



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

KOVY S TVAROVOU PAMĚTÍ - MODELOVÁNÍ NELINEÁRNÍCH SYSTÉMŮ S HYSTEREZÍ

SHAPE MEMORY ALLOYS - MODELLING OF NON-LINEAR SYSTEMS WITH HYSTERESIS

ZKRÁCENÉ ZNĚNÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE

SHORT VERSION OF DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Michal Vašina

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

prof. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

BRNO 2017

Abstrakt

Práce popisuje možnost použití kovu s tvarovou pamětí jako netradičního akčního členu ve vybraném mechatronickém systému. Praktická část práce je věnována experimentálnímu ověření vlastností vybraného kovu s tvarovou pamětí a dále pak návrhu a realizaci nového typu elektricky ovládaného sedlového ventilu, využívajícího akčního členu v podobě kovu s tvarovou pamětí. Tento ventil je navržen jako náhrada tradičního řešení a současně je integrován do patice pneumatického svalu McKibbenova typu. Dále jsou zde uvedeny výsledky praktického ověření funkčnosti navrženého řešení sedlového ventilu, stanoveny omezující podmínky na jeho provedení a využití.

V teoretické části práce je, v souvislosti s použitím kovu s tvarovou pamětí, rozebrána problematika modelování nelineárních systémů s hysterezí. Dále je navrženo nové vlastní řešení, umožňující modelování hystereze s nelokální pamětí, přičemž toto řešení využívá pro svou funkci nelineární výpočetní prvek definovaný pomocí goniometrické funkce kosinus. Prostřednictvím simulací a s využitím experimentálně získaných dat, jsou ověřeny vlastnosti navrženého řešení.

Klíčová slova

Kovy s tvarovou pamětí, sedlový ventil, netradiční akční člen, hystereze, modelování.

Abstract

This work describes a possibility to use a shape memory alloy as a non-traditional actuator in a particular mechatronic system. The practical part of this work is dedicated to the experimental property verification of the chosen shape memory alloy and also to the design and realization of the new type of electrically controlled gabled valve that uses a shape memory alloy as an actuator. This valve is designed as a replacement of the traditional solution and is also integrated into McKibbens pneumatic muscle endcap. There are also results of practical functional verification of the designed gabled valve solution listed here, and the limited condition for its manufacturing and use is stated here.

In the theoretical part of this work, firstly, the shape memory alloy and non-linear systems hysteresis type are discussed. Secondly a new particular solution is designed, which is based on a non-linear computational element, defined by goniometric cosine function. Finally, the properties of the designed solution are verified through the simulations and with the use of experimentally gained datas.

Keywords

Shape Memory Alloys, Gabled valve, Untraditional actuators, Hysteresis, Modelling.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	3
1 ÚVOD	4
1.1 Zaměření práce – motivace dizertační práce	4
1.2 Cíle dizertační práce	5
2 AKČNÍ ČLENY.....	6
2.1 Tradiční akční členy	6
2.2 Netradiční akční členy	6
2.3 Srovnání akčních členů.....	7
3 KOVY S TVAROVOU PAMĚTÍ	8
3.1 Princip SME.....	8
3.2 Vlastnosti SMA	10
3.3 Experimenty a ověření vlastností SMA	11
3.3.1 Měření statických charakteristik	11
3.3.2 Měření dynamických charakteristik	12
3.4 Výsledky měření a experimentů	17
4 SEDLOVÝ VENTIL S SMA AKČNÍM ČLENEM.....	18
4.1 Ověření funkčnosti a experimenty.....	18
4.2 Zhodnocení navrženého řešení a návrh dalších úprav	21
5 MODELÝ HYSTEREZÍ.....	22
5.1 Liang-Rogersův model	22
5.2 Preisachův model [1]	23
5.3 Prandtl-Ishlinského model	25
5.4 Modifikovaný Prandtl-Ishlinského model	27
5.5 Návrh vlastního modelu.....	27
5.6 Simulace a vzájemné porovnání modelů	30
5.6.1 Simulace	30
5.6.2 Porovnání modelů	38
5.7 Zhodnocení navrženého řešení a výsledků simulací.....	40
5.8 Možnosti zpřesnění modelů.....	41
6 ZÁVĚR.....	43
7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	44

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

EAP	Electro-Active Polymers (Elektroaktivní polymery)
ERF	Electro-Rheological Fluids (Elektorheologické kapaliny)
CP	Conductvie Polymers (Vodivé polymery)
IPG	Iont Polymer Gels (Iontové polymerní gely)
VCT	Vibratory Coupler Type (Vibračně vázaný typ)
SMA	Shape Memory Alloy (Kov s tvarovou pamětí)
SME	Shape Memory Effect (Jev tvarové paměti)
TWSME	Two Way Shape Memory Effect (Jev dvoustavové tvarové paměti)
A_S	Austenite start - teplota začátku austenitu
A_F	Austenite finish - teplota konce austenitu
M_S	Martensite start - teplota začátku martenzitu
M_F	Martensite finish - teplota konce martenzitu
T	Teplota SMA elementu
ε_{mh}	Martenstite fiction heating – frakce martensitu při ohřevu
ε_{mc}	Martenstite fiction cooling – frakce martensitu při chlazení
α	pravá limita hysteronu v Preisachově modelu
β	levá limita hysteronu v Preisachově modelu
h_p	pravá limita obecného hysteronu
h_l	levá limita obecného hysteronu
$\sigma(k)$	přesnost modelu v kroku k
Δ	suma absolutních hodnot odchylek
w	požadovaná poloha
X	výstupní veličina
e	řídící veličina
R	regulátor
P	proporcionální regulátor
$P-I$	proporcionálně integrační regulátor
y_x	relativní zkrácení
l_{zm}	změřená délka SMA vzorku
l_{vz}	délka SMA vzorku
LM	lokální paměť (Local Memory)
NM	nelokální paměť (Non-local Memory)
PI	Prandtl-Ishlinského model
MPI	modifikovaný Prandtl-Ishlinského (Modified Prandtl-Ishlinskii) model
CMPI	kosinem modifikovaný Prandtl-Ishlinského (Cosine Modified Prandtl-Ishlinskii) model
*CMPI	optimalizovaný CMPI model
A_p	pomocný optimalizační parametr pravé limity hysteronu *CMPI modelu
A_l	pomocný optimalizační parametr levé limity hysteronu *CMPI modelu
A_{pH}	plocha definující asymetričnost pravé limity hysteronu *CMPI modelu nad osou limity
A_{pL}	plocha definující asymetričnost pravé limity hysteronu *CMPI modelu pod osou limity
A_{iH}	plocha definující asymetričnost levé limity hysteronu *CMPI modelu nad osou limity
A_{iL}	plocha definující asymetričnost levé limity hysteronu *CMPI modelu pod osou limity

1 ÚVOD

Akční členy jsou nedílnou součástí většiny mechatronických systémů. V technické praxi můžeme nalézt mnoho tradičních typů akčních členů, založených na elektronických, elektromagnetických, elektromechanických, hydraulických nebo pneumatických principech. V mnoha případech se použití těchto řešení ukázalo jako optimální, nicméně postupem doby se konstruktéři více zaměřují na možnosti využití i takzvaných netradičních akčních členů. Jedním ze zástupců této skupiny jsou i kovy s tvarovou pamětí (Shape Memory Alloys – dále použita zkratka SMA). SMA mohou být díky svým vlastnostem, a při určitých okolnostech, považovány za systémy se silně nelineárním hysterezním chováním. Pojem „hystereze“ je jako takový znám již od konce 19. století. Setkat se s tímto pojmem je možné v různých odvětvích, jako jsou například elektrotechnika, strojírenství, ekonomika a jiné, přičemž tato problematika představuje, zvláště v technických vědách, nezanedbatelnou oblast. Metod pro modelování hysterezí existuje poměrně mnoho, ovšem jejich použitelnost může být vzhledem ke složitosti konkrétního reálného modelovaného systému značně omezena. Obdobně, jako i při řešení jiných problémů, souvisí kvalita sestaveného modelu s jeho komplikovaností, která obecně není žádoucí.

1.1 ZAMĚŘENÍ PRÁCE – MOTIVACE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Náhrada tradičních akčních členů za netradiční, může v některých případech významně zlepšit celkové parametry původního řešení konkrétního mechatronického systému, přičemž tato náhrada nemusí nutně znamenat zvětšení jeho složitosti, zvýšení energetické náročnosti či zhoršení dalších důležitých parametrů. Příkladem takovéto substituce může být použití kovů s tvarovou pamětí, které jsou konstruktéry stále ještě, z hlediska četnosti použití, opomíjeny. Kovy s tvarovou pamětí mají, díky některým svým vlastnostem, nesporný potenciál v podobě jejich využití jako akčních členů zejména v robotice.

Pro dosažení požadované kvality některých druhů řízení akčních členů je nutné mít k dispozici jejich co možná nejpřesnější model [6], [7], [11]. Z obecně stanovených teoretických předpokladů i experimentálně získaných výsledků je zřejmé, že lze SMA zařadit do kategorie nelineárních systémů s hysterezí. Tvorba modelů systémů z této kategorie může být, v závislosti na požadované přesnosti řešení, poměrně složitá [13], [14], [15]. V odborné literatuře jsou popsána řešení, která primárně vycházejí ze základní klasifikace typu identifikované hystereze a omezujících podmínek například v podobě limitně stanovené složitosti zvoleného modelu, náročnosti identifikace jeho

parametrů či výpočetní náročnosti. Snahy navrhovat nová řešení jsou i v této oblasti stále živým procesem, jehož výsledky mohou kvalitativně posunout aktuální úroveň poznávání v této problematice a otevřít tak prostor pro nová či modifikovaná řešení nejen v případě akčních členů.

Tato práce se tedy bude věnovat kovům s tvarovou pamětí (SMA), možnostem jejich využití jako netradičních akčních členů ve vybraném mechatronickém systému a vlastním návrhem jejich praktického použití.

Dále se tato práce zaměří na úzce související problematiku modelování takzvaných nelineárních systémů s hysterezí. Zde bude navrženo vlastní řešení modelu obecného nelineárního systému s hysterezí, umožňujícího modelování SMA akčního členu.

1.2 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Cíle této práce jsou, vzhledem k výše uvedenému textu, stanoveny následovně:

- Navrhnout, realizovat a ověřit funkčnost vlastního řešení vybraného mechatronického systému využívající netradiční akční člen typu kov s tvarovou pamětí. Tímto systémem bude elektricky ovládaný sedlový ventil, integrovaný do patice pneumatického svalu McKibbenova typu.
- Na základě teoretického předpokladu experimentálně ověřit výskyt nelineárního chování hysterezního typu u netradičního akčního členu, využívajícího kov s tvarovou pamětí a dále pak realizovat a prostřednictvím simulací ověřit vlastní obecný model systému s hysterezním chováním. K návrhu modelu použít nelineární výpočetní prvek definovaný pomocí goniometrické funkce kosinus. Vyhodnotit vybrané vlastnosti navrženého modelu s využitím znalosti chování již existujících řešení a dat, která budou získána experimentálně v první části práce.

2 AKČNÍ ČLENY

Akční členy lze rozdělit do skupin v závislosti na klasifikačním kritériu. Jak již bylo zmíněno v úvodu, akční členy lze rozdělit na tradiční a netradiční. V této kapitole bude stručně uveden jejich přehled. Pro zjednodušení textu budou používána adekvátní synonyma pojmu akční člen a to „aktuátor“ případně „pohon“.

2.1 TRADIČNÍ AKČNÍ ČLENY

Za tradiční akční členy lze považovat ty, které jsou založeny na dlouhodobě známých a osvědčených funkčních principech a technologiích. Četnost jejich použití je v současnosti majoritní, přičemž oblasti, ve kterých se s nimi lze setkat, jsou zejména průmysl, doprava a spotřební zboží.

Podle principu funkce můžeme tradiční akční členy rozdělit následovně [21]:

- spalovací motory,
- elektromagnetické akční členy – lineární a rotační elektromotory,
- hydraulické akční členy – lineární a rotační hydromotory,
- pneumatické akční členy – lineární a rotační pneumotory.

2.2 NETRADIČNÍ AKČNÍ ČLENY

Postupně rostoucí požadavky na parametry spolu s vývojem technologií umožnil vznik skupiny netradičních akčních členů. Moderní mechatronické systémy kladou nároky, kterým tradiční akční členy nemohou z různých důvodů vyhovět. Je to omezení z hlediska rozměrů, nutnost činnosti ve specifickém prostředí, činnost v těsné interakci s člověkem či přímo uvnitř živých organizmů, omezené možnosti napájení a další. Četnost jejich použití je ovšem v současnosti minoritní, přičemž oblasti, ve kterých se s nimi lze setkat jsou zejména robotika, zdravotnictví, doprava a spotřební zboží.

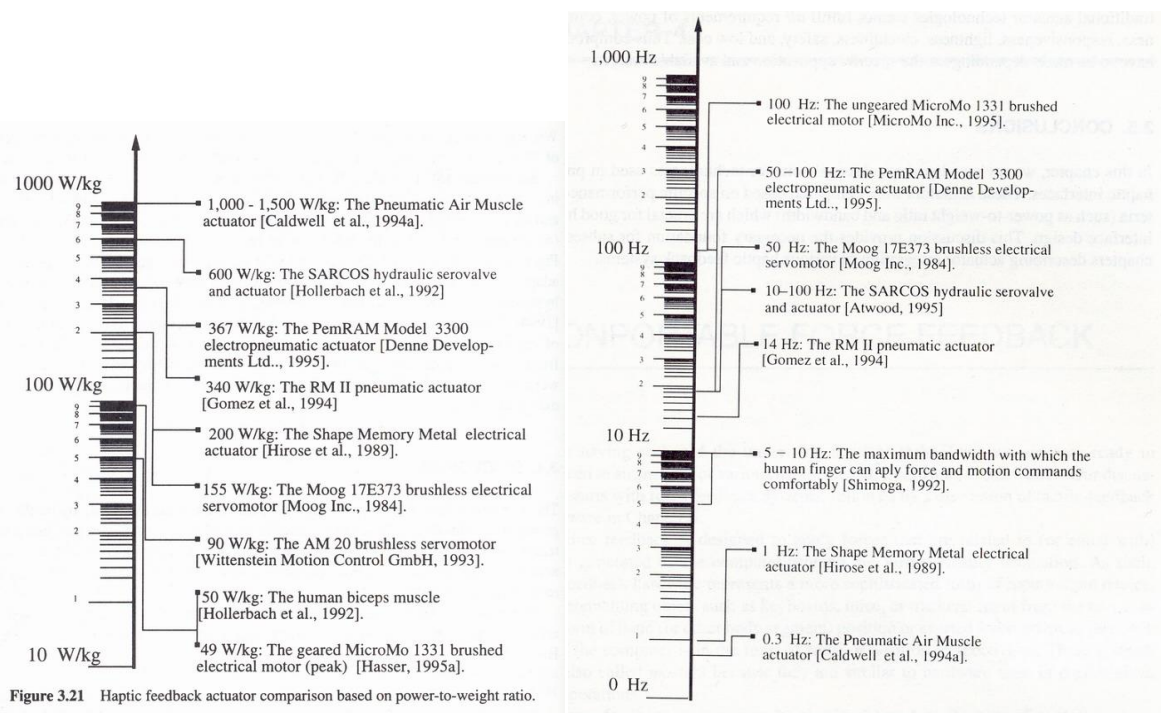
Podle principu funkce můžeme netradiční akční členy rozdělit následovně [21]:

- pneumatické svaly,
- elektrorheologické akční členy,
- elektroaktivní akční členy,
- piezoelektrické akční členy.

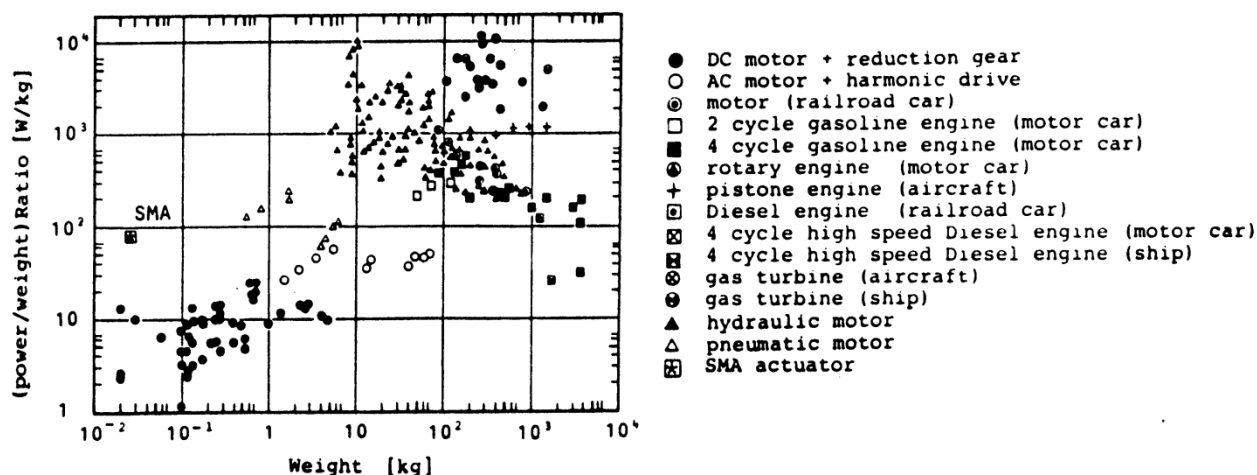
2.3 SROVNÁNÍ AKČNÍCH ČLENŮ

V grafech na následujících obrázcích je uvedeno srovnání pohonů podle poměru výkonu k hmotnosti (**Obr. 1a**) a dynamického rozsahu (**Obr. 1b**).

Na **Obr. 2** je uvedeno srovnání pohonů dle poměru výkonu ku hmotnosti k hmotnosti, kde je například vidět nevýhoda hydraulických akčních členů v potřebě hmotného zázemí, naopak je tomu u pohonů z paměťových slitin.



Obr. 1: a) Srovnání pohonů dle poměru výkon/hmotnost [30], b) Srovnání pohonů dle dynamického rozsahu [30].



Obr. 2: Srovnání pohonů dle poměru (výkon/hmotnost)/hmotnost [30].

3 KOVY S TVAROVOU PAMĚTÍ

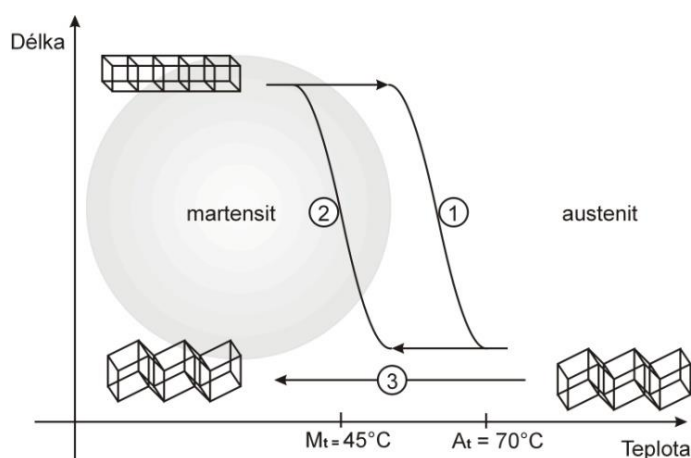
Následující kapitola je věnována kovům s tvarovou pamětí (SMA), principu funkce „paměťového efektu“ (SME) a možnostem jejich využití v technické praxi.

3.1 PRINCIP SME

SMA obecně řadíme do skupiny intermetalik [26], [34], [35], [36], [37]. Do této skupiny se řadí slitiny dvou a více kovů, u nichž nejsme schopni na základě interpolace vlastností jednotlivých složek stanovit parametry výsledné směsi. Vlastnostmi, pro něž se tyto kovy stávají atraktivními, jsou například superplasticita, již zmiňovaný SME, odolnost vůči kyselinám aj.

SME je způsoben změnami v krystalické struktuře SMA. Na tu má vliv několik faktorů, přičemž z hlediska využití jako akčního členu nás nejvíce zajímá teplota SMA prvku a vnější mechanické napětí, které na něj působí. Změnou těchto dvou faktorů dochází k takzvané fázové transformaci, při níž se mění struktura materiálu dle **Obr. 3**.

Krystalická struktura se při teplotě nižší než M_t nachází v deformovatelném stavu (martensitu). V tomto stavu se fyzické rozměry elementu vyrobeného z SMA mohou změnit, v důsledku vnějšího mechanického namáhání, až o 10 procent. Jakmile tento element zahřejeme na teplotu vyšší než A_t (křivka 1, **Obr. 3**), krystalická struktura se mění do pevného, nedeformovatelného stavu (austenitu). Je-li teplota udržována okolo hodnoty A_t , zůstává element ve smrštěném stavu. Poklesne-li teplota pod hranici M_t , přejde materiál zpět do deformovatelného stavu. V případě, že na kov působí zotavovací síla, dojde k jeho natáhnutí (křivka 2, **Obr. 3**), jinak zůstává ve smrštěném stavu (křivka 3, **Obr. 3**).

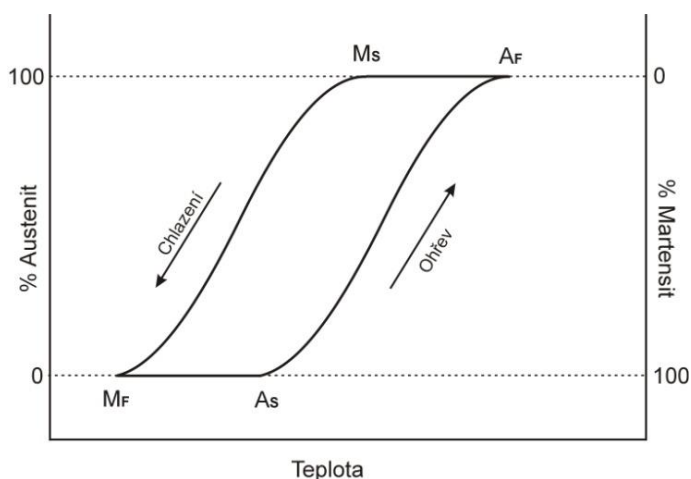


Obr. 3: Změny v krystalické struktuře SMA při SME [32].

Je-li kov vystaven působení teploty mnohem vyšší než je A_t , může dojít k jeho degradaci, což znamená ztrátu SME (element zůstane trvale smrštěn). Prahové teploty M_t a A_t lze upravit v závislosti na potřebě využití SMA v konkrétní aplikaci a to prostřednictvím volby druhu a poměru jednotlivých prvků SMA slitiny.

Na základě výše popsaného procesu lze zjednodušeně říci, že SMA mají schopnost přeměňovat tepelnou energii přímo na energii mechanickou, a to díky změně struktury vlastní krystalové mřížky, takzvanou termoelastickou martenzitickou transformací. Specifickou vlastností SMA je schopnost „zapamatovat“ si svůj tvar, který jim byl při výrobě „naprogramován“.

Změna, ke které dochází v krystalické struktuře SMA během SME, však není termodynamicky reverzní proces. Díky tření a vzniku různých defektů ve struktuře SMA dochází přímo v materiálu k energetickým ztrátám. Výsledkem je teplotní hystereze (**Obr. 4**). Obdobný průběh má i závislost deformace na teplotě. Velikost hystereze SMA je dána jejich složením a procesem výroby.



Obr. 4: Teplotní hystereze, vyskytující se u SMA [32].

Nejpoužívanějšími slitinami SMA jsou slitiny AuCd a NiTi. Dalšími používanými SMA slitinami jsou CuZnAl, CuAlNi nebo MnNi. Chemické složení SMA se obecně blíží ekvatomovému poměru jednotlivých prvků. U slitiny NiTi je tento poměr obvykle uváděn jako Nikl 55%, Titan 45%. Vlastní výroba SMA je náročná na čistotu jednotlivých použitých surovin a postup mechanicko-tepelného zpracování.

Z pohledu SME existují i varianty SMA se schopností „zapamatovat“ si jak vysokoteplotní (austenitický) tak i nízkoteplotní (martenzitický) tvar. Jev, popisující přechod mezi těmito dvěma stavy se nazývá Two Way Memory Effect (TWSME) [26], [37]. Obecně je využití SMA s vlastností TWSME například jako akčního členu problematictější a to z technologických důvodů.

3.2 VLASTNOSTI SMA

Z pohledu této práce bude další text věnován využití SMA v oblasti robotiky, konkrétně pak aplikacím v podobě akčních členů, využívajících ke své funkci opakujícího se SME. Pro praktické použití SMA v těchto aplikacích hovoří zejména některé zajímavé vlastnosti [20], [36], a to:

Sílový účinek – síla generovaná SMA pohonem je dána vnitřním mechanickým napětím (tlakem v krystalové mřížce). U slitiny NiTi se tato hodnota pohybuje od 300MPa do 700MPa.

Stárnutí a únava – definuje počet cyklů, které je SMA pohon schopen vykonat. Tuto hodnotu zpravidla udává výrobce a její velikost závisí na velikosti deformace (např. 10000 cyklů při deformaci do 2%).

Velikost zkrácení – obecně se udává do 10%, např. pro slitinu NiTi je to 5% až 8%.

Teplotní rozsah – udává hodnoty A_s , A_f , M_s , M_f na základě kterých je možné definovat velikost teplotní hystereze mezi vysokoteplotní (austenitem) a nízkoteplotní (martensitem) fází (**Obr. 4**). Pro slitinu NiTi se velikost hystereze udává v rozmezí 25°-50°C.

Účinnost pohonu – v porovnání s tradičními pohony je nižší. Hodnota se pohybuje do 10%.

Mechanické zatížení – doporučenou hodnotu maximálního mechanického zatížení zpravidla udávají výrobci SMA. Mechanické zatížení má podobný vliv jako pokles teploty a vytváří jakousi zápornou zpětnou vazbu.

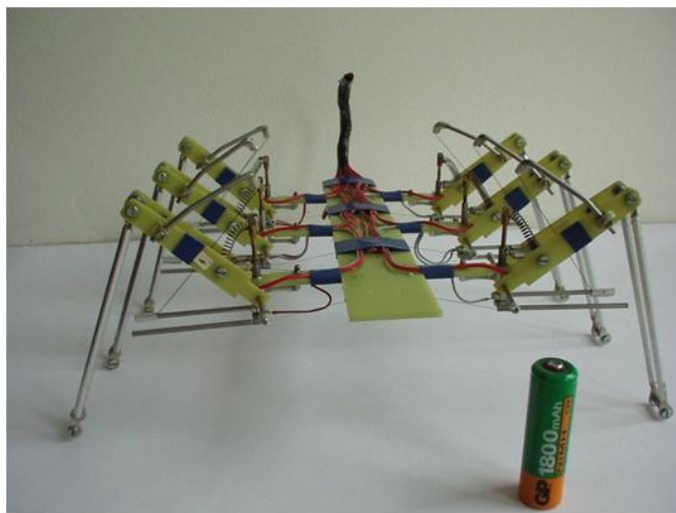
Rychlost časové odezvy – je dána velikostí hysterezní smyčky a teplotní kapacitou konkrétního SMA. Pro slitinu NiTi je tato hodnota udávána 460 J/kg*K, přičemž roli zde hraje i geometrický rozměr pohonu.

Mechanický výkon – je dán velikostí součinu síly a rychlosti během kontrakce.

Možnosti zapojení SMA pohonu některým z výše uvedených způsobů jsou dány zejména omezujícími podmínkami, které vyplývají z dané aplikace a zároveň potřebou dosažení optimálního výsledku. Ten bývá ve většině případů charakterizován maximální dosažitelnou dynamikou SMA pohonu. Výsledky realizovaných praktických experimentů, které budou dále

popsány ukazují, že nevhodně zvolené zapojení SMA pohonu může ovlivnit jeho výsledné parametry, případně výrazně zkrátit jeho životnost.

Příklad konkrétního použití SMA jako akčního členu pro zajištění funkce šestinohého kráčejiho robotu, realizovaného v rámci řešení projektu 102/02/0782 „Research in Control of Smart Robotic Actuators” je uveden na **Obr. 5**.



Obr. 5: Šestinohý kráčejiho robot s použitými SMA akčními členy.

3.3 EXPERIMENTY A OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ SMA

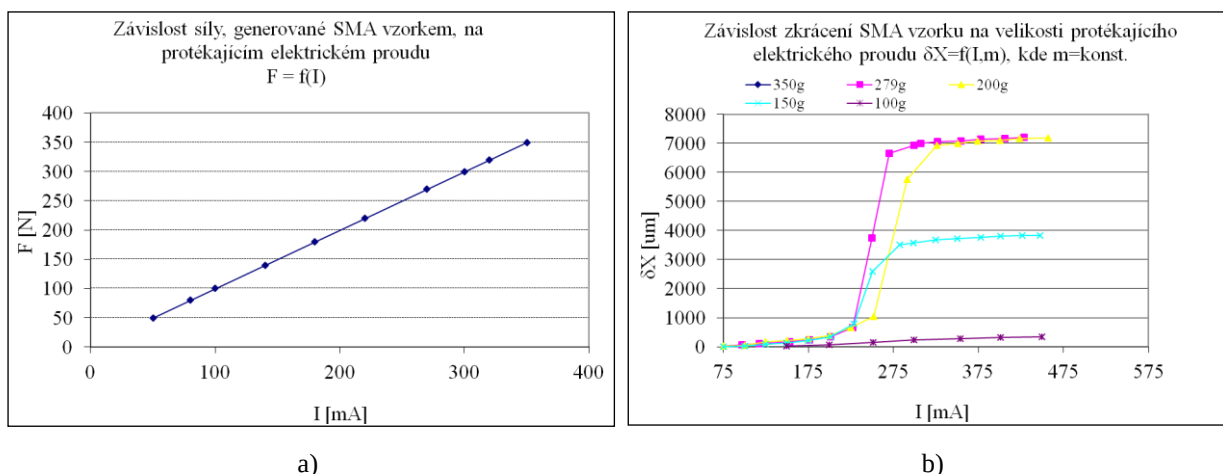
Pro ověření vybraných parametrů a elektrických vlastností konkrétního SMA materiálu, byla v rámci laboratoře netradičních pohonů provedena měření některých jeho statických a dynamických charakteristik. Průběhem a výsledky těchto prací se bude zabývat následující text.

Pro účely měření a experimentů byl pořízen a odpovídajícím způsobem mechanicky upraven vzorek SMA slitiny v podobě NiTi drátu, typ Dy70 (výrobce Dynalloy, Inc.) [20], o průměru 0,1524 mm. Délka vzorku byla přizpůsobena teoretickým předpokladům na výsledek měření a možnostem měřicího pracoviště.

3.3.1 Měření statických charakteristik

V oblasti statických charakteristik byla vybrána a následně provedena měření těchto funkčních závislostí:

- Závislost síly, generované SMA vzorkem, na protékajícím elektrickém proudu $F=f(I)$ (**Obr. 6a**).
- Závislost zkrácení SMA vzorku na velikosti protékajícího elektrického proudu $\delta X=f(I,m)$, kde $m=\text{konst.}$ (**Obr. 6b**). V tomto případě byla použita délka měřeného vzorku 10 cm.

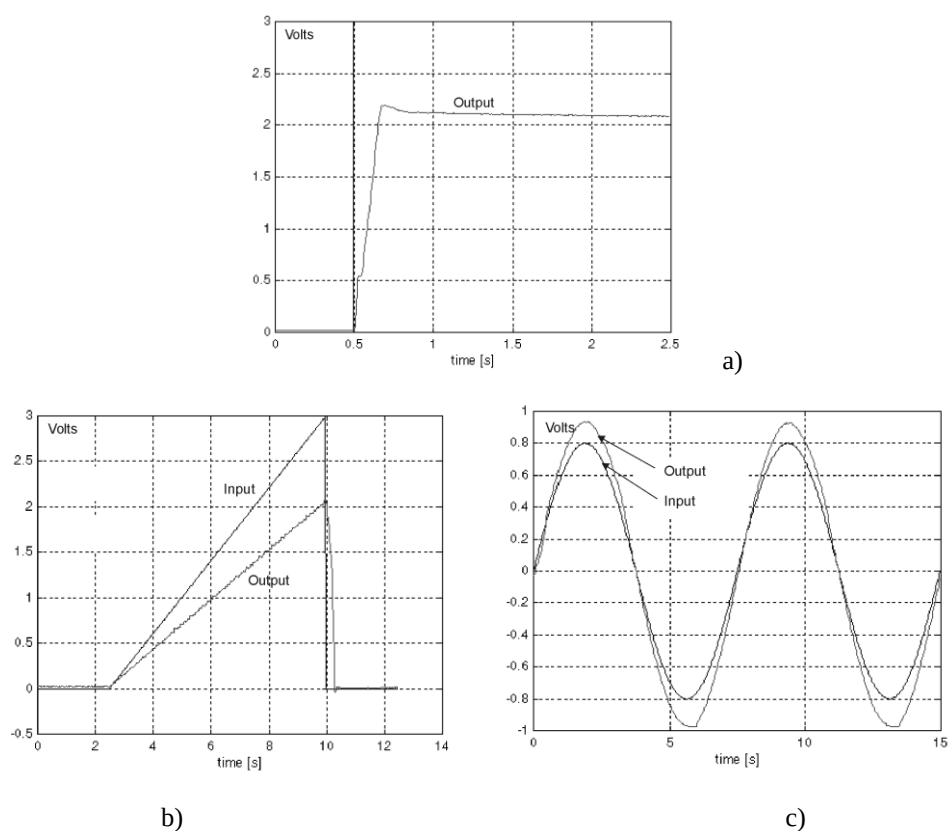


Obr. 6: Grafické znázornění výsledků měření statických charakteristik a) $F=f(I)$, b) $\delta X=f(I, m)$, kde $m=\text{konst.}$

3.3.2 Měření dynamických charakteristik

V oblasti dynamických charakteristik bylo, vzhledem k zamýšlenému využití SMA jako pohonu, vybráno a následně realizováno měření funkční závislosti rychlosti změny polohy v závislosti na rychlosti změny budicího signálu $\delta X = f(\delta u(t))$.

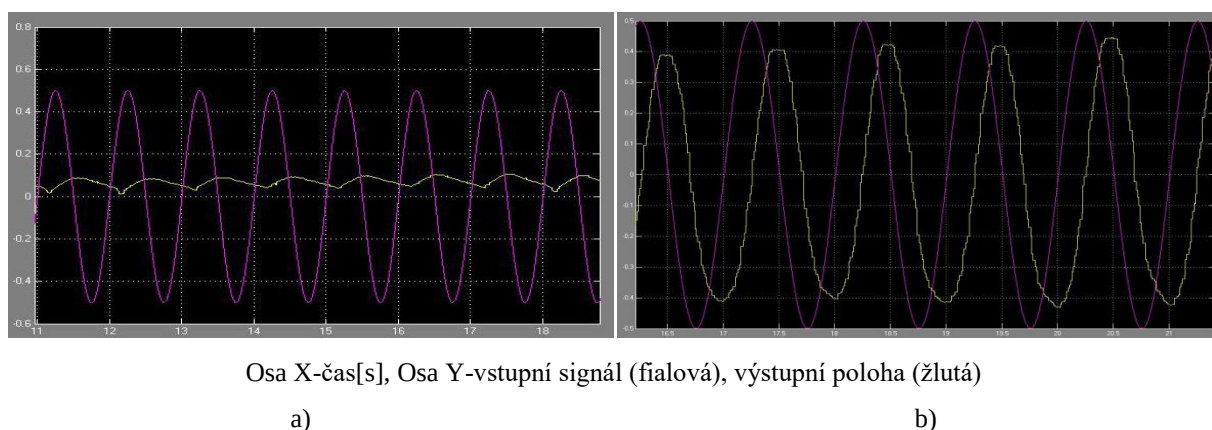
Pro měření výše uvedené závislosti byla navržena a realizována základní a rozšířená elektromechanická měřicí lavice.



Obr. 7: Grafické znázornění výsledků měření dynamických závislostí $\delta X = f(\delta u(t), m)$, kde $m = \text{konst.}$ a $u(t)$ odpovídá a) jednotkovému skoku, b) rampovému průběhu, c) sinusovému průběhu.

Měření, realizované pomocí lavice bylo zaměřeno na ověření teoretických předpokladů chování SMA pohonu v případě jejich antagonistického zapojení. Tento způsob zapojení lze obecně využít například v problematice polohových mechanismů. Zde je sledovaná poloha v případě deaktivace pohonů dána jejich aktuálním stavem. Výsledky měření jsou graficky znázorněny na **Obr. 7**.

Vliv chlazení na kvalitu odezvy SMA pohonu z pohledu její rychlosti a rozsahu je patrný z charakteristiky na **Obr. 8**. V tomto případě bylo použito aktivního chlazení v podobě nucené cirkulace okolního vzduchu.

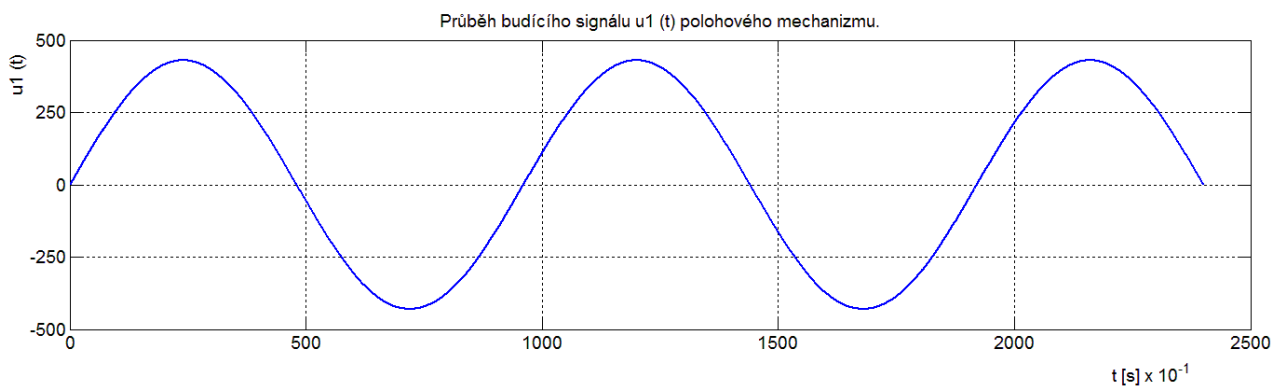


Obr. 8: Vliv aktivního chlazení na funkci SMA pohonu polohového mechanismu a) bez aktivního chlazení, b) s aktivním chlazením.

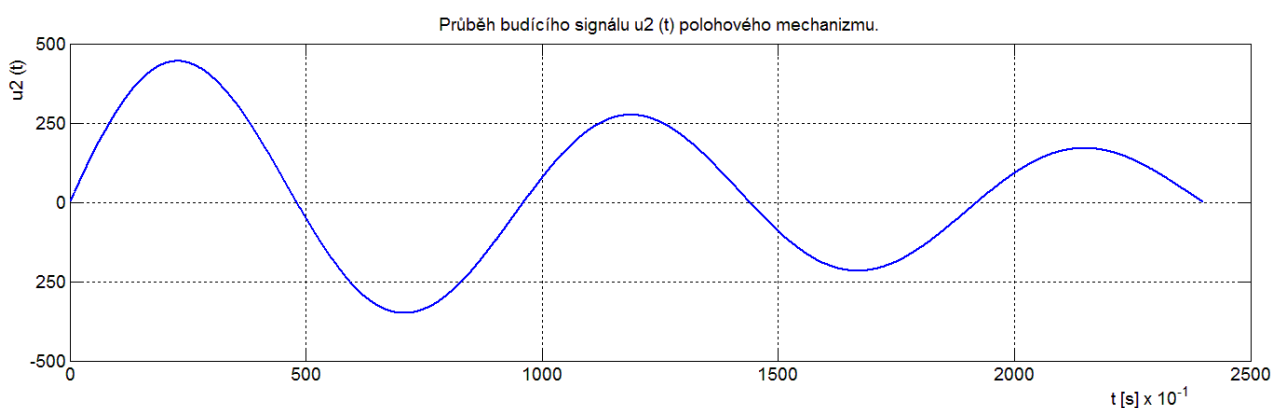
Měření realizované pomocí zkonstruované lavice bylo zaměřeno na ověření teoretických předpokladů chování SMA pohonu v případě jeho gravitačního zapojení. Tento způsob zapojení lze obecně využít například v problematice polohových mechanismů, u kterých je sledovaná poloha, v případě deaktivace pohonů, dána působením gravitační síly a předem nastavenými omezujícími podmínkami. Identické zapojení SMA pohonu bylo rovněž použito k přesnější identifikaci nelinearity typu hystereze.

Konkrétní sada měření byla realizována na vzorku SMA drátu o délce 165 mm, gravitační zátěži o hmotnosti 263 g a okolní teplotě 23°C. Pro potřeby aktivního chlazení vzorku prostřednictvím nucené ventilace byl použit kryt válcového tvaru o průměru 150 mm a lopatkový ventilátor Seythe, typ SY124020L o rozměrech 40x40x20 mm s průtokem 4,86 CFM.

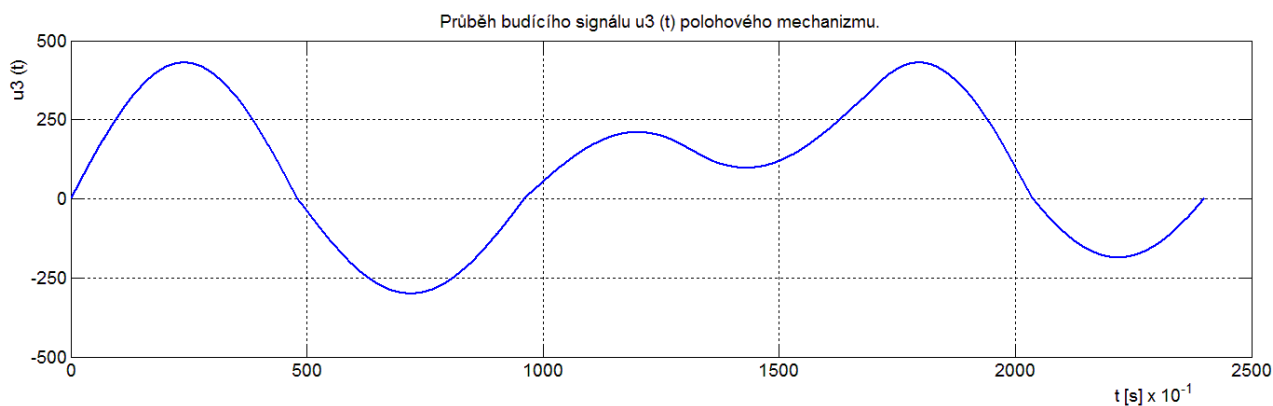
Doba každého měřicího cyklu byla stanovena na 240 s, počet cyklů byl stanoven na 50. Průběhy použitých budicích signálů SMA pohonu jsou uvedeny na **Obr. 9**.



a)



b)



c)

Obr. 9: Vstupní signály polohového mechanismu a) u_1 , b) u_2 , c) u_3 .

Hodnoty budících signálů $u_x(t)$, uvedených na **Obr. 9**, odpovídají hodnotám vstupního budícího stejnosměrného proudu pro použitý SMA akční člen I [mA].

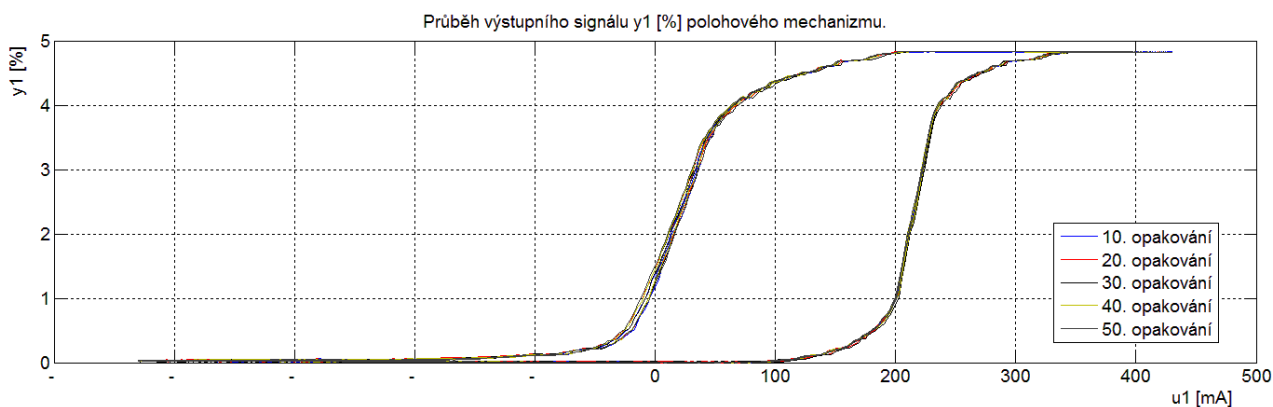
Signály $u_1(t)$ a $u_2(t)$ byly generovány pomocí funkce sinus a exp následně:

$$u_1(t) = 4.3 \cdot \sin(0.065449 \cdot t),$$

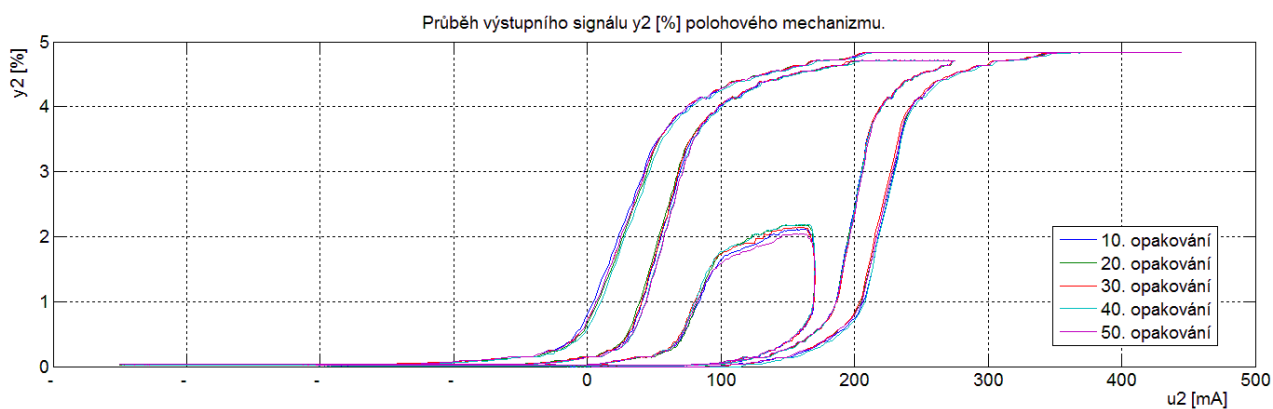
$$u_2(t) = 5 \cdot \sin(0.065449 \cdot t) \cdot (\exp(-t \cdot 0.005)).$$

Signál $u_3(t)$ byl definován vektorem hodnot tohoto signálu v diskrétních časových okamžicích.

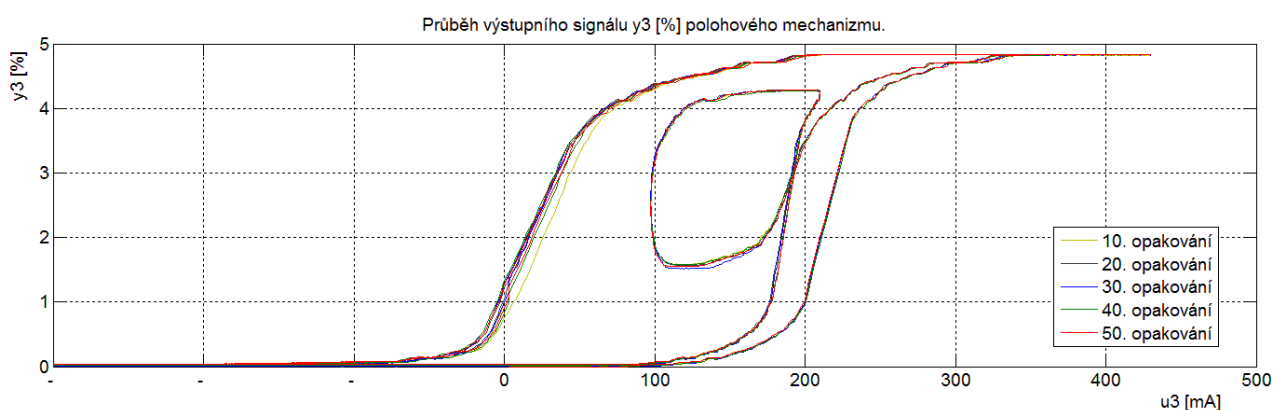
Odezvy SMA akčního členu na jednotlivé budící signály jsou uvedeny na **Obr. 10**. V tomto případě byl akční člen pasivně chlazen a to formou samovolného vyzáření vzniklého tepla do okolí.



a)



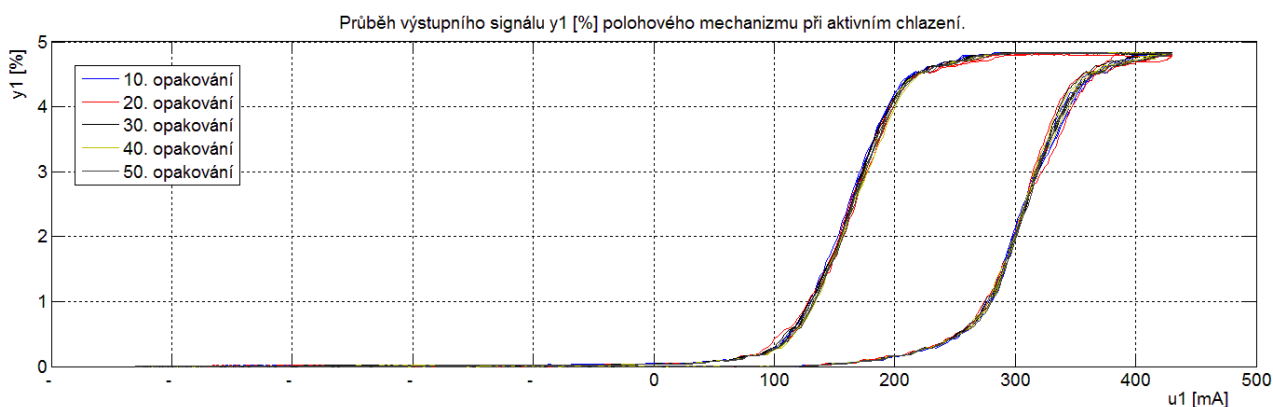
b)



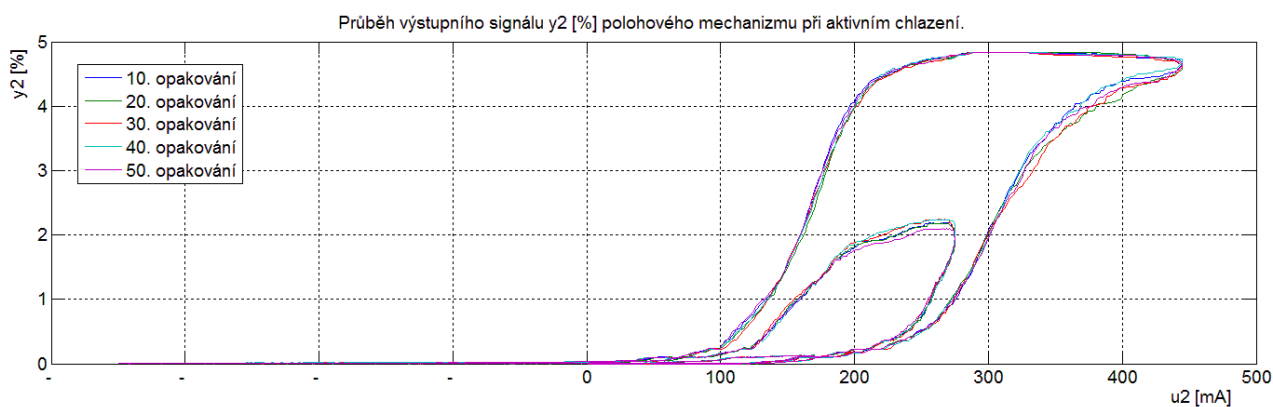
c)

Obr. 10: Odezvy polohového mechanismu na budící signály a) u_1 , b) u_2 , c) u_3 bez aktivního chlazení.

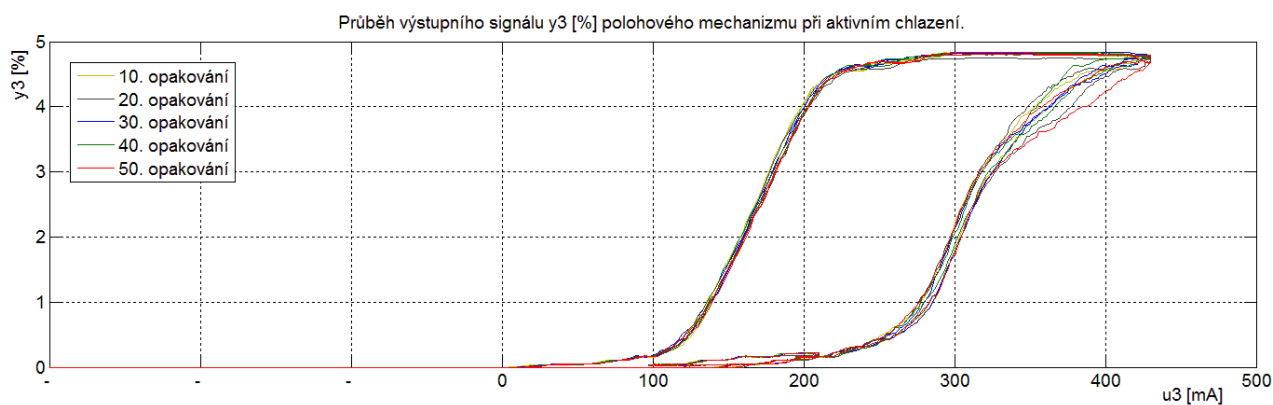
Chování SMA pohonu může být ovlivňováno chlazením. Tento teoretický předpoklad byl ověřen prostřednictvím použití aktivního chlazení v podobě nuceného proudění okolního vzduchu při měření charakteristik odezvy polohového mechanismu v rámci samostatného experimentu. Jeho výsledky jsou ukázány na (**Obr. 11**).



a)



b)



c)

Obr. 11: Odezvy polohového mechanismu na budící signály a) u_1 , b) u_2 , c) u_3 při použití aktivního chlazení.

Hodnoty y_1 , y_2 , y_3 odpovídají relativnímu zkrácení měřeného vzorku SMA a to dle vztahu (3.1):

$$y_x = \frac{l_{zm}}{l_{vz}} * 100 \quad (3.1)$$

3.4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A EXPERIMENTŮ

Výsledky měření vybraných statických charakteristik odpovídají teoretickým předpokladům, vycházejícím z dostupných informací k danému vzorku SMA materiálu [20]. Výsledky měření vybraných dynamických charakteristik odpovídaly teoretickým předpokladům, důležitým pro možné použití vybraného SMA v konkrétní aplikaci.

Na základě výsledků všech realizovaných měření a experimentů byly stanoveny dílčí závěry, s následujícím vyhodnocením.

Hodnoty statických i dynamických charakteristik testovaného vzorku SMA materiálu odpovídaly údajům, poskytovaným výrobcem [20].

Použití SMA materiálu vyžaduje specifická řešení, zejména v případech potřeby jeho mechanického ukotvení a vytváření elektrovodných spojů. V tomto ohledu se osvědčilo použití šroubových spojů s odpružením, případně lisovaných spojů. Řešení tohoto problému obvykle nabízeno přímo výrobcem daného SMA [20].

Byla potvrzena citlivost SMA materiálu na přetěžování. V tomto smyslu docházelo, díky nevhodně zvolenému zapojení měřeného vzorku a měřicím podmínkám, k jeho rychlé degradaci. Díky zmíněné degradaci nastala ztráta schopnosti SME po několika desítkách měřicích cyklů. Získaný poznatek vedl k navržení vlastního řešení toho problému a to v podobě integrace „mechanizmu bezpečnostních pružností“, realizovaných pomocí předepjatých vinutých pružin. Tyto pružiny měly funkci kompenzátoru doby nutné pro dostatečné ochlazení SMA vzorku a zároveň přispěly k lepší dynamice soustavy. Přesný popis jednotlivých funkčních částí bezpečnostního mechanismu je uveden v rámci patentové dokumentace (č. ochranného dokumentu 297963 vedeného u Úřadu průmyslového vlastnictví).

Významným faktorem, ovlivňujícím funkci SMA pohonu, je přítomnost pasivního (samovolné vyzařování generovaného tepla do okolí) nebo aktivního (nucená ventilace, přítomnost chladicího média) chlazení. Příklad vlivu tohoto faktoru je ukázán a na **Obr. 8** a **Obr. 11**. Zajištěním optimálního chlazení lze dosáhnout zásadní eliminace výskytu vnitřních hysterezních smyček nelinearity, které jsou pro SMA akční členy charakteristické.

4 SEDLOVÝ VENTIL S SMA AKČNÍM ČLEMEM

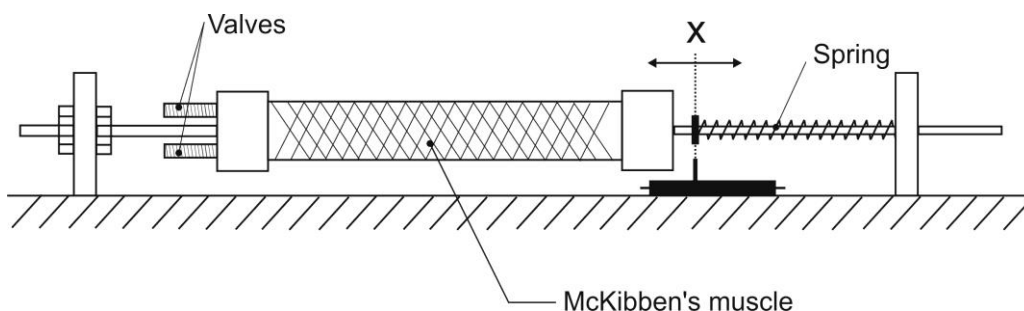
V kapitole 3 byla diskutována možná použití SMA ve statických i dynamických aplikacích, dále byly popsány základní vlastnosti SMA materiálů a parametry konkrétní SMA slitiny (NiTi). Dále byly popsány experimenty, provedené s NiTi slitinou, dále pak vydefinovány některé omezující podmínky jejího použití. Na základě závěrů byl proveden návrh vlastní aplikace – modifikované patice pneumatické svalu McKibbenova typu s integrovaným sedlovým ventilem, využívajícím SMA slitinu jako akčního členu.

4.1 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI A EXPERIMENTY

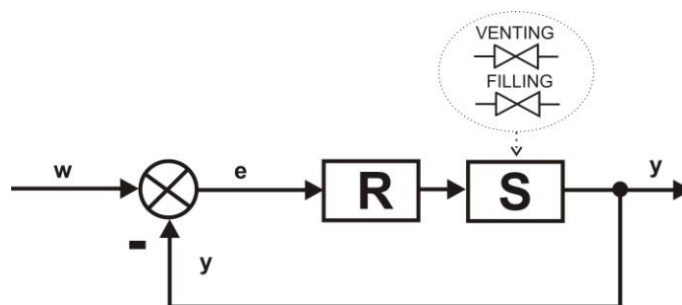
Pro ověření funkčnosti navrženého řešení modifikované patice byly vyrobeny a otestovány její funkční vzorky. Vlastní testy byly realizovány za využití navržené měřicí stolice (**Obr. 12**), obsahující pneumatický sval McKibbenova typu s integrovanou modifikovanou paticí a antagonisticky zapojenou pružnost.

Pro samotné testování byl navržen regulační obvod dle **Obr. 13**. Vstupní veličinou w byla požadovaná poloha, výstupní veličinou byla poloha X , řídicí veličinou e byl stejnosměrný elektrický proud zajišťující funkci napouštěcích a vypouštěcích ventilů. Regulační obvod R byl navržen ve dvou typech a to typ P a P-I.

Regulační obvod s P regulátorem se ukázal jako nestabilní, proto byl nahrazen P regulátorem s možností přepnutí jeho zesílení do tří hodnot v závislosti na velikosti regulační odchylky. Konkrétní vztah rozsahu hodnot regulační odchylky k hodnotě řídicí veličiny je uveden v **Tab. 1**.



Obr. 12: Měřicí lavice pro ověření funkčnosti modifikované patice.



Obr. 13: Schéma regulačního obvodu měřicí lavice.

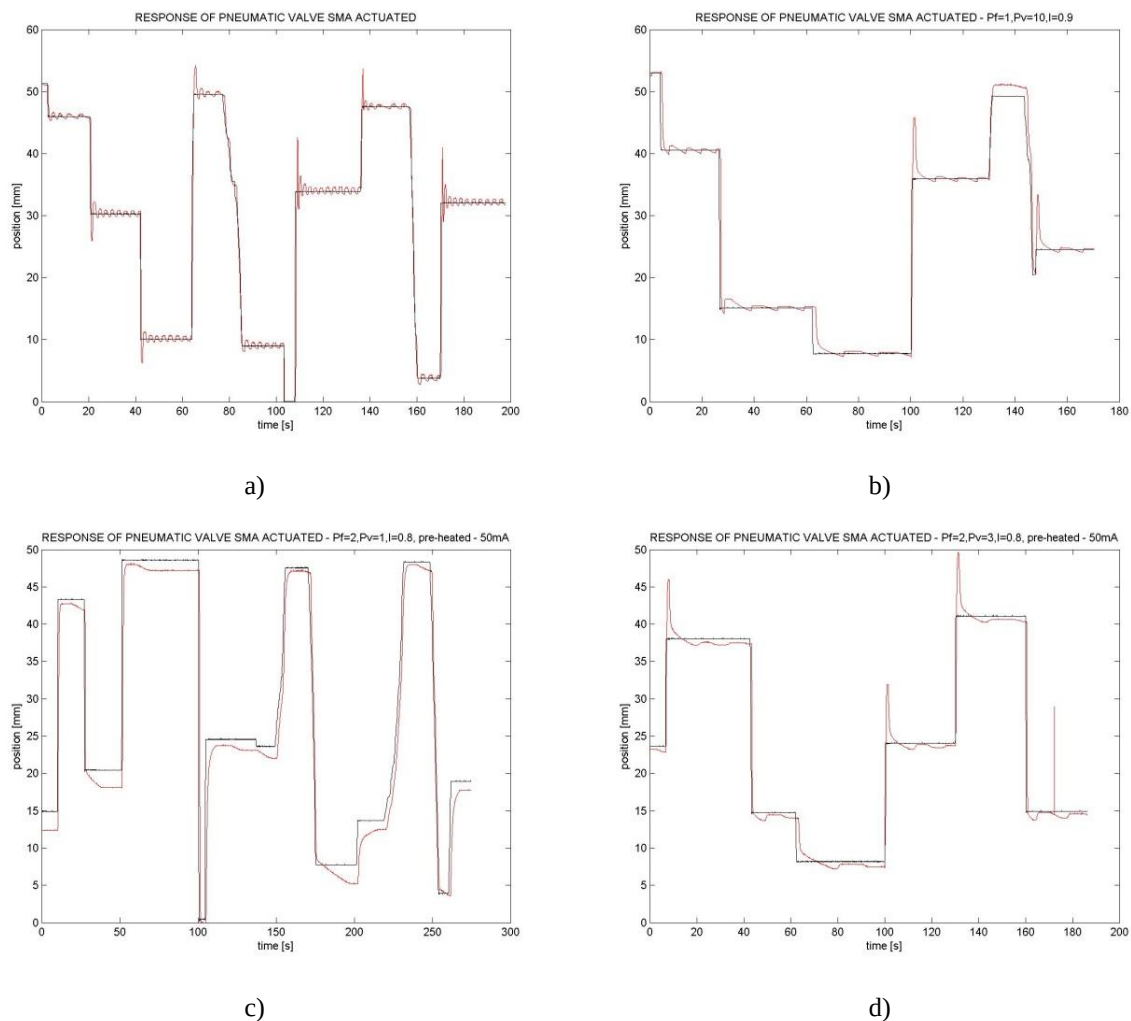
Tab. 1: Vztah rozsahu hodnot regulační odchylky k hodnotě řídicí veličiny.

Velikost regulační odchylky	Řídicí veličina (napouštěcí ventily)	Řídicí veličina (vypouštěcí ventily)
< 40	250 mA	200 mA
< 40 : 80 >	350 mA	300 mA
> 80	900 mA	900 mA

P regulátor s možností přepnutí byl nastaven na:

- hodnotu 3 pro velikost regulační odchylky < 40,
- hodnotu 5 pro velikost regulační odchylky <40:80>,
- hodnotu 10 pro velikost regulační odchylky > 80.

Optimální hodnoty P-I regulátoru byly experimentálně zjištěny a nastaveny na 3 pro P složku a 0,8 pro I složku, přičemž pásmo necitlivosti bylo nastaveno na <-5,+5> z rozsahu snímače polohy <0,900>. Frekvence regulační smyčky byla ve všech případech nastavena na 50 Hz. Výsledky experimentů při konkrétních nastaveních regulačního obvodu jsou uvedeny na **Obr. 14**.



Obr. 14: Dynamické charakteristiky pneumatického svalu s modifikovanou paticí a) P-regulátor, b-d) PI-regulátor.

Na základě zkušeností s realizací funkčního vzorku modifikované patice a provedeného testování byla jako nejvhodnější vybrána následující kombinace materiálů pro jednotlivé mechanické funkční části patice:

Polyamid PA 6.6

Al slitina EN AW2007 T3 / AlCu4PbMgMn

Ocel tř.11(např.11600)

NiTi drát, typ Dy70 o průměru 0,203 mm

- základní nosný materiál patice,
- závitové připojovací části a justační prvky,
- sedlové plochy a kuželka ventilu,
- akční člen.

4.2 ZHODNOCENÍ NAVRŽENÉHO ŘEŠENÍ A NÁVRH DALŠÍCH ÚPRAV

Z hlediska optimalizace provozních podmínek navrženého řešení se jako zásadní projevil teplotní rozdíl mezi aktuální teplotou SMA akčního členu a teplotou plynného média, použitého pro napuštění a vypouštění pneumatického svalu. Jako optimální se jevila teplota menší než M_t . V tomto případě dochází díky proudění média k aktivnímu chlazení SMA akčního členu a tím i z větší části potlačení jeho nelineárního chování. Pro systémy s časovou odezvou větší než 10 s bude pro dostatečně přesné a rychlé řízení postačovat použití jednoduchého ON-OFF regulátoru s odpovídající časovou konstantou.

Z hlediska mechanického provedení navrženého řešení byly splněny všechny požadavky na robustnost, tepelnou i mechanickou odolnost pro danou aplikaci. Zvolené materiály odpovídají typu použitého akčního členu. V tomto ohledu lze poměrně jednoduše definovat i příslušné omezující podmínky použitelnosti tohoto řešení.

Z hlediska použití navrženého řešení jako náhrady tradičních selenoidních ventilů lze definovat základní výhody a nevýhody:

Výhody:

- Nižší hmotnost.
- Integrace do patice svalu.
- Nižší nároky na čistotu média.
- Nižší hlučnost.
- Nižší cena.

Nevýhody:

- Nutnost demontáže pneumatického svalu v případě potřeby výměny ventilu.
- Nižší dynamika.
- Vliv teploty média.
- Nutnost použití nekovového materiálu těla patice.
- Nižší mechanická a teplotní odolnost.

Na základě vyhodnocení získaných poznatků byla dále stanovena možná vylepšení navrženého řešení:

- záměna použitých materiálu patice a ventilů,
- úprava vypouštěcích ventilů pro možnost připojení hadic, určených k odvodu vypouštěného média.

5 MODELÝ HYSTEREZÍ

V této kapitole budou popsány použité a navržené modely hysterezí.

5.1 LIANG-ROGERSŮV MODEL

Liang-Rogersův model může být klasifikován do třídy jednodušších modelů. Jeho podstata je založena na geometrické podobnosti hystereze s průběhem goniometrické funkce sinus resp. kosinus a jejího vhodného použití při výpočtu hodnoty výstupního signálu y [27], [34].

Tento model byl navržen pro popis transformace vnitřní struktury SMA mezi jejich vysokoteplotní a nízkoteplotní fází tzv. *frakce martensitu* [37]. Matematicky lze odvodit obecné vztahy pro závislost hodnoty výstupního signálu y na vstupním signálu u do následující podoby.

Pro vstupní signál u , narůstající v čase platí:

$$\begin{aligned} y &= -1 & \text{pro } u < u_{fs} \\ y &= \cos\left(\pi \frac{u - u_{fs}}{u_{ff} - u_{fs}}\right) + \pi & \text{pro } u_{fs} \leq u \leq u_{ff} \\ y &= +1 & \text{pro } u > u_{ff} \end{aligned} \quad (5.1)$$

Pro vstupní signál u , klesající v čase platí:

$$\begin{aligned} y &= -1 & \text{pro } u < u_{bf} \\ y &= \cos\left(\pi \frac{u - u_{bf}}{u_{bs} - u_{bf}}\right) + \pi & \text{pro } u_{bf} \leq u \leq u_{bs} \\ y &= +1 & \text{pro } u > u_{bs} \end{aligned} \quad (5.2)$$

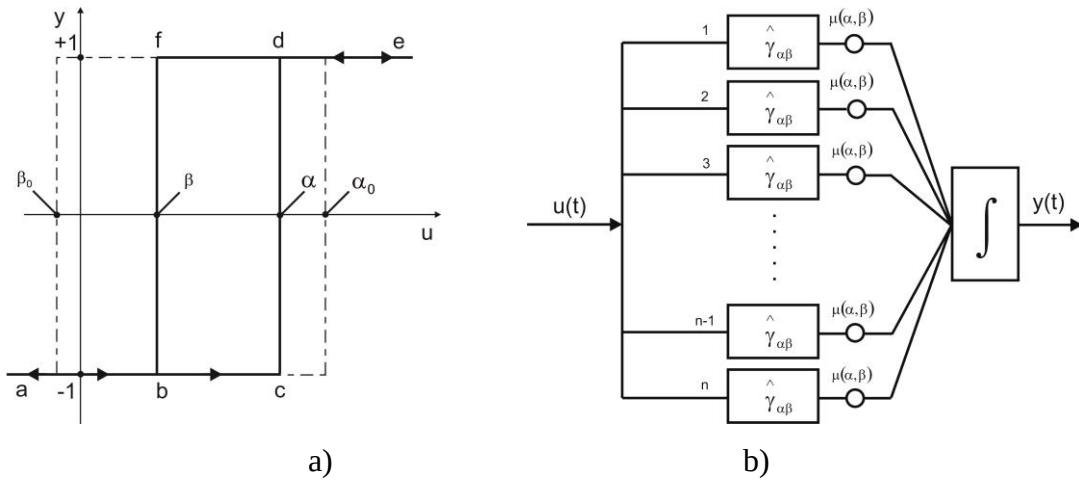
přičemž hodnoty $u_{bf} < u_{fs} < u_{bs} < u_{ff}$ určují šířku hysterezní charakteristiky.

Ze vztahu (5.1) respektive (5.2) je patrné, že tento model bude za předpokladu vhodného zvolení jednotlivých parametrů, schopen popsat LM hysterezní chování. Obdobným způsobem je definován například Tanakův model [34], který pro vlastní výpočet využívá exponenciální funkci.

5.2 PREISACHŮV MODEL [1]

Preisachův model je jedním z nejlépe propracovaných modelů [9] a jako takovému mu bude v této práci věnována největší pozornost. Struktura Preisachova modelu je postavena na idee „main block“ a lze ji popsat následovně.

Předpokládáme nekonečně mnoho jednoduchých prvků hysterezního typu $\hat{\gamma}_{\alpha\beta}$ (hysteronů), které budou definovány dle **Obr. 15a** a vztahem (5.3), popisujícím chování hysteronu v časových okamžicích k . Dále bude definována tzv. podmínka konzistence $y(0) = \pm 1$.



Obr. 15: a) Nelinearita typu „Relé s hysterezí“, b) Princip funkce Preisachova modelu.

$$\begin{aligned} y(k) &= +1 & \text{pro } u(k) > \alpha \\ y(k) &= y(k-1) & \text{pro } \beta \leq u(k) \leq \alpha \\ y(k) &= -1 & \text{pro } u(k) < \beta \end{aligned} \quad (5.3)$$

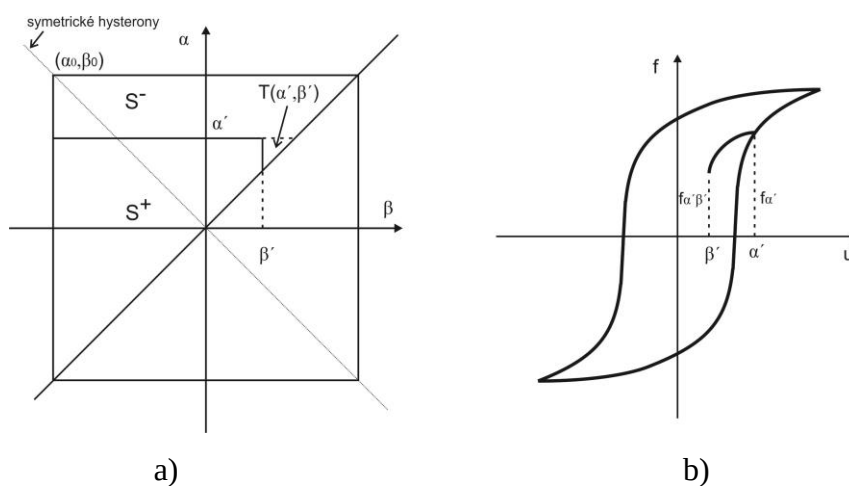
Slovně lze funkci tohoto hysteronu popsat takto. Vyrůstá-li vstup monotónně, výstupní hodnoty následují křivku $abcde$, klesá-li vstupní hodnota u , výstupní hodnota y se mění dle křivky $edfba$. Hodnoty $\alpha\beta$ specifikují okamžik, v němž dojde k překlopení do hodnoty $+1$ respektive -1 . Dále předpokládáme splnění podmínky $\alpha \geq \beta$. Popsaná nelinearita je jinak známa jako nelinearita typu relé s hysterezí, pro něž platí, že výstup y může nabývat hodnoty $+1$ respektive -1 . Je patrné, že elementární nelinearita splňuje definici nelinearity s lokální pamětí.

Dále předpokládáme libovolnou váhovou funkci $\mu(\alpha, \beta)$, obvykle nazývanou jako Preisachova funkce. Preisachův model potom můžeme definovat následovně:

$$f(t) = \hat{\Gamma}u(t) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \hat{\gamma}_{\alpha\beta} u(t) d\alpha d\beta \quad (5.4)$$

Označení $\hat{\Gamma}$ se často používá jako stručnější zápis takzvaného Preisachova hysterezního operátoru. Z rovnice (5.4) je zřejmá definice Preisachova modelu jako spojitého systému, sestávajícího z nekonečně mnoha paralelně spojených relé s hysterezí (**Obr. 15b**), přičemž vstup $u(t)$ do každého relé je identický. Jednotlivé výstupy jsou vynásobeny váhou $\mu(\alpha, \beta)$ a následně integrovány přes všechny příslušné hodnoty α a β , čímž je získána hodnota výstupu $f(t)$. Preisachův model je tedy navržen jako superpozice jednodušších hysterezních prvků $\hat{\gamma}_{\alpha\beta}$, které mohou tvořit výše zmíněné základní výpočetní bloky. Obdobný předpoklad byl již dříve matematiky použit a to konkrétně při funkčních analýzách. Ačkoli model ke své funkci využívá jednoduchých LM nelinearit, jeho výsledná podoba umožňuje popis NM hysterezí.

Z výše uvedeného vyplývá, že je pro konkrétní nastavení modelu nutné definovat typ hysteronu a váhu $\mu(\alpha, \beta)$ každého z nich. Odvození vztahu pro váhu $\mu(\alpha, \beta)$ respektive funkci určující hodnotu váhy v závislosti na konkrétním stavu modelovaného systému lze provést pomocí znalosti průběhu hystereze mezi saturacemi a to jak v kladném, tak záporném směru. Tyto průběhy tvoří tzv. *obálku*. Konkrétní body těchto křivek určují počáteční body větví hystereze, které vznikají při dosažení prvního lokálního maxima a odpovídají hodnotě α' resp. minima a odpovídají hodnotě β' vstupního signálu $u(t)$.



Obr. 16: Postup stanovení váhy hysteronu.

Je zřejmé, že hodnota prvního lokálního minima β' může být totožná s hodnotou záporné saturace. V tom případě se hodnota následujícího lokálního maxima (za podmínky, že nedosáhne hodnoty nad hodnotu kladné saturace) bude opět vyskytovat na rostoucí křivce obálky hystereze. Z **Obr. 16a** je zřejmé, že trojúhelníková plocha $T(\alpha', \beta')$ odpovídá přírůstku plochy S^- a úbytku

plochy S^+ . Tato změna odpovídá monotónnímu poklesu hodnoty vstupu $u = \alpha'$ na hodnotu $u = \beta'$. Rovnice popisující vztah mezi váhou příslušného hysteronu Preisachova modelu a konkrétním průběhem modelované charakteristiky.

$$\mu(\alpha', \beta') = \frac{1}{2} \frac{d \tan \Theta(\alpha', \beta')}{d\alpha'} \quad (5.5)$$

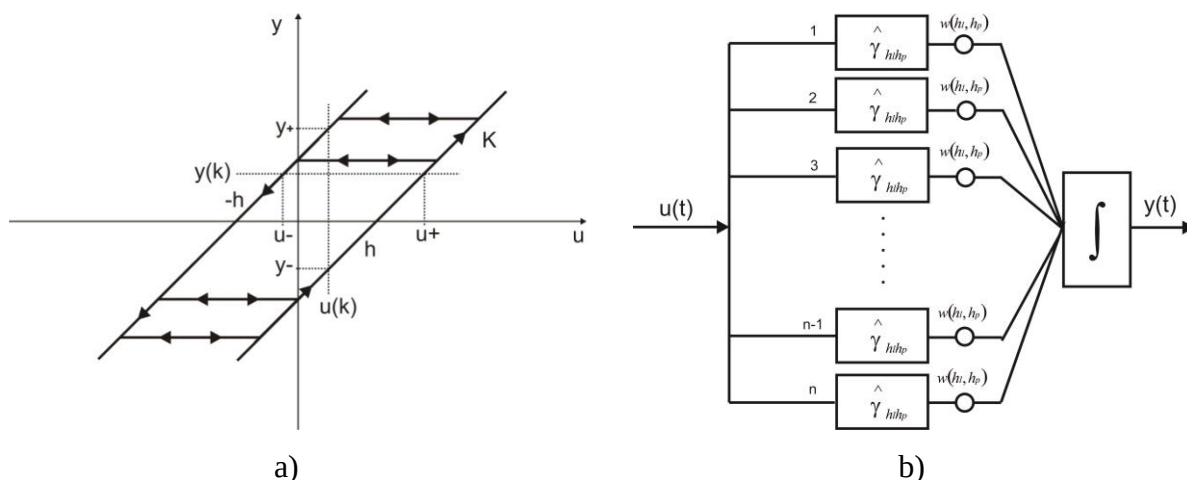
Ačkoli je výše uvedený popis stanovení vah $\mu(\alpha, \beta)$ respektive váhové funkce určující vliv jednoho konkrétního hysteronu na hodnotu výstupní funkce z Preisachova modelu výsledkem některých zde neuvedených dílčích matematických kroků, lze jeho správnost ověřit buď prostřednictvím geometrické interpretace modelu, kterou se bude zabývat následující text nebo realizací simulací s konečným (nejlépe jednotkovým) počtem hysteronů.

Významnou vlastností Preisachova modelu je selektivnost. Preisachův model dokáže, na základě způsobu formování křivky $L(t)$, „vymazat“ z historie vstupního signálu $u(t)$ hodnoty extrémů, dosažených před aktuálně nabytým extrémem. Tato vlastnost se nazývá *wiping-out property* a její funkci lze pospat následovně:

Každé lokální maximum vstupního signálu $u(t)$ vymaže vrcholy hraniční křivky $L(t)$, jejichž hodnota α souřadnic je menší než toto maximum a každé lokální minimum vstupního signálu $u(t)$ vymaže vrcholy hraniční přímky $L(t)$, jejichž hodnota β souřadnic je větší než toto minimum.

5.3 PRANDTL-ISHLINSKÉHO MODEL

Prandtl-Ishlinského (PI) model, obdobně jako Preisachův model, vychází z myšlenky „main block“ a principu sumace výstupů z dílčích nelinearit – hysteronů (**Obr. 17b**) [3], [4], [5], [8], [16], [24], [38]. V případě PI modelu je pro definici tohoto hysteronu využito charakteristiky vůle v převodech tzv. *backlash operátoru* (**Obr. 17a**).



Obr. 17: a) Charakteristika typu „Vůle v převodech“, b) Blokové schéma Prandtl-Ishlinského modelu.

Z výše uvedeného popisu vyplývá následující. Bude-li v okamžiku $(k - 1)$ hodnota $u(k - 1)$ v příslušném intervalu konzistence a $u(k)$ v dalším časovém okamžiku zůstane v tomto intervalu, nedojde ke změně hodnoty y a systém zůstane „ve vůli“. V opačném případě dojde ke změně výstupu y , systém se dostane do záběru dle jedné ze záběrových přímek podle toho, kterou hranici intervalu hodnota u překročila. Analogicky ke vztahu (5.4) lze obecně zapsat vztah pro výpočet výstupu z Prandtl-Ishlinského modelu následovně:

$$f(t) = \iint_{h_l \geq h_p} w(h_l, h_p) \hat{y}_{h_l h_p} u(t) dh_l dh_p \quad (5.6)$$

kde hodnota h_l odpovídá průsečíku záběrové přímky pro klesající hodnotu vstupu $u(t)$ a osy x , hodnota h_p odpovídá průsečíku záběrové přímky pro rostoucí hodnotu vstupu $u(t)$ a osy x . Váhy $w(h_l, h_p)$ jednotlivých hysteronů jsou v případě PI modelu odvozeny z takzvané *panenské křivky* konkrétní hystereze.

Úpravou rovnice (5.7), kde $bw_i = h_{pi} - |h_{li}|$

$$y(n) = \sum_{i=1}^n (bw_{n+1} - bw_i) w_i \quad (5.7)$$

lze vyjádřit vztah mezi šířkami hysteronů bw , odpovídajícími hodnotami výstupu $y(t)$ a váhami w rovnicí (5.8):

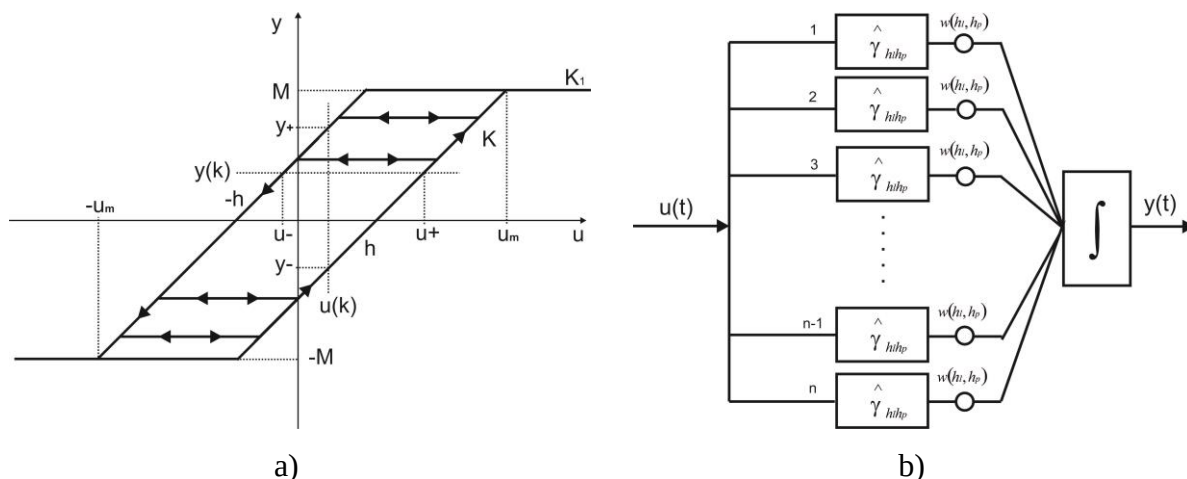
$$\{y\} = [A] * \{w\} \quad (5.8)$$

respektive rovnicí (5.9):

$$\{w\} = [A]^{-1} * \{y\} \quad (5.9)$$

5.4 MODIFIKOVANÝ PRANDTL-ISHLINSKÉHO MODEL

Modifikovaný Prandtl-Ishlinského (MPI) [38] model vychází z modelu, popsaného v předchozí kapitole. Jednotlivé funkční principy zůstaly zachovány, nicméně jako základní stavební nelinearity (hysteronu) je využito charakteristiky vůle v převodech s nasycením tzv. *saturated backlash* operátoru (**Obr. 18a**).



Obr. 18: a) Charakteristika typu „Vůle v převodech s nasycením“, b) Blokové schéma Modifikovaného Prandtl-Ishlinského modelu.

Uvnitř hystereze se výstupní hodnota y mění v závislosti na vstupní hodnotě u lineárně, se stejnou směrnici K_1 jako v případě kladného či záporného nasycení. Pokud se ve dvou po sobě jdoucích okamžicích nachází systém „ve vůli“, bude pro vstupní hodnotu y_k platit:

$$y(k) = y(k-1) + K_1[u(k) - u(k-1)] \quad (5.10)$$

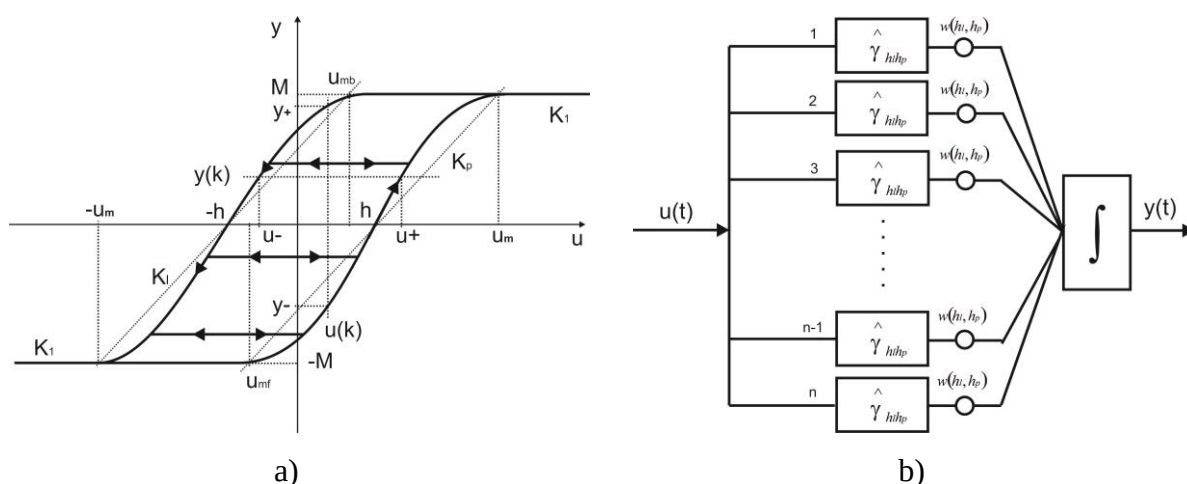
Hodnota výstupu y z MPI modelu je dána identicky, vzhledem k původnímu modelu, a to vztahem (5.6). Princip stanovení vah jednotlivých hysteronů je rovněž totožný.

5.5 NÁVRH VLASTNÍHO MODELU

Následující text se bude zabývat návrhem vlastního řešení, umožňujícího modelování nelinearity typu hystereze s nelokální pamětí.

Na základě teoretických předpokladů, rozebraných v předchozích kapitolách, lze nyní definovat vlastní „Cosine Modified Prandtl-Ishlinski“ (CMPI) řešení modelu. Navržený model, obdobně

jako modely diskutované v příslušných kapitolách, vychází z myšlenky „main block“ tj. integrace výstupů jednotlivých dílčích nelinearit (hysteronů) zvoleného typu, přičemž v tomto případě je pro stavbu hysteronu využito základní goniometrické funkce kosinus. Tím je pro potřeby CMPI modelu nově definována upravená charakteristika vůle v převodu s nasycením. Vlastní hysteron je rozšířen o další parametry, které specificky ovlivňují celkový výstup z navrženého modelu. Charakteristika hysteronu je ukázána na **Obr. 19a**, struktura vlastního modelu pak na **Obr. 19b**.



Obr. 19: a) Charakteristika typu „Modifikovaná vůle v převodech s nasycením“, b) Blokové schéma CMPI modelu.

Záběrové přímky jsou definovány vztahy:

$$\begin{aligned}
 y &= K_p \left[\cos \left(\pi \frac{u - u_{mf}}{u_m - u_{mf}} \right) + \pi \right] \quad \text{pro narůstající hodnotu vstupu} \\
 y &= K_l \left[\cos \left(\pi \frac{u - u_m}{u_{mb} - u_m} \right) + \pi \right] \quad \text{pro klesající hodnotu vstupu}
 \end{aligned} \tag{5.11}$$

Rovnice kladného a záporného nasycení jsou definovány vztahy:

$$\begin{aligned}
 y &= K_1 u + M \quad \text{pro kladné nasycení} \\
 y &= K_1 u - M \quad \text{pro záporné nasycení}
 \end{aligned} \tag{5.12}$$

Uvnitř hystereze se výstupní hodnota y mění v závislosti na vstupní hodnotě u lineárně, se stejnou směrnici K_1 jako v případě kladného či záporného nasycení. Pokud se ve dvou po sobě jdoucích okamžicích nachází systém „ve vůli“, bude pro vstupní hodnotu y_k platit:

$$y(k) = y(k-1) + K_1[u(k) - u(k-1)] \tag{5.13}$$

Hodnota u_m je za předpokladu $K > K_1$ dána vztahem:

$$u_m = \frac{Kh + M}{K - K_1} \quad (5.14)$$

Pokud bude hodnota $u \in \langle -u_m, +u_m \rangle$, musí pro vstupní hodnoty u a výstupní hodnoty y platit obdobné podmínky konzistence, za podmínky $-u_m < u_- < u_+ < u_m$. Hodnota výstupu z hysteronu v časových okamžicích k bude definována takto:

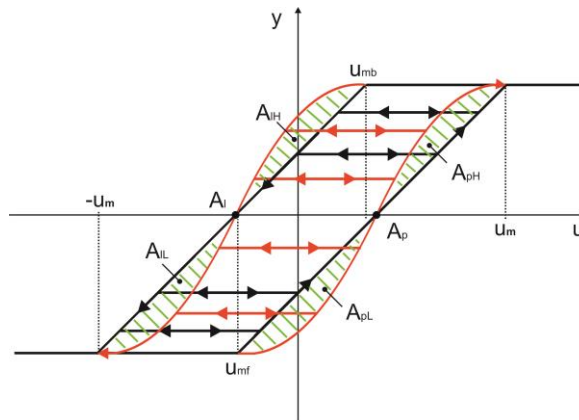
$$\begin{aligned} y(k) &= K_1 u(k) + M && \text{pro } u(k) \geq u_m \\ y(k) &= K_1 u(k) - M && \text{pro } u(k) \leq -u_m \\ y(k) &= K_p \left[\cos \left(\pi \frac{u(k) - u_{mf}}{u_m - u_{mf}} \right) + \pi \right] && \text{pro } u_+ \leq u(k) < u_m \\ y(k) &= K_l \left[\cos \left(\pi \frac{u(k) - u_m}{u_{mb} - u_m} \right) + \pi \right] && \text{pro } -u_m \leq u(k) < u_- \\ y(k) &= y(k-1) + K_1 [u(k) - u(k-1)] && \text{pro } u_- < u(k) < u_+ \end{aligned} \quad (5.15)$$

Hodnota výstupu y z CMPI modelu je dána identicky obdobně vzhledem k původnímu Prandtl-Ishlinského modelu. Princip stanovení vah jednotlivých hysteronů je rovněž totožný.

Pro možnost optimalizace navrženého hysteronu (**Obr. 19a**) jsou zavedeny pomocné parametry A_p , A_l . Tyto parametry jsou definovány vztahy (5.16) a (3.1) a reprezentují asymetričnost přepočetni charakteristiky vůči její ose, která prochází body u_{mf} , u_m respektive u_{mb} , $-u_m$ (**Obr. 20**) CMPI modelu. Definováním parametrů A_p , A_l je tedy stanovena určitá část goniometrické funkce kosinus, použitá jako přepočetni charakteristika hysteronu.

$$A_p = \frac{A_{pH}}{A_{pL}} \quad (5.16)$$

$$A_l = \frac{A_{lH}}{A_{lL}} \quad (5.17)$$



Obr. 20: Grafické reprezentace parametrů A_p a A_l .

Zavedení pomocných parametrů A_p , A_l umožňuje prvotní optimalizaci základního nastavení CMPI modelu. Oba parametry A_p , A_l budou nastavovány jako globální, to znamená jednotně pro všechny hysterony příslušného modelu.

5.6 SIMULACE A VZÁJEMNÉ POROVNÁNÍ MODELŮ

Z hlediska rozdělení druhů hysterezí na LM a NM, se následující text bude zabývat NM variantou. Tato varianta je z pohledu jejího modelování a souvisejících simulací náročnější, ovšem v případě problematiky řešené v rámci této práce odpovídající. Simulacemi získané výsledky pak bude možné porovnat jak vzájemně, tak i s experimentálně získanými daty prezentovanými v kapitole 3. V rámci porovnání nebude zařazen původní PI model, u nějž absence kladné respektive záporné saturace fakticky eliminuje jeho relevantní použití.

Pro možnost porovnání výsledků simulací vybraných modelů, diskutovaných v kapitole 5, budou tyto modely upraveny pomocí odpovídajícího přepisu základních matematických vztahů. Princip výpočtu výstupů jednotlivých modelů pak lze postupnými úpravami přepsat do zobecněného vztahu (5.18):

$$y = \sum_{S^+} \hat{y}_{h_l h_p} w_{h_l h_p} + \sum_{S^-} \hat{y}_{h_l h_p} w_{h_l h_p} \quad (5.18)$$

kde plocha S^+ resp. S^- reprezentuje kladně překlopené resp. záporně překlopené hysterony $\hat{y}_{h_l h_p}$ a $w_{h_l h_p}$ jejich odpovídající váhy. Výpočet hodnoty výstupu y v kroku k je pak dán vztahem (5.19)

$$y(k) = \sum_{S^+(k)} \hat{y}_{h_l h_p} w_{h_l h_p} + \sum_{S^-(k)} \hat{y}_{h_l h_p} w_{h_l h_p} \quad (5.19)$$

5.6.1 Simulace

Pro potřeby jednotlivých simulací budou stanovena následující kriteria. Počet hysteronů N , použitých při jednotlivých simulacích, bude zvolen tak, aby mohly být potvrzeny či vyvráceny některé teoretické předpoklady. Stejný postup bude aplikován i v případě vah jednotlivých hysteronů. Jejich hodnota bude pro potřeby simulací stanovena na $w_{h_l h_p} = 1$, a to z důvodu eliminace vlivu váhové funkce na hodnocenou přesnost modelů v jejich základní podobě. Výstupní hodnota jednotlivých hysteronů bude stanovena +1 v případě dosažení kladné saturace a -1 v případě dosažení záporné saturace.

Přesnost jednotlivých modelů bude stanovena jako absolutní hodnota odchylky jejich výstupu od experimentálně získaných dat dle vztahu (5.20):

$$\sigma(k) = |y_m(k) - y_r(k)| \quad (5.20)$$

respektive jako suma těchto hodnot (5.21).

$$\Delta = \sum_{k=1}^n \sigma(k) \quad (5.21)$$

Vlastní výpočet přesnosti jednotlivých modelů bude prováděn ve třech rozsazích kroku k výstupního signálu $u(t)$ a to $k_1 \in \langle 300; 700 \rangle$, $k_2 \in \langle 800; 1200 \rangle$ a $k_3 \in \langle 300; 2400 \rangle$. Levá hodnota rozsahu k bude z důvodu potřeby sjednocení výchozích podmínek dosažením kladné saturace všech jednotlivých hysteronů příslušných modelů stanovena na hodnotu $k = 300$. Tato hodnota odpovídá hodnotě t vstupního signálu $u(t)$, ve které se reálný systém, popsáný v kapitole 3, nachází v kladné saturaci.

Jednotlivé hodnoty $y(k)$, reprezentující experimentálně získaná data, budou vypočteny jako aritmetický průměr všech experimentálně naměřených hodnot v kroku k . Vzhledem k minimálnímu rozptylu těchto hodnot, patrného z **Obr. 10**, stability reálného systému a předpokládané přesnosti jednotlivých modelů, lze způsob výpočtu hodnot $y(k)$ prohlásit za dostatečný.

Níže uvedené charakteristiky popisují závislosti hodnoty výstupu $y(k)$ z jednotlivých modelů na hodnotách vstupu $u(k)$. Pro stanovení hodnoty vstupu $u(k)$ budou využity charakteristiky (**Obr. 9**). Na základě předpokladu výskytu největších nepřesností modelů v oblasti okolo hodnot A_S , A_F , M_S , M_F (**Obr. 4**), bude pro simulace a související výpočty primárně použita charakteristika u1.

Průběhy, uvedené na **Obr. 21** až **Obr. 38**, zobrazují vybrané specifické části chování výstupů $y(k)$ jednotlivých modelů tak, aby byly zdůrazněny rozdíly v jejich přesnosti, definované vztahem (5.20).

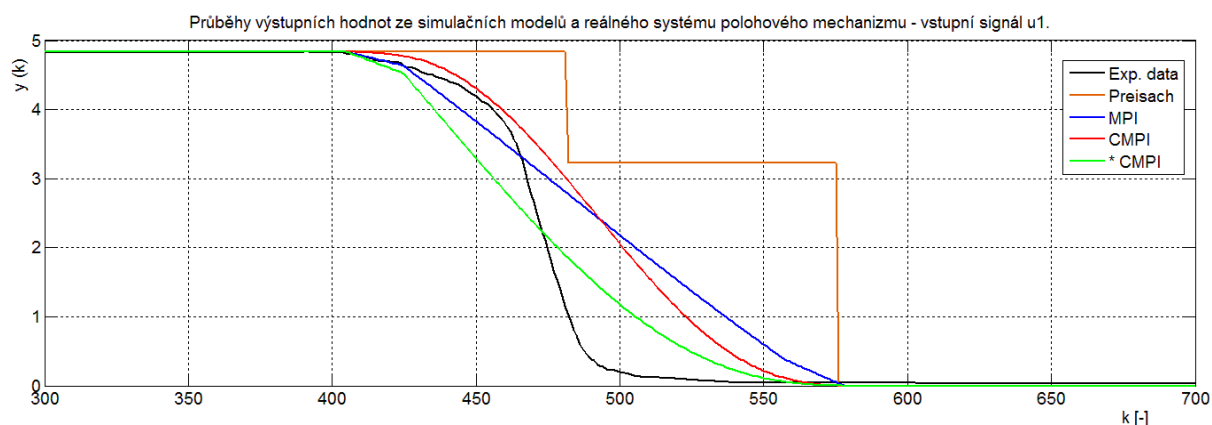
Pro možnost širšího porovnání přesnosti navrženého modelu s již existujícími modely, budou jednotlivé simulace provedeny pro různé hodnoty těchto tří základních parametrů:

- N – počet hysteronů, $N \in \langle 3, 10, 21 \rangle$,
- K_p – sklon pravé přepočtení charakteristiky hysteronu, $K_p \in \langle 0.5, 1, 2 \rangle$,
- K_l – sklon levé přepočtení charakteristiky hysteronu, $K_l \in \langle 0.5, 1, 2 \rangle$,

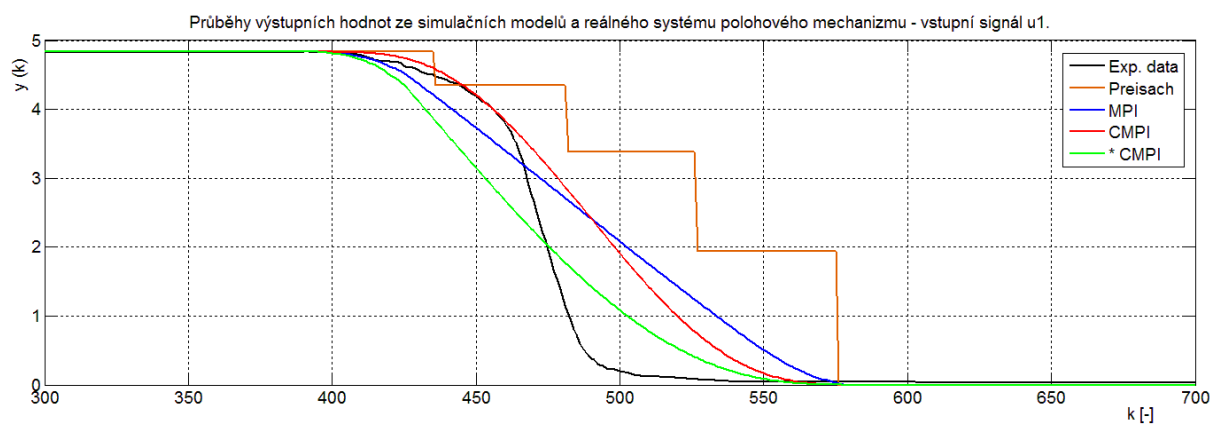
V souladu s definicí hysteronu Preisachova modelu budou hodnoty K_p , K_l odpovídat 90° sklonu přepočetni charakteristiky.

V případě CMPI modelu budou parametry A_p , A_l nastaveny tak, aby přepočetni charakteristika odpovídala funkci kosinus v intervalech:

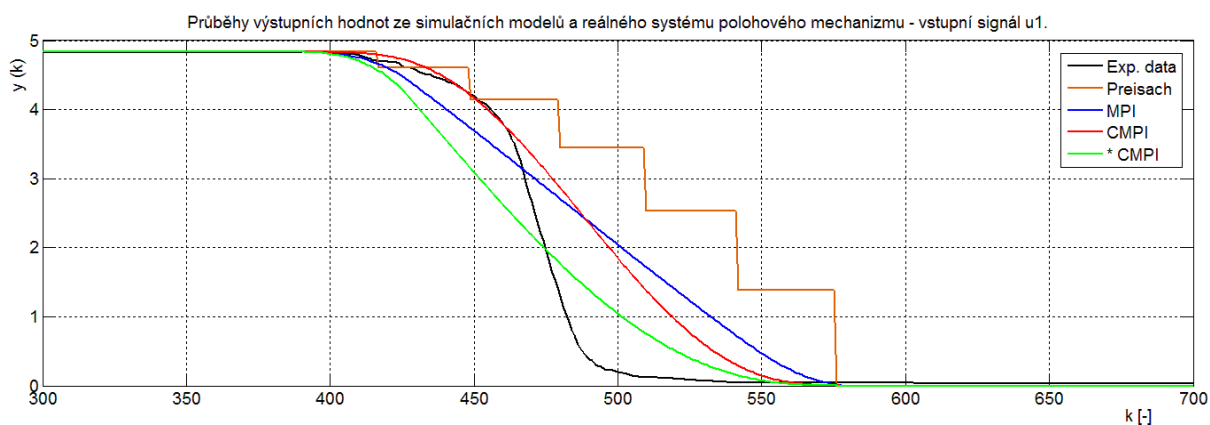
- $\langle -\pi, 0 \rangle$ pro CMPI model,
- $\langle -\pi, -\frac{\pi}{2} \rangle$ pro *CMPI model.



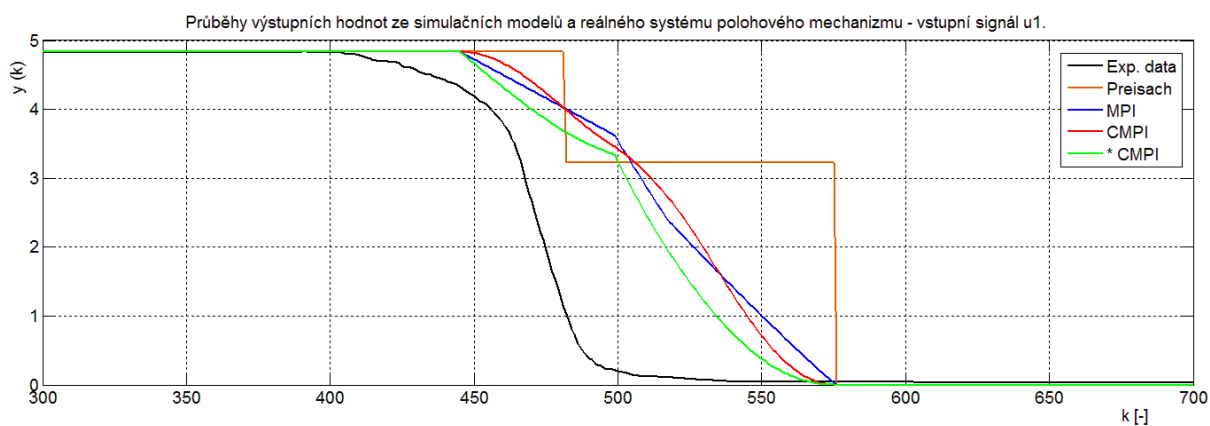
Obr. 21: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_1 , $K_p=K_l=0,5$, $N=3$.



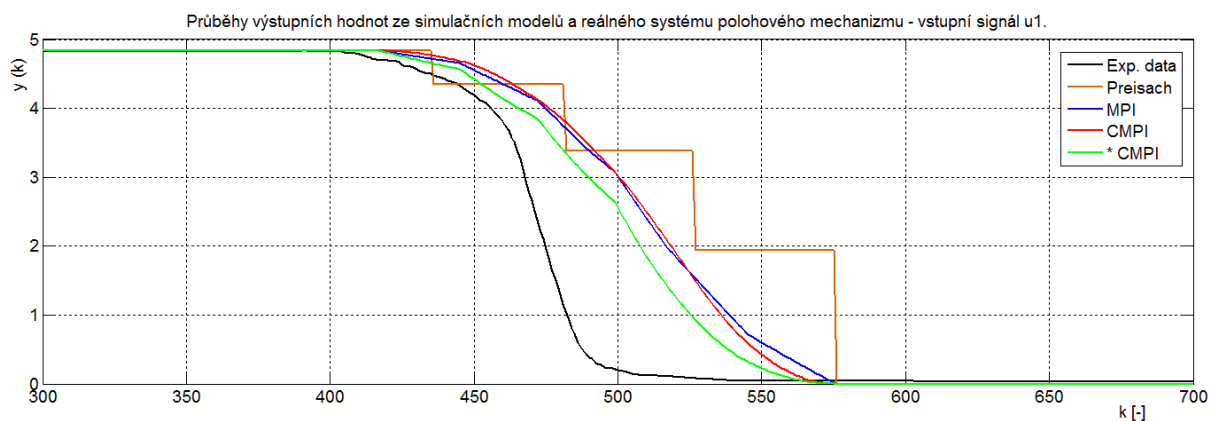
Obr. 22: Hodnoty výstupu z reálného systému a jednotlivých modelů - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_1 , $K_p=K_l=0,5$, $N=10$.



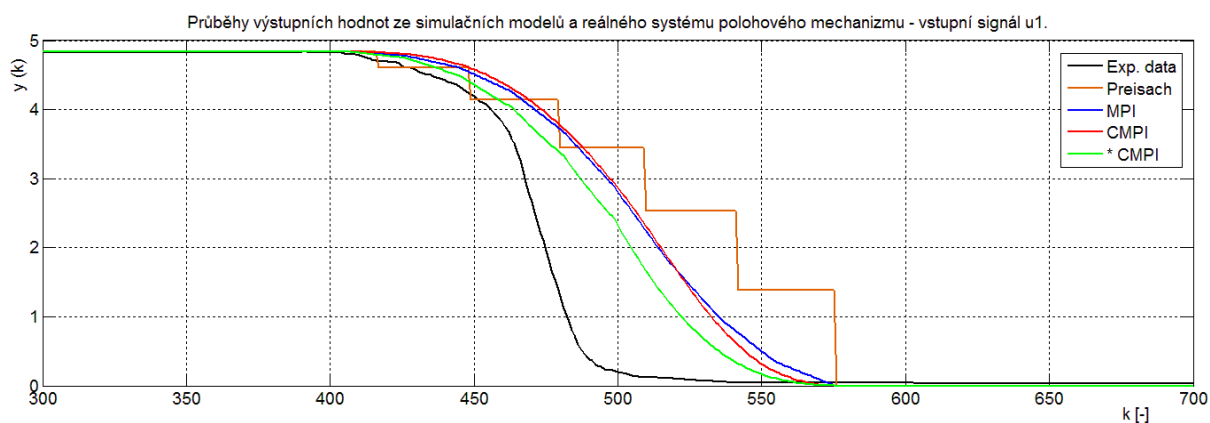
Obr. 23: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_i , $K_p=K_I=0,5$, $N=21$.



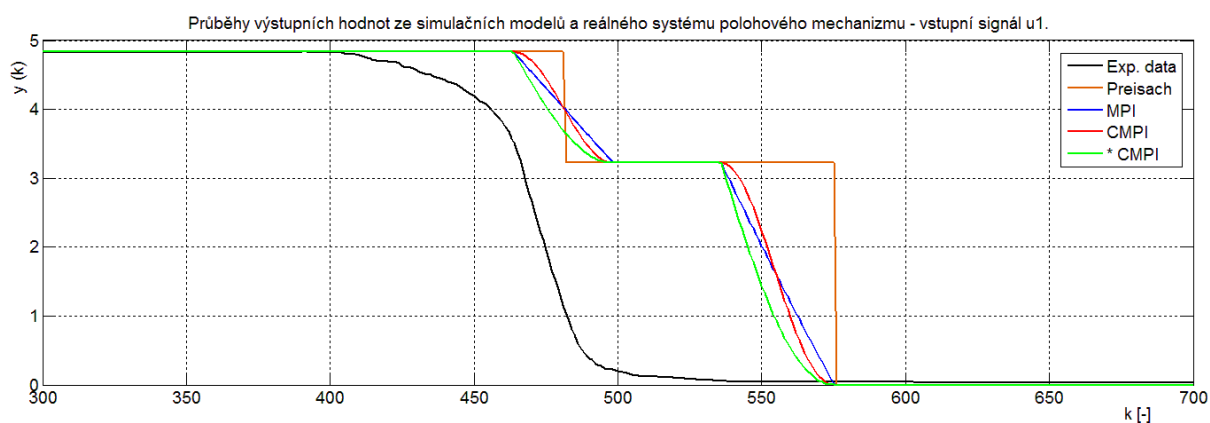
Obr. 24: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_i , $K_p=K_I=1$, $N=3$.



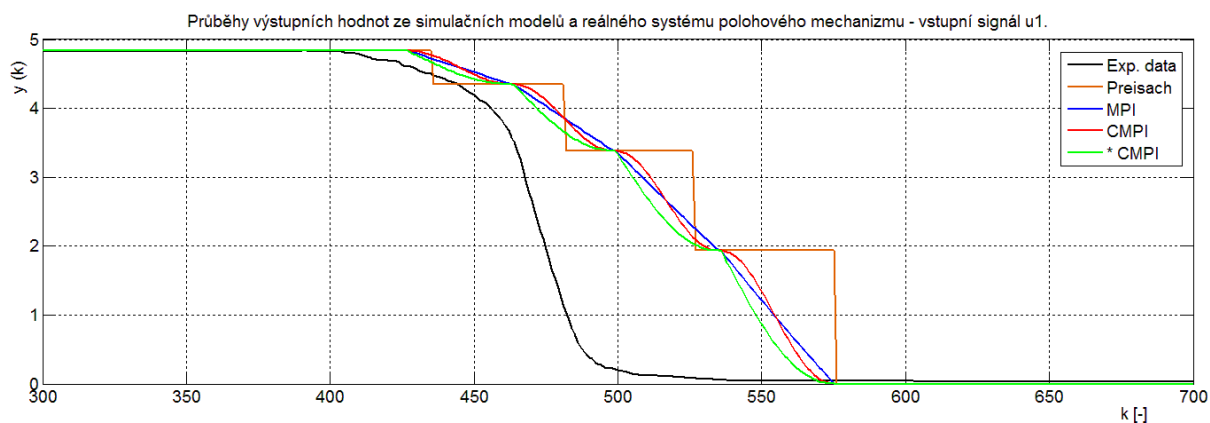
Obr. 25: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_i , $K_p=K_I=1$, $N=10$.



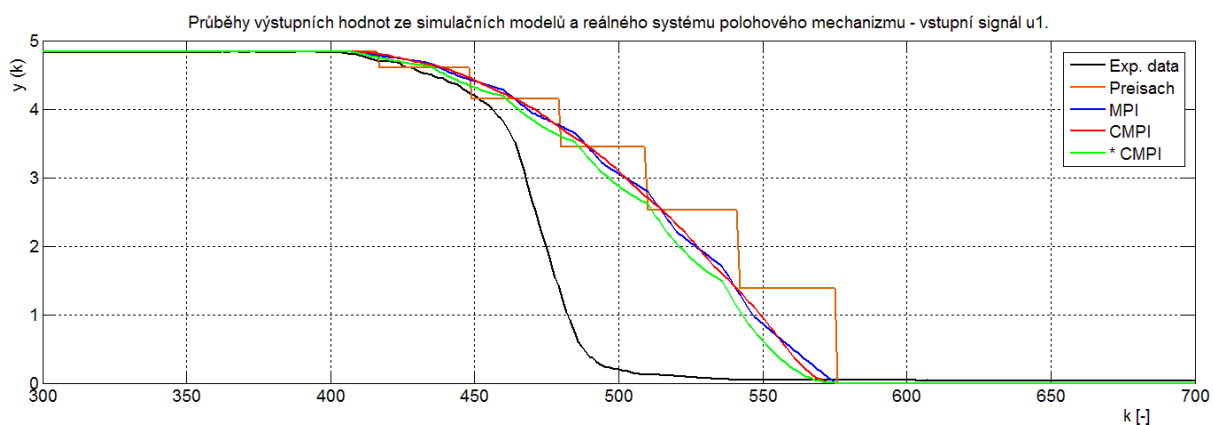
Obr. 26: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_1 , $K_p=K_I=1$, $N=21$.



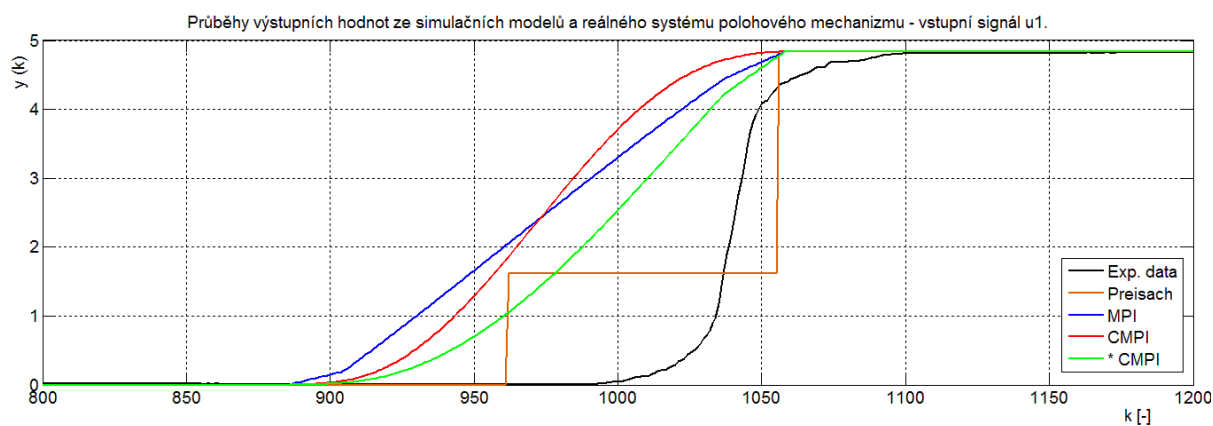
Obr. 27: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_1 , $K_p=K_I=2$, $N=3$.



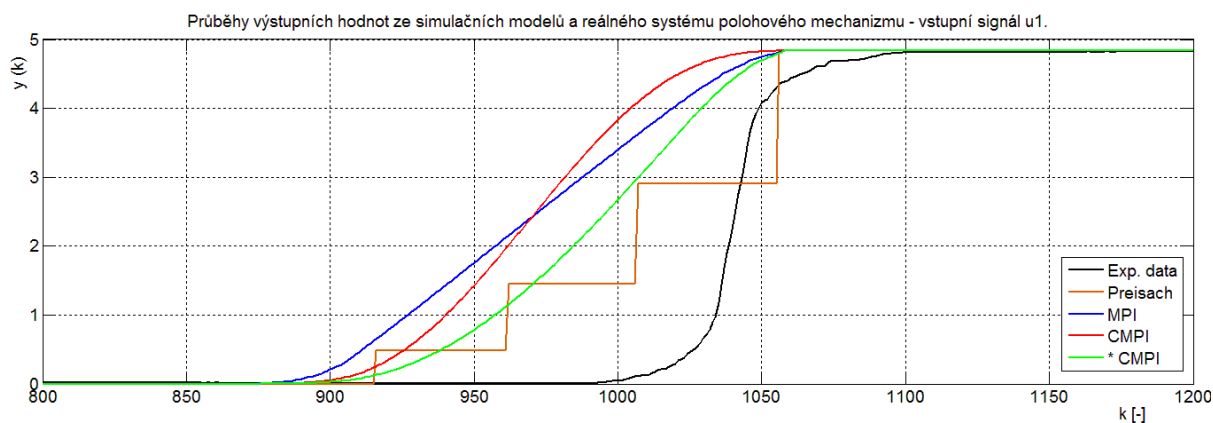
Obr. 28: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_1 , $K_p=K_I=2$, $N=10$.



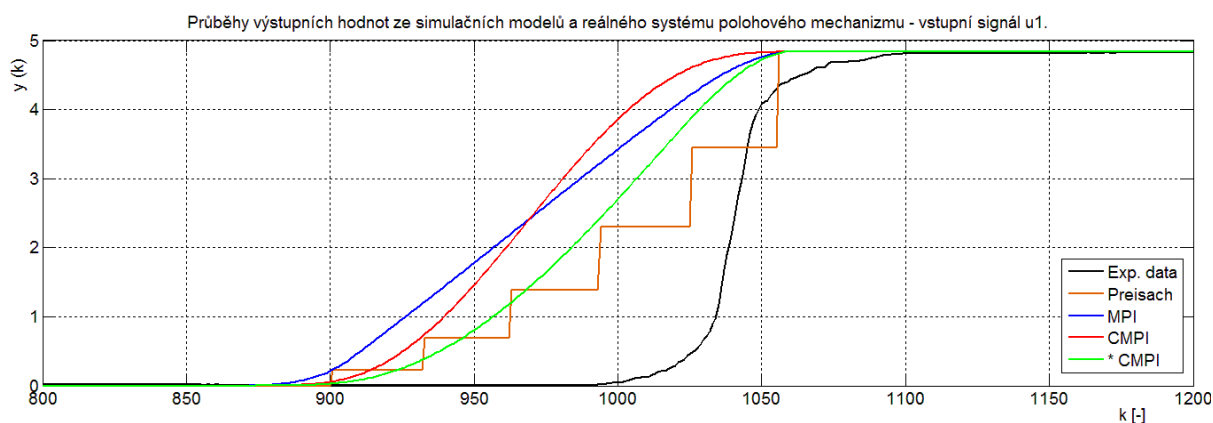
Obr. 29: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_1 , $K_p=K_I=2$, $N=21$.



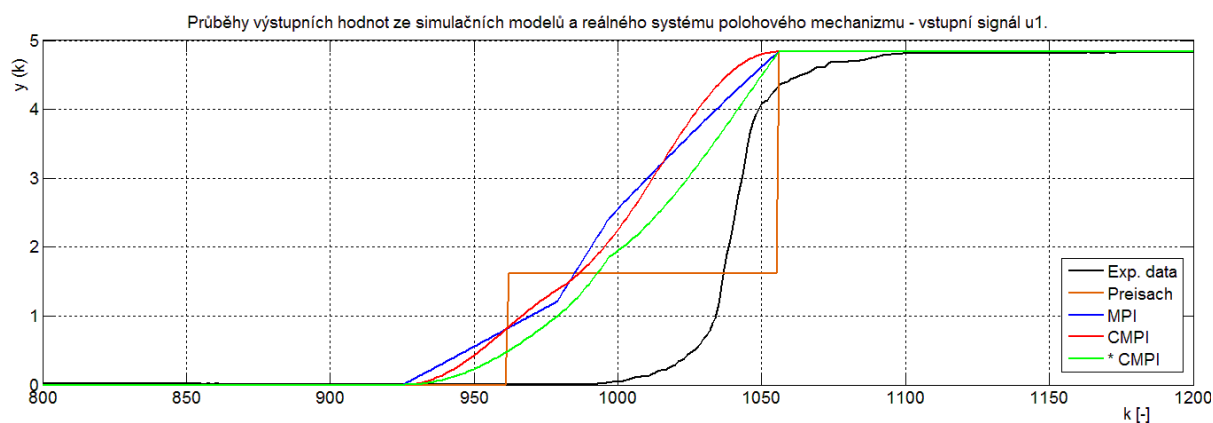
Obr. 30: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_2 , $K_p=K_I=0,5$, $N=3$.



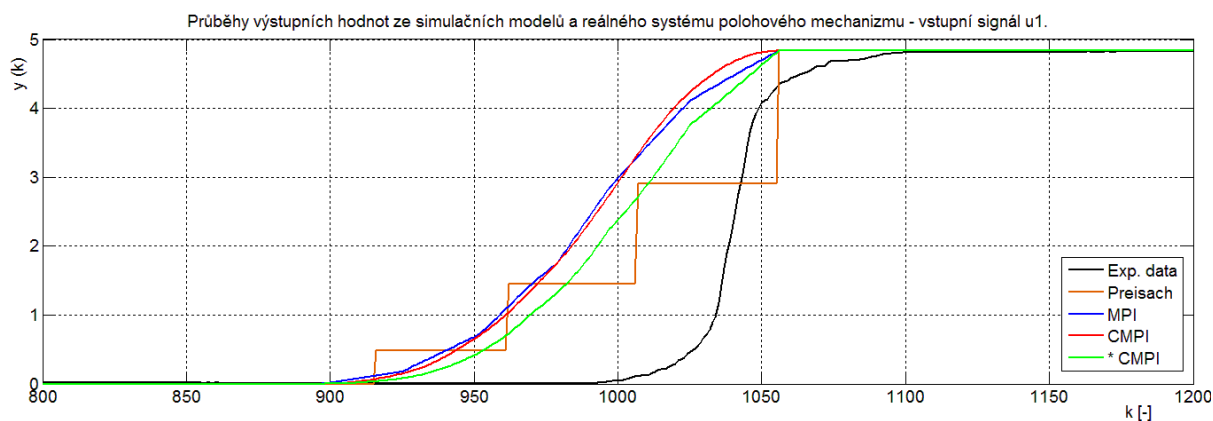
Obr. 31: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_2 , $K_p=K_I=0,5$, $N=10$.



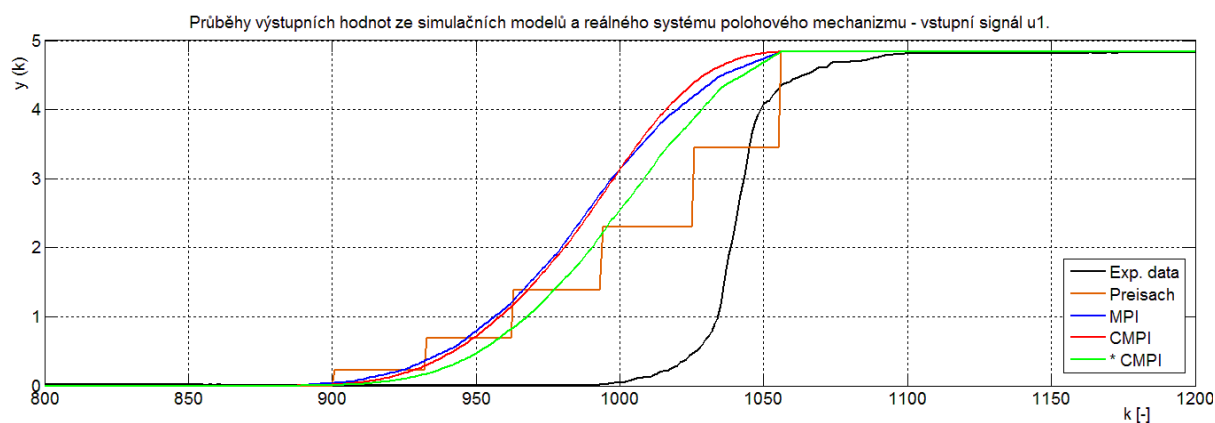
Obr. 32: Hodnoty výstupů z reálného systému a jednotlivých modelů - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_2 , $K_p=K_I=0,5$, $N=21$.



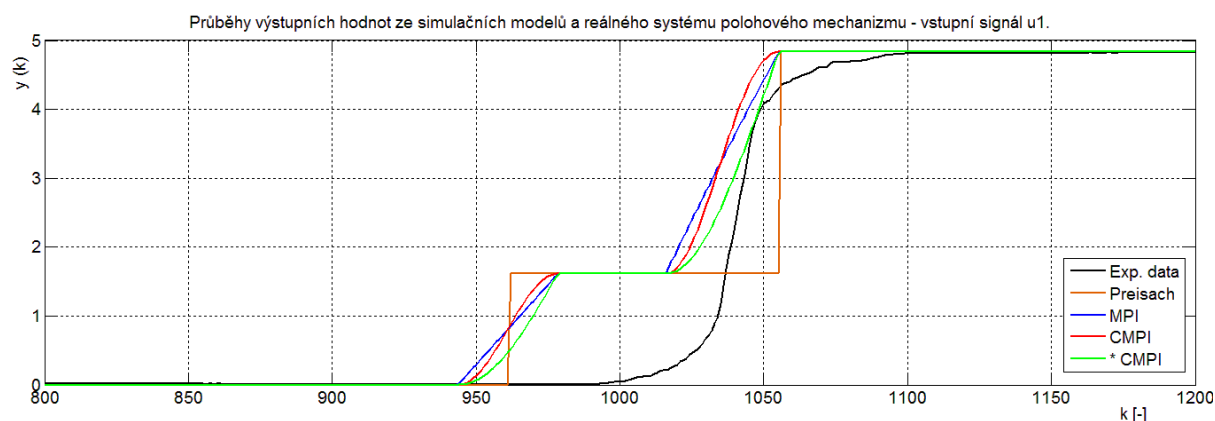
Obr. 33: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_2 , $K_p=K_I=1$, $N=3$.



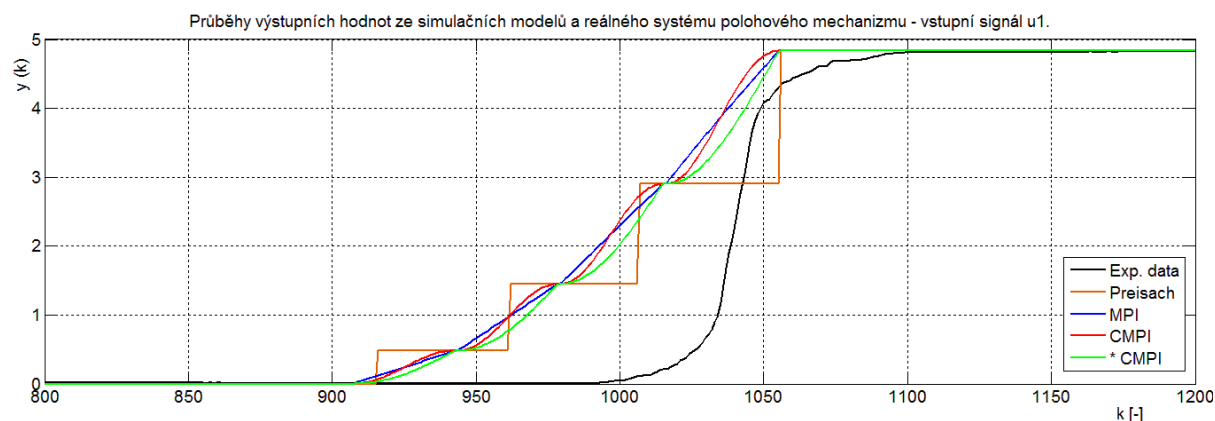
Obr. 34: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_2 , $K_p=K_I=1$, $N=10$.



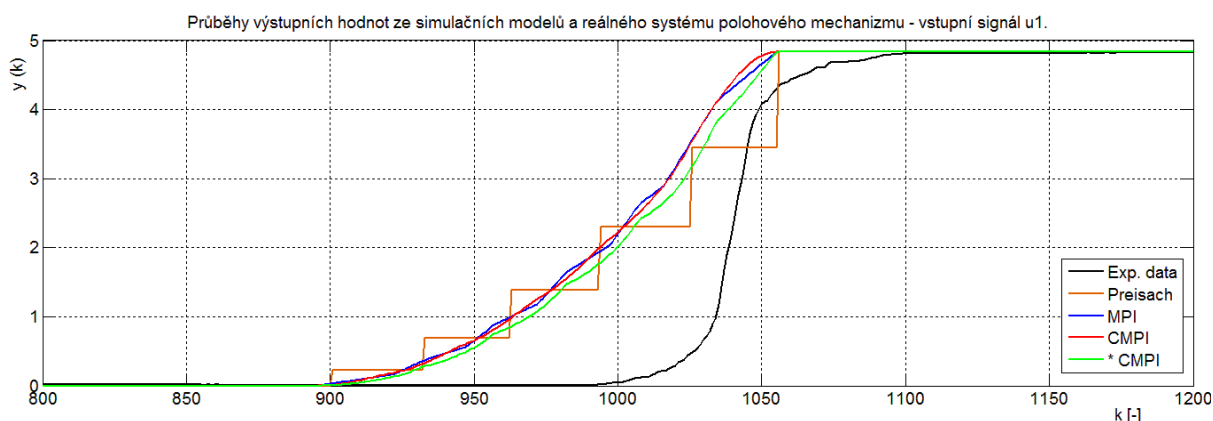
Obr. 35: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_2 , $K_p=K_I=1$, $N=21$.



Obr. 36: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_2 , $K_p=K_I=2$, $N=3$.



Obr. 37: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_2 , $K_p=K_I=2$, $N=10$.



Obr. 38: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_2 , $K_p=K_l=2$, $N=21$.

5.6.2 Porovnání modelů

Výsledky provedených simulací vybraných modelů a jejich srovnání z pohledu přesnosti definované vtahem (3.1) jsou uvedeny v tabulkách **Tab. 2**, **Tab. 3** a **Tab. 4**. Zvýrazněné hodnoty představují nejlepší dosaženou přesnost konkrétního modelu při vybraném nastavení parametrů K_x a N , kde $K_x = K_l = K_p$.

Tab. 2: Přehled hodnot Δ jednotlivých modelů pro u_1 , $k_1 \in \langle 300; 700 \rangle$.

K_x/N	**Preisachův model	MPI model	CMPI model	*CMPI model
0.5/3	363.1556	137.5201	117.1664	83.5296
0.5/10	286.2138	132.2218	102.7030	85.8196
0.5/21	255.0507	130.4768	97.7269	87.0363
1/3	363.1556	235.2724	234.7625	186.1889
1/10	286.2138	190.4777	190.2751	142.1436
1/21	255.0507	175.5718	175.5018	127.5361
2/3	363.1556	296.8125	296.6602	272.0671
2/10	286.2138	235.9902	235.9753	211.8744
2/21	255.0507	205.9616	206.0147	182.0782

* $K_x = 0 \approx$ sklon $L=P=90^\circ$, *optimalizovaný CMPI model.

Tab. 3: Přehled hodnot Δ jednotlivých modelů pro $u_1, k_2 \in \langle 800; 1200 \rangle$.

K_x/N	**Preisachův model	MPI model	CMPI model	*CMPI model
0.5/3	151.0791	329.4784	330.7201	230.7657
0.5/10	187.5961	344.2438	345.2836	245.7107
0.5/21	192.9123	347.6364	348.6184	249.1346
1/3	151.0791	212.7957	213.6857	163.6119
1/10	187.5961	257.0252	257.7325	208.4501
1/21	192.9123	271.7461	272.4196	223.4161
2/3	151.0791	151.6121	151.9498	126.7733
2/10	187.5961	211.7168	211.9806	187.4380
2/21	192.9123	216.2056	216.4757	192.0317

* $K_x = 0 \approx$ sklon $L=P=90^\circ$, *optimalizovaný CMPI model.

Tab. 4: Přehled hodnot Δ jednotlivých modelů pro $u_1, k_3 \in \langle 300; 2400 \rangle$.

K_x/N	**Preisachův model	MPI model	CMPI model	*CMPI model
0.5/3	1.0950e+03	960.5394	920.6401	670.8601
0.5/10	993.4808	983.3890	915.7944	713.4896
0.5/21	933.7585	988.3714	912.0745	726.2323
1/3	1.0950e+03	947.4593	952.1812	744.0533
1/10	993.4808	937.8931	942.1755	735.0803
1/21	933.7585	934.4357	939.2678	731.7978
2/3	1.0950e+03	955.6546	957.9461	853.2525
2/10	993.4808	939.5052	941.1758	838.4239
2/21	933.7585	879.8810	881.3422	778.5108

* $K_x = 0 \approx$ sklon $L=P=90^\circ$, *optimalizovaný CMPI model.

5.7 ZHODNOCENÍ NAVRŽENÉHO ŘEŠENÍ A VÝSLEDKŮ SIMULACÍ

Vyhodnocením výsledků, uvedených v kapitole 5.6.2, lze stanovit tyto závěry.

Pro systém, definovaný v kapitole 3.3.2, lze pomocí goniometrické funkce kosinus vytvořit model typu „main block“. Přesnost tohoto modelu, definovaná vztahem (5.21), je v porovnání s Preisachovým a MPI modelem větší. V případě nastavení rozsahu parametrů dle 5.6.1, lze dosáhnout zvýšení přesnosti nejméně o 14%.

Další zvýšení přesnosti modelu lze dosáhnout změnou počtu hysteronů. Závislost přesnosti modelu na počtu hysteronů je pro Preisachův, MPI a CMPI rostoucí. V případě použití optimalizace u CMPI modelu může být závislost přesnosti modelu na počtu hysteronů jak rostoucí, tak i klesající.

Dále lze stanovit tyto závislosti přesnosti vybraných modelů na hodnotě parametrů K_x , N a přechodu z kladné do záporné saturace, respektive záporné do kladné saturace (**Tab. 5**).

Tab. 5: Závislosti přesností modelů.

Model	K_x	N	Směr přechodu mezi saturacemi	Přesnost
Preisachův	-	rostoucí	kladná → záporná záporná → kladná	rostoucí klesající
MPI	rostoucí	rostoucí	kladná → záporná záporná → kladná	klesající → rostoucí rostoucí → klesající
CMPI	rostoucí	rostoucí	kladná → záporná záporná → kladná	klesající → rostoucí rostoucí → klesající
*CMPI	rostoucí	rostoucí	kladná → záporná záporná → kladná	**klesající → rostoucí rostoucí → klesající

* $A_p=A_l=0$, ** pro $K_x < 1$ je přesnost klesající → klesající.

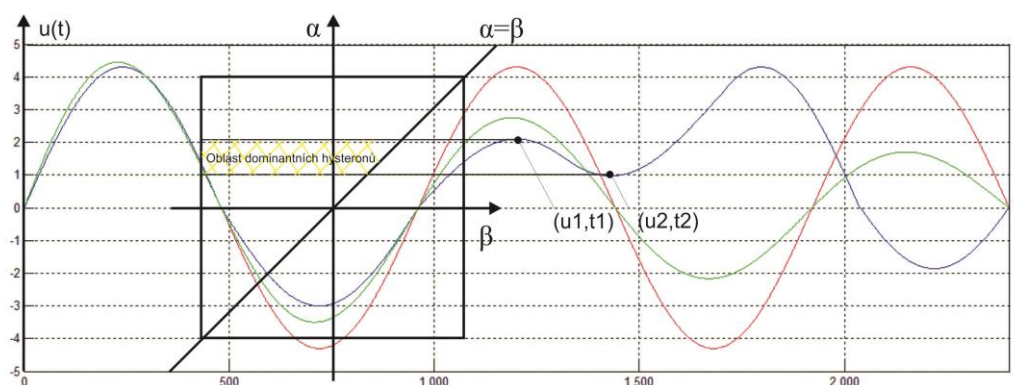
Přesnost modelů lze upravit nastavením různých hodnot pro K_p a K_l a to jak jednotlivě pro každý hysteron, tak i jednotně pro celý model.

5.8 MOŽNOSTI ZPŘESNĚNÍ MODELŮ

Dalšího zpřesnění modelů lze dosáhnout úpravou hodnoty vah jednotlivých hysteronů. Tuto úpravu lze provést na teoretickém nebo empirickém základě, případně jejich kombinací.

V teoretickém přístupu definujeme váhy hysteronů pomocí váhové funkce, diskutované v kapitolách 5.2 a 5.3. Výhodou tohoto přístupu je možnost rychlejšího nastavení modelů skládajících se z většího počtu hysteronů. Nevýhodou je pak poměrně komplikované sestavení váhové funkce.

Zpřesnění modelů na základě empirického přístupu může být výhodnější v případech, kdy je použit menší počet hysteronů. Jejich váhy jsou pak nastaveny jednotlivě pro každý hysteron zvlášť, jednotně pro všechny hystery, nebo s využitím identifikace takzvaných dominantních hysteronů. Na **(Obr. 39)** je naznačena identifikace dominantních hysteronů u Preisachova modelu, přičemž extrémy vstupní funkce $u(t)$ jsou zde vyjádřeny body (u_1, t_1) a (u_2, t_2) .



Obr. 39: Identifikace dominantních hysteronů.

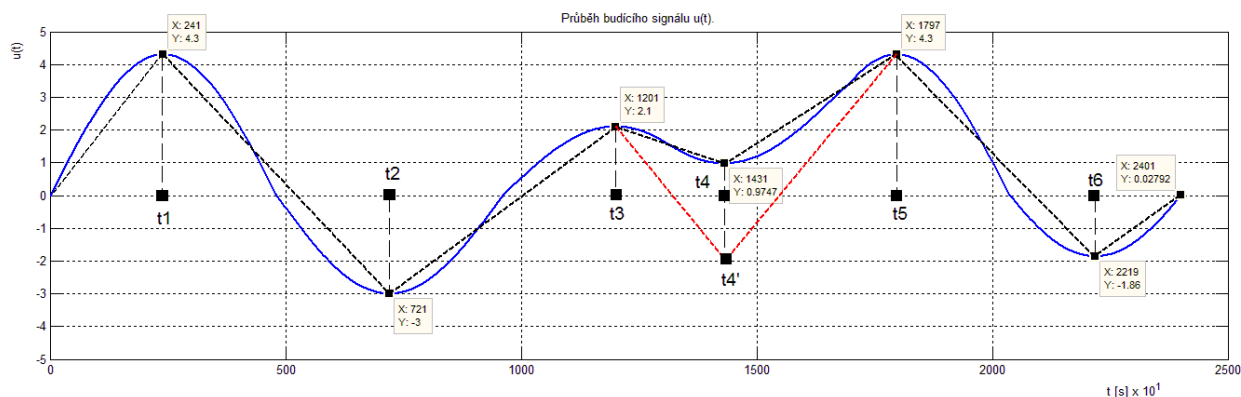
Kombinaci teoretického a empirického přístupu lze také použít následujícím způsobem.

Na základě znalosti vstupního signálu $u(t)$ (**Obr. 9**), respektive jeho hodnot $u(k)$ v kroku k , můžeme identifikovat jednotlivé extrémy $t_1, t_2, t_3 \dots t_n$ vstupní funkce $u(t)$ a definovat je pomocí hodnot $[u(k), n]$ (**Obr. 40**).

V kapitole 5 byl u NM hysterezí diskutován vliv extrémů hodnot vstupní funkce $u(t)$ na tvar hystereze a větve, tvořící její případné vnitřní smyčky. Obdobně tyto extrémy ovlivňují hodnoty výstupní funkce $y(t)$ modelů. Lze tedy říci, že prostřednictvím korekce hodnot vstupní funkce $u(t)$ lze ovlivnit přesnost modelů.

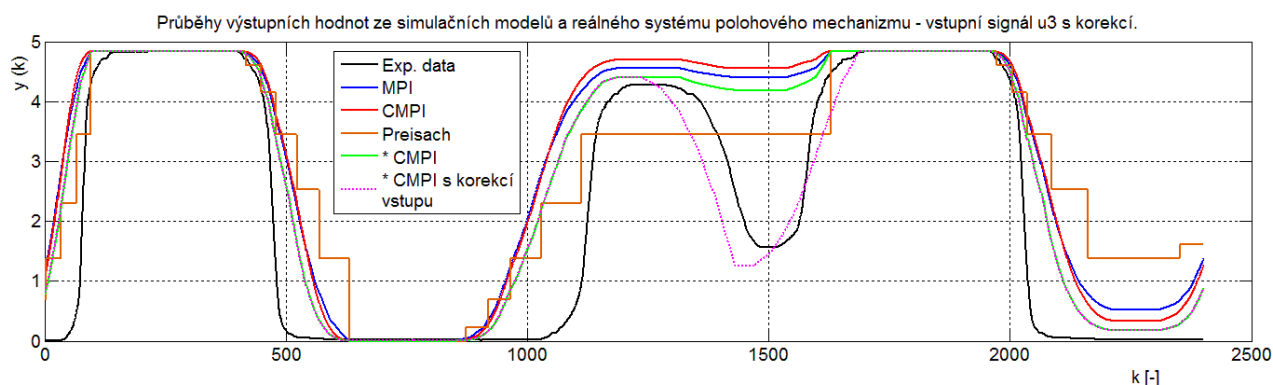
Korekce funkce může být globální nebo lokální (**Obr. 40**). Při globální korekci bude vstupní funkce $u(t)$ fakticky substituována například její linearizovanou podobou $u_l(t)$. V případě lokální korekce bude vstupní funkce $u(t)$ substituována pouze ve vybraných oblastech např. $\langle t_3, t_4, t_5 \rangle$ (**Obr. 40**).

Se znalostí vlivu vah respektive váhové funkce na chování modelů a vlivu korekce vstupní funkce $u(t)$ lze dovodit jejich částečnou vzájemnou analogii.



Obr. 40: Korekce vstupního signálu $u(t)$ a identifikace jeho extrémů.

Příklad vlivu zavedení korekce vstupního signálu $u(t)$ v podobě linearizace jeho části na přesnost modelů je znázorněna na Obr. 41, a numericky vyčíslena v Tab. 6.



Obr. 41: Úprava přesnosti modelu pomocí korekce vstupního signálu $u(t)$.

Tab. 6: Přehled hodnot Δ jednotlivých modelů pro u_3 s korekcí, $k_3 \in \langle 300; 2400 \rangle$.

K_x/N	**Preisachův model	MPI model	CMPI model	*CMPI model	***CMPI model
1/21	1.8951e+03	1.7692e+03	1.7985e+03	1.3498e+03	1.0955e+03

** $K_x = 0 \approx$ sklon $L=P=90^\circ$, *optimalizovaný CMPI model, ***optimalizovaný CMPI model s korekcí vstupního signálu.

Použití metody globální nebo lokální korekce vstupního signálu pomocí linearizace potlačuje informaci o původním průběhu vstupní funkce $u(t)$ mezi jejími extrémami a tím částečně i o její dynamice, což ovšem pro některé případy nemusí být omezující.

Potlačení informace o dynamice vstupního signálu $u(t)$ lze zčásti eliminovat, a to její nelineární substitucí.

6 ZÁVĚR

Akční členy tvoří nenahraditelnou součást mechatornických systémů. Jejich vývoj, optimalizace a obecně zdokonalování je stále aktuálním tématem. Jednou z cest, kterou se v tomto ohledu zabývá mnoho výzkumných pracovišť, je i náhrada tradičně používaných řešení řešeními netradičními.

Předkládaná práce se zabývala vytvořením obecného přehledu akčních členů, jejich kategorizací z pohledu tradičnosti jejich použití, popisem základních principů jejich funkcí, výhod a nevýhod a vzájemným srovnáním podle vybraných kritérií.

V návaznosti na problematiku netradičních akčních členů byl v této práci nejprve teoreticky podrobně rozebrán jejich zástupce a to kovy s tvarovou pamětí (SMA). Následně byly v rámci praktických částí realizovány experimenty s vybraným SMA - slitinou niklu (Ni) a titanu (Ti).

Na základě výsledků experimentální části práce a v rámci jejich hlavních stanovených cílů se podařilo navrhnout, realizovat a úspěšně otestovat funkční vzorek sedlového ventilu, integrovaného do patice pneumatického svalu McKibbenova typu. Popisovaný sedlový ventil vznikl během autorovy stáže v Advanced Robotic Lab na University of Salford ve Velké Británii a jako takový má, proti obvykle používaným zařízením využívajícím tradiční pohony, řadu výhod. Zkušenosti a závěry z experimentální části práce rovněž umožnily vznik vedlejšího výsledku práce v podobě patentu č. přihlášky 2004-1146 (č. ochranného dokumentu 297963), vedeného u Úřadu průmyslového vlastnictví. Tímto bylo úspěšně dosaženo prvního cíle této práce.

V souladu s teoretickými předpoklady byl u vybrané slitiny NiTi experimentálně potvrzen výskyt nelineárního chování typu hystereze, konkrétně pak hystereze s nelokální pamětí. V této části bylo, v rámci stanovených hlavních cílů práce, navrženo vlastní řešení, umožňující modelování NM hysterezí. Funkčnost řešení v podobě modelu, založeného na struktuře typu main block byla nejprve ověřena prostřednictvím vlastního programového vybavení, které bylo pro tento účel vyrobeno. Výsledky, získané prostřednictvím výpočtů, byly porovnány jak s experimentálně získanými daty, tak i s výsledky, získanými z dalších vybraných, již existujících modelů. K tomuto účelu bylo využito softwarového prostředí MATLAB R2014a. Provedeným porovnáním navrženého Cosine Modified Prandtl-Ishlinski (CMPI) modelu s Preisachovým a Modifikovaným Prandtl-Ishlinského (MPI) modelem byl potvrzen předpoklad množnosti použití nelineárního výpočetního prvku. Navržené řešení CMPI modelu zlepšilo přesnost modelu vybraného praktického použití SMA akčního členu o nejméně 14%. Tímto bylo úspěšně dosaženo i druhého cíle této práce.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MAYERGOYZ, I.: *Mathematical models of hysteresis and their applications*, A Volume in the Elsevier Series in Electromagnetism, First edition, 2003.
- [2] *Developing a Controller for a Spatial Bending Micro Module Actuated By Shape Memory Alloys: Modeling and Experiment: Proceedings of the 3rd RSI International Conference on Robotics and Mechatronics October 7-9, 2015, Tehran, Iran*. Edited by Hadi, A., Akbari, H. 2015. p. 772-777.
- [3] *Generalized Prandtl-Ishlinskii Hysteresis Model: Hysteresis Modeling and Its Inverse for Compensation in Smart Actuators: Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control Cancun, Mexico, Dec. 9-11, 2008*. Edited by Al Janaideh, M., Mao, J., Rakheja, S., Xie, W., Su, Ch. 2008. p. 5182-5187.
- [4] *Classical Prandtl-Ishlinskii modeling and inverse multiplicative structure to compensate hysteresis in piezoactuators: 2012 American Control Conference Fairmont Queen Elizabeth, Montréal, Canada June 27-June 29, 2012*. Edited by Rakotondrabe, M. 2012. p. 1646-1651.
- [5] *Inversion of an Extended Generalized Prandtl-Ishlinskii Hysteresis Model: Theory and Experimental Results: American Control Conference (ACC) June 4-6, 2014. Portland, Oregon, USA*. Edited by Zhang, J., Merced, E., Sepúlveda, N., Tan, X. 2014. p. 4765-4770.
- [6] *Hysteresis Modeling for a Shape Memory Alloy Actuator using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System: Proceedings of the 3rd RSI International Conference on Robotics and Mechatronics October 7-9, 2015, Tehran, Iran*. Edited by Rad, N. F., Ayati, M., Basaeri, H., Yousefi-Koma, A., Tajdari, F., Jokar, M. 2015. p. 320-324.
- [7] *Modeling and Control of a Shape Memory Alloy Actuator: Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on Intelligent Control Limassol, Cyprus, June 27-29, 2005*. Edited by Dutta, S. M., Ghorbel, F. H., Dabney, J. B. 2005. p. 1007-1012.
- [8] *Polynomial Prandtl-Ishlinskii Hysteresis Modeling for Nanorobot Motion Control: Proceedings of the 16th International Conference on Nanotechnology Sendai, Japan, August 22-25, 2016*. Edited by Song, B., Sun, Z., Xi, N., Yang, Y., Chen, L., Zhou, Z. 2016. p. 291-292.
- [9] MOUSAVI, S. A., ENGDAHL, G. Differential Approach of Scalar Hysteresis Modeling Based on the Preisach Theory. *IEEE Trans. Magn.*, 2011, vol. 47, no. 10, p. 3040–3043. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2144576.

- [10]LI, W.; FU, W.; KOH, Ch.-S.; WANG, Y. A Stable Iteration Procedure of Newton's Method in Finite Element Computation of Nonlinear Magnetic Field Problems with a Vector Hysteresis Model. *IEEE Trans. Magn.*, 2016, p. 1–6. DOI: 10.1109/TMAG.2016.2623585.
- [11]ALASTY, A., SHAMELI, E. Dynamic Modeling of a New Varying Stress SMA Actuator for Precise Applications. *IEEE Trans. Magn.*, 2004, p. 209–214.
- [12]WANG, G., GUAN, Ch., ZHOU, H., ZHANG, X., RAO, Ch. Hysteresis compensation of piezoelectric actuator for open-loop control. *Chinese optics letters*, 2013, vol. 11, p. 202-1–202-4. DOI: 10.3788/COL201311.S21202.
- [13]MAJIMA, S., KODAMA, K., HASEGAWA, T. Modeling of Shape Memory Alloy Actuator and Tracking Control System with the Model. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2001, vol. 9, no. 1, p. 54–59.
- [14]TRI, V.-M., TJAHJOWIDODO, T., RAMON, H., VAN BRUSSEL, H. A New Approach to Modeling Hysteresis in a Pneumatic Artificial Muscle Using The Maxwell-Slip Model. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2011, vol. 16, no. 1, p. 177–186. DOI: 10.1109/TMECH.2009.2038373.
- [15]KREJCI, P., KUHNEN, K. Inverse control of systems with hysteresis and creep. *IEE Proc.-Control Theory Appl*, 2001, vol. 148, no. 3, p. 185–192. DOI: 10.1049/ipcta:2001037.
- [16]GU, G.-Y., ZHU, L.-M., SU, Ch.-Y. Modeling and Compensation of Asymmetric Hysteresis Nonlinearity for Piezoceramic Actuators With a Modified Prandtl–Ishlinskii Model. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, vol. 61, no. 3, p. 1583–1595. DOI: 10.1109/TIE.2013.2257153.
- [17]BEKKER, A., BRINSON, L.C. Phase Diagram Based Description of the Hysteresis Behavior of Shape Memory Alloys. *Acta Metall. Mater.*, 1998, vol. 46, no. 10, p. 3649–3665.
- [18]p2w. p2w [online]. Copyright © 2014 AAA EDV Vertriebs AG [cit. 19.06.2017]. Dostupné z: http://epaper.maxonmotor.com/?_ga=2.113593543.1584717411.1497834483-1445644310.1497834483
- [19]Piezo - Piezo Mechanisms & Piezo Mechanic Systems by PI Physik Instrumente. Piezo - Piezo Mechanisms & Piezo Mechanic Systems by PI Physik Instrumente [online]. Copyright © 2012 PI L.P. All rights reserved. [cit. 22.06.2017]. Dostupné z: <http://www.piezo.ws/>

- [20]Dynalloy inc. [on-line]. Copyright © 2017 DYNALLOY, Inc. All Rights Reserved. [cit. 22.06.2017]. Dostupné z: http://www.dynalloy.com/tech_data_wire.php
- [21]KOPEČNÝ, L. McKibbenův pneumatický sval - modelování a použití v hmatovém rozhraní. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 114 s. [online]. Copyright © [cit. 22.06.2017]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=20176
- [22]TG Drives - Servomotory. TG Drives - komplexní dodávky a zprovoznění servopohonů, dodávky řídicích systémů [online]. Copyright © [cit. 22.06.2017]. Dostupné z: <http://www.tgdrives.cz/servomotory/>
- [23]KRASNOLEKIJ, M., POKROKOVSKIJ, A. Systémy s gistérezisom, Nauka, Moskva, 1983.
- [24]KUHEN, K. Modelling, Identification and Compensation of Complex Hysteretic Nonlinearities a modified Prandtl-Ishlinskii Approach, European J. of Control, No.4.,2003, pp. 407-418.
- [25] IKUTA, K., TSUKAMOTO, M., HIROSE, S. Mathematical Model and Experimental Verification of Shape memory Alloy for Designing Micro Actuator, Proc. of the IEEE on Micro Electromechanical Systems and Investigation of Microstructures, sensors, Actuators, machines and Robots, 1991.
- [26]DRAHOŠ, P. Príspevok k syntéze aktuátora zo zliatiny s tvarovou pamäťou, PhD. disertace, STU Bratislava, 2003.
- [27]JUNFENG, LI., HIROYUKI, H. Modeling of an SMA actuator based on the Liang Rogers model, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 43 (2013) p. 325-335, DOI 10.3233/JAE-131704,
- [28]WEIJIA, W., XIANGXIANG, H., PING, S. Electrorheological fluids: structures and mechanisms, DOI: 10.1039/b710948m.
- [29]PFEIFFER, CH., MAVROIDISA, C., BAR-COHEN, Y., DOLGIN, B. Proceedings of the 1999 SPIE Telemanipulator and Telepresence Technologies VI Conference, Boston, MA, September 19-22, 1999, Vol. 3840, pp. 88-99.
- [30]BURDEA, G. Force and Touch Feedback for Virtual Reality. John Wiley, 1996. 339 p. ISBN 0-471-02141-5.
- [31]OTSUKA, K., WAYMAN, C.M., Shape Memory Materials, Cambridge University Press, 1998, ISBN 0 521 44487.

-
- [32] GILBERTSON, G.G., Muscle wires project book, Mondo-tronics, inc., San Rafael, 2000, ISBN 1-879896-16-8.
- [33] CONRAD, J.M., MILLS, J.W., Stiquito, Advanced experiments with a simple and inexpensive robot, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, California, 1998, ISBN 0-8186-7408-3.
- [34] DRAHOŠ, P., Thermodynamic Model of SMA Drive. In: Proceedings of 4th Conference Process Control 2000 in ČR (Kouty nad Desnou), University of Pardubice.
- [35] Actuator Wire. Welcome to MuscleWires® - Next Generation Hardware Solutions [online] [cit. 22.05.2017]. Dostupné z: http://store-musclewires-com.3dcartstores.com/Actuator-Wire_c_87.html.
- [36] Material | Memry, a SAES Group Company. Memry, a SAES Group Company | From Melt to Market [online]. Copyright ©2012 Memry Corporation. A SAES Getters company. All rights reserved. [cit. 03.06.2017]. Dostupné z: <http://memry.com/products-services/material>.
- [37] DUERIG, T.W., Engineering aspects of Shape Memory Alloys, Illinois, Departement Of Materials Science and Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1996.
- [38] ŠOLC, F., Modelování hystereze v mechatronických systémech, Automatizace, ročník 50, vydání č.1., Leden 2007, str. 18-24.