

SIMULAČNÍ MODEL PIEZOELEKTRICKÉHO AKČNÍHO ČLENU

J. Los, J. Tůma

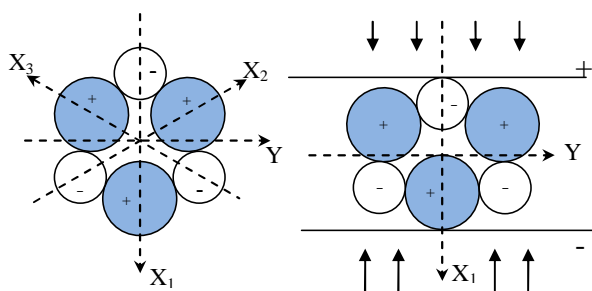
VŠB – Technická univerzita Ostrava, Česká republika

Abstrakt

V dnešní době se stále více dostávají do povědomí piezoelektrické akční členy. Jedná se o akční členy, které pracují na principu piezoelektrického jevu. Tyto akční členy mají specifické vlastnosti, které se projevují především vysokým frekvenčním rozsahem, malým posunutím za přítomnosti relativně velkých tlakových a tahových sil. Tento příspěvek se zabývá postupným návrhem simulačního modelu piezoelektrického akčního členu v prostředí MATLAB a to typového piezoelektrického akčního členu P-842.40 od německé firmy Physik Instrumente.

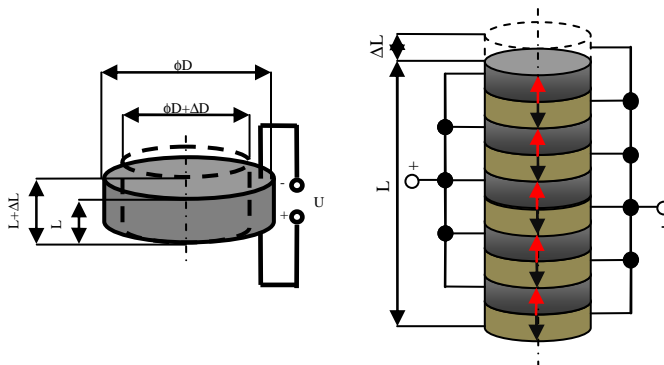
1 Piezoelektrické akční členy

Piezoelektrické akční členy představují aktuátory pracující na principu zpětného piezoelektrického jevu. Jedná se o změnu tvaru tělesa (deformaci) vlivem změny elektrického pole v piezoelektrickém materiálu (materiál, u kterého se projevuje piezoelektrický jev). Mezi přírodní piezoelektrický materiál patří např. křemen, topaz atd. Tyto přírodní materiály se projevují malými deformacemi, proto se v dnešní době používají uměle vytvořené materiály, jako jsou např. piezokeramiky PZT, které mají příznivější vlastnosti.



Obrázek 1: Schematická krystalová struktura křemene před a po deformaci

Piezoelektrický akční člen typu P-842.40, pro který bude sestavován simulační model, se řadí do skupiny piezoelektrických akčních členů, které jsou nazývané „stack actuators”. Tyto akční členy jsou složeny s více piezoelektrických elementů, tak aby se dosáhlo požadovaného prodloužení a mohli generovat větší síly. Mezi jednotlivými elementy jsou umístěny tenké elektrody, které vytváří elektrické pole působící na daný element a ten se důsledkem toho deformuje požadovaným směrem.




Obrázek 2: Samostatný piezoelektrický element a vnitřní uspořádání piezoelektrického akčního členu

2 Vlastnosti piezoaktuátorů a jejich ověření

Jak již bylo zmíněno, tento příspěvek se zabývá simulačním modelem typového piezoelektrického akčního členu P-842.40 od firmy Physik Instrumente. Tato firma dodává dvě provedení těchto typů piezoelektrických akčních členů. Prvním provedením je provedení bez zpětné vazby, u kterého akční člen vykazuje hysterezi. Druhým provedením je provedení se zpětnovazební regulací polohy, které má lineární statickou charakteristiku bez hystereze. V tomto příspěvku bude popisován piezoelektrický akční člen v prvním provedení a to tedy vykazující hysterezi.

Tabulka 1: ZÁKLADNÍ ÚDAJE UDÁVANÉ VÝROBCEM PRO PIEZOAKTUÁTOR P-842.40

Model	P-842.40	
Maximální protažení [μm]	60±20%	
Statická tuhost [N/μm]	15±20%	
Síla v tahu [N]	300	
Síla v tlaku [N]	800	
Rezonanční frekvence [kHz]	8,5±20%	

Z údajů, které uvádí výrobce pro daný typ piezoelektrického akčního členu (Tabulka 1.), je patrný velký rozsah maximálního protažení s rozptylem ±20%, což představuje v případě použitého typu akčního členu rozmezí protažení 48-72μm. Z důvodu relativně malých prodloužení tohoto akčního členu je zapotřebí počítat i s jeho tuhostí, která ovlivňuje výsledné prodloužení. Výrobce uvádí základní výpočty maximálního prodloužení pro statické a dynamické zatížení piezoaktuátoru.

Pro pokles maximální prodloužení ΔL_s v závislosti na statické zatěžující síle je uváděna rovnice

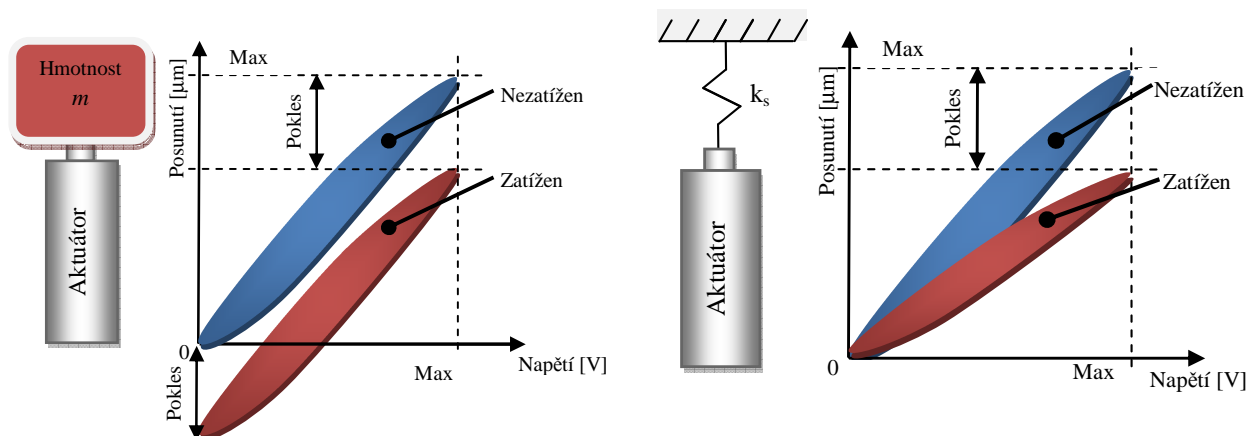
$$\Delta L_s \approx \frac{F}{k_p} \quad (1)$$

, kde F je zatěžující síla v N, k_p statická tuhost piezoaktuátoru v N/μm.

V případě dynamického zatížení je udávána rovnice pro pokles maximální prodloužení ΔL_r ve tvaru

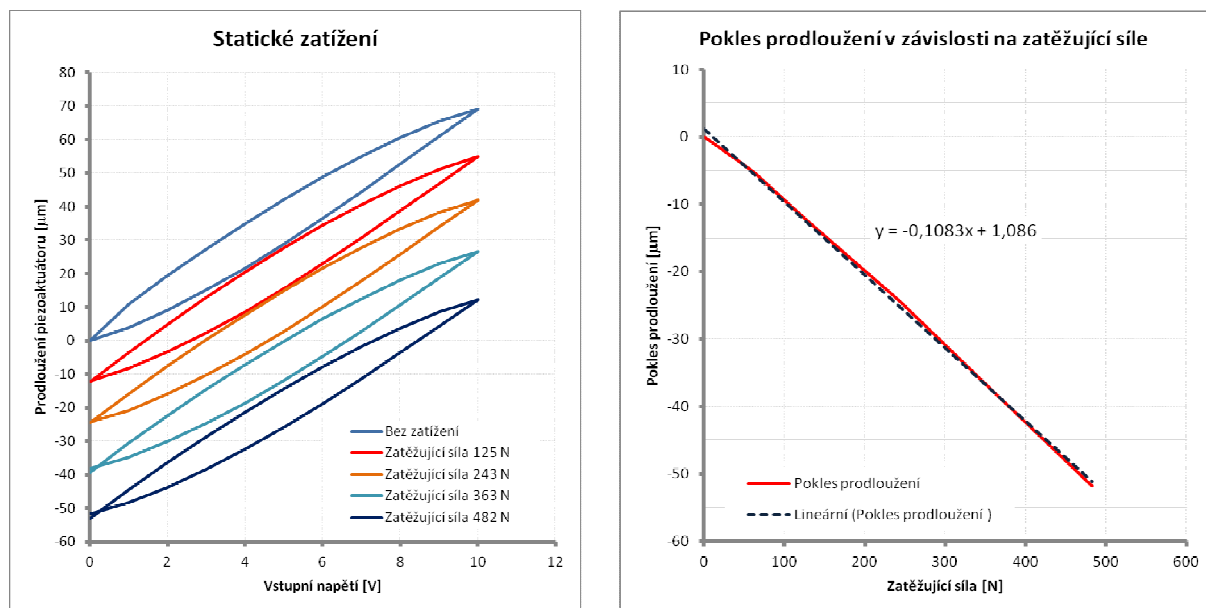
$$\Delta L_r \approx \Delta L_n \left(1 - \frac{k_p}{k_p + k_s} \right) \quad (2)$$

kde ΔL_n je maximální prodloužení v nezatíženém stavu v μm, k_s je tuhost dynamického zatížení v N/μm, k_p je statická tuhost piezoaktuátoru v N/μm.



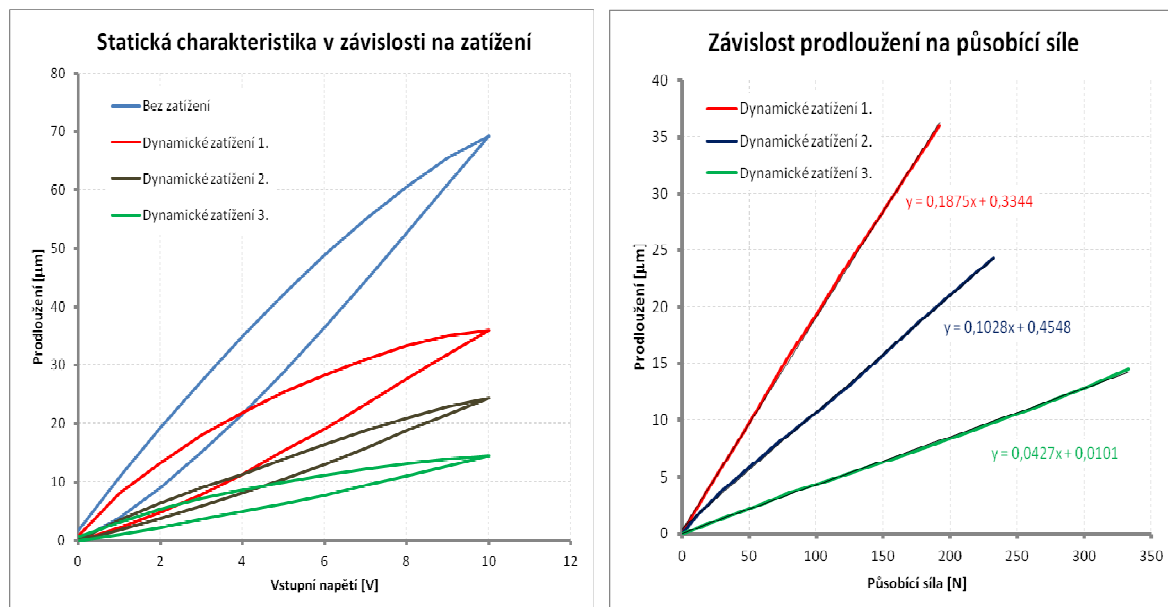
Obrázek 3: Princip poklesu maximálního prodloužení vlivem statického a dynamického zatížení

Pro získání parametrů typového piezoelektrického akčního členu a ověření vlastností naznačených na posledním obrázku (Obrázku 3.) bylo přistoupeno k měření statických charakteristik a to při statickém i dynamickém zatížení. Toto měření bylo prováděno na laboratorním zařízení. Zařízení umožňuje postupné zatěžování piezoelektrického akčního členu danými silami.



Obrázek 4: Naměřené statické charakteristiky pro zatížení statickou silou

Měření probíhalo postupným nastavováním vstupního napětí na zesilovači piezoelektrického akčního členu, následné výstupní hodnoty byly odečítány, na multifunkčním zařízení Pulse od B&K. Výstupní hodnoty byly získány z ustálených stavů pro jednotkové skoky od 1 do 10 V a zpět.

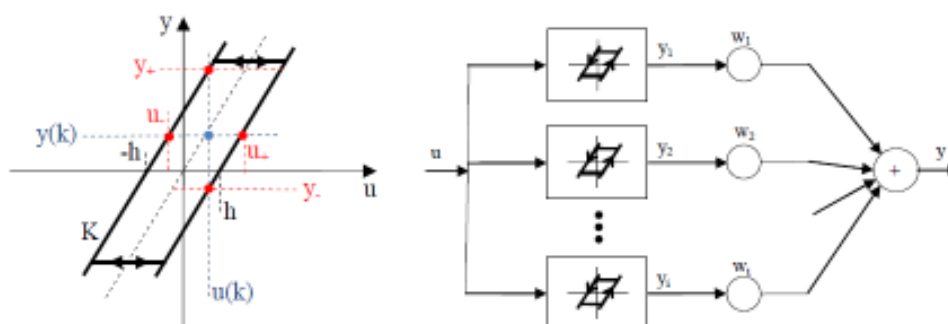


Obrázek 5: Naměřené statické charakteristiky pro zatížení dynamickou silou

3 Simulační model typového piezoelektrického akčního členu

Jak je zřejmé z naměřených dat, piezoelektrický akční člen vykazuje hysterezi. Z tohoto důvodu je na simulační model tohoto akčního členu pohlíženo, jako na simulační model hystereze. Pro vytvoření tohoto modelu byl použit Prandtlův-Išlinského (P-I) model hystereze. P-I model hystereze je odvozen od Preisachova modelu hystereze. Ten byl odvozen s ohledem na fyzikální představě vzniku hystereze ve feromagnetických materiálech. Jednalo se o představu, že tento materiál je složen z nekonečného počtu malých dipólů, které si můžeme představit jako magnetky, které se překlápí v závislosti na intenzitě magnetického pole [2]. U Preisachova modelu jsou tyto prvky zastoupeny elementární hysterezí typu relé a u P-I modelu jsou tyto prvky zastoupeny elementární hysterezí typu vůle v převodech.

U dané elementární vůle v převodech mohou nastat tři stavy. Dva stavy jsou zastoupeny sledováním hraničních tzv. záběrových přímk a to podle toho, zdali vstupní hodnota narůstá nebo klesá. Třetí stav je vůle, do které se výstup dostane, když dojde ke změně vstupu z rostoucího na klesající nebo naopak. V tomhle stavu setrvává (má stejnou hodnotu), dokud se nedostane opět na záběrovou přímku.

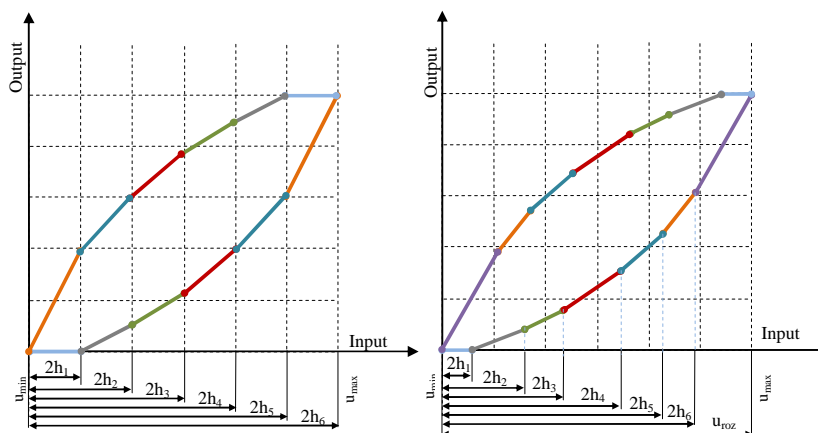


Obrázek 6: Hystereze typu vůle v převodech a blokové schéma P-I modelu hystereze

P-I model lze považovat za systém, u kterého je pro jednoznačné určení výstupní hodnoty $y(k)$ nutné znát hodnotu vstupní veličiny $u(k)$ a vektor stavu jednotlivých elementárních prvků v okamžiku $k-1$. Je nutné také znát hodnoty vah w a hysterezí h jednotlivých elementárních prvků jako vektory. Stav jednotlivých elementárních prvků musí splňovat podmínky konzistence [2]. Potom může být P-I model hystereze popsán jako

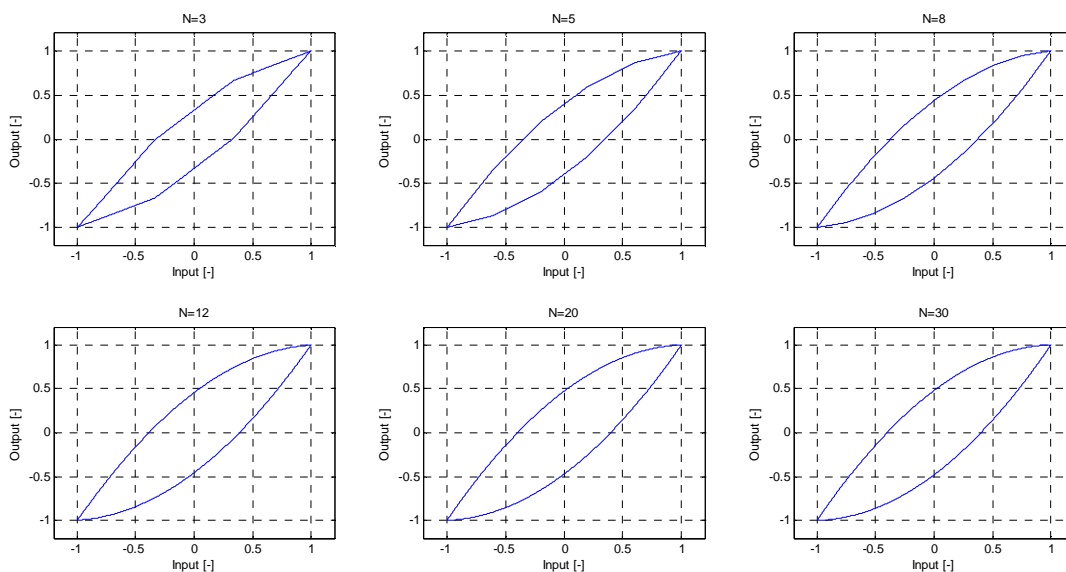
$$y = \mathbf{H}_{h,w}(u, y) \quad (3)$$

Hodnoty vektoru h volíme s ohledem na maximální rozsah používaného vstupu. Například, když budeme používat vstup s rozmezí hodnot $\langle -1, 1 \rangle$ a budeme chtít použít 5 elementárních hysterezí, můžeme uvažovat vektor hodnot $h = [0, 0,25, 0,5, 0,75, 1]$. Hodnoty vektoru vah w se volí s ohledem na požadované hodnoty výstupu.

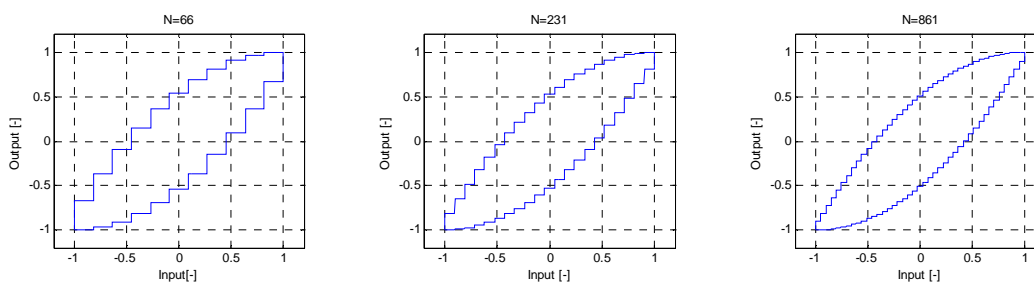


Obrázek 7: Vliv hodnot vektoru h na výsledný tvar hystereze bez působení vektorů vah w

Výhodou P-I modelu je to, že není potřeba velké množství elementárních hysterezí k získání požadovaného tvaru oproti Preisachovu modelu (Obrázek 9). Vliv počtu použitých elementárních hysterezí u P-I modelu na výsledný průběh je vidět na následujícím obrázku (Obrázek 8.).

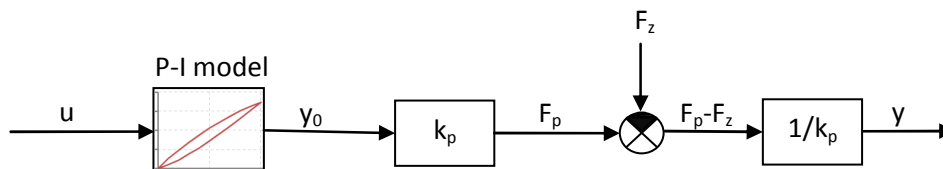


Obrázek 8: Vliv počtu použitých elementárních vřít v převodech na výslednou hysterezi u P-I modelu



Obrázek 9: Vliv počtu použitých hysterezí na výslednou hysterezi u Preisachova modelu

Výsledný simulační model, který zde bude následně popsán, je statický modelem piezoelektrického akčního členu. Nezabývá se dynamickými vlastnostmi tohoto akčního členu, ale závislostí poklesu prodloužení na zatěžující síle v ustálených stavech. Schematickou podobu statického piezoelektrického akčního členu můžeme vidět na následujícím obrázku.

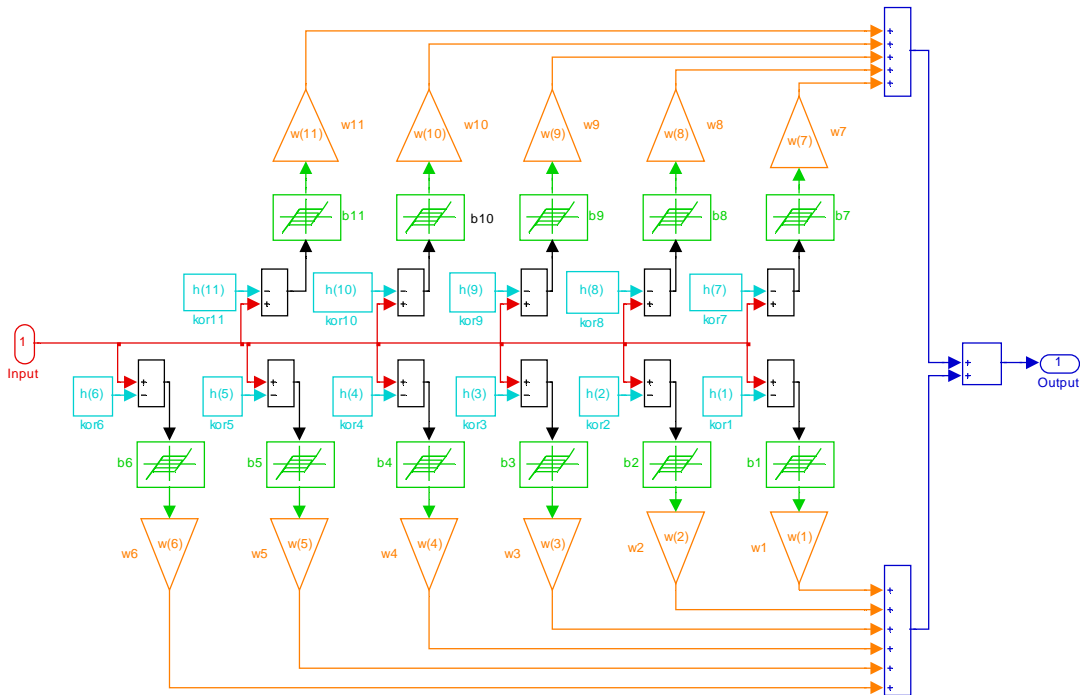


- u - vstupní hodnota
- y_0 - prodloužení bez zatížení
- y - výstupní prodloužení
- k_p - statická tuhost piezoaktuátoru
- F_p - síla piezoaktuátoru
- F_z - zatěžující síla

Obrázek 10: Výsledný model piezoelektrického akčního členu

Tento model obsahuje P-I model, který byl vytvořen s ohledem na výslednou hysterezi akčního členu v nezátíženém stavu a dále pak sumační člen, který realizuje vzájemné působení zatěžující síly a síly vyvinuté piezoaktuátorem v závislosti na jeho tuhosti.

P-I model pro simulovanou hysterezi typového piezoaktuátoru P-842.40 v nezátíženém stavu, byl vytvořen pomocí 11 elementárních vůlí v převodech, které byly v Simulinku realizovány prostřednictvím bloku Backlash. Hodnoty složek vektoru h_i byly voleny s ohledem na vstupní napětí pro piezoelektrický zesilovač 0-10V a to podle tabulky (Tabulka 2.). Vektor vah w_i P-I modelu byl volen metodou pokus omyl, tak aby se simulovaný průběh co nejlépe přiblížili reálnému průběhu. Podobu výsledného P-I modelu realizovaného v MATLAB – Simulink můžeme vidět na následném obrázku (Obrázek 11.).



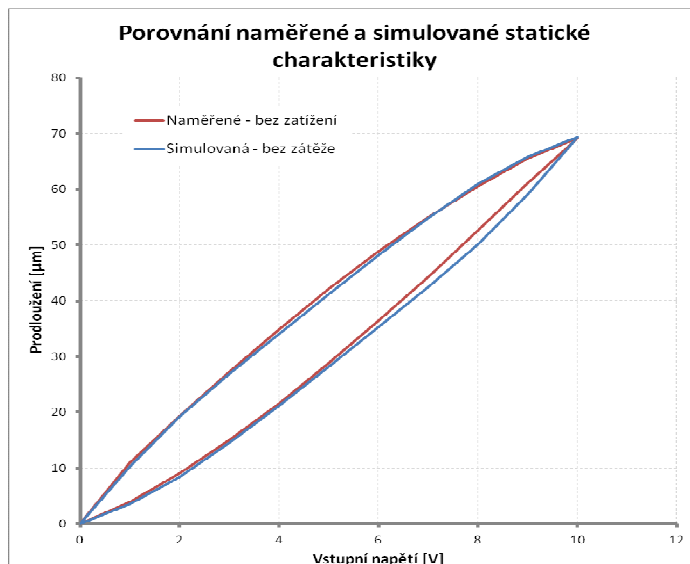
Obrázek 11: Výsledné schéma P-I modelu v prostředí MATLAB – Simulink

Bohužel v Simulinku není možnost definovat blok backlash jinak, nežli nastavit šířku pásma necitlivosti. Tento blok se chová, jako by měl rozdělen velikost vůle na kladné a záporné hodnoty h_i . Proto, byla provedena úprava u těchto bloků a to tak, že se hodnoty vstupu posunuly do záporných hodnot podle daného h_i a hodnoty šířky necitlivosti v bloku backlash jsou nastaveny na $2h_i$.

Tabulka 2: PARAMETRY VÝSLEDNÉHO P-I MODELU A PRŮBĚH VSTUPNÍHO SIGNÁLU

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
h_i	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
w_i	3,55	1,3	1,3	0,508	0,355	0,127	0,025	0,508	1,3	1,3	3,55

Pro ověření funkčnosti P-I modelu byla provedena simulace pro nezátížený stav. Pro simulaci byl zvolen vstupní signál, který nejdříve stoupal 0-10 a následně klesal 10-0. Výsledný průběh simulované a naměřené hystereze můžeme vidět na následujícím obrázku (Obrázek 12.).



Obrázek 12: Srovnání naměřené a simulované statické charakteristiky piezoaktuátoru P-842.40

4 Závěr

Tento příspěvek byl zaměřen na vytvoření statického modelu typového piezoelektrického akčního členu, který patří do skupiny „stack actuator“. Tyto akční členy si můžeme představit jako lineární motory, které dosahují relativně malého prodloužení v řádech μm , přičemž vyvinou velké tlakové a tahové síly. Nevýhodou těchto akčních členů je to, že v otevřené smyčce vykazují hysterezi a z důvodů jejich malého prodloužení, je potřeba počítat i s tuhostí daného aktuátoru. Pro ověření vlastností typového piezoaktuátoru, bylo provedeno měření a to jak v nezátíženém tak také v zatíženém stavu. V části zaměřené na vytvoření simulačního modelu piezoelektrického akčního členu, je popsán postup návrhu tohoto modelu pomocí Prandtlova-Išlinského modelu hystereze (P-I model). Tento model je odvozen od Preisachova modelu. P-I model využívá pro modelování hystereze elementárních hysterezí typu vůle v převodech. Jednotlivé výstupy z těchto elementárních hysterezí se mění v závislosti na velikosti jednotlivých pásem necitlivostí, které jsou voleny v závislosti na rozsahu vstupního signálu. Pomocí vah se následně utváří výsledný tvar simulované hystereze. V poslední části byl vytvořen simulační P-I model typového piezoelektrického akčního členu v nezátíženém stavu, který využívá 11 elementárních hysterezí typu vůle v převodech a byl realizován v prostředí MATLAB – Simulink. Pro ověření správnosti modelu byl vytvořen graf, který porovnává simulovaná a reálně naměřená data.

Reference

- [1] M.Rakotonbrade & C.Clévy & P.Lutz. *Complete open loop control of hysteretic, creeped, and oscillating piezoelectric cantilevers*. Besançon, 2008, France. IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATION SCIENCE AND ENGINEERING 2010.
- [2] F. Šolc. *Modelování hystereze v mechatronických systémech*. Brno, 2007. [online] Automa 2007.

Jaroslav Los – jaroslav.los.st@vsb.cz

VŠB - Technická Univerzita Ostrava, ul. 17.listopadu č.15, 708 33 Ostrava – Poruba
Fakulta strojní, Katedra automatizační techniky a řízení.

Jiří Tůma – jiri.tuma@vsb.cz

VŠB - Technická Univerzita Ostrava, ul. 17.listopadu č.15, 708 33 Ostrava – Poruba
Fakulta strojní, Katedra automatizační techniky a řízení.