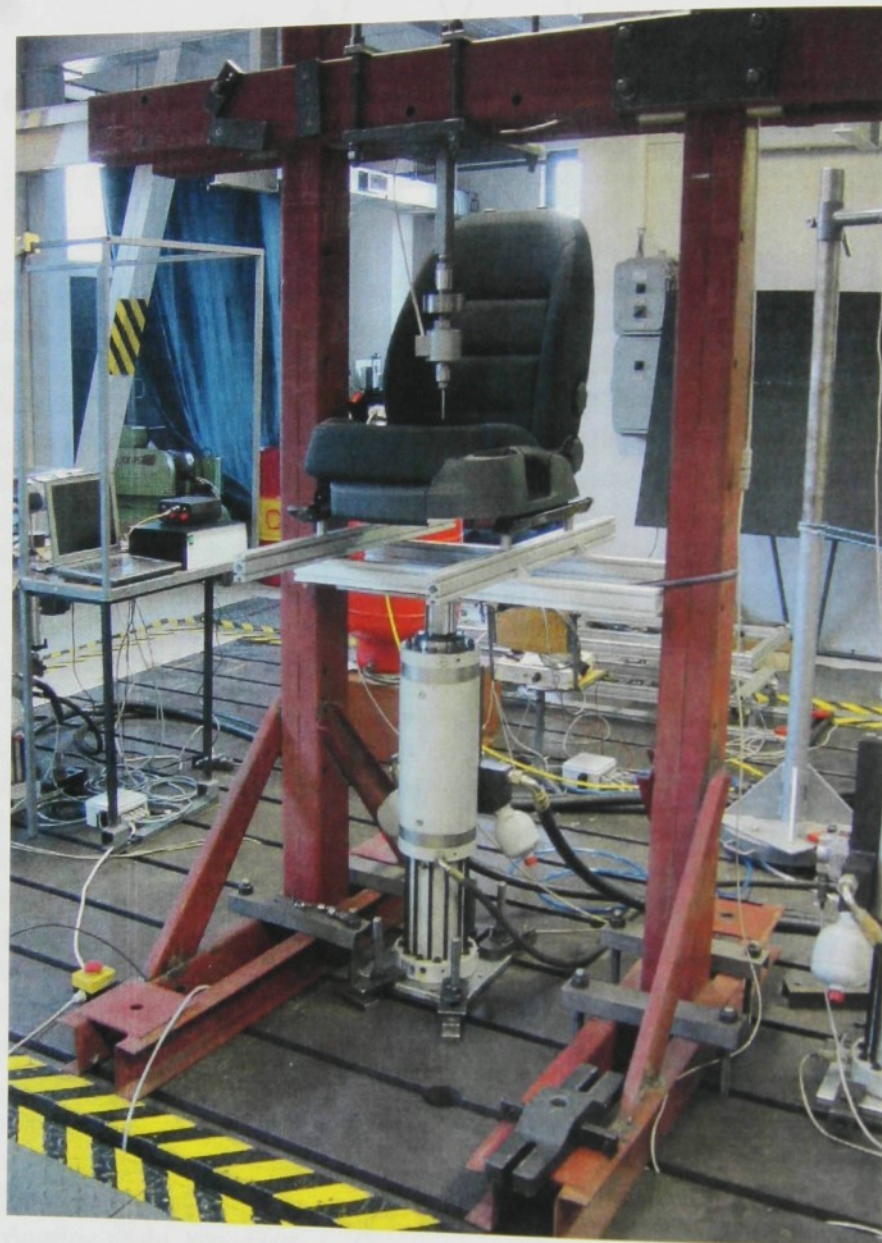
K měření síly byl použit snímač Rukov HP 21, 2.2 kN , výr. číslo 04384 se jmenovitým zesílením 500 a vstupním napětím $\pm 10 \text{ V}$. Převodní konstanta snímače je potom 28.779 N/V .

5.1.1 Měřicí hrot

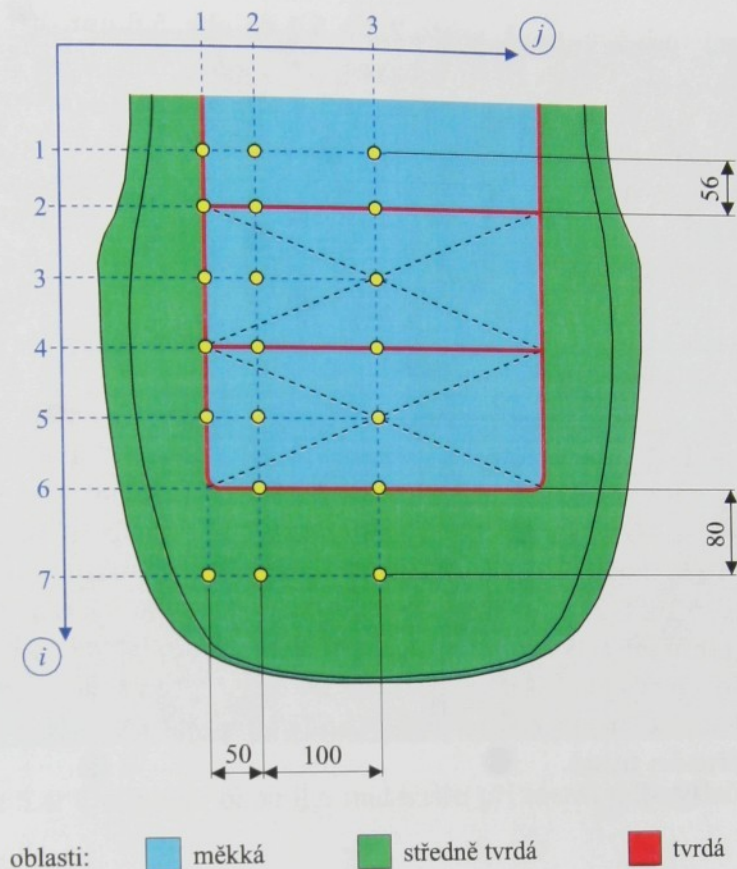
Závažným rozhodnutím v tomto experimentu byla volba měřicího hrotu.

První otázkou je velikost kontaktní plochy mezi snímačem a sedákem. Při vtlačování sondy do sedáku ovlivňuje měřenou sílu nejen materiál pod sondou, ale i jeho okolí, jak je vidět z obr. 5.4 a 5.5. Napjatost v sedáku je totiž v tomto případě víceosá. Přilehlý materiál je také stlačován deformujícím se čalouněním. Naměřená hodnota síly je tedy složena nejen ze síly vratné a tlumicí v daném bodě, ale i ze silových účinků popsanych vlivů.

Pokud bude plocha snímače velká, bude větší i měřená hodnota síly při daném stlačení, než při malé ploše. To má příznivý vliv na přesnost měřené veličiny, protože je využívána větší část rozsahu snímače. Nepříznivé je ale rozsáhlé ovlivnění okolí způsobené zejména deformací čalounění, které zapojuje do procesu stlačování značnou část sedáku. Plocha sedáku není vodorovná a v různých místech má různý sklon. Při velké ploše snímače by se postupně s rostoucím vtlačováním zvětšovala i kontaktní plocha. To je jev naprosto nežádoucí, neboť velikost styčné plochy přímo ovlivňuje měřenou sílu. Důležitým požadavkem tedy je, aby styčná plocha mezi snímačem a sedákem zůstala během vtlačování pokud možno konstantní. To lze zajistit tak, že rozměr měřicího hrotu bude co nejmenší. Malá plocha znamená malou měřenou sílu. Ta tedy nesmí být ale příliš malá s ohledem na rozsah snímače. Proto byl zvolen měřicí hrot s kruhovým průřezem o jmenovitém



Obrázek 5.2: Uspořádání experimentu



Obrázek 5.3: Rozmístění měřicích míst na sedáku

průměru 5 mm (skutečný průměr snímače je 4.97 mm a plocha čela tedy $S = \pi \frac{4.97^2}{4} = 19.4 \text{ mm}^2$). Měřené síly se potom pohybují v intervalu (0 až 60) N.

Další otázkou je tvar plochy hrotu. Nabízejí se varianty např. kulová nebo úsečová. Ty ale nesplňují požadavek neměnnosti styčné plochy v závislosti na vtlačení. Proto byla zvolena plocha vodorovná. Ostrá hrana válce byla mírně zabroušena, aby nepoškozovala namáhané čalounění.

5.1.2 Kontakt mezi sedákem a snímačem

Za dosažení kontaktu mezi hrotem snímače a sedákem v počátku měření byla považována naměřená síla přibližně mezi 0.4 N až 0.6 N. V takovém okamžiku byla vynulována hodnota polohové souřadnice x . Je zřejmé, že to neznamená, že se hrot bude dotýkat sedáku celou svou čelní plochou. Díky tomu, že je hrot malý, však nedokonalý kontakt s narůstajícím vtlačením vymizí. Jak rychle, záleží na sklonu plochy sedáku v měřeném místě. Situace je příznivější v bodech, kde sedák svírá s vodorovnou rovinou čela hrotu malý úhel, např. místo 3_3 na obr. 5.6 nahoře. Méně příznivé případy nastanou v

zejména v místech švů, např. místo 2.3 a 5.1 na obr. 5.6 uprostřed a dole.

Další skutečností je, že při intenzivnějším zatěžování sedáku hrotem snímače dochází v měřeném místě k deformaci, která se z hlediska krátkodobého měření jeví jako trvalá. Zda-li jde skutečně o trvalou deformaci, nebo spíše efekt dopružení s dlouhou časovou konstantou nebylo zjišťováno a pro potřeby tohoto experimentu to není důležité. Velikost této deformace se při popsaném zatěžování pohybuje přibližně v hodnotách 1 mm až 3 mm a je důvodem nulové naměřené síly v polohách blízkých nule, neboť snímač v tomto intervalu ztrácí se sedákem kontakt. Mezi jednotlivými měřeními bylo toto protlačení jednoduše zahlazeno rukou.

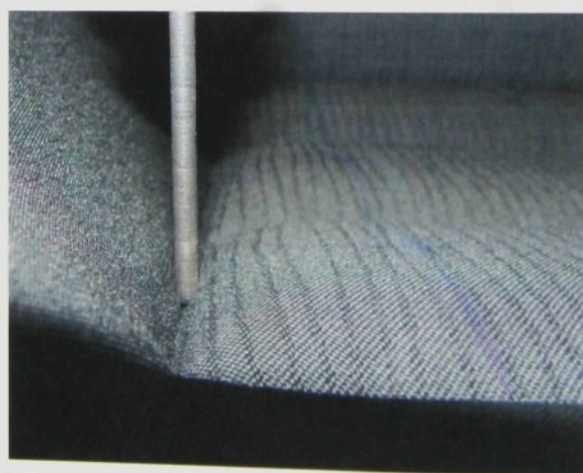
Dalším jevem, je dočasná ztráta kontaktu při změně směru pohybu v okamžiku maximálního stlačení při velkých frekvencích. Kinematicky buzený hrot snímače vyjíždí z deformovaného sedáku vysokou rychlostí a účinek síly vratné není dostatečný na urychlení hmoty sedáku při návratu do původního tvaru. Proto zde dochází k dočasnému odlehnutí. To je dobře vidět zejména na obr. 5.15, 5.16, 5.22 jako zvlnění ve spodním průběhu hysterezní smyčky. Lze říci, že tento jev se vyskytoval pouze v některých místech měkkých částí sedáku při frekvencích 2 a 3 Hz. Určujícím faktorem pro vznik je rychlost snímače a výsledná kombinace síly vratné, tlumicí a úbytku síly vlivem relaxace napětí v měřeném místě.



Obrázek 5.4: Ovlivnění okolního materiálu při menší míře vtlačení hrotu



Obrázek 5.5: Ovlivnění okolního materiálu při větší míře vtlačení hrotu



Obrázek 5.6: Nalezení kontaktu pro stanovení nulové polohy. Nahoře: místo 3.3, uprostřed: místo 2.3, dole: místo 5.1

5.2 Naměřené výsledky

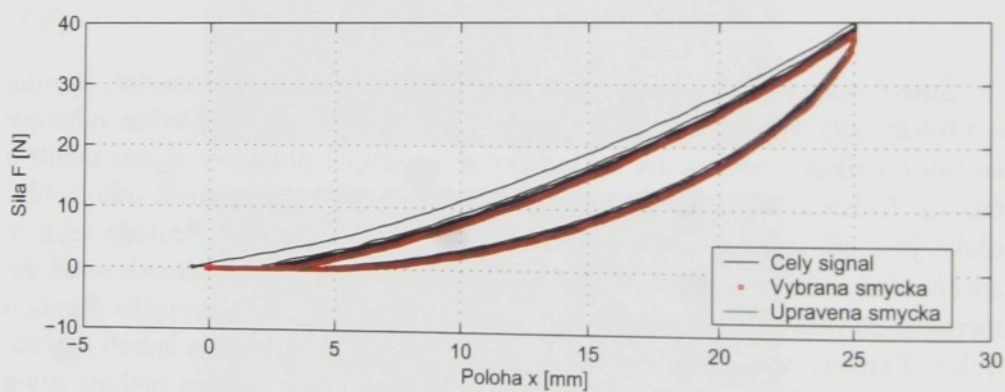
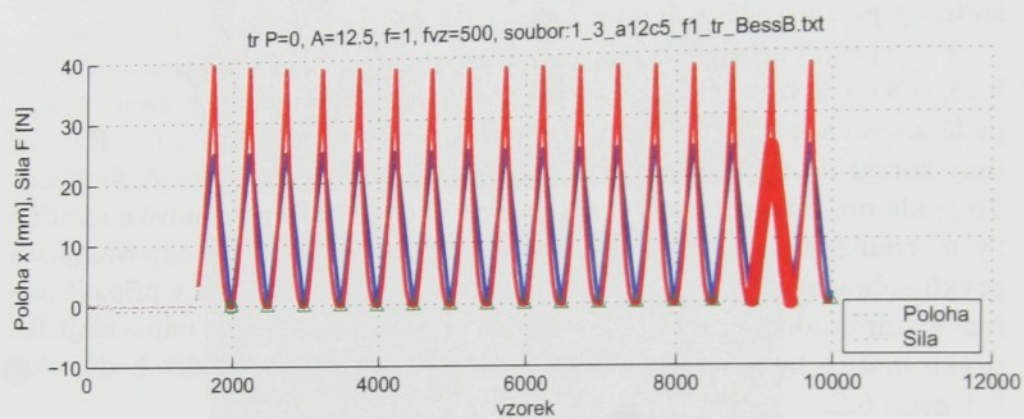
Na obrázcích 5.8 až 5.27 jsou uvedeny grafy naměřené síly F v jednotlivých místech sedáku pro dané amplitudy a frekvence. Z nich je možno posoudit vlastnosti sedáku způsobené tuhostí a tlumením materiálu. K posouzení velikosti tuhosti v daném místě bylo zvoleno jednoduché kritérium - maximální hodnota síly F_{max} dosažená během periody zvolené pro zpracování. Výsledné hodnoty jsou uspořádány do tab. 5.1 a 5.2 pro popsané zatěžující signály.

K vyjádření tlumení v daném místě slouží velikost práce W_d vykonané tlumicí silou během jedné periody. W_d je definována vztahem (5.1). Výsledné hodnoty jsou uspořádány do tab. 5.3 a 5.4 pro popsané zatěžující signály.

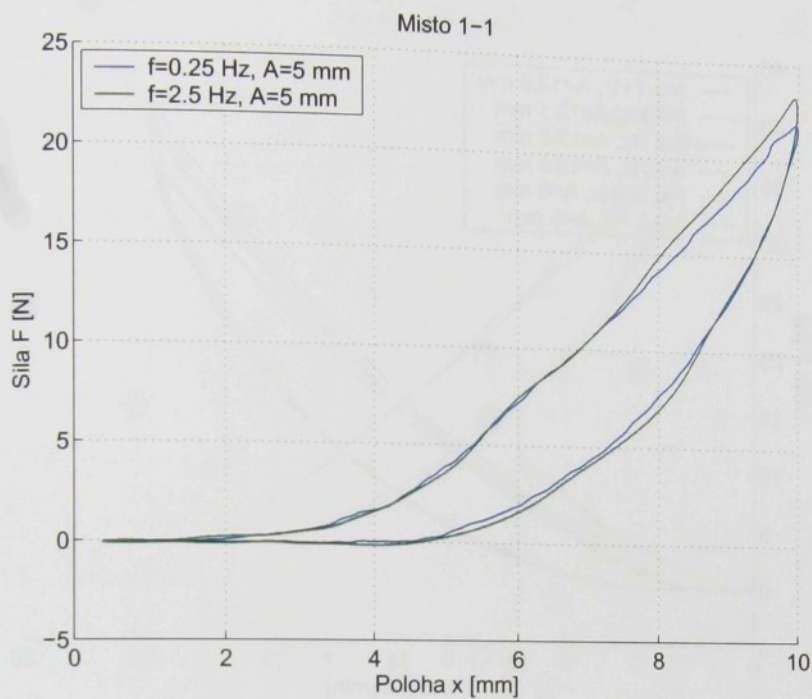
Pro lepší představu výsledků uvedených v těchto tabulkách jsou na obr. 5.28, 5.29, 5.30 a 5.32 jejich grafické podoby v interpolovaném zobrazení. V případě amplitudy 12.5 mm nebyly proměřovány body 1_1, 1_3 a 1_5. Bylo by tedy korektní pro jejich zobrazení užít hodnoty NaN (tedy Not A Number). To je ale pro interpolovaný graf s malým počtem bodů nepříznivé a narušilo by to zmíněný účel grafů - lepší přehlednost. Proto byla do odpovídajících prvků zobrazované matice dosazena hodnota 0. Naproti tomu v případě měření s amplitudou 5 mm nebylo měřeno pouze místo 6_1 a do odpovídajícího prvku matice byla dosazena hodnota vyšší z hodnot sousedních bodů, tedy 5_1 nebo 6_2.

$$W_d = \oint F(x) dx. \quad (5.1)$$

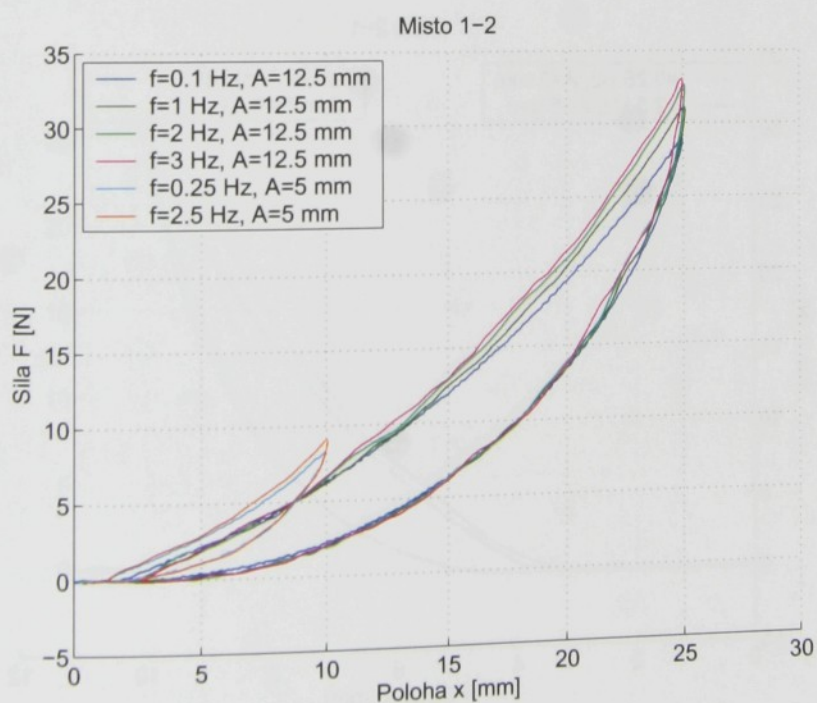
Silová odezva na polohový budicí signál je složena ze síly vratné, tlumicí a úbytku síly vlivem relaxace napětí. To znamená, že v důsledku relaxace se bude celková odezva na periodicky se opakující polohový signál měnit s časem. Relaxační jev je nejvýznamnější v počátku zatěžování. Z tohoto hlediska je lepší spustit měření po odeznění relaxačního děje. Protože však je zatěžování sedáku v některých případech velmi razantní (např. opakovaná deformace 25 mm při frekvenci 3 Hz), není dobré ho aplikovat po příliš dlouhou dobu. Periody vybrané pro zpracování tedy pocházejí spíše z konců zatěžovacích intervalů, kdy relaxační děj již příliš neovlivňuje velikost měřené síly a zároveň je délka zatěžovacího intervalu volena co nejkratší. Výběr periody z naměřených dat, která je vhodná ke zpracování je dokumentován na obr. 5.7. Zde je také dobře vidět vliv relaxace na velikost síly v horní části obrázku jako pokles její maximální hodnoty s časem (vybraná perioda je označena silně červeně). V dolní části obrázku jako posun hysterezní smyčky v souřadném dolů ve svislé směru.



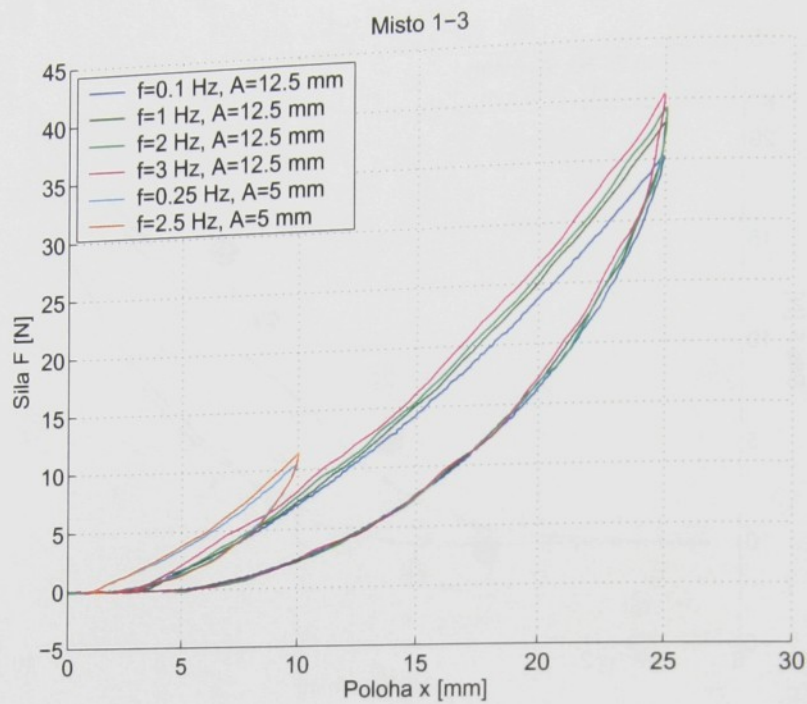
Obrázek 5.7: Výběr periody pro další zpracování



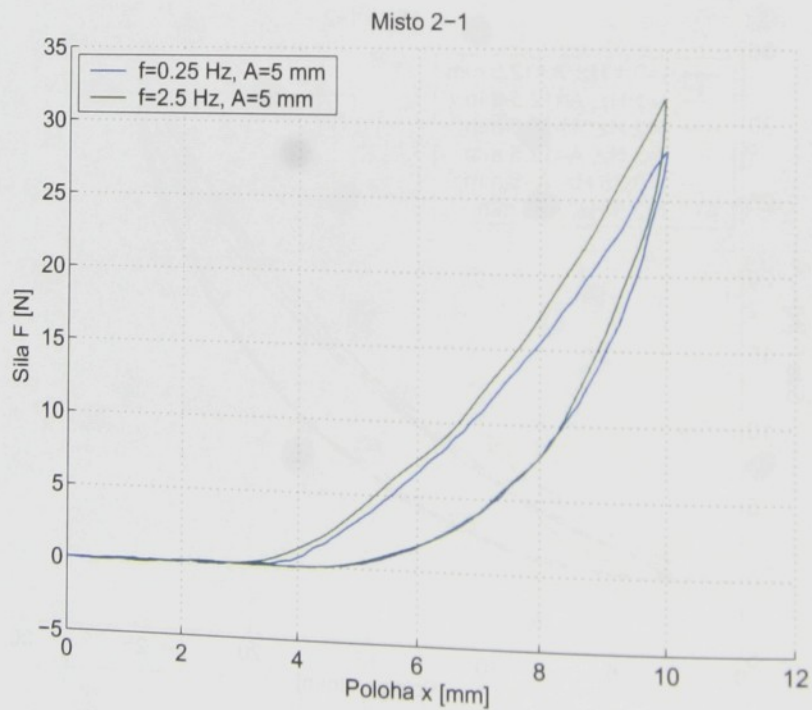
Obrázek 5.8: Silová odezva při polohovém buzení v místě 1.1



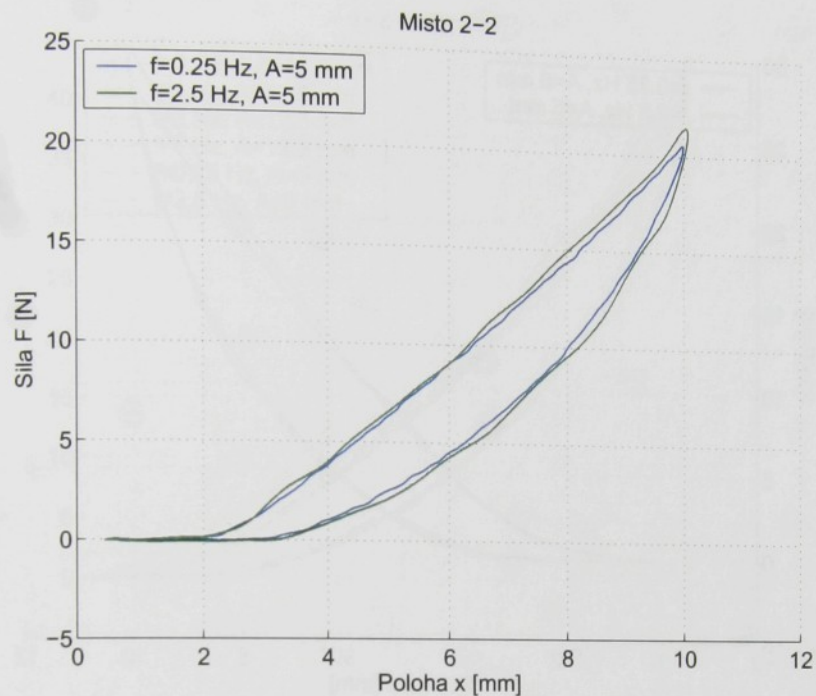
Obrázek 5.9: Silová odezva při polohovém buzení v místě 1.2



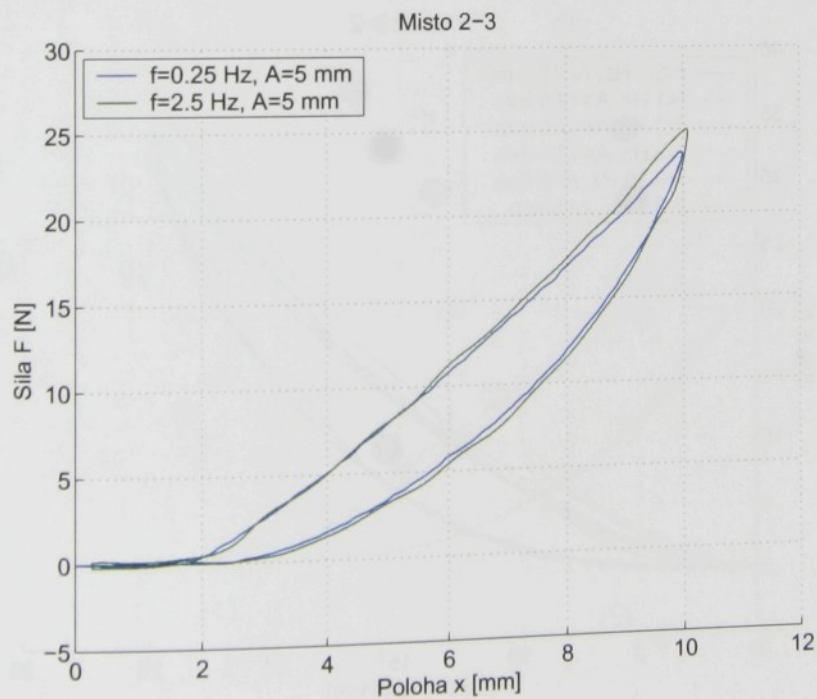
Obrázek 5.10: Silová odezva při polohovém buzení v místě 1_3



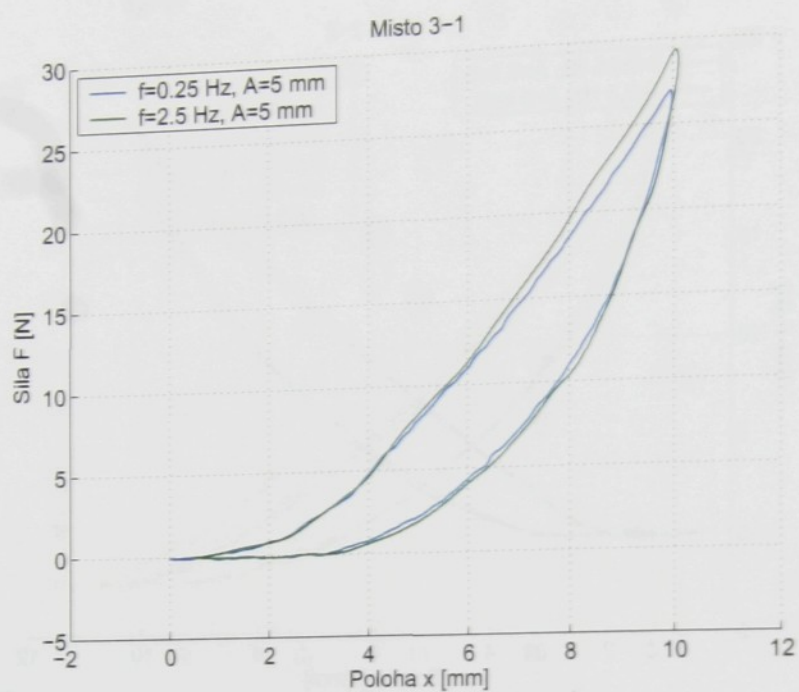
Obrázek 5.11: Silová odezva při polohovém buzení v místě 2_1



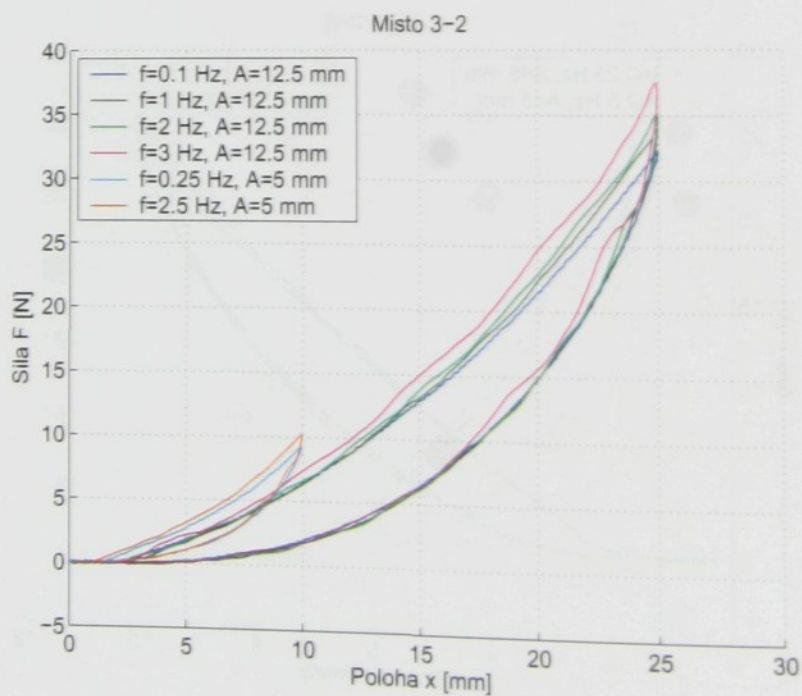
Obrázek 5.12: Silová odezva při polohovém buzení v místě 2.2



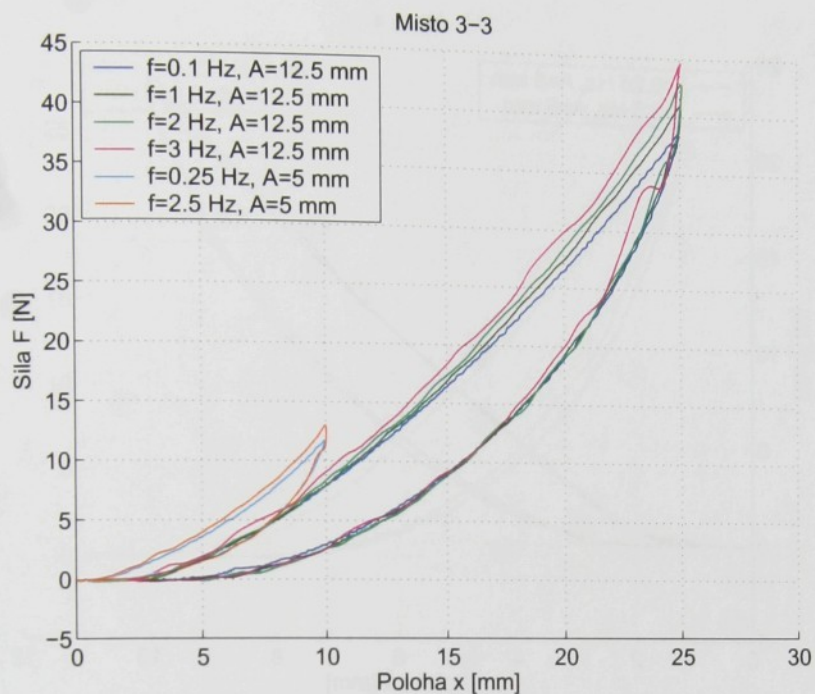
Obrázek 5.13: Silová odezva při polohovém buzení v místě 2.3



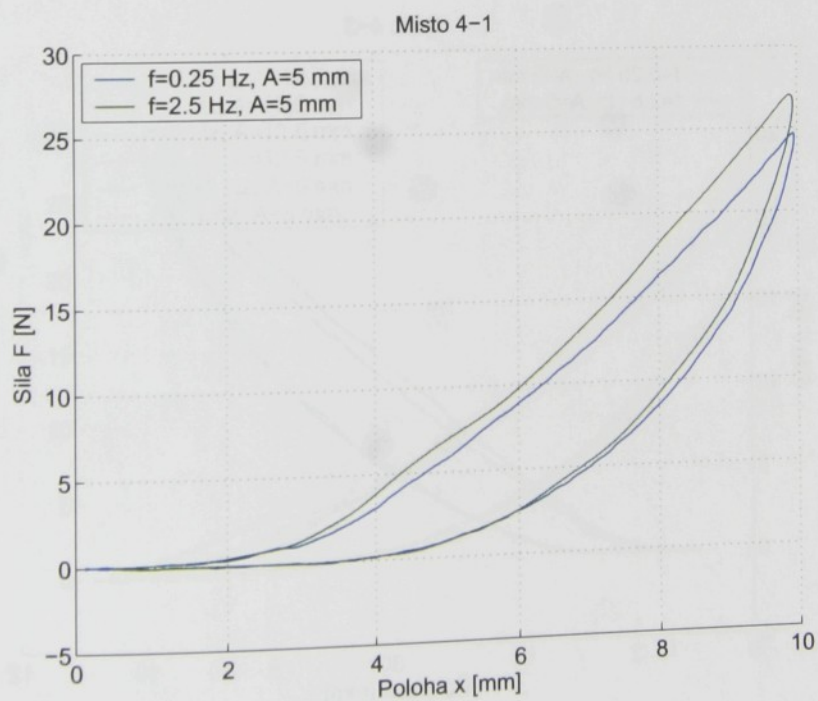
Obrázek 5.14: Silová odezva při polohovém buzení v místě 3-1



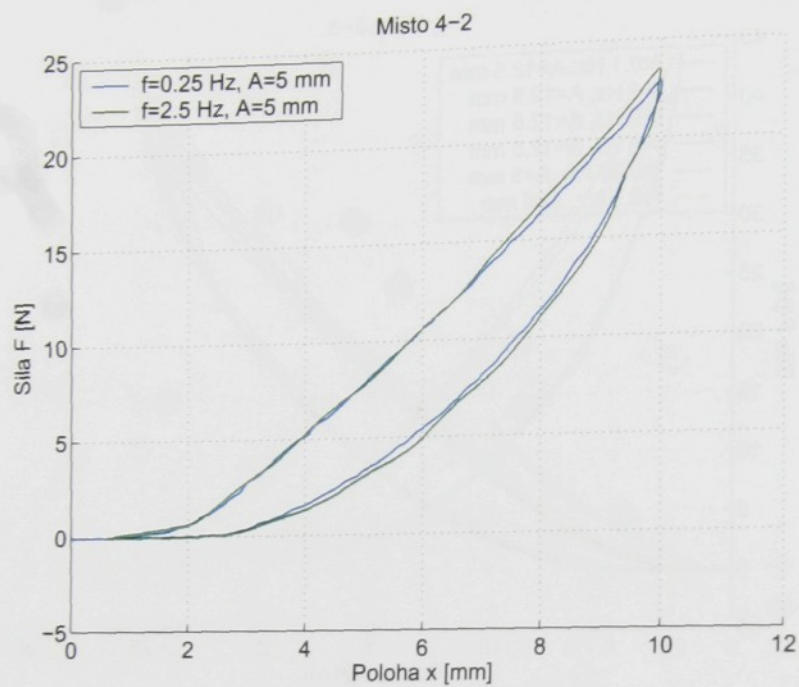
Obrázek 5.15: Silová odezva při polohovém buzení v místě 3-2



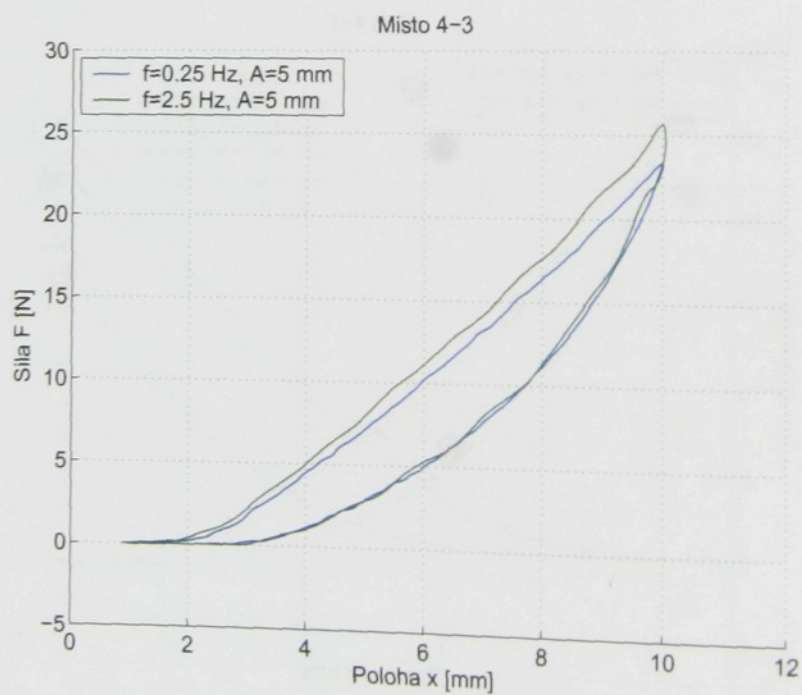
Obrázek 5.16: Silová odezva při polohovém buzení v místě 3.3



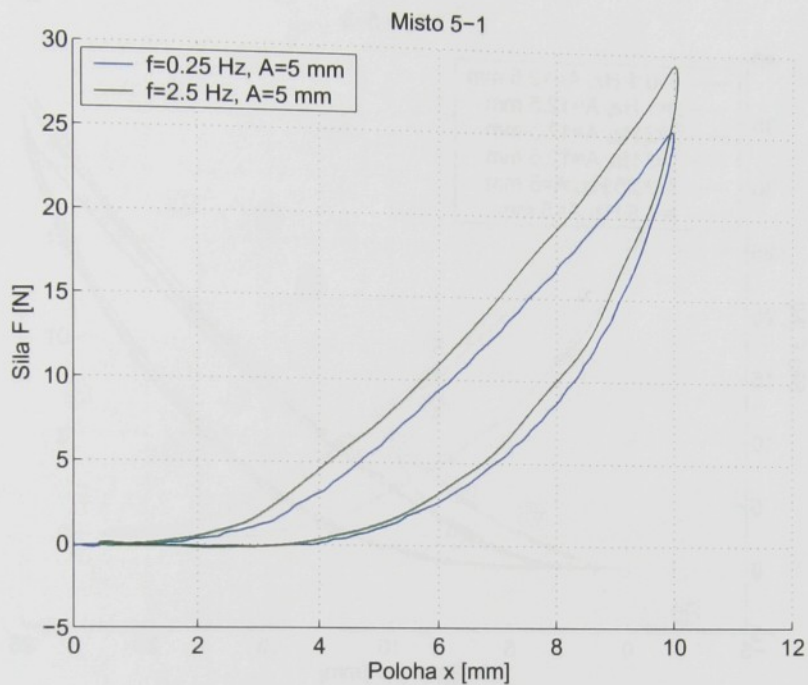
Obrázek 5.17: Silová odezva při polohovém buzení v místě 4.1



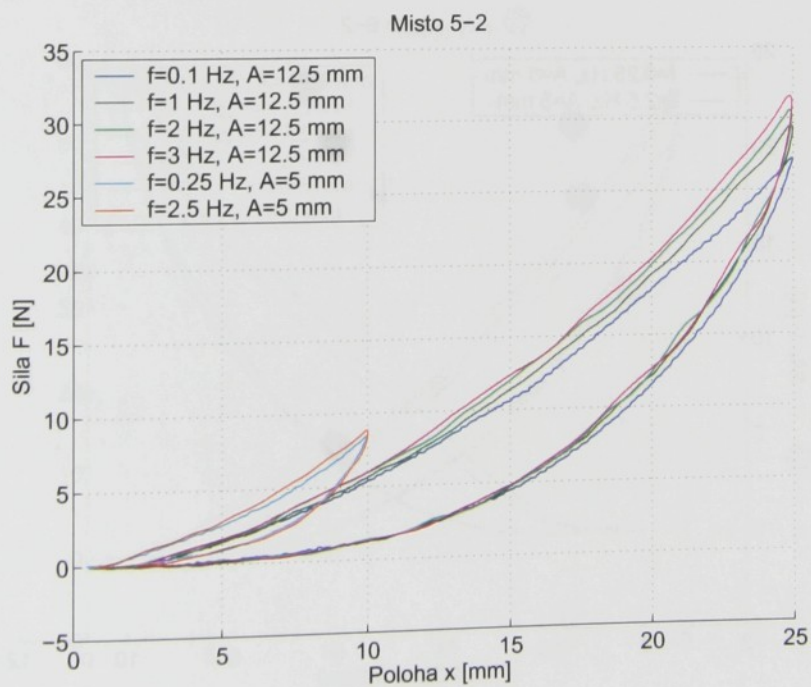
Obrázek 5.18: Silová odezva při polohovém buzení v místě 4.2



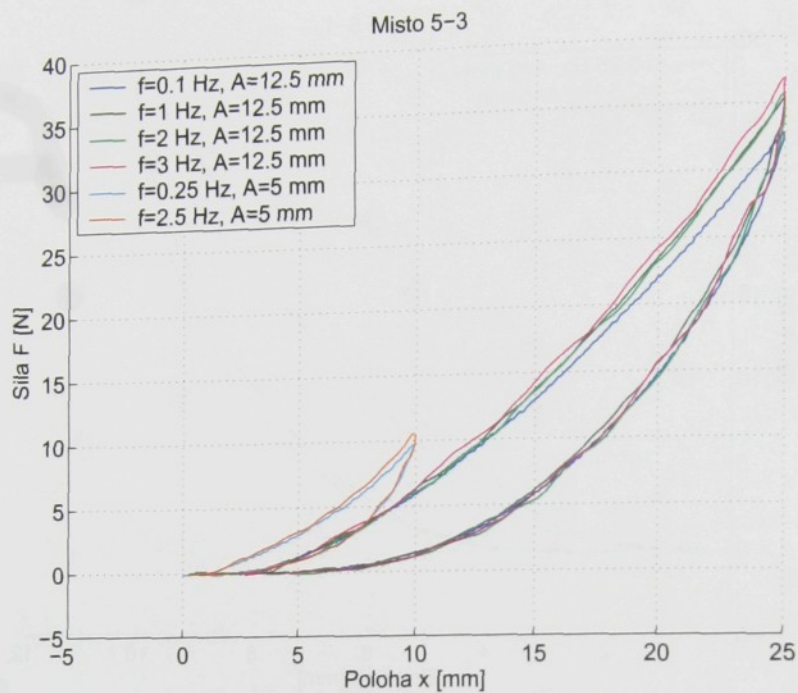
Obrázek 5.19: Silová odezva při polohovém buzení v místě 4.3



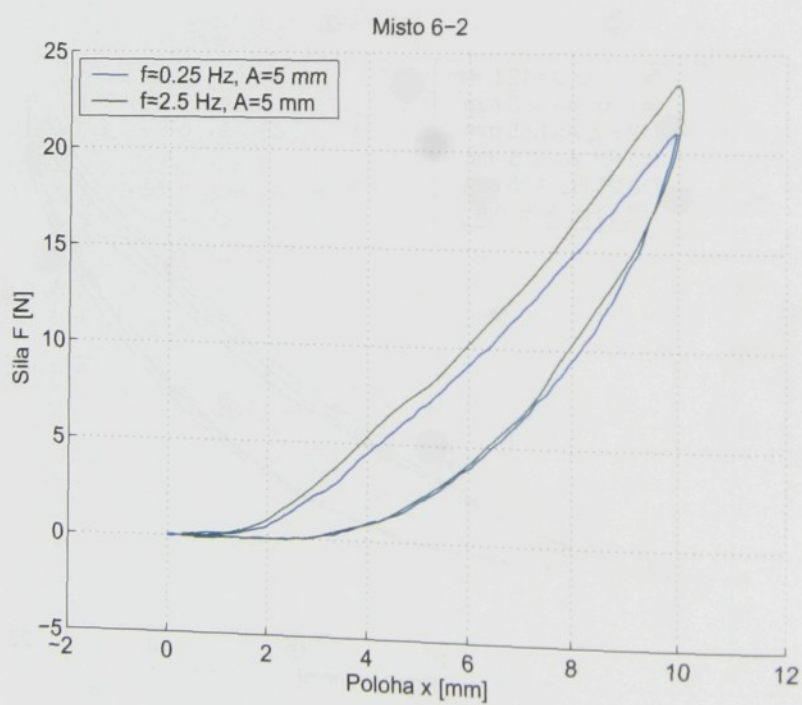
Obrázek 5.20: Silová odezva při polohovém buzení v místě 5_1



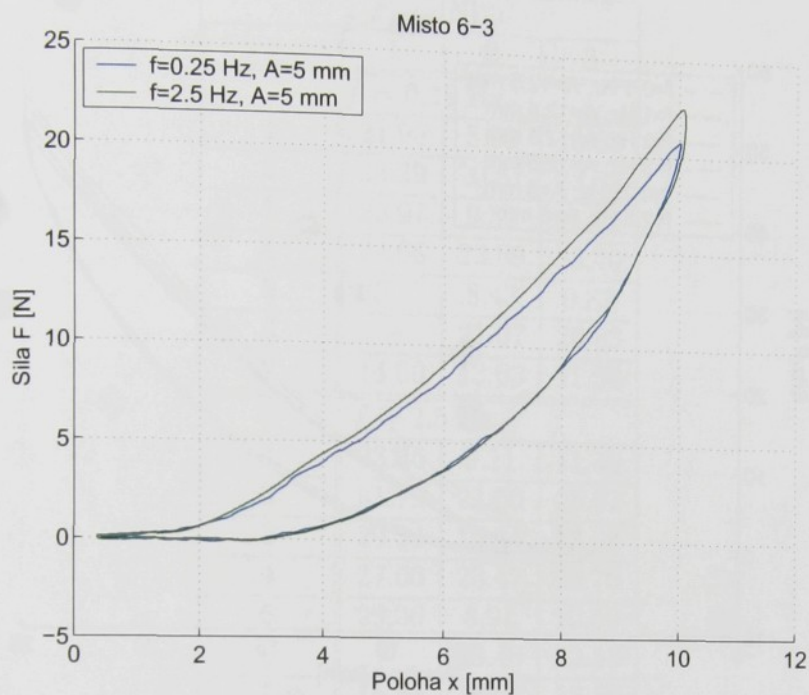
Obrázek 5.21: Silová odezva při polohovém buzení v místě 5_2



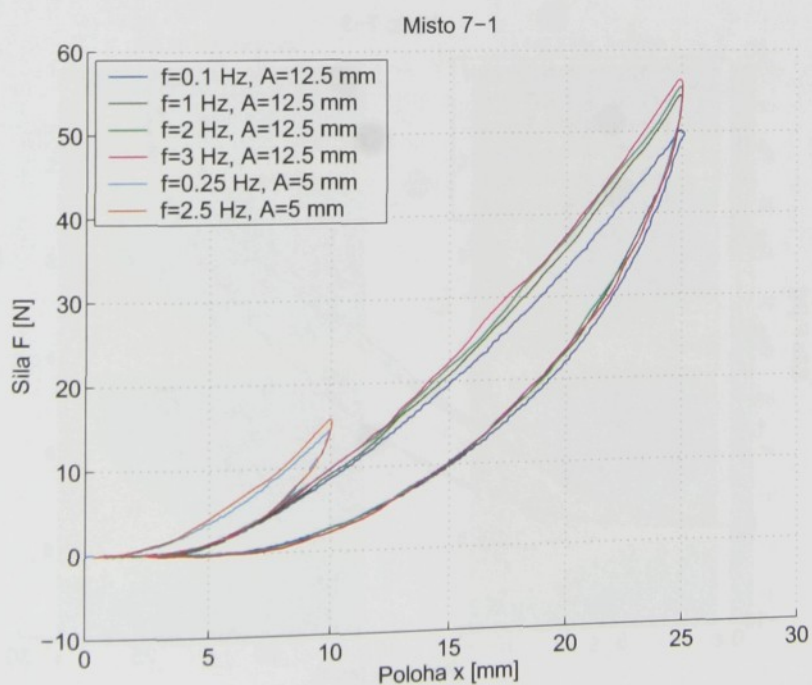
Obrázek 5.22: Silová odezva při polohovém buzení v místě 5_3



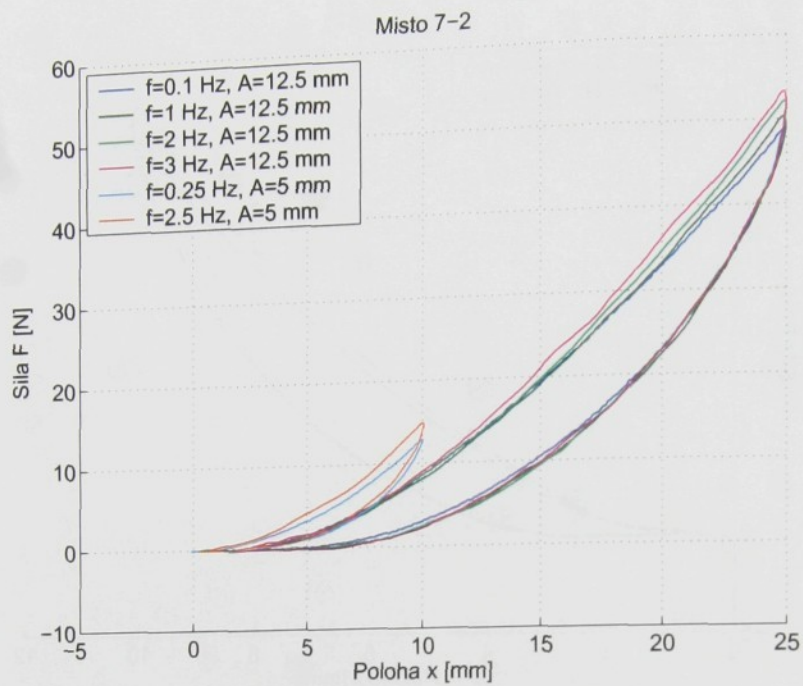
Obrázek 5.23: Silová odezva při polohovém buzení v místě 6_2



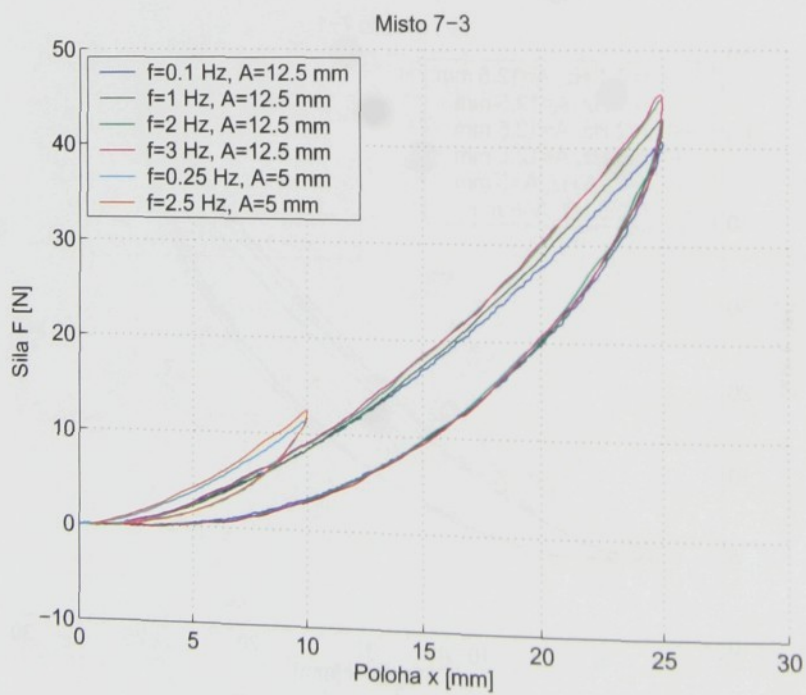
Obrázek 5.24: Silová odezva při polohovém buzení v místě 6.3



Obrázek 5.25: Silová odezva při polohovém buzení v místě 7.1



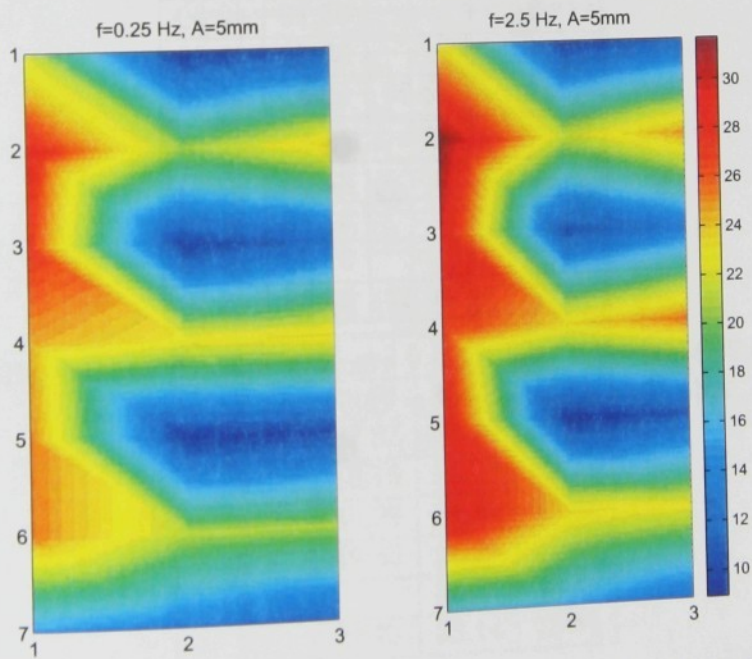
Obrázek 5.26: Silová odezva při polohovém buzení v místě 7_2



Obrázek 5.27: Silová odezva při polohovém buzení v místě 7_3

F_{max} [N]			
$\downarrow i, j \rightarrow$	1	2	3
$f = 0.25$ Hz			
1	21.95	8.25	10.62
2	28.29	20.61	23.65
3	26.97	9.30	11.85
4	24.68	22.89	23.40
5	25.37	8.43	9.82
6	-	21.07	20.83
7	14.50	13.03	11.54
$f = 2.5$ Hz			
1	23.36	9.11	11.48
2	31.72	21.50	25.01
3	29.34	10.24	13.08
4	27.00	23.47	25.70
5	29.36	8.91	10.59
6	-	23.48	22.58
7	15.84	15.00	12.55

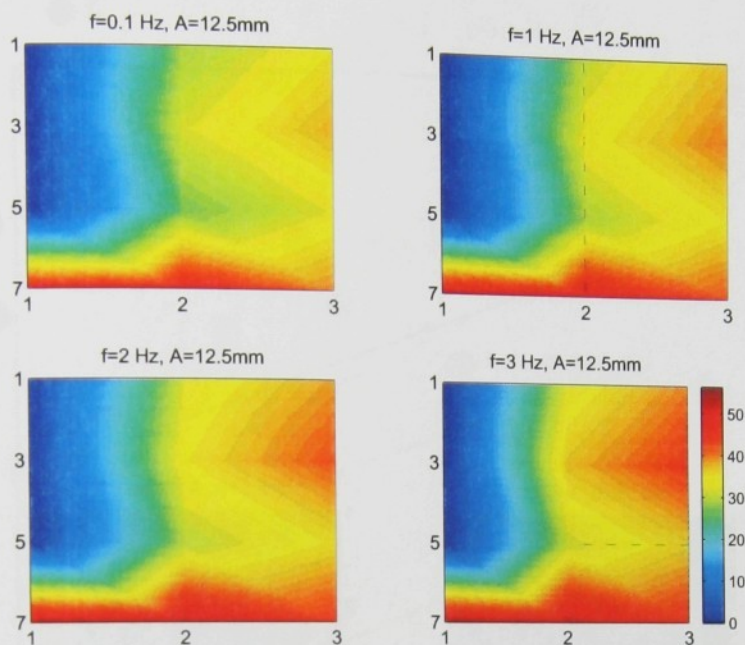
Tabulka 5.1: Maximální síla F_{max} v různých místech sedáku při frekvenci $f \in \{0.25, 2.5\}$ Hz a amplitudě $A = 5$ mm



Obrázek 5.28: Maximální síla F_{max} [N] v různých místech sedáku při frekvenci $f \in \{0.25, 2.5\}$ Hz a amplitudě $A = 5$ mm

F_{max} [N]			
$\downarrow i, j \rightarrow$	1	2	3
$f = 0.1$ Hz			
1	-	28.99	35.27
3	-	32.32	38.72
5	-	27.21	32.85
7	50.11	49.06	40.71
$f = 1$ Hz			
1	-	31.12	38.03
3	-	33.99	40.93
5	-	29.52	35.33
7	54.45	50.39	43.00
$f = 2$ Hz			
1	-	32.66	39.29
3	-	35.19	42.89
5	-	30.59	35.69
7	55.50	52.31	44.99
$f = 3$ Hz			
1	-	33.06	40.43
3	-	37.49	44.65
5	-	31.59	36.89
7	56.41	53.38	45.50

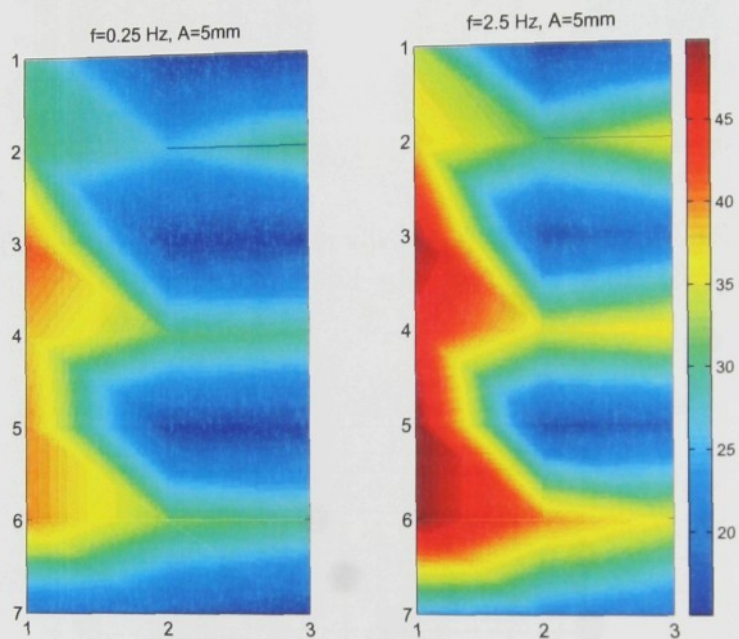
Tabulka 5.2: Maximální síla F_{max} v různých místech sedáku při frekvenci $f \in \{0.1, 1, 2, 3\}$ Hz a amplitudě $A = 12.5$ mm



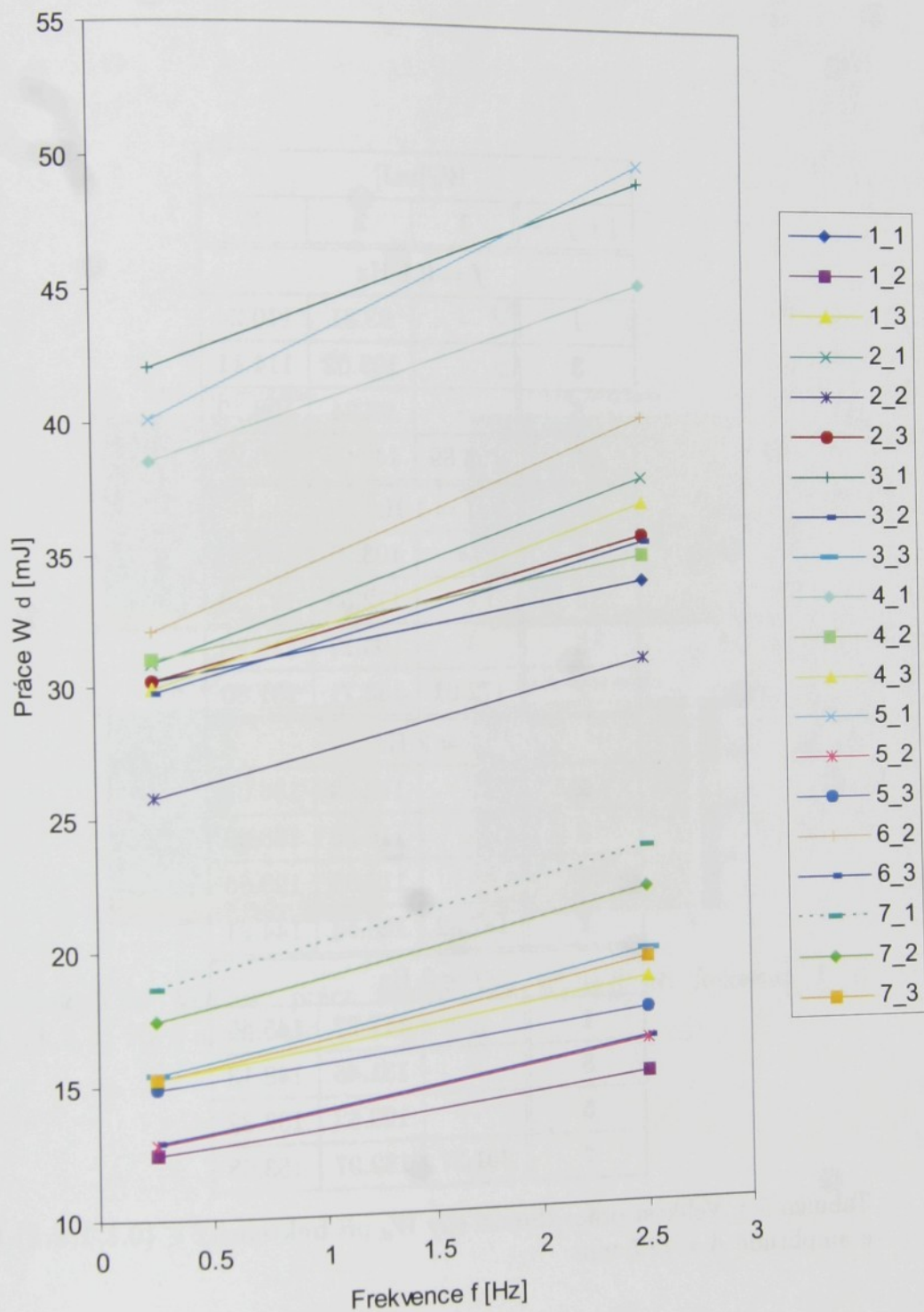
Obrázek 5.29: Maximální síla F_{max} [N] v různých místech sedáku při frekvenci $f \in \{0.1, 1, 2, 3\}$ Hz a amplitudě $A = 12.5$ mm

W_d [mJ]			
$\downarrow i, j \rightarrow$	1	2	3
$f = 0.25$ Hz			
1	30.24	12.46	15.33
2	30.94	25.87	30.29
3	42.07	12.89	15.47
4	38.55	31.09	29.94
5	40.10	12.82	14.96
6	-	32.15	29.83
7	18.67	17.50	15.27
$f = 2.5$ Hz			
1	33.91	15.04	18.66
2	37.87	30.96	35.65
3	49.16	16.38	19.72
4	45.29	34.92	36.92
5	49.85	16.25	17.49
6	-	40.21	35.44
7	23.71	22.14	19.44

Tabulka 5.3: Velikost práce tlumicí síly W_d při frekvenci $f \in \{0.25, 2.5\}$ Hz a amplitudě $A = 5$ mm



Obrázek 5.30: Velikost práce tlumicí síly W_d [mJ] při frekvenci $f \in \{0.25, 2.5\}$ Hz a amplitudě $A = 5$ mm



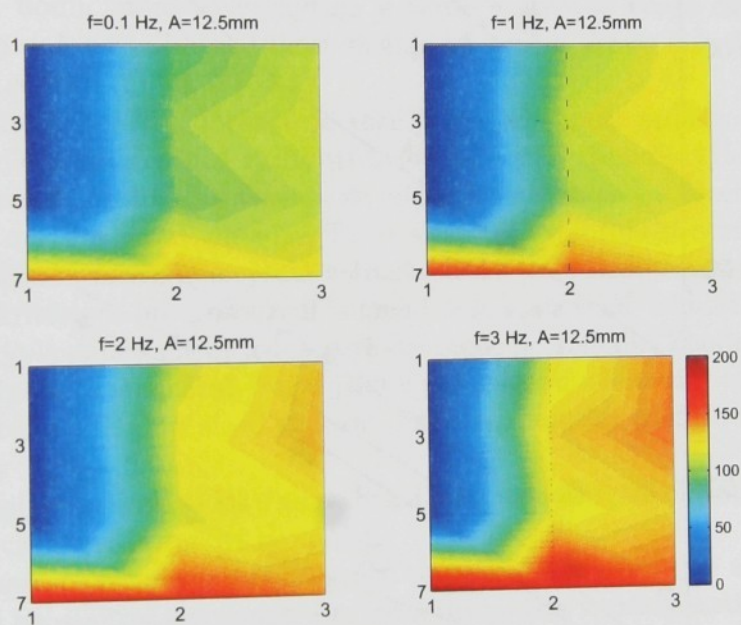
Obrázek 5.31: Nárůst práce tlumicí síly W_d s frekvencí v různých místech sedáku pro amplitudu $A = 5$ mm; měřeno pro $f \in \{0.25, 2.5\}$ Hz

$W_d [\text{mJ}]$			
$\downarrow i, j \rightarrow$	1	2	3
$f = 0.1 \text{ Hz}$			
1	-	93.81	110.24
3	-	103.02	114.11
5	-	97.24	108.19
7	153.89	142.09	120.90
$f = 1 \text{ Hz}$			
1	-	103.27	123.98
3	-	112.50	127.53
5	-	105.17	116.99
7	172.01	153.71	131.80
$f = 2 \text{ Hz}$			
1	-	112.93	136.09
3	-	119.86	138.93
5	-	114.65	123.65
7	187.82	166.54	144.21
$f = 3 \text{ Hz}$			
1	-	117.27	145.45
3	-	131.48	148.13
5	-	120.62	132.32
7	201.37	182.97	153.68

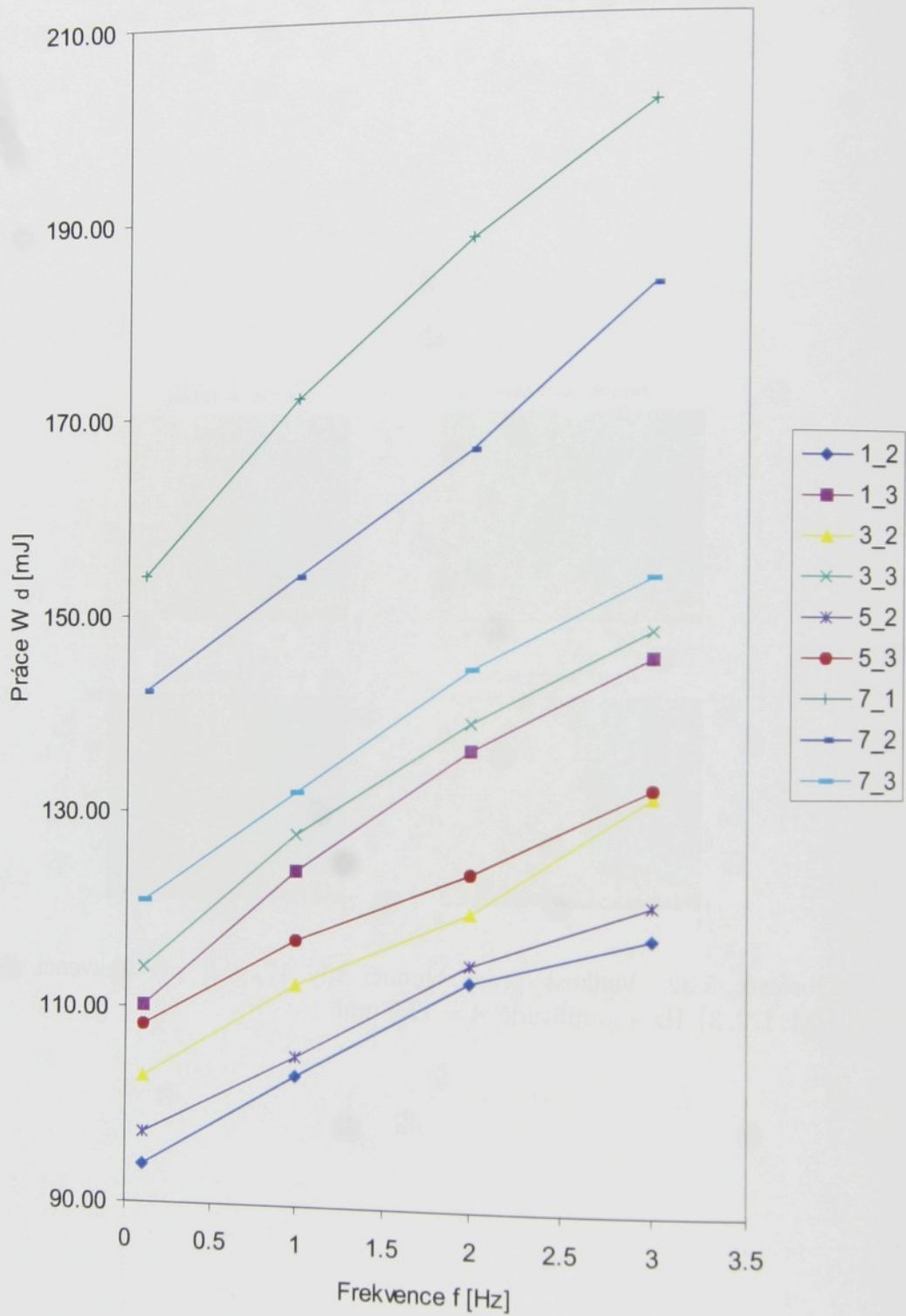
Tabulka 5.4: Velikost práce tlumicí síly W_d při frekvenci $f \in \{0.1, 1, 2, 3\}$ Hz a amplitudě $A = 12.5$ mm

5.3 Závěr kapitoly

V této kapitole byl proveden výpočet velikosti práce tlumicí síly W_d [mJ] pro různé frekvence f [Hz] a amplitudy A [mm]. Výsledky jsou zobrazeny v tabulce 5.3. Tabulka ukazuje, že velikost práce tlumicí síly W_d [mJ] roste s frekvencí f [Hz] a amplitudou A [mm].



Obrázek 5.32: Velikost práce tlumicí síly W_d [mJ] při frekvenci $f \in \{0.1, 1, 2, 3\}$ Hz a amplitudě $A = 12.5$ mm



Obrázek 5.33: Nárůst práce tlumicí síly W_d s frekvencí v různých místech sedáku pro amplitudu $A = 12.5$ mm; měřeno pro $f \in \{0.1, 1, 2, 3\}$ Hz

5.3 Závěr kapitoly

V této kapitole byl proměřen sedák za účelem získání představy o rozložení jeho tuhostních a tlumicích vlastností. Systém rozložení měřených bodů je uveden na obr. 5.3 na str. 102. Je tvořen třemi sloupci, kde $j = 1, 2, 3$. Jako kritérium tuhosti byla zvolena maximální síla F_{max} dosažená během jedné periody budicího polohového signálu. Nejtužšími místy na sedáku jsou samozřejmě oblasti švů. Postupujeme-li zleva, je sloupec ($j = 1; i = 1 \div 5$) nejtužší. Zajímavým zjištěním ale je, že následuje sloupec nejpoddajnější ($j = 2; i = 1 \div 5$) a směrem ke středové rovině souměrnosti sedák tuhne ($j = 3; i = 1 \div 5$). To je dobře patrné z tabulek 5.1 a 5.2 a jejich grafických podob - obr. 5.28 a 5.29. Opačně je tomu v předposlední a poslední řadě měřených bodů, která se vyskytuje v tvrdé a středně tvrdé části sedáku ($i = 6, 7; j = 1 \div 3$). Zde se tuhost snižuje od levého okraje ($i = 6, 7; j = 1$), ke středu sedáku ($i = 6, 7; j = 3$).

Z těchto tabulek a obrázků je také jasné, že tuhost sedáku se zvyšuje s narůstajícím stlačením i rychlostí deformace. Pro správný výklad uvedených zobrazení budiž zdůrazněno, že místa proměřovaná na švech jsou vůči ostatním místům zapuštěna níže. To, že vykazují vyšší tuhost neznamená, že budou příčinou místního zvýšení měrného tlaku po dosednutí osoby.

Jako kritérium pro posouzení tlumení byla stanovena velikost práce tlumicí síly vykonané během jedné periody budicího signálu. Zhodnocení je v tomto případě principiálně stejné jako v předchozím odstavci, pouze si stačí za slovo tuhost doplnit slovo tlumení. Příslušné tabulky pak jsou 5.3 a 5.4 a obrázky 5.30 a 5.32.

Přechod vlastností sedáku na rozhraní mezi jednotlivými oblastmi (měkká, středně tvrdá, tvrdá) nebyl zkoumán.

Zajímavou otázkou je nárůst práce tlumicí síly se zvětšující se frekvencí kmitu při konstantní amplitudě. Pro jednotlivá místa v měkké a středně tvrdé části sedáku ($A = 12.5 \text{ mm}$, $f \in \{0.1, 1, 2, 3\} \text{ Hz}$) jsou tyto závislosti vyneseny v grafu na obr. 5.33. Jejich v podstatě lineární charakter je překvapivý. Se zvětšující se tuhostí v daném místě $i-j$ je nárůst práce W_d s frekvencí strmější.

V tvrdé oblasti sedáku bylo měřeno pouze při dvou různých frekvencích ($A = 5 \text{ mm}$, $f \in \{0.25, 2.5\} \text{ Hz}$), proto nelze z obdobných závislostí na obr. 5.31 hodnotit jejich charakter. Taktéž lze ale říci, že nárůst práce W_d s frekvencí je strmější s rostoucí tuhostí měřeného místa.

Závěr

V první kapitole byla měření na vzorku polyuretanové pěny prokázána silně nelineární závislost zatěžující síly na deformaci. Z dalších typických vlastností uvedme např. napřimování hysterezní smyčky při cyklickém zatěžování s rostoucí frekvencí, masivní relaxační děj či nehomogenní rozložení poměrné deformace v zatěžovaném průřezu nebo Poissonovo číslo blízké 0. Stejně tak se podařilo identifikovat oblasti, v nichž jisté charakteristické veličiny mají lineární závislost pozorovatelnou na velmi širokém intervalu vstupních parametrů budicího signálu. Jsou jimi lineární závislost práce tlumicí síly na frekvenci buzení a nezávislost polohy extrému budicí síly na témž parametru. Prokázání existence těchto vlastností zásadním způsobem napomáhá úspěšnému vývoji simulačního modelu PU pěny.

V kapitole druhé je diskutován vliv proudění vzduchu otevřenými póry polyuretanu v průběhu stlačování. Bylo provedeno měření ve vakuové komoře, které přes popsání problémy vede k závěru, že proudění vzduchu ovlivňuje tlumicí vlastnosti pěny v míře, která není v žádném případě srovnatelná s vlastním materiálovým tlumením. Pro jej lze v simulačním modelu zanedbat.

V třetí kapitole je uvedena metoda pro simulaci tlumicí síly pomocí vztahu $F_t = b_a |x|^a \dot{x}$ charakteristickým pro materiálový útlum a známém z literatury. Díky aplikaci poznatků uvedených v kapitole první bylo dosaženo velmi dobrých výsledků ve srovnání s experimentálním měřením.

Ve čtvrté kapitole je na základě úvahy o fyzikálních procesech probíhajících v pěně sestaven její simulační model. Verifikován byl na širokém intervalu parametrů budicího polohového signálu. V případě harmonického signálu je to střední hodnota 20, 25, 30 mm, amplitudy 1 až 7, resp. 10 mm a frekvence 0.1 až 10 Hz. Vyhověl s uspokojivou přesností. Pro nižší variabilitu parametrů buzení v případě trojúhelníkového signálu polohy bylo dosaženo výsledků ještě přesnějších. Pro ladění modelu je výhodná jeho odolnost proti přílišné citlivosti ve vztahu mezi změnou vnitřních parametrů a ovlivněním odezvy na výstupu a také poměrně přehledné uspořádání. Zcela zásadní význam při hledání konstant modelu měla znalost lineárních vlastností prokázaných v kapitole první.

V páté kapitole je provedeno měření závislosti zatěžující síly na deformaci a její rychlosti na skutečném automobilovém sedáku. Přesto, že se jedná o komplikovanou soustavu základního polyuretanového polotovaru, kovových

výstuží a prošitého čalounění, byly zde identifikovány charakterově stejné závislosti jako u vzorku prosté PU pěny, včetně přibližné lineární závislosti práce tlumicí síly na frekvenci a nezávislosti jejího extrému. Z toho lze dedukovat, že simulační model kompletního sedáku bude kvalitativně shodný a bude jej možno sestavit na stejném principu, jako u vzorku pěny.

Přes všechna uvedená pozitiva modelu popsaného v kap.4 je třeba konstatovat, že se jedná o model I. generace a v budoucnu je možné pracovat na jeho zpřesnění, zejména v oblasti vyvážení frikčních a viskózních vlastností při malých rychlostech.

Literatura

- [1] Církľ, D.: Identifikace tlumicích vlastností polyuretanové pěny. Dílčí výzkumná zpráva VS 9708, TU Liberec, Liberec 2000
- [2] Církľ, D.: Mechanické vlastnosti polyuretanové pěny. Dílčí výzkumná zpráva 1453-04 pro výzkumný záměr MŠMT - VZ MSM 242100003 - Interakce vibroizolačního systému s okolním prostředím, Technická univerzita v Liberci, Liberec 2001
- [3] Církľ, D., Šklíba, J.: Práce na simulačním modelu polyuretanové pěny, sborník konference Inženýrská mechanika 2002, VÚT Brno, Brno 2002
- [4] Církľ, D.: Možnost aplikace umělých neuronových sítí v oblasti modelování mechanických vlastností polyuretanové pěny, projekt vakuové komory. Dílčí výzkumná zpráva 1453/2002/04 pro výzkumný záměr MSM 242100001: Optimalizace vlastností strojů a pracovních procesů - interakce vibroizolačního systému s okolním prostředím, Technická univerzita v Liberci, Liberec 2002
- [5] Církľ, D.: Problémy s měřením vlastností polyuretanové pěny ve vakuu. Dílčí výzkumná zpráva VZ 1453/2003/5 pro výzkumný záměr MSM 242100001: Optimalizace vlastností strojů a pracovních procesů - interakce vibroizolačního systému s okolním prostředím, Technická univerzita v Liberci, Liberec 2003
- [6] Církľ, D.: Simulace tlumení polyuretanového materiálu při harmonickém buzení, sborník konference IX. International conference on the theory of machines and mechanisms IFToMM, Technická univerzita v Liberci, Liberec 2004
- [7] Šubrt, J., Protiva, J.: Měření vibrací vozidel Š 781, zkušební záznam (ZZ-A 302/88 Š 781-124), VÚMV Praha, Praha 1989
- [8] Vacek, M.: Komplexní výzkum sedadla z hlediska bezpečnosti a pohodlí, výzkumná zpráva, VÚMV Praha
- [9] Záruba, L.: Rozložení měrných tlaků na sedadlech osobních a malých užitkových automobilů, výzkumná zpráva (Z-81/70), VÚMV Praha, 1970

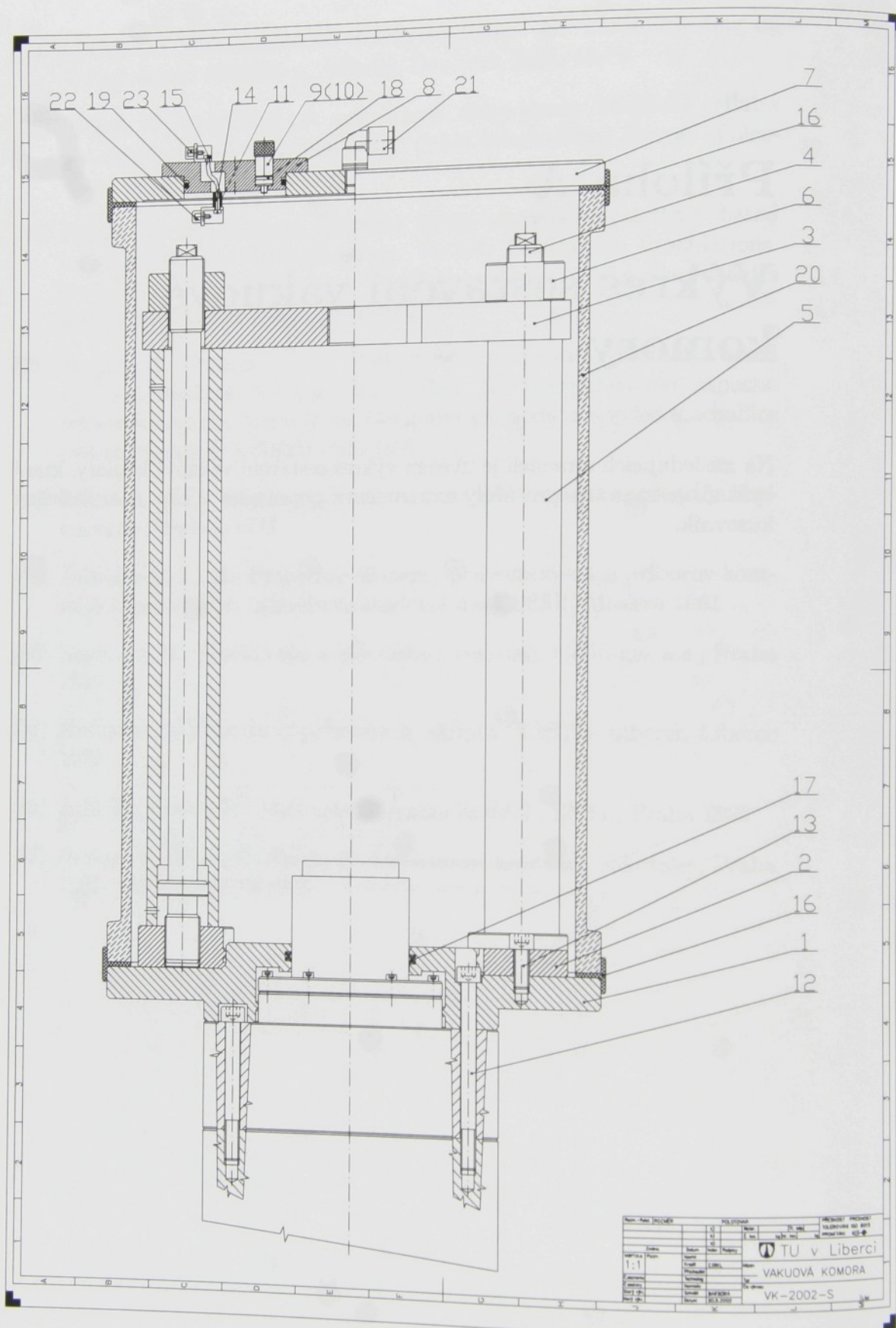
- [10] Vacek, M., Záruba, L.: Rozložení měrných tlaků na sedadlech malých užitkových automobilů Š 1202, Š 1203 (HS 567/70, etapa 2c), VÚMV Praha, Praha 1970
- [11] Záruba, L.: Dynamické zkoušky sedadel automobilů a hydropulsní zařízení, čís. zp. (K-59/74), VÚMV Praha, Praha 1974
- [12] Vacek, M.: Porovnávací měření prodyšnosti nábytkových polštářů pro vodní páry, výzkumná zpráva (K-59/74), VÚMV Praha, 1974
- [13] Vacek, M.: Porovnávací měření prodyšnosti nábytkových polštářů pro vodní páry, výzkumná zpráva (K-59/74), VÚMV Praha, 1974
- [14] Záruba, L.: Výzkum požadavků na výhled, sezení a rozmístění ovladačů z hlediska aktivní bezpečnosti, výzkumná zpráva (Z-54/72), VÚMV Praha, 1972
- [15] Šklíba, J., Štengl, M., Barbora, J.: Oživení a optimalizace prototypu sedačky, výzkumná zpráva (90-03005), SVÚSS Běchovice, Praha 1990
- [16] Sedadla užitkových vozidel z hlediska přenosu vibrací, výzkumná zpráva, SVÚSS Běchovice, Praha 1989
- [17] Klejch, J., Černý, J., Hospůdka, M.: Zpráva k závěrečnému oponentnímu řízení etapy výzkumu oborového úkolu OC 334 - odpružené sedadlo řidiče - k 389, n.p. Karosa, Vysoké Mýto 1975
- [18] Barbora, J., Louda, L., Šklíba, J., Vavřínová, J., Záruba, L.: Výzkum a vývoj vzduchem odpruženého sedadla řidiče pro nákladní automobily a autobusy, zpráva k oponentnímu řízení, st. podnik PIKAZ Praha
- [19] Šimůnek, I., Roubal, J., Buryška, R., Reitinger, M.: Měření frekvencí svislých a vodorovných zrychlení odpruženého sedadla řidiče - typ 8202, Výzkumný ústav dopravní Praha
- [20] Yu Wang , Cuitino, A.M.: Full-field measurements of heterogenous deformation patterns of polymeric foam using digital image correlation. *International Journal of Solids and Structures* 39, 2002
- [21] Patten, W. N., Sha, S., Mo, C.: A vibration model of open celld polyurethan foam automotive seat cushions. *Journal of Sound and Vibrations* 217(1), 1998
- [22] Ramsteiner, N., Fell, N., Forster, S. Testing the deformation behaviour of polymer foams. www.elsevier.nl/locate/polytest. *Polymer Testing* 20 (2001) 661-670
- [23] Shen, Y., Golnaraghi, F., Plumtree, A.:Modelling compressive cyclic stress-strain behaviour of structural. www.elsevier.nl/locate/ijfatigue. *International Journal of Fatigue* 23 (2001) 491-497

- [24] Mills, N., J.: Micromechanics of Polymer foams. 3rd nordic meeting on Materials and Mechanics, Aalborg, Denmark 2000, 45-76
- [25] Ehlers, W., Markert, B.: A macroscopic finite strain model for cellular polymers. www.elsevier.com/locate/ijplas. International Journal of plasticity 19 (2003) 961-976
- [26] Nedjar, B.: Frameworks for finite strain viscoelastic-plasticity based on multiplicative decompositions. Part I: Continuum formulations. www.elsevier.com/locate/cma. Computer methods in applied mechanics and engineering 191 (2002) 1541-1562
- [27] Nedjar, B.: Frameworks for finite strain viscoelastic-plasticity based on multiplicative decompositions. Part II: Computational aspects. www.elsevier.com/locate/cma. Computer methods in applied mechanics and engineering 191 (2002) 1563-1593
- [28] Dmitriev, V., N, Gradeckij, V., G.: Osnovy pnevmoavtomatiki, Mašinstroenie, Moskva 1973
- [29] Zalmanzon, L., A.: Protočnye elementy pnevmatičeskich priborov kontrolja i upravlenija, Izdatelstvo akademii nauk SSSR, Moskva 1961
- [30] Noskievič, P.: Modelování a identifikace systémů, Montanex a.s., Praha 1999
- [31] Krebsová, M.: Nauka o polymerech, skripta, VŠST v Liberci, Liberec 1978
- [32] Juliš K., Brepta R.: Mechanika: Dynamika díl 2., SNTL, Praha 1987
- [33] Brepta, R., Půst, L., Turek, F.: Mechanické kmitání, Sobotáles, Praha 1987, ISBN 80-901684-8-5

Příloha A

Výkres sestavení vakuové komory

Na následujících stranách je uveden výkres sestavení vakuové komory, která byla zkonstruována pro účely experimentu popsaného v kap. 2 a příslušný kusovník.



POZ.	NÁZEV	VÝKRES-NORMA	MATERIÁL	KS
1	Kotevní deska	VK-2002-01	11 523	1
2	Příruba	VK-2002-02	11 523	1
3	Nosník	VK-2002-03	11 500	1
4	Spojovací tyč	VK-2002-04	11 500	2
5	Příčník	VK-2002-05	11 523	2
6	Matice nosníku	VK-2002-06	11 500	2
7	Víko	VK-2002-07	11 500	1
8	Průchodové víko	VK-2002-08	11 500	1
9	Zátka	VK-2002-09	11 500	4
10	Průchodka	VK-2002-10	11 500	4
11	Distanční sloupek	VK-2002-11		2
12	Šroub M10 × 120	ČSN 02 1143		6
13	Šroub M10 × 25	ČSN 02 1143		6
14	Šroub M3 × 20	ČSN 02 1131		2
15	Šroub M3 × 10	ČSN 02 1131		2
16	Těsnění skleněného válce			2
17	Těsnění do vakua			1
18	Těsnění SEAL 5-612			8
19	Těsnění SEAL 2-230			1
20	Skleněný válec PZ DN300			1
21	Rychlospojka G 1/4"			1
22	9 pinový konektor CANON (F)			1
23	9 pinový konektor CANON (M)			1

Rozm. - Polot.				PŘESNOST	
		c)		Tř. odp.	
		b)		TOLEROVÁNÍ ISO 8015	
		a)		PROMĚTÁNÍ	
Změna		Datum	Index	Podpisy	
Měřítko	Pozn.	Navrhl	CIRKL	 TU v Liberci VAKUOVÁ KOMORA VK-2002-K List	
		Kreslil			
		Přezkoušel	BARBORA		
Č. seznamu		Technolog			
Č. sestavy		Normaliz.			
Starý výkr.		Schválil			
Nový výkr.		Datum	20.5.2002		

Příloha B

Vzduchový válec s výfukem do okolí

Pro simulaci vyfukování a nasávání vzduchu póry polyuretanové pěny při stlačování byl použit model pneumatického válce s výfukem do okolního prostředí. Pro případ na obr. B.1 je uvedeno odvození tlakových poměrů (pro fázi nasávání).

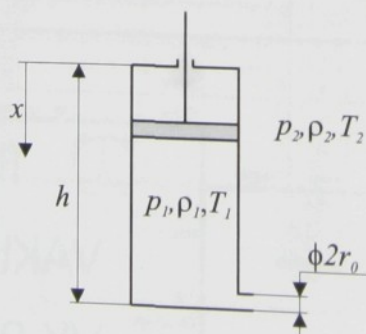
Diferenciální množství energie dQ_2 obsažené v plynu přivedeném do nádoby se projeví změnou vnitřní energie dU_1 a prací rozpínání plynu dL_1 v nádobě. Napíšeme rovnici energetické bilance

$$dQ_2 = dU_1 + dL_1. \quad (\text{B.1})$$

Protože množství tepelné energie, které vstupuje do objemu s plynem, je rovno součinu jeho hmotnosti m_2 a měrné entalpie i_2 ($dQ_2 = i_2 m_2$) a vnitřní energie U_1 a jí vykonaná práce L_1 jsou rovny $dU_1 = d(u_1 m_1)$ a $dL_1 = p_1 dV_1$, můžeme rovnici (B.1) přepsat do tvaru:

$$i_2 dm_2 = u_1 dm_1 + m_1 du_1 + p_1 dV_1, \quad (\text{B.2})$$

kde u_1 je měrná vnitřní energie.



Obrázek B.1: Schéma pneumatického válce s výfukem do okolí

V rovnici (B.2) vyjádříme entalpii a vnitřní energii pomocí součinu teploty a měrné tepelné kapacity při konstantním tlaku c_p a objemu c_v :

$$c_p T_2 dm_2 = c_v T_1 dm_1 + c_v m_1 dT_1 + p_1 dV_1, \quad (\text{B.3})$$

Za předpokladu, že vzduch je ideální plyn, uijeme Klapironovu rovnici:

$$p_1 V_1 = m_1 R T_1, \quad (\text{B.4})$$

kde R je měrná plynová konstanta, $R = 287 \text{ J/kg K}$ pro vzduch (při $T_2 = 290 \text{ K}$).

Dosazením výrazu $m_1 T_1$ obdržného z rovnice (B.4) do (B.3) a úpravou $\frac{c_p}{c_v} = \kappa$ a $c_p - c_v = R$, kde κ je adiabatický exponent, dostaneme po úpravě:

$$\kappa R T_2 dm_2 = V_1 dp_1 + \kappa p_1 dV_1. \quad (\text{B.5})$$

V rovnici (B.5) dosadíme za element hmotnosti stlačeného vzduchu dm_2 , přitékajícího do objemu V_1 vztah $dm_2 = G_2 dt$ a po vyjádření elementu tlaku dp_1 dostaneme:

$$dp_1 = \frac{\kappa G_2 R T_2 dt}{V_1} - \kappa p_1 \frac{dV_1}{V_1} \quad (\text{B.6})$$

Průtok G_2 vzduchu z okolní atmosféry vyjádříme užitím vztahu:

$$G_2 = \mu S_0 p_2 \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \frac{1}{R T_2} \left[\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} \quad \text{pro} \quad \left(\frac{p_1}{p_2} \right) > \beta_{kr} \quad (\text{B.7})$$

nebo

$$G_2 = \mu S_0 p_2 \sqrt{\frac{2}{R T_2} \frac{\kappa}{\kappa+1} \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{2}{\kappa-1}}} \quad \text{pro} \quad \left(\frac{p_1}{p_2} \right) \leq \beta_{kr}. \quad (\text{B.8})$$

Kritický poměr tlaků β_{kr} je dán vztahem

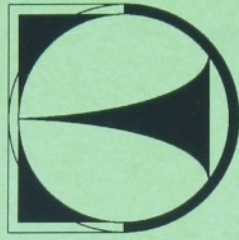
$$\beta_{kr} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)_{kr} \quad (\text{B.9})$$

a pro vzduch ($\kappa = 1.4$) nabývá hodnoty 0.528; μ je koeficient průtoku a $S_0 = \pi r_0^2$ je plocha výfukového otvoru. Velikost objemu 1 je dána posuvem pístnice $V_1 = V_0 - S_1 x$ a jeho diferenciální změna tedy $dV_1 = -S_1 dx$, $V_0 = S_1 h$.

Příčemž platí, že

$$T_1 = T_2 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}. \quad (\text{B.10})$$

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ



Mechanické vlastnosti polyuretanové pěny
(Teze disertační práce)

David Církľ

říjen 2005

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYURETANOVÉ PĚNY

(Teze disertační práce)

Autor:

Ing. David Církl

Studijní program:

P2301 Strojní inženýrství

Studijní obor (zaměření):

3901V003 Aplikovaná mechanika

(Inženýrská mechanika)

Školící pracoviště:

katedra mechaniky, pružnosti a pevnosti

Školitel:

prof. RNDr. Jan Šklíba, CSc.

Disertace je k dispozici v Univerzitní knihovně - Voroněžská 13, Liberec.

Liberec 2005

Recenzenti:

doc. Ing. Jaromír Barbora, CSc., Technická univerzita v Liberci
doc. Ing. Vojtěch Mišun, CSc., Vysoké učení technické v Brně
Ing. Luděk Pešek, CSc., Ústav termomechaniky ČAV, Praha

Termin a místo obhajoby:

ISBN: 80-7083-992-9

Anotace

Mechanické vlastnosti polyuretanové pěny

Polyuretanové (PU) pěny jsou dominantně zastoupeny při výrobě automobilových sedaček. Pro počítačové simulace statického i dynamického komfortu sezení je nutné její vlastnosti v dostatečné míře popsat. Tím se zabývá tato práce. Kromě známých vlastností byl popsán lineární průběh práce tlumicí síly na frekvenci harmonického buzení a nezávislost extrému tlumicí síly na tomtéž parametru. Měření ve vakuové komoře naznačuje, že příspěvek proudícího vzduchu otevřenými póry polyuretanu je zanedbatelný vzhledem k vlastnímu útlumu materiálové matrice.

Byla vypracována metodika, pro aproximaci tlumicí síly v analytickém tvaru pro harmonického buzení.

Dále byl vypracován reologický model PU pěny a úspěšně verifikován na harmonickém a trojúhelníkovém budícím signálu.

Přestože je kompletní automobilový sedák daleko komplikovanější soustavou, vykazuje kvalitativně stejné vlastnosti jako prostý vzorek polyuretanové pěny.

klíčová slova

sedadlo řidiče, polyuretanová pěna, reologický model, vakuová komora

Annotation

Mechanical properties of polyurethane foam

Polyurethane (PU) foam is predominantly used in driver seat production. For computer simulated statical or dynamical comfort of seating it is necessary to describe its properties in sufficient degree which this work deals with. Except some properties known before there was identified linear course of damping force dissipated work on frequency of harmonic kinematic excitation, and in-dependency of damping force extreme on the same parameter. Measurement done in vacuum chamber indicates that contribution of flowing air through opened cells polyurethane is negligible with regard to material dumping.

Method of damping force approximation in analytical form was developed. Furthermore rheologic model of polyurethane foam has been drawn up and verified by harmonic and triangle kinematic excitation.

Although the complete car seat is far more complicated system its behavior shows qualitatively the same properties as the specimen of PU foam.

keywords

driver seat, polyurethane foam, rheological model, vacuum chamber

Úvod

Polyuretanová (PU) pěna je již tradičním a velmi rozšířeným materiálem používaným v mnoha oblastech. Zcela dominantně se prosadil při výrobě automobilových sedaček, kde zprostředkovává kontakt mezi sedačkou a sedící osobou. Patří tedy do skupiny II. vibroizolačního stupně. Jeho mechanické vlastnosti zásadním způsobem ovlivňují komfort sezení jak ve statickém, tak v dynamickém stavu. Zkoumáním podminek, kterým je sedící osoba v je-doucím automobilu vystavena a jejich účinků na lidský organismus se dlouhou dobu zabýval Výzkumný ústav motorových vozidel (VÚMV) v Praze, Státní výzkumný ústav pro stavbu strojů (SVÚSS), Výzkumný ústav do-pravní Praha a další. Důkazem toho jsou technické zprávy [7] až [19]. Počátky výzkumu lze sledovat již v 60 letech minulého století. Významnou motivací v této oblasti byla snaha poznat a v možné míře eliminovat negativní do-pady vibrací na řidiče užítkových vozidel. Zde vzhledem k předpokládané dlouhodobé expozici vibracemi může docházet např. ke zvýšené únavě, která hrozí snížením pozornosti, zhoršení podmínek k ovládání vozidla nebo až k zdravotním komplikacím.

Zmíněné výzkumy vedly k sestavování simulačních modelů odpruženého sedadla s dynamickou zářezí. Odpružení mohlo být zajištěno např. nůžkovým nebo paralelogramovým mechanismem s pneumatickou pružinou. Dynamic-kou zátěž prezentovala např. dvouhmotová soustava s tlumiči a pružinami. I když celkový simulační model je poměrně komplikovaný, byl sestaven na základě poznaných a ověřených mechanických vlastností jednotlivých sub-systémů. Vlastnosti polyuretanové pěny zde však byly v prvním přiblížení nahrazeny lineárními pružinami a tlumiči. V simulačním modelu tedy chyběla realistická reprezentace vlastností PU pěny jakožto velmi nelineárního materiálu.

Cílem této práce tedy bylo formulovat základní mechanické vlastnosti PU pěny a sestavit jejich simulační model.

Patrně vlivem společenských změn výzkum vlastností PU pěny ve vý-zkumných ústavech v České republice v podstatě zanikl. Proto má nejmladší relevantní tuzemský pramen v souhrnu použité literatury datování roku 1990. Jinak tomu bylo v zahraničí. Lze pozorovat, že z původní motivace ochrany zdraví řidičů z povolání užítkových automobilů se tato problematika přenáší i do sektoru osobních automobilů, kde již, vzhledem k daleko menší úrovni vibrací, není klíčovým problémem ochrana posádky před negativními zdra-votními následky, ale zvyšování již dosti vysoké úrovně komfortu. To je prav-děpodobně dáno silnou konkurencí na trhu. Proto má tento druh výzkumu možnost uplatnění i u nás.

Práce na vývoji simulačního modelu PU pěny v zahraničí je dokumento-vána množstvím publikací - např. [20] až [27]. Z nich je patrná snaha o hledání cesty, jak tento problém vůbec uchopit. Jedna část autorů užívá metodu kon-tinua, druhá část problém řeší modelem se soustředěnými parametry, přičemž

stupeň komplikovanosti v přístupu je v některých případech velmi rozdílný. Verifikace modelů je často provedena na omezené množině testovacích dějů. Přístup jednotlivých autorů je zpravidla predikován aplikační oblastí.

1 Vlastnosti vzorku PU materiálu

1.1 Vzorek polyuretanového materiálu

Obecně o způsobu výroby polyuretanové pěny a jejím chemickém složení hovoří např. literatura [31]. Struktura a mechanické vlastnosti polyuretanového materiálu jsou dány chemickým složením a vzájemným poměrem jednotlivých komponent. Přípravuje se z polyesterů se dvěma hydroxylovými skupinami na koncích, izokyanátů a vody. Reakci vody s diizokyanátem se uvolňuje kyslíčnick uhlíčitý, který vytváří pěnovou strukturu. Vznikající polymer současně během vypěňování tuhne. Podle složení výchozí směsi lze připravit pěny měkké polotuhé a tuhé. Měkké PU pěny jsou u nás známé pod označením "Molitán".

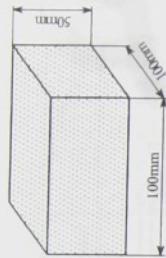
V závislosti na chemickém složení směsi lze vyrobit pěny označující se zkratkou TDI nebo MDI, přičemž obě varianty mohou být v provedení s otevřenými nebo uzavřenými póry. Zkušební vzorky (viz obr. 1) pocházejí z podniku Gumotex Břeclav, který se zaměřuje na produkci sedáků a operáků z polyuretanových pěn. Mají tvar kvádru o rozměrech (100x100x50) mm. Jsou vyrobeny z materiálu TDI s hustotou 55 kg/m³ a otevřenými póry.

Typické pro tyto výrobky je, že v blízkosti povrchu se struktura liší od struktury vnitřní, kde je základní materiál protkánav navzájem propojenými dutinami (původně bublinky vzniklé při zpěňování). Při deformaci hmoty se jimi vzduch může volně polybovat. Povrch je tvořen daleko méně prodýšnou slupkou, která částečně unikání vzduchu brání. Jednotlivé zkušební vzorky byly vyřezány z většího celku. Proto mají některé kvádry tvořeny stěny pouze řezem vnitřní struktury a u jiných může být některá ze stěn tvořena slupkou. Pro experimenty byly vybrány vzorky z vnitřních oblastí polotovaru, aby tento fakt neovlivňoval měřené vlastnosti.

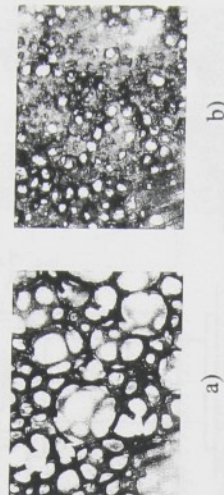
Na obr. 2 je řez vnitřní strukturou vzorků a pro porovnání též slupka s daleko menším počtem pórů. Množství a velikost bublinek odpovídá nepřímému úměrně hustotě materiálu.

1.2 Měřicí zařízení

Hlavním zdrojem informací pro posuzování vlastností tohoto materiálu je experimentální měření. To je prováděno v hydrodynamické zkušebně (HDL Doubrý). Součástí prací byl návrh a zkonstruování nového zkušebního stavu (obr. 3 vlevo), který má – ve srovnání s původním – kromě menších zástavbových rozměrů i vyšší tuhost.



Obrázek 1: Vzorek polyuretanového materiálu



Obrázek 2: a) řez vnitřní strukturou, b) povrchová slupka, zvětšeno 4×, vzo- rek 4A

Použité snímače k měření síly jsou tenzometrické. Jedná se buď o typ s rozsahem do 1.5 kN nebo Rukov HP 21, 2.2 kN, výr. číslo 04384. Hydraulický válec je typu AHS 25-250 (jmenovitá síla 25 kN, max. celkový zdvih 250 mm), max. pracovní tlak 28 MPa.

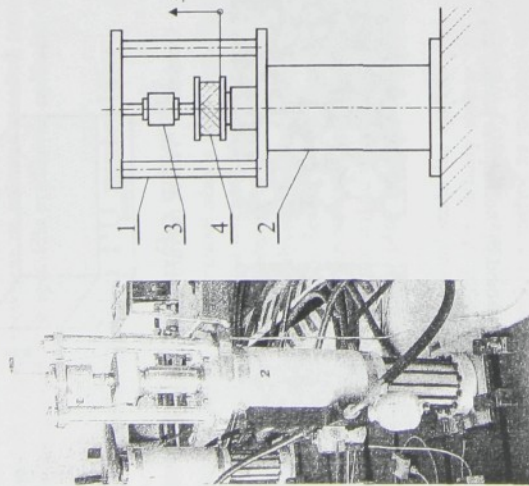
Vzorek polyuretanového materiálu je vložen mezi dvě rovnoběžné ocelové desky (viz obr. 3).

1.3 Silová odezva vzorku na kinematické buzení

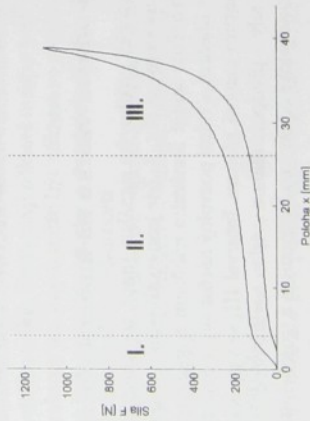
Při stlačování vzorku polohovým signálem (např. trojúhelníkovým) má silová odezva průběh uvedený na obr. 4. Zde jsou rozlišitelné 3 charakteristické fáze. Oblast I. se vyznačuje téměř lineárním náběhem z nulových hodnot. Následuje opět téměř lineární a velmi pozvolný nárůst síly v oblasti II. Tato fáze se v odborné literatuře nazývá *plateau*. Interval III. se vyznačuje prudkým nárůstem měřené síly s předpokládanou svislou asymptotou. V práci je uveden podrobnější rozbor silové odezvy na harmonické a trojúhelníkové kinematické buzení.

1.3.1 Zatěžování harmonickým budícím signálem

Odezvou $F(x)$ na harmonický budící signál (1) u takovéhoto materiálu je křivka na obr. 6. Hydraulický válec nejprve najíždí z počáteční polohy 0 na



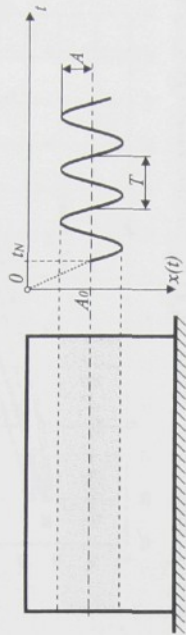
Obrázek 3: Malý zkušební rám, vlevo: reálné provedení, vpravo: schéma: 1- rám, 2-hydraulický válec, 3-snímač síly, 4-vzorek polyuretanového materiálu



Obrázek 4: Silová odezva na trojúhelníkové buzení s rychlostí přibližně 150 mm/s

A_0 [mm]	A [mm]				
	1	3	5	7	10
20	x	-	x	-	x
25	x	x	x	x	-
30	x	x	x	x	x

Tabulka 1: Parametry harmonického budícího signálu



Obrázek 5: Zatěžování PU vzorku harmonickým signálem polohy s náběhem

střední hodnotu A_0 a kolem této střední hodnoty kmitá s amplitudou A . Výsledkem je hysterezní křivka, která se vlivem rychlé relaxace posouvá v souřadném systému dolů.

$$x(t) = A_0 + A \sin[\omega(t - t_N)], \quad \omega = 2\pi f, \quad f = 1/T, \quad (1)$$

kde:

A_0 – je střední hodnota kmitu,

A – je amplituda kmitu,

T – je perioda kmitu,

f – je frekvence kmitu,

t_N – je čas náběhu z nulové polohy.

V některých případech je výhodnější pracovat s předpisem (2) bez náběhu, tedy ve formě

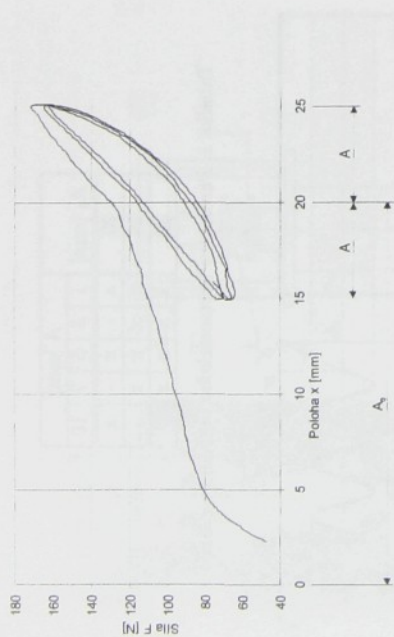
$$x(t) = A_0 + A \sin(\omega t). \quad (2)$$

Měřeno bylo pro kombinace parametrů harmonického signálu daných tab. 1

a v každé variantě pro široký rozsah frekvencí $f \in \{0.1; 0.5; 0.7; 1; 1.5; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10\}$ Hz.

Naměřená celková silová odezva a tlumicí síla jsou vyneseny na obr. 7 a 8 (z důvodu černobílého tisku tezí je kvůli přehlednosti počet zobrazených křivek omezen).

Obsahem plochy hysterezní smyčky, jak uvádí vztah (3), je práce ztracená za jeden kmit vlivem tlumení W_d . Byla provedena analýza závislosti velikosti práce tlumicí síly v rámci jedné periody na frekvenci budícího signálu pro jednotlivé střední hodnoty a amplitudy, jak uvádí tab. 1. Získané výsledky jsou v grafickém vyjádření na obr. 9 např. pro $A_0 = 25$ mm a $A = \{1, 3, 5, 7\}$ mm.



Obrázek 6: Silová odezva polyuretanu na harmonický budicí signál ($f=3\text{Hz}$, $A=5\text{mm}$, $A_0=20\text{mm}$)

Z uvedeného vyplývá, že průběh práce tlumicí síly lze pro danou střední hodnotu a amplitudu velmi dobře proložit lineární funkcí.

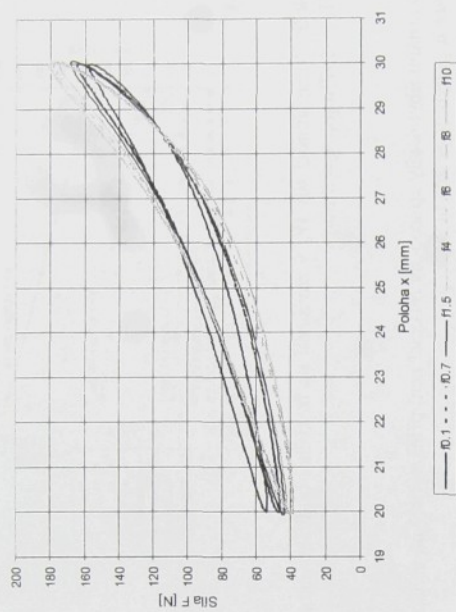
$$W_d = \oint F_t dx. \quad (3)$$

Lze tedy konstatovat, že kromě obecně známých vlastností, jako jsou charakteristické fáze silové odezvy při deformaci, Poissonovo číslo blízké 0 nebo nehomogenní poměrná deformace materiálů, byly v práci uvedeny důležité poznatky o charakteru tlumicí síly.

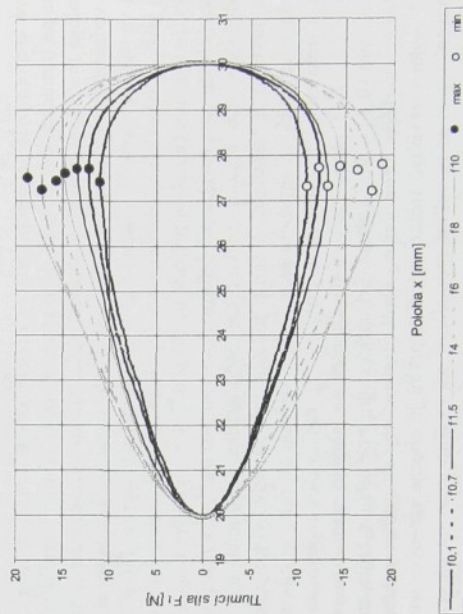
Polyuretanová pěna vykazuje při deformaci x velmi nelineární silovou odezvu F . V kontrastu s tímto bylo ukázáno, že práce tlumicí síly vykonaná během jedné periody roste s budicí frekvencí lineárně pro danou střední hodnotu a amplitudu. Druhým důležitým závěrem je, že poloha extrémů tlumicí síly je anebo ji lze považovat za nezávislou na frekvenci harmonického budicího signálu (opět pro danou střední hodnotu a amplitudu). Extrémní tlumicí síly jsou na obr. 8 znázorněny jako černé a bílé body - jsou koncentrovány v omezené oblasti poloh. Tytéž vlastnosti se projevovaly i v případě buzení trojúhelníkového. Z toho je zřejmé, že tento obecně vzato nelineární materiál (tedy v oblasti (x, F)) vykazuje silné lineární chování v oblasti (f, W_d) .

Při vytváření modelu mechanických vlastností PU pěny činí simulace tlumení největší potíže. Proto jsou tyto poznatky užitečnými a zároveň jednoduchými kritérii pro tvorbu a verifikaci takového modelu.

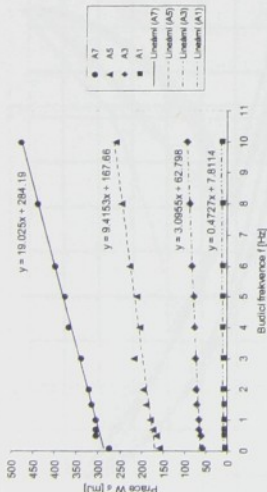
Další vlastností PU pěny je velmi výrazné relaxační chování. Největší změny v měřené síle nastávají v prvních okamžicích zatížení. Zajímavé je,



Obrázek 7: Celková síla F , $A=5\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=25\text{mm}$



Obrázek 8: Tlumicí síla F_t , $A=5\text{mm}$, $f=(0.1\div 10)\text{Hz}$, $A_0=25\text{mm}$



Obrázek 9: Práce tlumicí síly W_d v závislosti na frekvenci budícího signálu f ; $A=(1, 3, 5, 7)\text{mm}$, $A_0=25\text{mm}$

že procentuální úbytek síly způsobený relaxací není příliš závislý na velikosti deformace a pohybuje se kolem 30%.

Hysterezní smyčky se při rostoucí frekvenci kinematického buzení napřimují.

2 Pokus o změření vlivu vzduchu na tlumení

Vakuová komora byla zkonstruována za účelem kvantifikovat, v jakém poměru se na tlumících vlastnostech polyuretanové pěny podílí vlastní tlumení materiálové matrice v poměru k tlumení způsobeném vyfukováním a nasávaním vzduchu póry v průběhu slačování a odlehčování. Ukázalo se, že při měření ve vakuové komoře musíme vzít v úvahu mnoho doprovodných fyzikálních jevů, které ovlivňují získané výsledky. Jako největší problém se zatím jeví fakt, že vakuum (v našem případě 97 %) je dobrým tepelným izolantem. Teplo vzniklé disipací energie při deformaci vzorku nemůže být v dostatečné míře odváděno, roste teplota vzorku a lze předpokládat, že to může mít vliv na jeho mechanické vlastnosti. V rámci jednoho měření, kdy byl polyuretan slačován harmonickým signálem se střední hodnotou 20 mm, amplitudou 10 mm a frekvencí 1 Hz, se během přibližně 10 min zvýšila teplota uvnitř vzorku o 7 st. C. Podobně je to s tenzometry na silovém snímači napájenými napětím $(0 \div 5)$ V. Zmařená elektrická energie se mění v teplo, které má sníženou možnost přístupu do okolí. Tenzometry se potom zahřívají, přičemž teplotní závislost těchto měřicích prvků je obecně známým jevem. Vyrovnávání teplot je ve vakuu zpomaleno, což zvyšuje časovou náročnost experimentů.

Přes omezenou použitelnost tohoto postupu se však podařilo získat výsledky, které poměrně jednoznačně vedou k závěru, že vliv proudícího vzduchu na tlumení je zanedbatelný vzhledem k vlastnímu materiálovému útlumu.

Protože v průběhu prací byl již model popisující vliv vyfukování a nasávání vzduchu sestaven, je jeho koncepce v disertační práci uvedena, včetně respektování změny plochy průtočného otvoru v průběhu slačování.

3 Explicitní formulace tlumicí síly

V literatuře, jako jsou např. technické průvodce [32] nebo [33], lze nalézt, že průběh tlumicí síly poddajných prvků, u kterých tlumení závisí na výchylce x a je realizováno disipací energie uvnitř materiálu, je možné popsat rovnicí

$$F_t(x, \dot{x}) = b_a |x|^a \dot{x}. \quad (4)$$

Pro naše účely můžeme ve vztahu (4) vynechat absolutní hodnotu, neboť vzorek je pouze slačován, tedy podle zvoleného souřadného systému je namáhán výhradně kladnými hodnotami polohy x . Budeme jej tedy používat ve formě

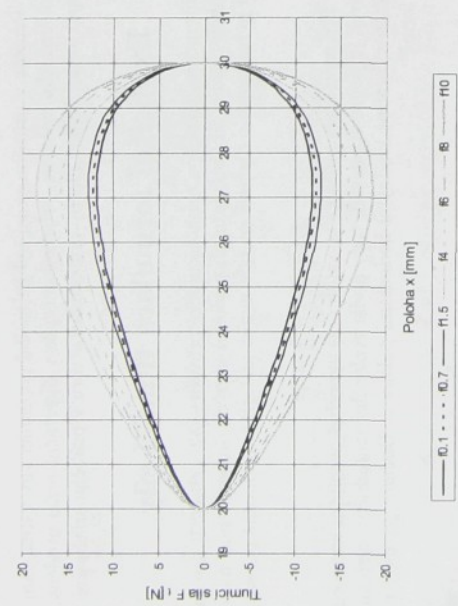
$$F_t(x, \dot{x}) = b_a x^a \dot{x}. \quad (5)$$

V práci byla popsána metoda identifikace tlumicí síly polyuretanového vzorku užitím vztahu (5) při harmonickém buzení. Metoda vychází ze zjištěných vlastností vzorku popsaných v kap. 1. Jedná se o lineární závislost práce tlumicí síly a v prvním přiblížení konstantní polohu jejího extrému na frekvenci harmonického budícího signálu. Aproximace (5) se jeví vhodnou, protože linearity nárůstu integrálu této funkce podle dráhy (mechanická práce) a nezávislost polohy jejího extrému na frekvenci byla prokázána. Velikost integrálu je potom při změně amplitudy nutno zajišťovat stanovením funkce $b_a = b_a(f, A)$.

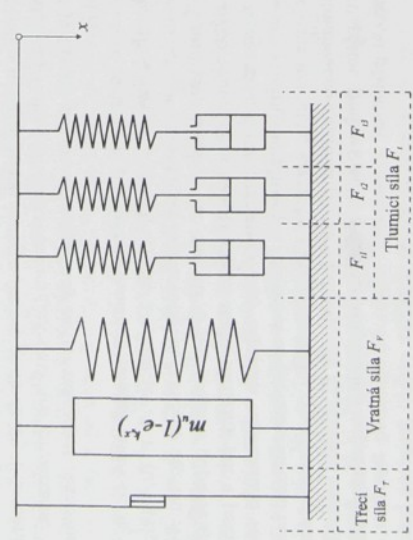
Užití této metody je platné pro zvolenou střední hodnotu A_0 a velmi široký rozsah frekvencí $f \in (0; 10)$ Hz a amplitud $A \in (0; 7 \text{ resp. } 10)$ mm. Výsledek např. pro parametry harmonického budícího signálu $A_0 = 25$ mm a $A = 5$ mm jsou uvedeny na obr. 10. Z porovnání s odpovídajícími grafy naměřených veličin jsou patrné pouze malé odchylky jak v průběhu, tak i v poloze extrému, které jsou způsobeny zejména celočíslnou volbou exponentu a pro všechny amplitudy a frekvence se shodnou střední hodnotou A_0 . Volba reálné mocniny, která by více odpovídala vypočtenému exponentu a , by kromě možnosti snížení přesnosti v průběhu F_t přinesla zesložitéjší výrazů a ztrátu přímé přehlednosti. Simulace odpovídají experimentální datům s dostatečnou přesností.

4 Sestavení simulačního modelu PU pěny

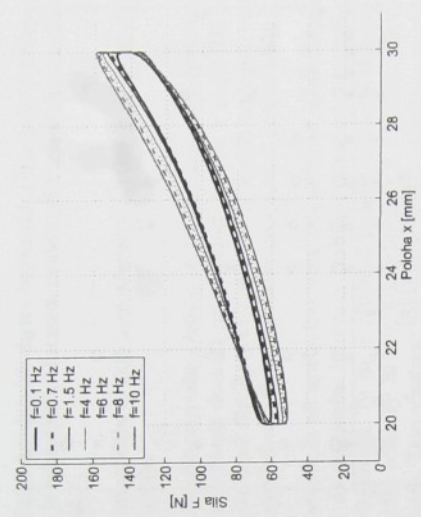
V této kapitole je uvedena koncepce reologického modelu (obr. 11) se soustředěnými parametry, která se snaží vystihnout dosud poznané vlastnosti PU pěny popsané v kap. 1. Obsahuje složky síly vratné, tlumicí a třecí.



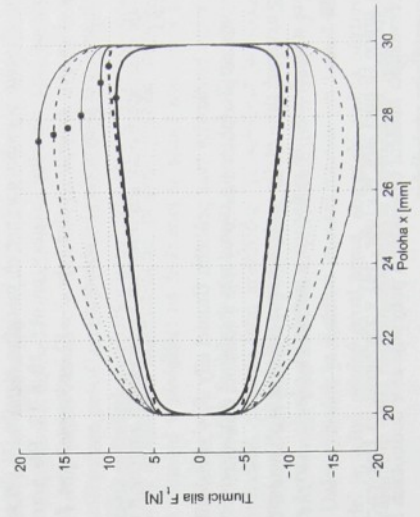
Obrázek 10: Simulovaná tlumicí síla F_t , $A=5\text{mm}$, $f=(0.1 \div 10)\text{Hz}$, $A_0=25\text{mm}$
(porovnej s obr. 8 na str. 11)



Obrázek 11: Schéma modelu PU materiálu se třemi tlumíci



Obrázek 12: Simulovaná celková síla F , $A=5\text{mm}$, $f=(0.1 \div 10)\text{Hz}$, $A_0=25\text{mm}$
(porovnej s obr. 7 na str. 11)



Obrázek 13: Simulovaná tlumicí síla F_t , $A=5\text{mm}$, $f=(0.1 \div 10)\text{Hz}$, $A_0=25\text{mm}$
(porovnej s obr. 8 na str. 11)

- Velikost simulačních chyb v hodnotách celkové síly F i disipované práce W_d je vzhledem k obecnosti modelu při harmonickém zatěžování přijatelná.

Chování modelu se také samozřejmě v některých momentech od skutečnosti odchyluje:

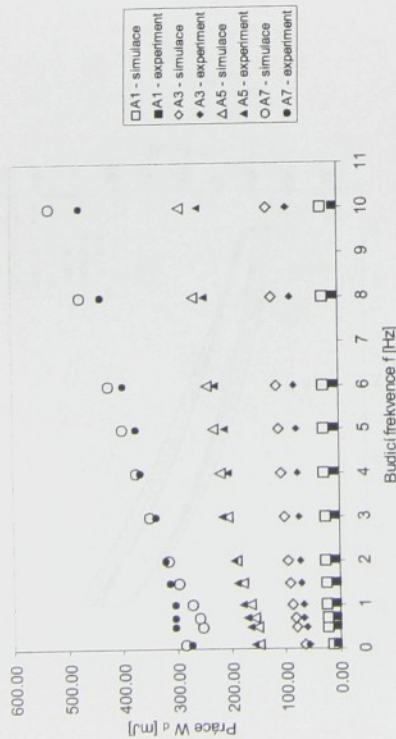
- V důsledku strmného nárůstu koeficientu smykového tření v oblasti malých rychlostí dochází při reverzaci pohybu k neplynulé změně znaménka třecí síly. Projevuje se to více či méně hranatým tvarem hysterezních křivek v úvratích, který neodpovídá pozorování.
- Přesto, že se při změně frekvence daří udržovat polohu extrémů tlumicí síly na omezeném intervalu, rozhodně nelze mluvit o její nezávislosti na frekvenci. Tu lze v přibližné podobě ojedinelé sledovat v případech střední hodnoty 20 mm a amplitudách 5 a 10 mm při vyšších frekvencích. Tato vlastnost modelu je patrně způsobena použitou definicí koeficientu smykového tření a vyvážením poměru třecí a viskózní složky tlumení při nižších rychlostech. Souvisí tak tedy i s vlastností popsanou v předchozím odstavci.
- Zvýšení hodnot tlumicí síly při amplitudě 1 mm a všech alternativách frekvence a střední hodnoty má zřejmě stejnou příčinu.

Model byl také verifikován trojúhelníkovým průběhem polohy při značné relativní deformaci a širokém rozsahu frekvenci, ale pro konstantní střední hodnotu i amplitudu. Parametry modelu byly zvoleny s cílem co nejlépe vyhovět naměřenému průběhu síly při nižší variabilitě budícího signálu. Na chování v jiných oblastech zatěžování nebyl brán zřetel. Bylo zde dosaženo velmi dobré shody simulace s experimentem, přičemž průběh disipované práce v důsledku tlumení v závislosti na frekvenci se téměř shoduje s naměřenými hodnotami.

Kromě uvedených funkčních vlastností má model některé příjemné vlastnosti uživatelské, protože jeho konstrukce je poměrně jednoduchá a přehledná. Přestože má prakticky 24 konstant, lze si v průběhu odlaďování do značné míry osvojit souvislosti mezi jejich změnou a důsledky na výstupu modelu. Další výhodou je stabilita chování modelu při změně jeho parametrů. Model je velmi odolný proti tomu, aby malá změna některé konstanty vedla k zásadním nebo nepředpokládaným změnám na jeho výstupu.

5 Měření na konkrétním sedáku

Výsledné vibroizolační vlastnosti sedáku jsou kromě vlastností základního materiálu, tedy polyuretanu, ovlivňovány dalšími faktory. Těmi jsou tvarování polyuretanového polotovaru, ve kterém jsou ještě umístěny drátové



Obrázek 14: Práce simulované a experimentálně zjištěné tlumicí síly W_d v závislosti na frekvenci budícího signálu f ; $A=(1, 3, 5, 7)$ mm, $A_0=25$ mm

Reologický model mechanických vlastností vzorku PU pěny byl verifikován na velmi širokém rozsahu parametrů budícího signálu. V případě harmonické excitace jsou výsledky uvedeny na obr. 12 a 13. Při porovnání s průběhy síly získanými experimentálně (obr. 7 a 8) lze konstatovat, že model respektuje chování PU pěny v mnoha ohledech:

- Dodržuje charakteristické napřimování hysterezních smyček s rostoucí frekvencí.
- Respektuje hruškovitý tvar průběhu tlumicí síly F_t v závislosti na poloze x , včetně předpokládaného vývoje s rostoucí frekvencí.
- Polohy extrémů tlumicí síly v závislosti na frekvenci (při zvolené střední hodnotě a amplitudě) se vyskytují v omezeném pásmu, ikdyž poměrně širokém.
- Vývoj práce tlumicí síly W_d (obr. 14) v závislosti na frekvenci zachovává převážující lineární charakter a pohybuje se v hodnotách blízkých experimentálním výsledkům.
- Největší absolutní odchylka v průběhu práce tlumicí síly nastává až na hranici zatěžovací oblasti při střední hodnotě 30 mm a amplitudě 7 mm.

prvky pro uchycení švů polstrování, látka polstrování a její vypnutí, přítomnost a poloha švů a případně také vložená netkaná textilie mezi polyuretanem a polstrováním. V práci byly zjišťovány tuhostní a útlumové vlastnosti různých místech sedáku (viz obr. 15).

Závěr

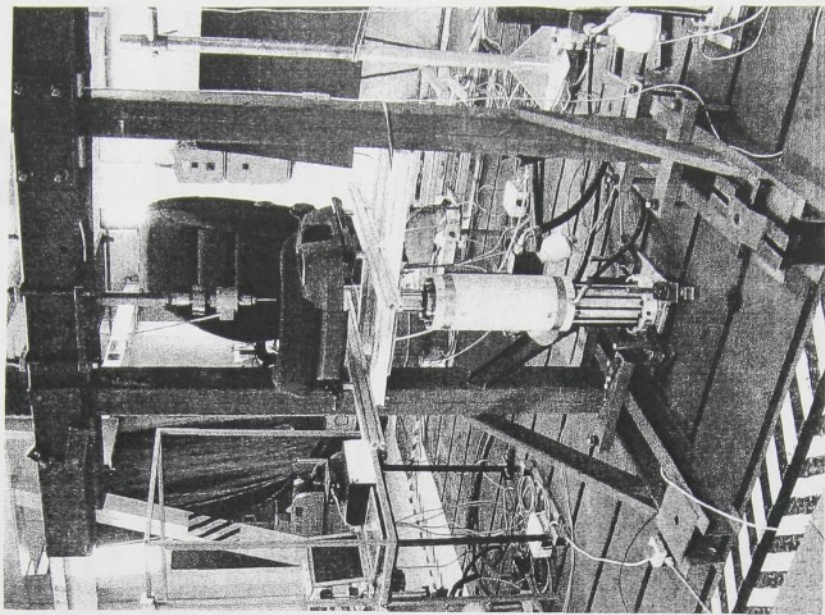
V první kapitole byla měření na vzorku polyuretanové pěny prokázána silně nelineární závislost zatěžující síly na deformaci. Z dalších typických vlastností uvedně např. napřimování hysterzní smyčky při cyklickém zatěžování s rostoucí frekvencí, masivní relaxační děj či nehomogenní rozložení poměrně deformace v zatěžovaném průřezu nebo Poissonovo číslo blízké 0. Stejně tak se podařilo identifikovat oblasti, v nichž jisté charakteristické veličiny mají lineární závislost pozorovatelnou na velmi širokém intervalu vstupních parametrů budícího signálu. Jsou jimi lineární závislost práce tlumící síly na frekvenci buzení a nezávislost polohy extrému budící síly na téměř parametru. Prokázání existence těchto vlastností zásadním způsobem napomáhá úspěšnému vývoji simulačního modelu PU pěny.

V kapitole druhé je diskutován vliv proudění vzduchu otevřenými póry polyuretanu v průběhu stlačování. Bylo provedeno měření ve vakuové komoře, které přes popsané problémy vede k závěru, že proudění vzduchu ovlivňuje tlumící vlastnosti pěny v míře, která není v žádném případě srovnatelná s vlastním materiálovým tlumením. Proto jej lze v simulačním modelu zanedbat.

V třetí kapitole je uvedena metoda pro simulaci tlumící síly pomocí vztahu $F_t = b_0 |x^a|$ a charakteristickým pro materiálový útlum a známém z literatury. Díky aplikaci poznatků uvedených v kapitole první bylo dosaženo velmi dobrých výsledků ve srovnání s experimentálním měřením.

Ve čtvrté kapitole je na základě úvahy o fyzikálních procesech probíhajících v pěně sestaven její simulační model. Verifikován byl na širokém intervalu parametrů budícího polohového signálu. V případě harmonického signálu je to střední hodnota 20, 25, 30 mm, amplitudy 1 až 7, resp. 10 mm a frekvence 0.1 až 10 Hz. Vyhověl s uspokojivou přesností. Pro nižší variabilitu parametrů buzení v případě trojúhelníkového signálu polohy bylo dosaženo výsledků ještě přesnějších. Pro ladění modelu je výhodná jeho odolnost proti přílišné citlivosti ve vztahu mezi změnou vnitřních parametrů a ovlivněním odezvy na výstupu a také poměrně přehledné uspořádání. Zcela zásadní význam při hledání konstant modelu měla znalost lineárních vlastností prokázaných v kapitole první.

V páté kapitole je provedeno měření závislosti zatěžující síly na deformaci a její rychlosti na skutečném automobilovém sedáku. Přesto, že se jedná o komplikovanou soustavu základního polyuretanového polotovaru, kovových výstužů a prošitého čalounění, byly zde identifikovány charakterové stejné závislosti jako u vzorku prosté PU pěny, včetně přibližné lineární závislosti



Obrázek 15: Uspořádání experimentu

práce tlumící síly na frekvenci a nezávislosti polohy jejího extrému na frekvenci. Z toho lze dedukovat, že simulační model kompletního sedáku bude kvalitativně shodný a bude jej možno sestavit na stejném principu, jako u vzorku pěny.

Přes všechna uvedená pozitivní modela popsaného v kap. 4 je třeba konstatovat, že se jedná o model I. generace a v budoucnu je možné pracovat na jeho zpřesnění, zejména v oblasti vyvážení frikčních a viskózních vlastností při malých rychlostech.

Reference

- [1] Cirkl, D.: Identifikace tlumících vlastností polyuretanové pěny. Dílčí výzkumná zpráva VS 9708, TU Liberec, Liberec 2000
- [2] Cirkl, D.: Mechanické vlastnosti polyuretanové pěny. Dílčí výzkumná zpráva 1453-04 pro výzkumný záměr MŠMT - VZ MSM 242100003 - Interakce vibroizolačního systému s okolním prostředím, Technická univerzita v Liberci, Liberec 2001
- [3] Cirkl, D., Šklíba, J.: Práce na simulačním modelu polyuretanové pěny, sborník konference Inženýrská mechanika 2002, VÚT Brno, Brno 2002
- [4] Cirkl, D.: Možnost aplikace umělých neuronových sítí v oblasti modelování mechanických vlastností polyuretanové pěny, projekt vakuové komory. Dílčí výzkumná zpráva 1453/2002/04 pro výzkumný záměr MSM 242100001: Optimalizace vlastností strojů a pracovních procesů - interakce vibroizolačního systému s okolním prostředím, Technická univerzita v Liberci, Liberec 2002
- [5] Cirkl, D.: Problémy s měřením vlastností polyuretanové pěny ve vakuu. Dílčí výzkumná zpráva VZ 1453/2003/5 pro výzkumný záměr MSM 242100001: Optimalizace vlastností strojů a pracovních procesů - interakce vibroizolačního systému s okolním prostředím, Technická univerzita v Liberci, Liberec 2003
- [6] Cirkl, D.: Simulace tlumení polyuretanového materiálu při harmonickém buzení, sborník konference IX. International conference on the theory of machines and mechanisms IFToMM, Technická univerzita v Liberci, Liberec 2004
- [7] Šubrt, J., Protiva, J.: Měření vibrací vozidel Š 781, zkušební záznam (ZZ-A 302/88 Š 781-124), VÚMV Praha, Praha 1989
- [8] Vacek, M.: Komplexní výzkum sedadla z hlediska bezpečnosti a pohodlí, výzkumná zpráva, VÚMV Praha
- [9] Záruba, L.: Rozložení měrných tlaků na sedadlech osobních a malých užitkových automobilů, výzkumná zpráva (Z-81/70), VÚMV Praha, 1970
- [10] Vacek, M., Záruba, L.: Rozložení měrných tlaků na sedadlech malých užitkových automobilů Š 1202, Š 1203 (HS 567/70, etapa 2c), VÚMV Praha, Praha 1970
- [11] Záruba, L.: Dynamické zkoušky sedadel automobilů a hydropulsní zařízení, čís. zp. (K-59/74), VÚMV Praha, Praha 1974

[26] Nedjar, B.: Frameworks for finite strain viscoelastic-plasticity based on multiplicative decompositions. Part I: Continuum formulations. www.elsevier.com/locate/cma. Computer methods in applied mechanics and engineering 191 (2002) 1541-1562

[27] Nedjar, B.: Frameworks for finite strain viscoelastic-plasticity based on multiplicative decompositions. Part II: Computational aspects. www.elsevier.com/locate/cma. Computer methods in applied mechanics and engineering 191 (2002) 1563-1593

[28] Dmitriev, V., N. Gradeckij, V., G.: Osnovy pnevmoavtomatiki, Mašinstroenie, Moskva 1973

[29] Zalmanzon, L., A.: Protočnye elementy pnevmatičeskich priborov kontrolja i upravlenija, Izdatelstvo akademii nauk SSSR, Moskva 1961

[30] Noskivič, P.: Modelování a identifikace systémů, Montanex a.s., Praha 1999

[31] Krebsová, M.: Nauka o polymerech, skripta, VŠST v Liberci, Liberec 1978

[32] Juliš, K., Brepta R.: Mechanika: Dynamika díl 2., SNTL, Praha 1987

[33] Brebta, R., Půst, L., Turek, F.: Mechanické kmitání, Sobotáles, Praha 1987, ISBN 80-901684-8-5

[12] Vacek, M.: Porovnávání měření prodyšnosti nábytkových polštářů pro vodní páry, výzkumná zpráva (K-59/74), VÚMV Praha, 1974

[13] Vacek, M.: Porovnávání měření prodyšnosti nábytkových polštářů pro vodní páry, výzkumná zpráva (K-59/74), VÚMV Praha, 1974

[14] Záruba, L.: Výzkum požadavků na výhled, sezení a rozmístění ovladačů z hlediska aktivní bezpečnosti, výzkumná zpráva (Z-54/72), VÚMV Praha, 1972

[15] Šklíba, J., Štengl, M., Barbora, J.: Oživení a optimalizace prototypu sedadla, výzkumná zpráva (90-03005), SVÚSS Běchovice, Praha 1990

[16] Sedadla uživatelských vozidel z hlediska přenosu vibrací, výzkumná zpráva, SVÚSS Běchovice, Praha 1989

[17] Klejch, J., Černý, J., Hospůdka, M.: Zpráva k závěrečnému oponentnímu řízení etapy výzkumu oborového úkolu OC 334 - odpružené sedadlo řidiče - k 389, n.p. Karosa, Vysoké Mýto 1975

[18] Barbora, J., Louda, L., Šklíba, J., Vavřimová, J., Záruba, L.: Výzkum a vývoj vzduchem odpruženého sedadla řidiče pro nákladní automobily a autobusy, zpráva k oponentnímu řízení, st. podnik PIKAZ Praha

[19] Šimůnek, I., Roubal, J., Buryška, R., Reitinger, M.: Měření frekvencí svislých a vodorovných zrychlení odpruženého sedadla řidiče - typ 8202, Výzkumný ústav dopravní Praha

[20] Yu Wang, C., Cutino, A., M.: Full-field measurements of heterogeneous deformation patterns of polymeric foam using digital image correlation. International Journal of Solids and Structures 39, 2002

[21] Patten, W., N., Sha, S., Mo, C.: A vibration model of open cell polyurethane foam automotive seat cushions. Journal of Sound and Vibrations 217(1), 1998

[22] Ramsteiner, N., Fell, N., Forster, S.: Testing the deformation behaviour of polymer foams. www.elsevier.nl/locate/polytest. Polymer Testing 20 (2001) 661-670

[23] Shen, Y., Golnaraghi, F., Plumtree, A.: Modelling compressive cyclic stress-strain behaviour of structural. www.elsevier.nl/locate/ijfatigue. International Journal of Fatigue 23 (2001) 491-497

[24] Mills, N., J.: Micromechanics of Polymer foams. 3rd nordic meeting on Materials and Mechanics, Aalborg, Denmark 2000, 45-76

[25] Ehlers, W., Markert, B.: A macroscopic finite strain model for cellular polymers. www.elsevier.com/locate/ijplas. International Journal of plasticity 19 (2003) 961-976

Vydala: Technická univerzita v Liberci, Hájkova 6, Liberec
Fakulta strojní TU v Liberci
Stav ke dni: 18.10.2005
Číslo publikace: 55-087-05