



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

DIZERTAČNÍ PRÁCE

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.

Bibliografická reference

VAŠINA, M. *Kovy s tvarovou pamětí - modelování nelineárních systémů s hysterezí*.
Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017.
106 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou dizertační práci na téma „Kovy s tvarovou pamětí - modelování nelineárních systému s hysterezí“ vypracoval samostatně pod vedením školitele prof. Ing. Lud'ka Žaluda, Ph.D. a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené dizertační práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této dizertační práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 28. 08. 2017

.....

Ing. Michal Vašina

Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří mi pomohli a podporovali při postgraduálním studiu a při realizaci této dizertační práce. Zejména bych rád vyslovil díky:

- svému školiteli prof. Ing. Lud'ku Žaludovi, Ph.D. a prof. Ing. Františku Šolcovi, CSc. za vedení, cenné odborné rady a pomoc zejména při dokončení této dizertační práce.
- Ing. Karlu Hoderovi za odbornou pomoc, konzultace a cenné rady při realizaci praktických experimentů.
- Ing. Jindřichu Bieligovi, Ing. Stanislavu Klusáčkovi, Ph.D. a Ing. Lukáši Kopečnému, Ph.D. za odbornou pomoc, lidskou podporu a *schopnost* upřímné a objektivní kritiky.
- rodičům a přátelům za podporu a motivaci.

Tuto práci věnuji s velkými díky své partnerce Šárce za nezměrnou trpělivost, obdivuhodnou toleranci a bezvýhradnou každodenní podporu a též svým dcerám, které jsou radostí a světlem mého života...

V Brně dne 28. 08. 2017

.....
Ing. Michal Vašina

SEZNAM OBRÁZKŮ	7
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	12
1 ÚVOD	14
1.1 Zaměření práce – motivace dizertační práce.....	14
1.2 Obsah dizertační práce	15
1.3 Cíle dizertační práce.....	16
2 AKČNÍ ČLENY.....	17
2.1 Tradiční akční členy.....	17
2.1.1 <i>Spalovací motory</i>	17
2.1.2 <i>Elektromagnetické akční členy – lineární a rotační elektromotory</i>	17
2.1.3 <i>Hydraulické akční členy – lineární a rotační hydromotory</i>	18
2.1.4 <i>Pneumatické akční členy - lineární a rotační pneumotory</i>	19
2.2 Netradiční akční členy	19
2.2.1 <i>Pneumatické svaly</i>	19
2.2.2 <i>Elektrorheologické akční členy</i>	20
2.2.3 <i>Elektroaktivní akční členy</i>	20
2.2.4 <i>Piezoelektrické akční členy</i>	21
2.2.5 <i>Kovy s tvarovou pamětí</i>	22
2.3 Srovnání akčních členů	23
3 KOVY S TVAROVOU PAMĚTÍ	24
3.1 Historie.....	24
3.2 Princip SME.....	25
3.3 Aplikace využívající SMA.....	27
3.4 Experimenty a ověření vlastností SMA	31
3.4.1 <i>Měření statických charakteristik</i>	31
3.4.2 <i>Měření dynamických charakteristik</i>	33
3.5 Výsledky měření a experimentů	40
4 SEDLOVÝ VENTIL S SMA AKČNÍM ČLENEM	41
4.1 Návrh řešení modifikované patice	41

4.2	Ověření funkčnosti a experimenty	42
4.3	Zhodnocení navrženého řešení a návrh dalších úprav	45
5	HYSTEREZE.....	46
5.1	Typy hysterezí.....	46
5.1.1	<i>Skalární hystereze [1]</i>	<i>46</i>
5.1.2	<i>Vektorová hystereze [1]</i>	<i>49</i>
5.2	Liang-Rogersův model.....	49
5.3	Preisachův model [1]	51
5.3.1	<i>Geometrická interpretace principu Preisachova modelu</i>	<i>55</i>
5.3.2	<i>Numerická implementace Preisachova modelu</i>	<i>58</i>
5.3.3	<i>Vlastnosti Preisachova modelu</i>	<i>61</i>
5.4	Prandtl-Ishlinského model	62
5.5	Modifikovaný Prandtl-Ishlinského model	65
5.6	Návrh vlastního modelu	67
5.7	Simulace a vzájemné porovnání modelů	69
5.7.1	<i>Simulace</i>	<i>70</i>
5.7.2	<i>Porovnání modelů</i>	<i>78</i>
5.8	Zhodnocení navrženého řešení a výsledků simulací	80
5.9	Možnosti zpřesnění modelů	81
6	ZÁVĚR.....	84
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	85
8	PŘÍLOHA A	89
9	PŘÍLOHA B.....	90
10	PŘÍLOHA C	99
11	PŘÍLOHA D	105

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1:	a) Stejnoseměrný elektromotor MAXON [18], b) Střídavý synchronní motor TG Drives [22].	18
Obr. 2:	ERF akční člen - píst s integrovaným ECS elementem [29].....	20
Obr. 3:	a) Vrstvený piezoelektrický akční člen [19], b) Piezoelektrický motor s postupnou vlnou [21].....	22
Obr. 4:	a) Srovnání pohonů dle poměru výkon/hmotnost [30], b) Srovnání pohonů dle dynamického rozsahu [30].	23
Obr. 5:	Srovnání pohonů dle poměru (výkon/hmotnost)/hmotnost [30].....	23
Obr. 6:	Změny v krystalické struktuře SMA při SME [32].....	25
Obr. 7:	Teplotní hystereze, vyskytující se u SMA [32].....	26
Obr. 8:	a) Základní tvary SMA výrobků [36], b) SMA chirurgický nástroj [20].	27
Obr. 9:	Příklady SMA akčních členů [20].....	27
Obr. 10:	Typická zapojení SMA pohonu.	30
Obr. 11:	Šestinohý kráčeující robot s použitými SMA akčními členy.....	31
Obr. 12:	Grafické znázornění výsledků měření statických charakteristik a) $F=f(I)$, b) $\delta X=f(I,m)$, kde $m=\text{konst.}$	32
Obr. 13:	Základní elektromechanická měřicí lavice.	33
Obr. 14:	Rozšířená měřicí elektromechanická lavice pro ověření dynamických vlastností SMA pohonu (antagonistické zapojení).....	33
Obr. 15:	Bezpečnostní pružiny [Příloha A].....	34
Obr. 16:	Grafické znázornění výsledků měření dynamických závislostí $\delta X=f(\delta u(t),m)$, kde $m=\text{konst.}$	34
Obr. 17:	Vliv aktivního chlazení na funkci SMA pohonu polohového mechanismu a) bez aktivního chlazení, b) s aktivním chlazením.....	35
Obr. 18:	Měřicí lavice pro ověření dynamických vlastností SMA pohonu (gravitační zapojení).....	36
Obr. 19:	a) Polohový mechanismus s SMA pohonem, b) Řešení aktivního chlazení.	36
Obr. 20:	Vstupní signály polohového mechanismu a) u_1 , b) u_2 , c) u_3	37
Obr. 21:	Odezvy polohového mechanismu na budící signály a) u_1 , b) u_2 , c) u_3	38
Obr. 22:	Odezvy polohového mechanismu na budící signály a) u_1 , b) u_2 , c) u_3 při použití aktivního chlazení.	39

Obr. 23:	a) Pneumatický sval McKibennova typu [21], b) Rychlý solenoidní ventil [21]. .41
Obr. 24:	a) Řez navrženou modifikovanou paticí, b) Navržená modifikovaná patice.42
Obr. 25:	Meřicí lavice pro ověření funkčnosti modifikované patice.43
Obr. 26:	Schéma regulačního obvodu měřicí lavice.43
Obr. 27:	Dynamické charakteristiky pneumatického svalu s modifikovanou paticí a) P-regulátor, b-d) PI-regulátor.44
Obr. 28:	a) Systém s nelinearitou typu hystereze, b) Vícevrstvá nelinearita.46
Obr. 29:	a) Hystereze s lokální pamětí (LM), b) Hystereze s nelokální pamětí (NM).48
Obr. 30:	Chování hystereze a) s lokální pamětí (LM), b) s nelokální pamětí (NM).48
Obr. 31:	Zobecněný Liang - Rogersův model hystereze.51
Obr. 32:	a) Nelinearita typu „Relé s hysterezí“, b) Princip funkce Preisachova modelu.52
Obr. 33:	Postup stanovení váhy hysteronu.53
Obr. 34:	Geometrická interpretace Preisachova modelu - rozložení hysteronů.55
Obr. 35:	Geometrická interpretace Preisachova modelu - princip separace ploch (1. krok).56
Obr. 36:	Geometrická interpretace Preisachova modelu - princip separace ploch (2. krok).57
Obr. 37:	Geometrická interpretace Preisachova modelu - obecný princip separace ploch (n-tý krok).57
Obr. 38:	Vliv dominantních extrémů funkce $u(t)$ na separaci ploch S^+ , S^-59
Obr. 39:	a) Charakteristika typu „Vůle v převodech“, b) Blokové schéma Prandtl-Ishlinského modelu.63
Obr. 40:	Stanovení vah pomocí panenské křivky.64
Obr. 41:	a) Charakteristika typu „Vůle v převodech s nasycením“, b) Blokové schéma Modifikovaného Prandtl-Ishlinského modelu.66
Obr. 42:	a) Charakteristika typu „Modifikovaná vůle v převodech s nasycením“, b) Blokové schéma CMPI modelu.67
Obr. 43:	Grafické reprezentace parametrů A_p a A_l69
Obr. 44:	Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_1 , $K_p=K_l=0,5$, $N=3$72
Obr. 45:	Hodnoty výstupu z reálného systému a jednotlivých modelů - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_1 , $K_p=K_l=0,5$, $N=10$72

Obr. 46:	Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_1 , $K_p=K_I=0,5$, $N=21$	73
Obr. 47:	Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_1 , $K_p=K_I=1$, $N=3$	73
Obr. 48:	Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_1 , $K_p=K_I=1$, $N=10$	73
Obr. 49:	Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_1 , $K_p=K_I=1$, $N=21$	74
Obr. 50:	Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_1 , $K_p=K_I=2$, $N=3$	74
Obr. 51:	Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_1 , $K_p=K_I=2$, $N=10$	74
Obr. 52:	Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_1 , $K_p=K_I=2$, $N=21$	75
Obr. 53:	Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_2 , $K_p=K_I=0,5$, $N=3$	75
Obr. 54:	Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_2 , $K_p=K_I=0,5$, $N=10$	75
Obr. 55:	Hodnoty výstupů z reálného systému a jednotlivých modelů - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_2 , $K_p=K_I=0,5$, $N=21$	76
Obr. 56:	Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_2 , $K_p=K_I=1$, $N=3$	76
Obr. 57:	Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_2 , $K_p=K_I=1$, $N=10$	76
Obr. 58:	Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_2 , $K_p=K_I=1$, $N=21$	77
Obr. 59:	Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_2 , $K_p=K_I=2$, $N=3$	77
Obr. 60:	Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_2 , $K_p=K_I=2$, $N=10$	77
Obr. 61:	Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_2 , $K_p=K_I=2$, $N=21$	78
Obr. 62:	Identifikace dominantních hysteronů.	81

Obr. 63:	Korekce vstupního signálu $u(t)$ a identifikace jeho extrémů.	82
Obr. 64:	Úprava přesnosti modelu pomocí korekce vstupního signálu $u(t)$	82
Obr. 65:	Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , $K_p=K_I=0,5$, a) $N=3$, b) $N=10$, c) $N=21$	90
Obr. 66:	Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , $K_p=K_I=1$, a) $N=3$, b) $N=10$, c) $N=21$	91
Obr. 67:	Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , $K_p=K_I=2$, a) $N=3$, b) $N=10$, c) $N=21$	92
Obr. 68:	Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_2 , $K_p=K_I=0,5$, a) $N=3$, b) $N=10$, c) $N=21$	93
Obr. 69:	Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_2 , $K_p=K_I=1$, a) $N=3$, b) $N=10$, c) $N=21$	94
Obr. 70:	Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_2 , $K_p=K_I=2$, a) $N=3$, b) $N=10$, c) $N=21$	95
Obr. 71:	Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_3 , $K_p=K_I=0,5$, a) $N=3$, b) $N=10$, c) $N=21$	96
Obr. 72:	Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_3 , $K_p=K_I=1$, a) $N=3$, b) $N=10$, c) $N=21$	97
Obr. 73:	Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_3 , $K_p=K_I=2$, a) $N=3$, b) $N=10$, c) $N=21$	98
Obr. 74:	GUI generátoru hysteronů.....	105
Obr. 75:	GUI editoru hysteronů.	105
Obr. 76:	GUI programu Hysteron.	106

SEZNAM TABULEK

Tab. 1:	Přehled příkladů využití SMA v praxi.	28
Tab. 2:	Technický list dodávaný výrobcem SMA [20].	29
Tab. 3:	Vybrané parametry SMA slitiny NiTi, typ Dy70 [20].	32
Tab. 4:	Vztah rozsahu hodnot regulační odchylky k hodnotě řídicí veličiny.	43
Tab. 5:	Přehled hodnot Δ jednotlivých modelů pro u_1 , $k_1 \in \langle 300;700 \rangle$	78
Tab. 6:	Přehled hodnot Δ jednotlivých modelů pro u_1 , $k_2 \in \langle 800;1200 \rangle$	79
Tab. 7:	Přehled hodnot Δ jednotlivých modelů pro u_1 , $k_3 \in \langle 300;2400 \rangle$	79
Tab. 8:	Závislosti přesností modelů.	80
Tab. 9:	Přehled hodnot Δ jednotlivých modelů pro u_3 s korekcí, $k_3 \in \langle 300;2400 \rangle$	83

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

EAP	Electro-Active Polymers (Elektroaktivní polymery)
ERF	Electro-Rheological Fluids (Elektrorheologické 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 OBSAH DIZERTAČNÍ PRÁCE

Vlastní dizertační práce bude členěna do následujících čtyř částí.

Část první (kap. 2) – vytvoří obecný přehled akčních členů, jejich kategorizaci z pohledu tradičnosti jejich použití, popis základních principů jejich funkce, výhody a nevýhody a vzájemné srovnání podle vybraných kritérií.

Část druhá (kap. 3 , kap. 4) – bude obsahovat popis historie objevu kovů s tvarovou pamětí (SMA), jejich druhů, vlastností, principu funkce, rozsahu možných použití, výhod a nevýhod výsledky praktických experimentů s vybraným druhem SMA (NiTi). Dále zde bude navržena vlastní aplikace SMA jako akčního členu, ověření funkčnosti navrženého řešení a jeho zhodnocení včetně návrhu možných úprav.

Část třetí (kap. 5) – se zaměří na problematiku nelineárního chování typu hystereze, její definici, základní obecné rozdělení a modelování. V samostatných kapitolách a podkapitolách budou popsány existující modely hystereze s lokální pamětí (Liang-Rogersův) a nelokální pamětí (Preisachův, Prandtl-Ishlinského, Modifikovaný Prandtl-Ishlinského), návrh vlastního řešení modelu hystereze s nelokální pamětí, využívajícího nelineární výpočetní prvek definovaný pomocí goniometrické funkce kosinus. Zde budou zahrnuty výsledky z provedených simulací chování jednotlivých modelů, jejich vzájemné porovnání a porovnání s experimentálně získanými daty. Bude provedeno zhodnocení přesnosti jednotlivých modelů a to za předpokladu jednotně definovaných parametrů modelů.

Část čtvrtá (kap. 6) – shrne a vyhodnotí hlavní výsledky praktické i teoretické části práce, a dále pak možné směry dalšího vývoje v řešeném problému.

1.3 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 a popis charakteristických vlastností a parametrů. 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.

2.1.1 Spalovací motory

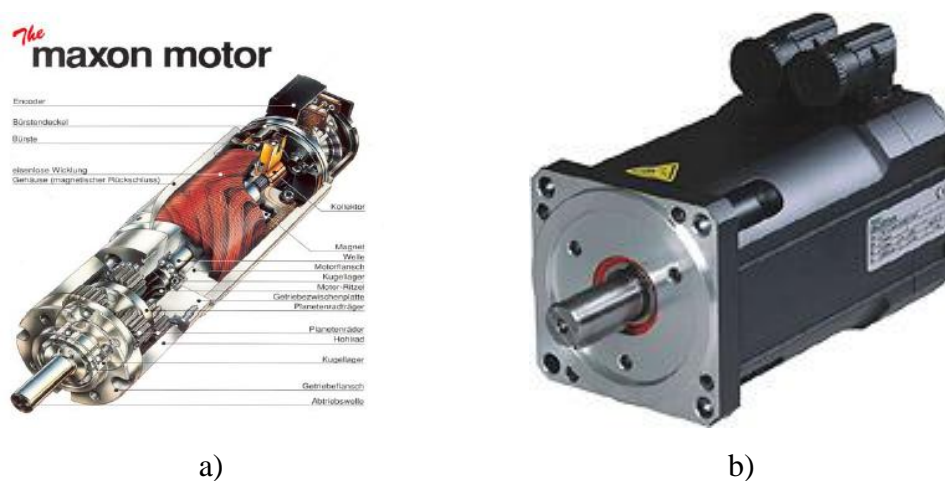
Princip funkce tohoto akčního členu spočívá v přeměně využitelné chemické energie paliva (benzín, nafta, plyn, uhlí) na mechanickou práci. Spalovací motory mají dominantní postavení především v dopravě, kde těží z vysokého poměru množství chemické energie paliva na hmotnostní jednotku, a to například od systému s elektromotorem. Tento fakt může být v budoucnu ovlivněn neustálým vývojem technologií pro akumulaci elektrické energie.

Spalovací motory produkují toxické spaliny. Bez zajištění odvodu spalin nelze prakticky tyto akční členy použít v uzavřeném (vnitřním) prostředí.

2.1.2 Elektromagnetické akční členy – lineární a rotační elektromotory

Tento typ akčního členu využívá působení magnetických sil mezi statorem a rotorem motoru. Podle typu konstrukce může být stator i rotor tvořen permanentními magnety nebo cívkami indukujícími magnetické pole. Elektromotory se vyznačují poměrně jednoduchou konstrukcí, jednoduchou regulací a s tím související dostupností přesných matematických modelů. Jejich

použití znevýhodňuje nízký poměr výkonu ku hmotnosti. V mechatronických systémech jsou obvykle doplněny o zpravidla robustní převodová ústrojí. Z pohledu robotiky nejsou, díky vysoké hmotnosti a značné tuhosti, systémy s elektromotory příliš vhodné pro aplikace, vyžadující interakci s člověkem. I přesto jsou elektromotory nejčastěji používaným druhem akčního členu právě ve zmíněné robotice. Ještě koncem minulého století markantně převažovaly motory stejnosměrné, a to především pro svou jednoduchou regulaci a dostupnou výkonovou elektroniku. Typickým příkladem kvalitního stejnosměrného pohonu je motor s měděnou hrnečkovou kotvou, státorem s permanentním magnetem, integrovanou planetovou převodovkou a optickým inkrementálním snímačem na (**Obr. 1a**).



Obr. 1: a) Stejnosměrný elektromotor MAXON [18], b) Střídavý synchronní motor TG Drives [22].

V současné době se stále častěji setkáváme se střídavými motory, a to především pro jejich delší životnost díky absenci mechanického komutátoru. Další výhodou jejich použití je lepší poměr výkonu ku hmotnosti. V servopohonech mají výlučné postavení synchronní motory, zpravidla obsahující rotor z permanentních magnetů (**Obr. 1b**). S rozvojem elektroniky a řídicích algoritmů se začínají objevovat i servopohony s asynchronními (indukčním) elektromotory.

2.1.3 Hydraulické akční členy – lineární a rotační hydromotory

Tyto akční členy využívají tlakové energie kapaliny (hydrostatické mechanizmy), nebo kinetické energie kapaliny (hydrodynamické mechanizmy). Použití vysokých tlaků a nestlačitelnost média umožňuje hydraulickým mechanismům generování značných sil s velkým dynamickým rozsahem. Přestože systémy musí být vzhledem k vysokým tlakům robustní a potřebují těžké zázemí, vychází poměr výkon ku hmotnosti ve skupině tradičních pohonů

nejvyšší. Vzhledem k používaným tlakům a vyvozeným silám je ale použití v interakci s člověkem nevhodné až nebezpečné.

2.1.4 Pneumatické akční členy - lineární a rotační pneumotory

Akční členy pracují na obdobném principu jako hydraulické motory, místo kapaliny však používají plynného média (zpravidla vzduchu). Z důvodu snadné stlačitelnosti plynu jsou mnohem méně tuhé a současně mají nižší dynamický rozsah. Díky této vlastnosti je velice těžké je řídit. Nižší pracovní tlaky vedou také k nižšímu poměru výkonu ku hmotnosti. Pro svou přirozenou pružnost a použití inertního média jsou ze skupiny tradičních pohonů nejvhodnější pro interakci s člověkem.

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]:

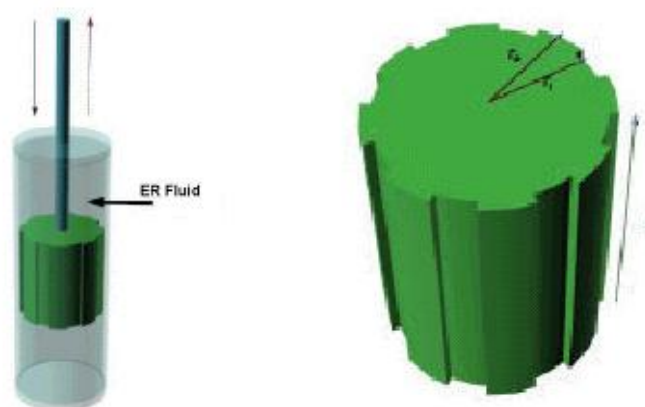
- pneumatické svaly,
- elektrorheologické akční členy,
- elektroaktivní akční členy,
- piezoelektrické akční členy.

2.2.1 Pneumatické svaly

Akční člen v podobě pneumatického svalu převádí energii stlačeného média na energii mechanickou, podobně jako klasické lineární pneumatické akční členy. Zásadní rozdíl je ovšem v konstrukci, průběhu síly a principu vlastní funkce. Z hlediska konstrukce existuje mnoho variant pneumatických svalů, jejich princip funkce je ovšem identický. Působením tlakové síly média na vnitřní vrstvu membrány svalu dochází ke kontrakci svalu a generování tažné síly. Jednotlivé typy pneumatických svalů se vzájemně liší způsobem převodu této tlakové síly na sílu kontrakční.

2.2.2 Elektrorheologické akční členy

Jsou akční členy, využívající elektroaktivní kapalinu (Electro Rheological Fluids - ERF), která v přítomnosti elektrického pole markantně mění své rheologické vlastnosti [28], [29]. Tyto vlastnosti jsou viskozita, změna objemu, změna povrchového napětí, atd. ERF je suspenze částic o velikosti 10 – 100 mikronů v nevodivé kapalině. Vlivem indukovaného dipólového momentu elektrického pole se částice seřadí do řetězců ve směru budícího pole. ERF se tak změní z kapaliny ve viskoelastickou hmotu podobnou gelu, s dobou odezvy několik milisekund. Klasifikace ERF jako akčního členu je diskutabilní, protože se v pravém slova smyslu nejedná o akční člen. ERF jsou využívány především v elementech elektricky řízené tuhosti (Electro Controlled Solidity - ECS) (Obr. 2).



Obr. 2: ERF akční člen - píst s integrovaným ECS elementem [29].

Tuhost ECS elementu je upravována prostřednictvím regulace průtoku elektrorheologické kapaliny drážkami po stranách pístu a elektrodami, generujícími elektrické pole.

2.2.3 Elektroaktivní akční členy

Tyto akční členy jsou tvořeny elektroaktivními polymery (Electroactive Polymers – EAP) s říditelnými vlastnostmi jsou vyráběny v mnoha typech. Jejich chování může být zpravidla ovlivněno různými stimulátory. Některé typy EAP se mohou projevovat permanentní změnou, zatímco jiné mohou poskytovat reversibilní odezvu.

EAP lze z hlediska velikosti použitého napájecího napětí rozdělit na dvě základní skupiny. Elektronové EAP napájené vysokým napětím, které jsou řízeny elektrickým polem nebo Coulombovými silami. Iontové EAP, napájené nízkým napětím do 30 V, jež jsou řízeny difúzí

iontů materiálem. Pro použití v robotice se jeví vhodnější především druhá (iontová) skupina EAP, zejména díky nízkému napájecímu napětí.

Podskupinami EAP mohou být *Vodivé polymery* (CP). Konstrukce akčních členů, založených na vodivých CP je možná díky změnám objemů, které v CP probíhají během jejich elektrochemické oxidace/redukce. Tyto změny objemu nastávají při začlenění resp. vyloučení iontů a rozpouštědla do/z polymerové struktury díky jejich oxidačnímu/redukčnímu procesu.

Iontové elektricky aktivní polymerní gely (IPG) jsou dlouhé polymerní řetězce s elastickými vlastnostmi. Při průchodu elektrického proudu roztokem vznikají ionty, které aktivně působí na vzorek IPG a způsobí jeho ohyb. Vhodnou konstrukcí a rozmístěním elektrod lze dosáhnout i poměrně složitých pohybů při malém napájecím napětí (1,5 V), rychlé odezvy (> 100 Hz) a velkého počtu opakování (> 105 cyklů). Částečnou nevýhodou je nutnost iontově aktivního pracovního prostředí. Takové prostředí se vyskytuje např. v živých organismech.

2.2.4 Piezoelektrické akční členy

Piezoelektrické akční členy využívají nepřímý piezoelektrický jev, případně elektrostriční jev, kdy na základě působení vnějšího elektrického pole dochází k deformaci akčního členu. Piezoelektrické akční členy lze v zásadě rozdělit na dvě skupiny:

- staticky buzené,
- piezoelektricky buzené.

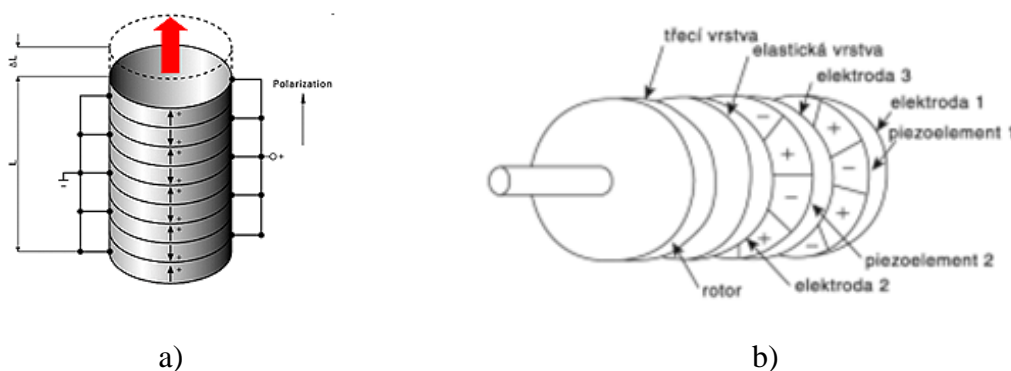
Staticky buzené – tyto akční členy jsou buzeny stejnosměrným napětím, výstupem jsou relativně velmi malé změny rozměrů akčního členu (max. 0,2%), které ale vyvozují velké síly a tlak v řádu desítek až stovek Newtonů. Existuje několik principů, umožňujících zvýšit relativní pohyb tohoto akčního členu. Jedním z řešení je řazení několika piezoelementů mechanicky do série a elektricky paralelně (**Obr. 3a**). Tímto způsobem je vytvořen tzv. *piezoelectric stack*. V tomto případě nedochází ke zvětšení relativního prodloužení, absolutní prodloužení však může dosahovat až 100 μm při napájecím napětí 500-1000 V. Absolutní výchylku akčního členu lze dále zvýšit použitím vhodného mechanického převodu, ve většině případů založeného na principu páky. Polohovací piezoelektrické servomechanizmy této skupiny můžeme řídit jak pulzně metodou „On/Off“ v případě inkoustových tiskáren, tak spojitým přiváděným napětím v případě polohovacího zařízení laserů a mikroskopů.

Piezoelektrické motory – jsou akční členy využívající velmi dobrých rezonančních vlastností piezomateriálů. Výstupní veličina akčního členu (poloha, otáčky) není přímo úměrná přivedenému

napětí, ale závisí na tvaru a kmitočtu budicího napětí. V porovnání se staticky buzenými akčními členy není možné dosáhnout srovnatelné přesnosti polohování, výhodou je však možnost dosažení vysokých rychlostí pohybu a velkého rozsahu. Podstatou funkce piezoelektrických motorů je vyvolání deformace povrchové vrstvy statoru, která se v rozmanitém konstrukčním provedení motoru převádí na rotační nebo translační pohyb rotoru. Za předpokladu optimálního pracovního režimu je měrný výkon piezoelektrického motoru pětkrát až desetkrát vyšší než u tradičních elektromechanických motorů. Motory lze dělit dle rozmanitých konstrukčních řešení. Z pohledu robotiky se však nejdůležitější jeví dělení na motory využívající *stojatou*, nebo *postupnou* elastickou vlnu.

Principem funkce motorů se stojatou vlnou je vhodný převod tečné složky působící síly kmitajícího elementu na požadovaný rotační pohyb. Tyto akční členy bývají označovány jako vibračně vázané (Vibratory Coupler Type - VCT). K výhodám tohoto řešení patří nízká cena, daná pouze jedním zdrojem vibrací, a vysoká účinnost (teoreticky až 98%). K nevýhodám se řadí možnost pouze jednoho možného směru pohybu.

Principem funkce motorů s postupnou vlnou je vyvolání postupného vlnění v elastické vrstvě statoru tzn., že body na povrchu vrstvy vykonávají eliptický pohyb (**Obr. 3b**). Rotor je pak v důsledku tření unášen po vlnící se vrstvě. Postupná elastická vlna je skládána superpozicí dvou stojatých vln posunutých v čase i prostoru o čtvrt periody. Tyto motory vyžadují složitější budicí obvod, lze je však bez problému reverzovat.



Obr. 3: a) Vrstvený piezoelektrický akční člen [19], b) Piezoelektrický motor s postupnou vlnou [21].

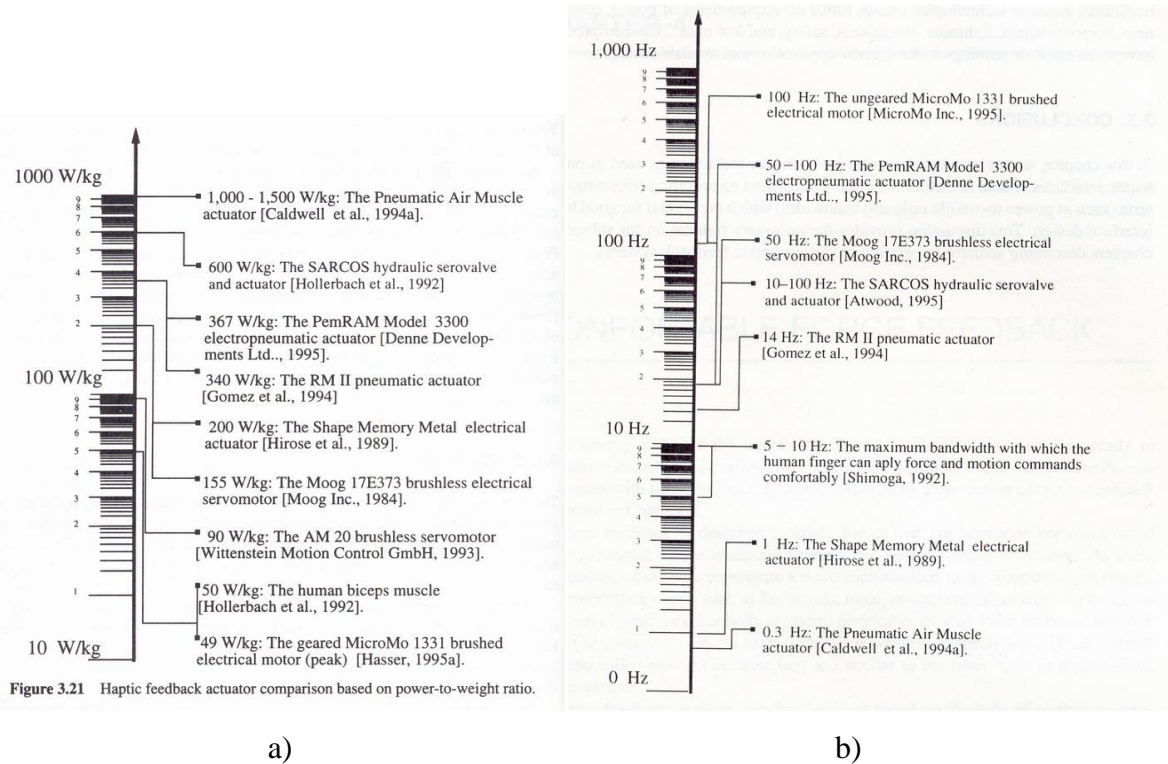
2.2.5 Kovy s tvarovou pamětí

Posledním zástupce skupiny netradičních akčních členů jsou kovy s tvarovou pamětí (Shape Memory Alloys – SMA), kterým se v rámci této práce bude věnovat samostatná kapitola č.3 .

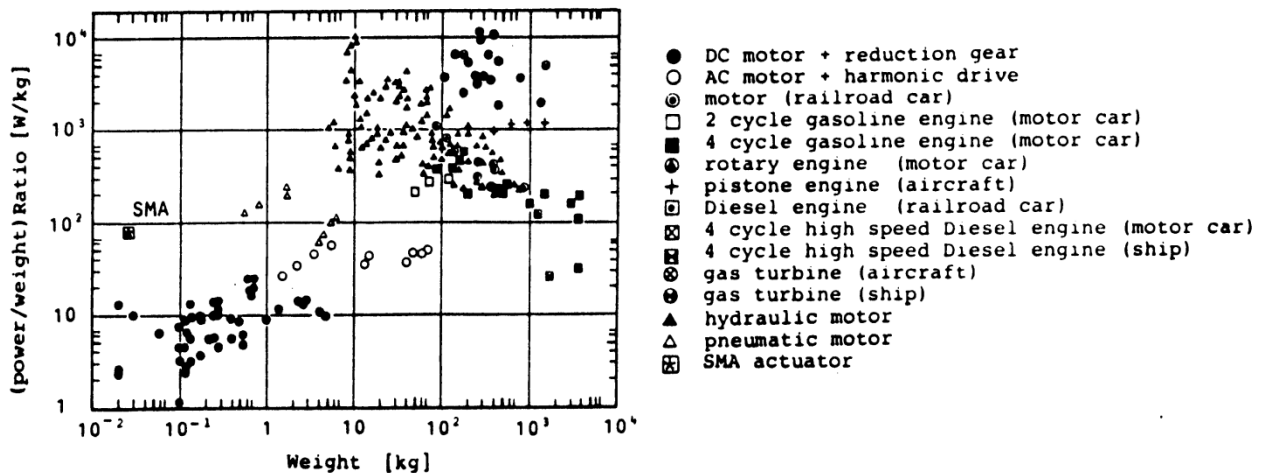
2.3 SROVNÁNÍ AKČNÍCH ČLENŮ

V grafech na následujících obrázcích je uvedeno srovnání pohonů podle poměru výkonu ku hmotnosti (**Obr. 4a**) a dynamického rozsahu (**Obr. 4b**).

Na **Obr. 5** je uvedeno srovnání pohonů dle poměru výkonu ku hmotnosti ku hmotnosti, kde je například vidět nevýhoda hydraulických akčních členů v potřebě hmotného zázemí, naopak je tomu u pohonů z paměťových slitin.



Obr. 4: a) Srovnání pohonů dle poměru výkon/hmotnost [30], b) Srovnání pohonů dle dynamického rozsahu [30].



Obr. 5: Srovnání pohonů dle poměru (výkon/hmotnost)/hmotnost [30].

3 KOVY S TVAROVOU PAMĚTÍ

Následující kapitola je věnována kovům s tvarovou pamětí (SMA), historii jejich objevu a vývoje, popisu základních charakteristických vlastností, principu funkce „paměťového efektu“ (SME) a možnostem jejich využití v technické praxi.

3.1 HISTORIE

Za objevitele paměťových slitin (SMA) je považován švédský fyzik Arne Olander. Ten si v roce 1932 [31], [32], při svých pokusech se slitinou zlata (Au) a kadmia (Cd), všiml zajímavého jevu. Prvek, vyrobený z této slitiny, se za studena choval plasticky a mohl být působením vnějších mechanických sil deformován do různých tvarů. Po zahřátí nad určitou teplotu se tento prvek samovolně vrátil zpět do svého původního tvaru, jaký měl před plastickou deformací. Tato schopnost, typická pro SMA, se nazývá tvarový paměťový efekt (SME). Veřejnosti byl tento jev poprvé předveden na světové výstavě v Bruselu v roce 1958. Zde SMA „motor“ v podobě drátu z již zmíněné slitiny Au-Cd vykonával mechanickou práci, která spočívala v opětovném zvedání závaží. V roce 1961 byl vědci U.S. Naval Ordnance Laboratory objeven SME i u slitin niklu (Ni) a titanu (Ti). Slitina niklu a titanu, označována jako NiTiinol, se oproti slitině Au-Cd ukázala jako levnější, jednodušší na práci a méně nebezpečná z hlediska zdraví.

Tyto skutečnosti znovu vzbudily zájem o výzkum v oblasti SME a jeho využití [20], [33]. První komerční výrobky využívající SMA se začaly objevovat v 70.tých letech minulého století. Nejprve se jednalo o aplikace statické, později se objevily aplikace dynamické, ve kterých začaly SMA plnit roli akčních členů. Použitím SMA se začaly zabývat i renomované firmy, např. Sharp (1982) a Matsushita Electric (1983), kdy šlo vesměs o tzv. přímé regulátory pracující na principu zapnutí-vypnutí.

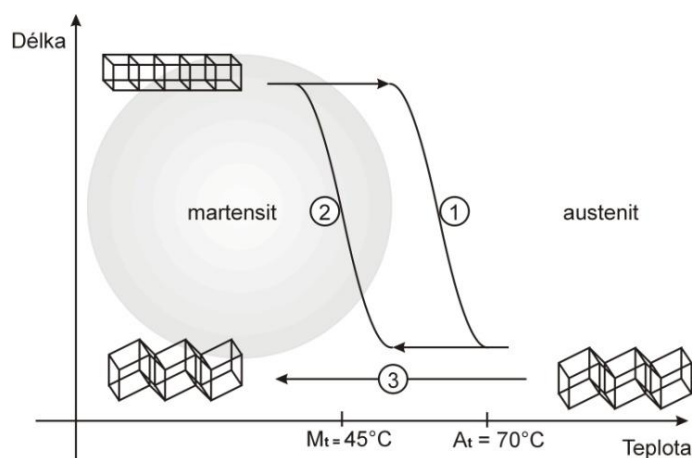
Další výzkum se zaměřil na možnosti využití SMA jako nepřímého regulátoru (pohonu), kdy k ohřevu a tím i řízení SMA začalo být používáno teplo externího zdroje, případně teplo vzniklé na ohmickém odporu samotného SMA při průchodu elektrickým proudem. V roce 1971 bylo navrženo a otestováno umělé srdce poháněné SMA akčními členy. Možnost řídit teplotu SMA pomocí jeho vlastního ohmického odporu předvedli v roce 1983 japoňští vědci [26], přičemž navrhli využití SMA jako akčního členu pro mikrorobotiku.

3.2 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. 6**. Limitně rozeznáváme dvě fáze slitiny [17]. S vysoce symetrickou krystalickou mřížkou – austenit (analogie se slitinami železa) a strukturu s menší symetrií (ortorombická, tetragonální krystalická mřížka) – martensit. Při martensitické transformaci může z austenitu vzniknout i několik variant martensitu, avšak transformace zpět probíhá do jediného austenitu. Díky třírozměrné krystalografické mřížce je martensitická transformace nesymetrická hlavně ve směru tah – tlak.

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. 6**), 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. 6**), jinak zůstává ve smrštěném stavu (křivka 3, **Obr. 6**).

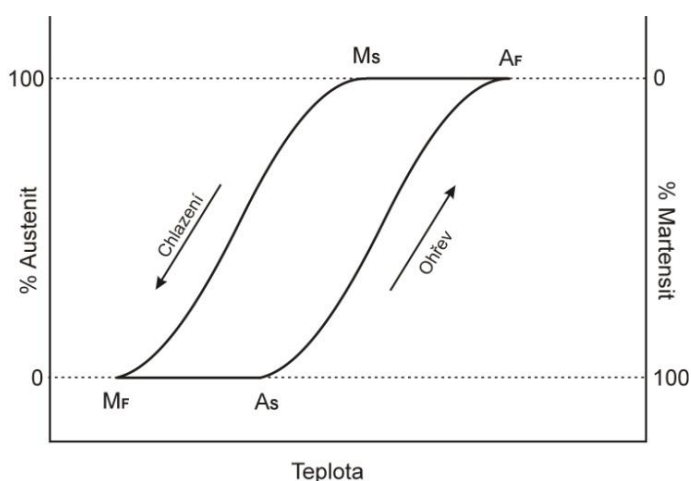


Obr. 6: Změny v krystalické struktuře SMA při SME [32].

Je-li kov vystaven působení teploty mnohem vyšší než je A_t , může dojít k jeho degradaci, což znamená ztrátu SME (element zůstane trvale smršťen). 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, takzvané 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. 7**). Obdobný průběh má i závislost deformace na teplotě. Velikost hystereze SMA je dána jejich složením a procesem výroby.



Obr. 7: Teplotní hystereze, vyskytující se u SMA [32].

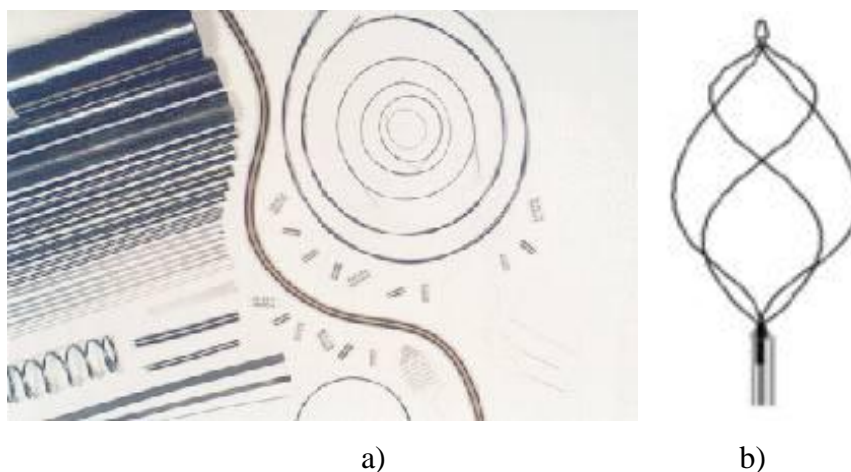
V kapitole 3.1 byly jako příklady SMA uvedeny slitiny AuCd a NiTi. Dalšími používanými SMA slitinami jsou CuZnAl, CuAlNi nebo MnNi. Chemické složení SMA se obecně blíží ekvatomovému poměru jednotlivých prvků. U slitiny NiTi je tento poměr obvykle uváděn jako Nikl 55%, Titan 45%. Vlastní výroba SMA je 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

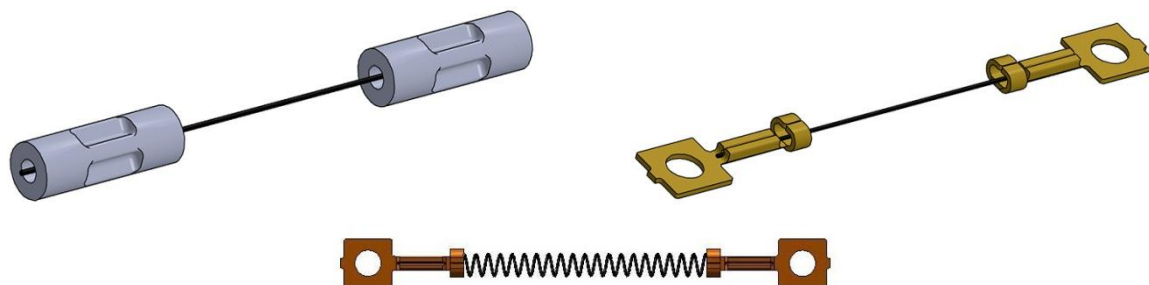
stavy se nazývá Two Way Memory Effect (TWSME) [26], [37]. Obecně je využití SMA s vlastností TWSME například jako akčního členu problematictější a to z technologických důvodů.

3.3 APLIKACE VYUŽÍVAJÍCÍ SMA

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1, první aplikace SMA pohonu se objevila již na počátku druhé poloviny dvacátého století. Tehdy byl SMA akční člen využit k jednoduchému cyklickému zvedání zátěže. V současné době můžeme tento typ akčního členu nalézt v různých oblastech výzkumu a průmyslu [2], [25]. Výrobci dodávají tento materiál na trh v mnoha provedeních a tvarech [20], [32], [35], [36]. Základními a dnes již běžně dostupnými jsou dráty, trubky či pásky (**Obr. 8a**). Některé firmy, zabývající se výrobou SMA, poskytují zákazníkům možnost tvarování SMA na základě dodané technické dokumentace, čímž umožňují vznik mnoha dalším variantám finálních výrobků, které jsou jakousi obdobou zákaznických obvodů (**Obr. 8b**).



Obr. 8: a) Základní tvary SMA výrobků [36], b) SMA chirurgický nástroj [20].



Obr. 9: Příklady SMA akčních členů [20].

Stručný přehled oborů, v kterých se lze setkat s praktickým použitím SMA včetně popisu konkrétní aplikace, je uveden v **Tab. 1**. V uvedených aplikacích bylo SMA využito především díky některé z jejich specifických vlastností.

Tab. 1: Přehled příkladů využití SMA v praxi.

Obor	Aplikace
Medicína	kostní implantáty, cévní stenty, drátky samonapínacích rovnátek, chirurgické nástroje, obroučky brýlí
Letecký průmysl	spojky potrubí v letadlech, výztuhy křídel, elektrické konektory
Stavebnictví	výztuhy základů staveb
Regulační technika	náhrada bimetalický materiálů, klimatizace, regulační ventily topné vody, otvírače klapek ventilátorů
Robotika	pohony (akční členy)
Automobilová technika	pružiny, úchytky snímačů

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:

Silový 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. 7**). 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.

Příklad technického listu, dodávaného ke konkrétnímu SMA výrobcem je uveden v **Tab. 2**.

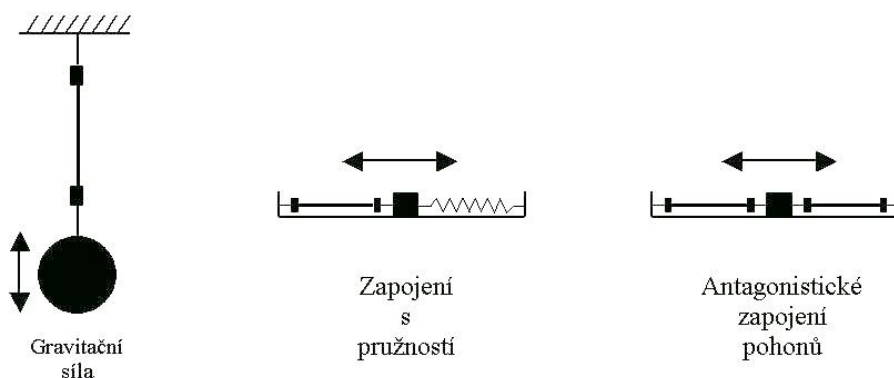
Tab. 2: Technický list dodávaný výrobcem SMA [20].

Transformation temperatures and strains:	
Transformation temperature range	-200* - + 110 °C
Transformation enthalpy	0,47 - 0,62 kJ/Kg K
Transformation strains	
up to 1 cycle	up to 8 %
up to 100 cycles	up to 5 %
up to 100.000 cycles	up to 3 %
above 100.000 cycles	ca. 2 %
Thermal hysteresis**	30 - 80 °C
Physical properties:	
Melting point	ca. 1310 °C
Density	6,45 kg/dm ³
Thermal conductivity of the Martensite	ca. 9 W/m K
Thermal conductivity of the Austensite	ca. 18 W/m K
electrical resistivity	50 - 110 μΩcm
lin. thermal expansion factor α of the Martensite	ca. 6,7 x 10 ⁻⁶ 1/K
lin. thermal expansion factor α of the Austenite	10 - 11 x 10 ⁻⁶ 1/K
Corrosion properties and biocompatibility	excellent
Magnetic permeability	<1,002
Magnetic susceptibility	3,0 x 10 ⁶
Mechanical Properties:	
Youngs modulus*** of the Austenite	ca. 70 - 80 GPa
Youngs modulus*** of the Martensite	ca. 23 - 41 GPa
Ultimate tensile strength (cold worked condition)	up to 1.900 MPa
Ultimate tensile strength (fully annealed condition)	ca. 900 MPa
Plateau stress („Pseudo“-Yield stress) Martensite	70 - 200 MPa
Plateau stress Austenite	200 - 650 MPa
„conventional“ Yield stress Austenite	550 - 700 MPa
Transversal contraction factor	0,33
Tensile strain (fully annealed)	20 - 60 %
Tensile strain (cold worked)	5 - 20 %
Hot workability	reasonable
Cold workability	difficult (work hardening)
Machinability	very poor

Srovnání netradičních SMA pohonů s klasickými řešeními je ukázáno na **Obr. 4a** a **Obr. 5**, kde jsou uvedeny orientační hodnoty poměru výkon/hmotnost a vlastní hmotnosti pohonu. Na **Obr. 4b** je znázorněno srovnání různých typů pohonů z hlediska jejich dynamického rozsahu.

SMA pohon můžeme, podobně jako další druhy akčních členů, najít v těchto typických zapojeních (**Obr. 10**):

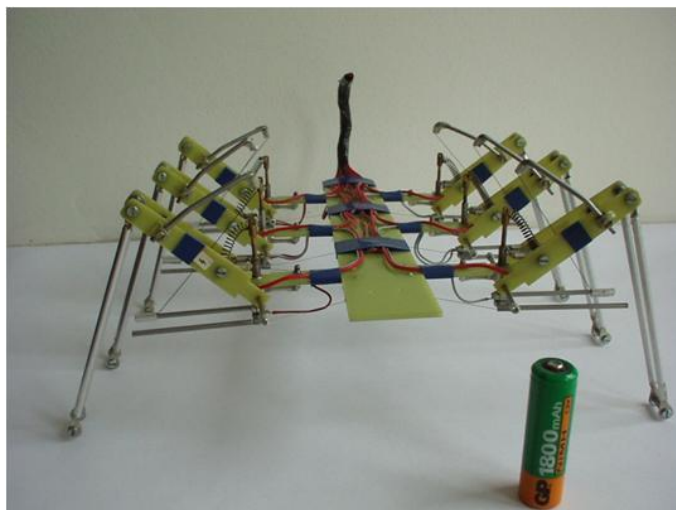
- zapojení s gravitační zátěží,
- zapojení proti předepjaté pružině,
- antagonistické zapojení.



Obr. 10: Typická zapojení SMA pohonu.

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 v kapitole 3.4.2 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 šestinožného kráčejičího robotu, realizovaného v rámci řešení projektu 102/02/0782 „Research in Control of Smart Robotic Actuators” je uveden na **Obr. 11**.



Obr. 11: Šestinohý kráčejíci robot s použitými SMA akčními členy.

3.4 EXPERIMENTY A OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ SMA

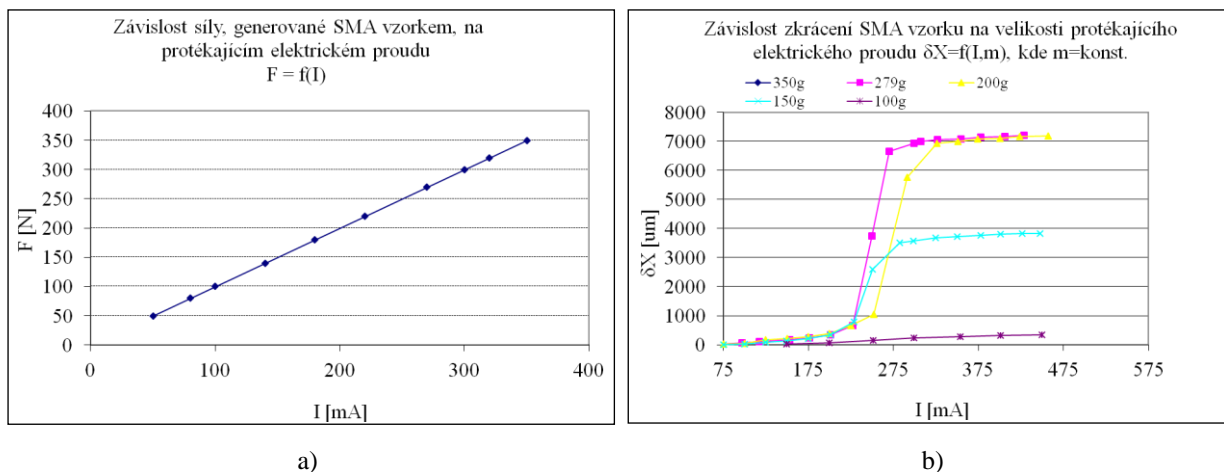
Pro ověření vybraných parametrů a elektrických vlastností konkrétního SMA materiálu, byla v rámci laboratoře netradičních pohonů provedena měření některých jeho statických a dynamických charakteristik. Průběhem a výsledky těchto prací se bude zabývat následující text.

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.

3.4.1 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. 12a).
- Závislost zkrácení SMA vzorku na velikosti protékajícího elektrického proudu $\delta X=f(I,m)$, kde $m=\text{konst.}$ (Obr. 12b). V tomto případě byla použita délka měřeného vzorku 10 cm.



Obr. 12: Grafické znázornění výsledků měření statických charakteristik a) $F=f(I)$, b) $\delta X=f(I, m)$, kde $m=\text{konst.}$

Tab. 3: Vybrané parametry SMA slitiny NiTi, typ Dy70 [20].

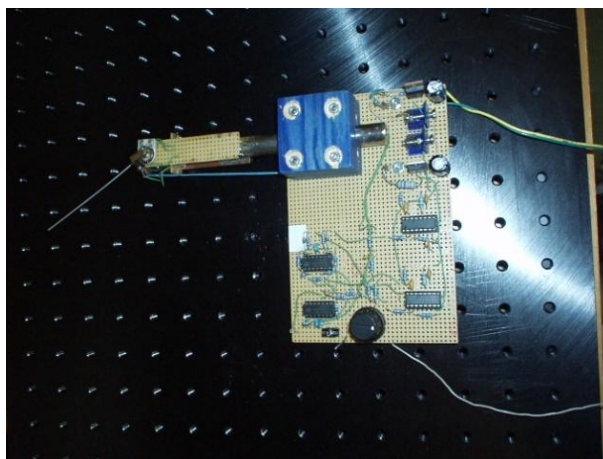
Průměr drátu [mm]	Odpor drátu na jednotku délky [Ω/m]	Generovaná síla [N]	Elektrický proud nutný pro aktivaci SME [mA]*	Rychlost protažení z teploty 90°[s]
0,025	1425	0,089	45	0,15
0,038	890	0,20	55	0,20
0,050	500	0,36	85	0,30
0,076	232	0,80	150	0,70
0,101	126	1,43	200	0,90
0,127	75	2,23	320	1,40
0,152	55	3,21	410	1,70
0,203	29	5,70	660	2,70
0,254	18,5	8,91	1050	4,50
0,305	12,2	12,80	1500	6,80
0,381	8,3	22,50	2250	8,80
0,510	4,3	35,60	4000	14,0

* doba dosažení maximální kontrakce je 1s.

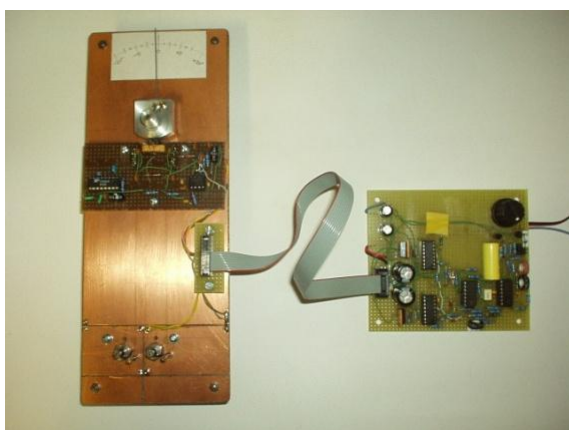
3.4.2 Měření dynamických charakteristik

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 $\delta X=f(\delta u(t))$.

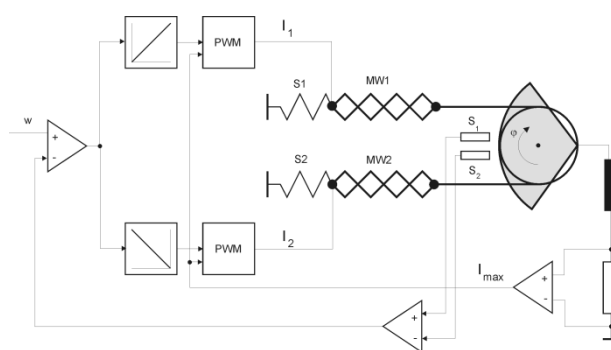
Pro měření výše uvedené závislosti byla navržena a realizována základní (**Obr. 13**) a rozšířená (**Obr. 14**) elektromechanická měřicí lavice.



Obr. 13: Základní elektromechanická měřicí lavice.



a)

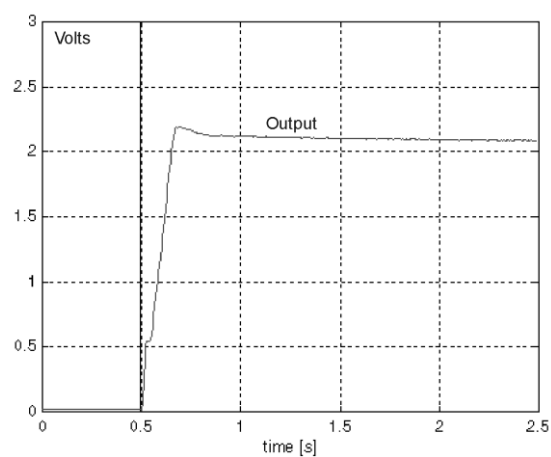


b)

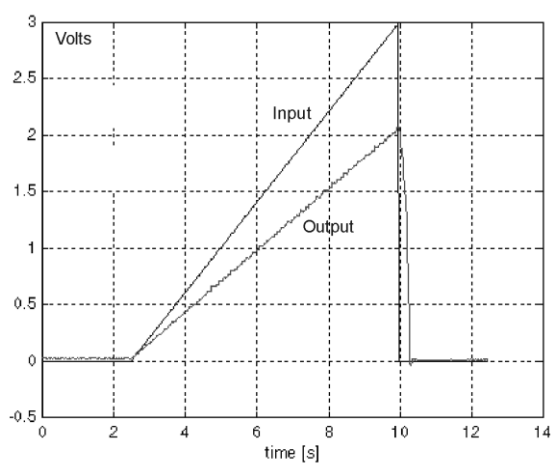
Obr. 14: Rozšířená měřicí elektromechanická lavice pro ověření dynamických vlastností SMA pohonu (antagonistické zapojení).



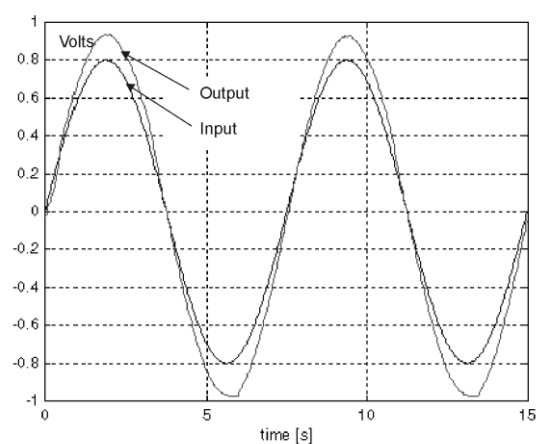
Obr. 15: Bezpečnostní pružiny [Příloha A].



a)



b)

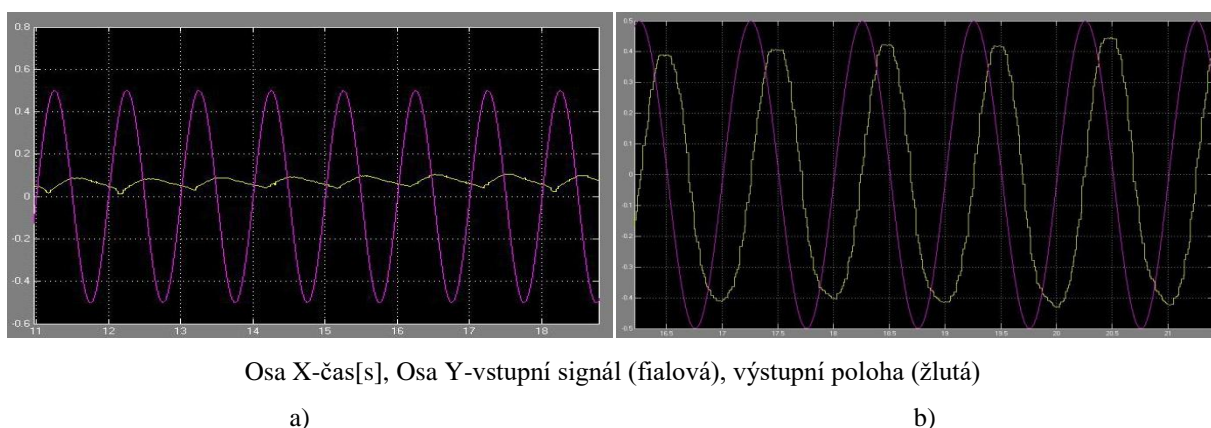


c)

Obr. 16: 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 schematicky popsané na **Obr. 14a**, 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. 16**.

Vliv chlazení na kvalitu odezvy SMA pohonu z pohledu její rychlosti a rozsahu je patrný z charakteristiky na **Obr. 17**. V tomto případě bylo použito aktivního chlazení v podobě nucené cirkulace okolního vzduchu.

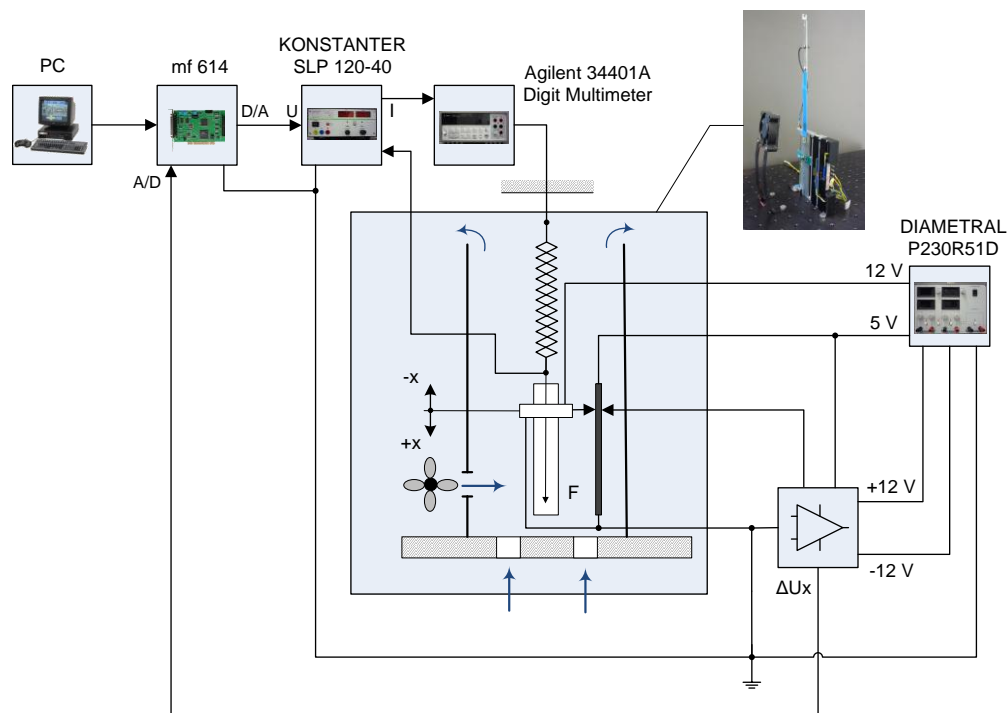


Obr. 17: Vliv aktivního chlazení na funkci SMA pohonu polohového mechanismu a) bez aktivního chlazení, b) s aktivním chlazením.

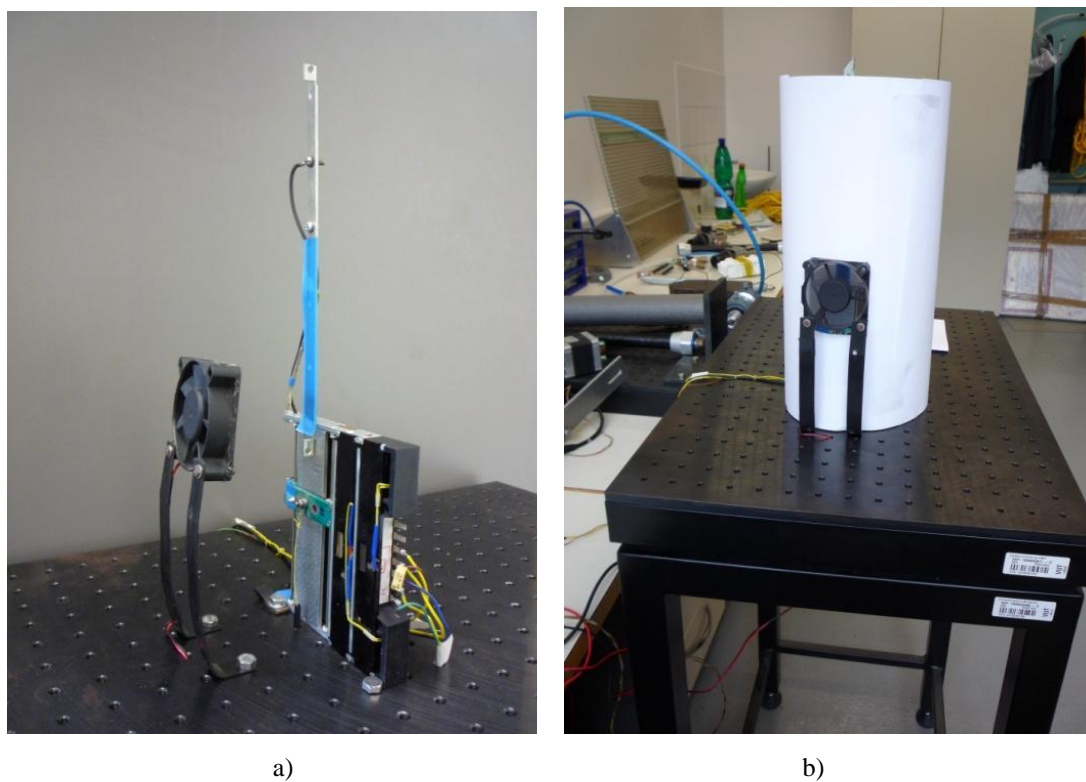
Měření, realizované pomocí zkonstruované lavice schematicky vyobrazené na **Obr. 18**, bylo zaměřeno na ověření teoretických předpokladů chování SMA pohonu v případě jeho gravitačního zapojení. Tento způsob zapojení lze obecně využít například v problematice polohových mechanismů, u kterých je sledovaná 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, diskutované v kapitole 3.2.

Konkrétní sada měření byla realizována na vzorku SMA drátu o délce 165 mm, gravitační zátěži o hmotnosti 263g a okolní teplotě 23°C. Pro potřeby aktivního chlazení vzorku prostřednictvím nucené ventilace (**Obr. 19**) byl použit kryt válcového tvaru o průměru 150mm a lopatkový ventilátor Seythe, typ SY124020L o rozměrech 40x40x20mm s průtokem 4,86 CFM.

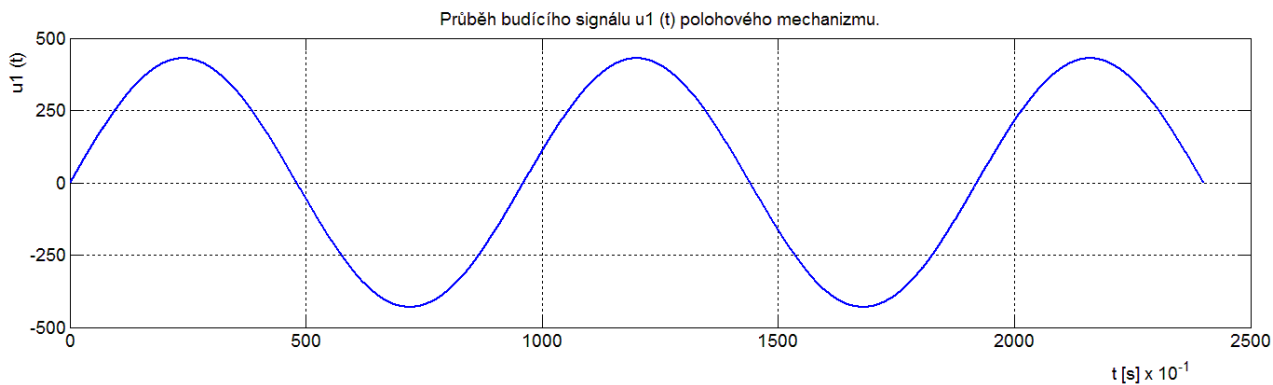
Doba každého měřicího cyklu byla stanovena na 240s, počet cyklů byl stanoven na 50. Průběhy použitých budicích signálů SMA pohonu jsou uvedeny na **Obr. 20**.



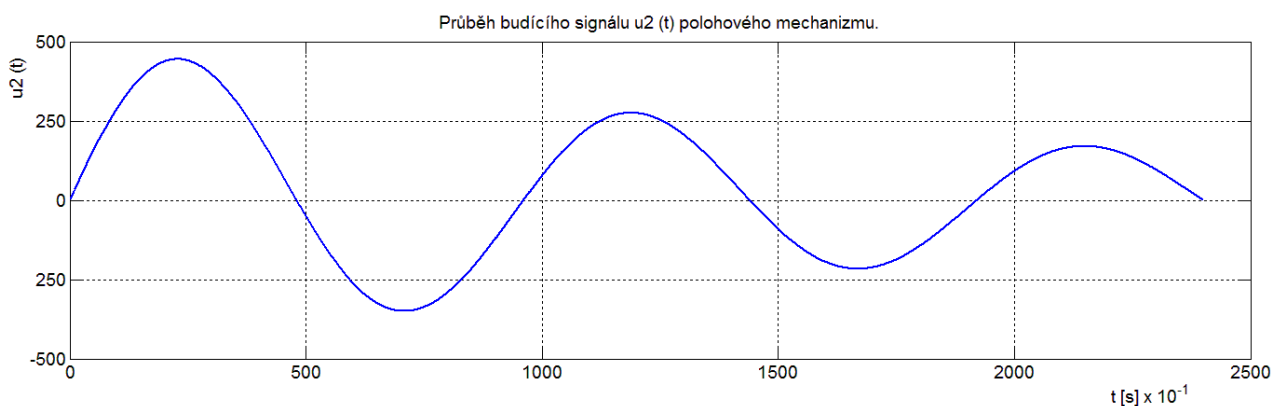
Obr. 18: Měřicí lavice pro ověření dynamických vlastností SMA pohonu (gravitační zapojení).



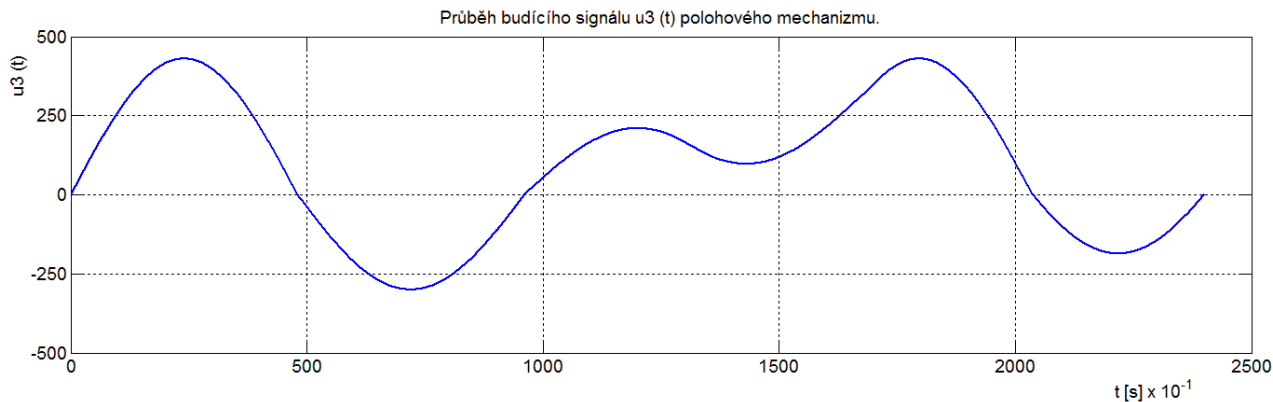
Obr. 19: a) Polohový mechanismus s SMA pohonem, b) Řešení aktivního chlazení.



a)



b)



c)

Obr. 20: Vstupní signály polohového mechanismu a) u_1 , b) u_2 , c) u_3 .

Hodnoty budících signálů $u_x(t)$, uvedených na **Obr. 20**, odpovídají hodnotám vstupního budicího stejnosměrného proudu pro použitý SMA akční člen I [mA].

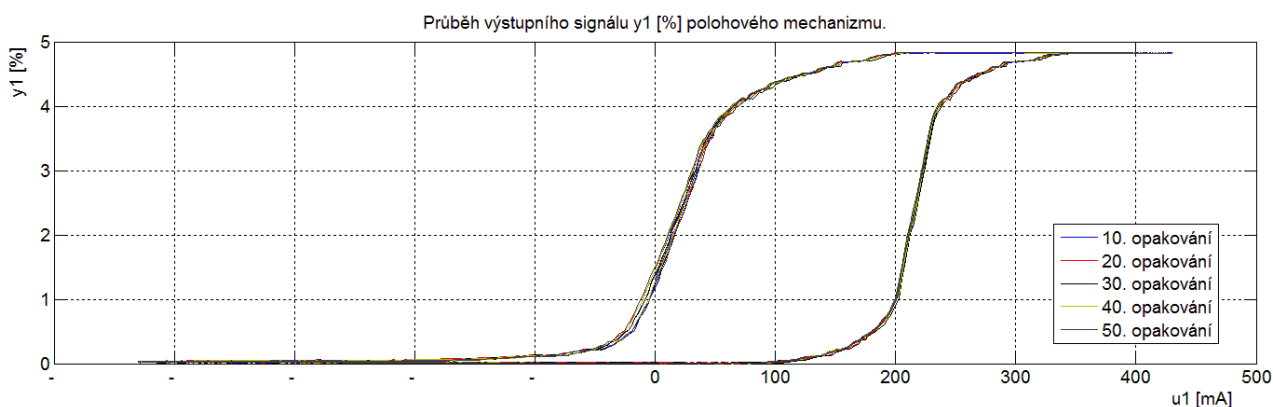
Signály $u_1(t)$ a $u_2(t)$ byly generovány pomocí funkce sinus a exp následně:

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

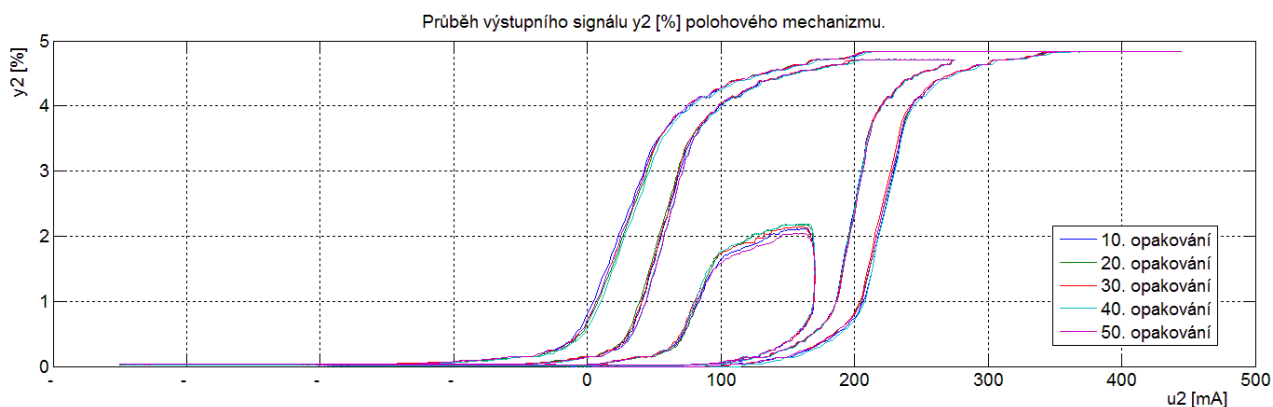
$$u_2(t) = 5 \cdot \sin(0.065449 \cdot t) \cdot (\exp(-t \cdot 0.005)).$$

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

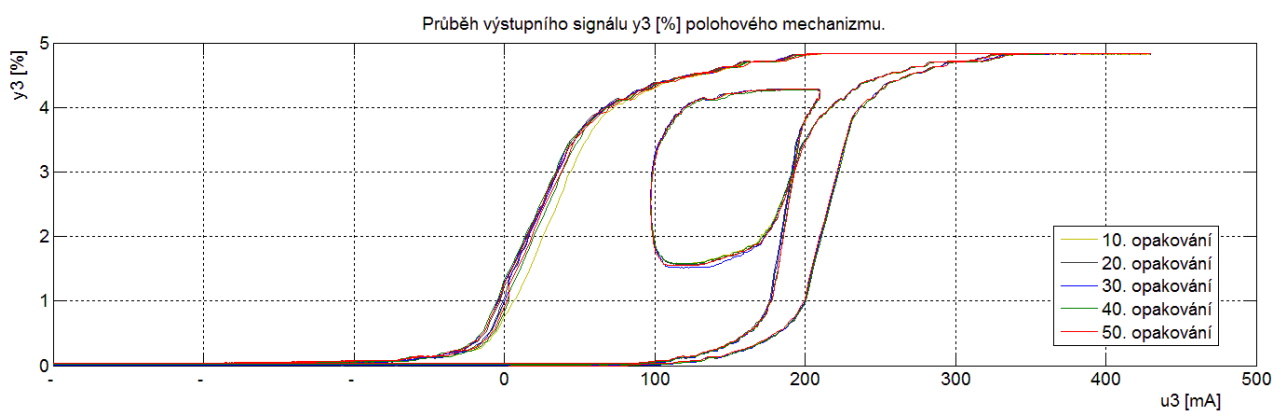
Odezvy SMA akčního členu na jednotlivé budící signály jsou uvedeny na **Obr. 21**. V tomto případě byl akční člen pasivně chlazen a to formou samovolného vyzáření vzniklého tepla do okolí.



a)



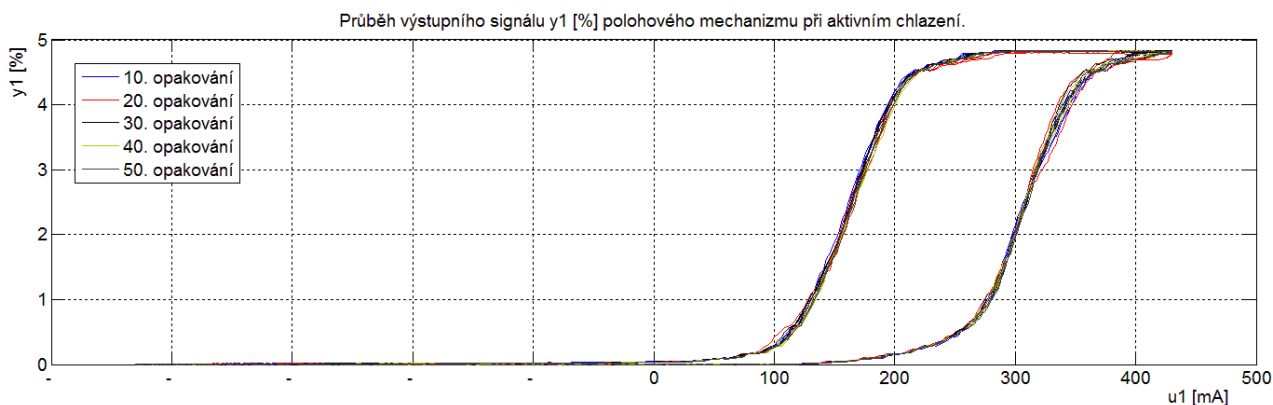
b)



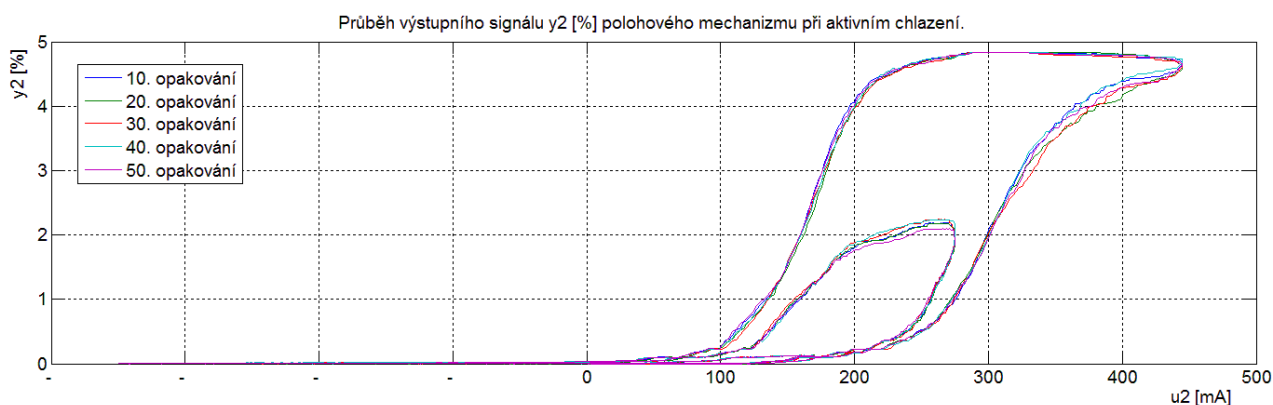
c)

Obr. 21: Odezvy polohového mechanismu na budící signály a) u_1 , b) u_2 , c) u_3 bez aktivního chlazení.

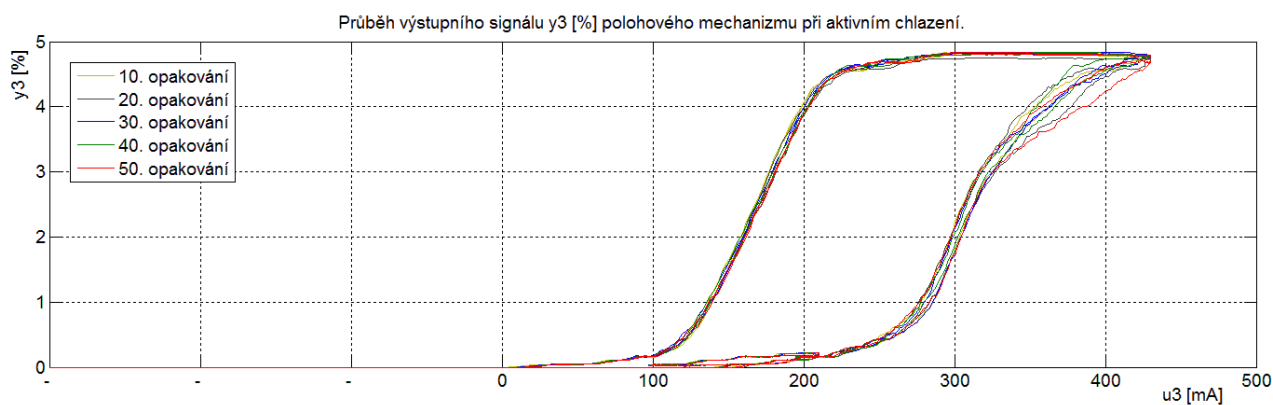
V kapitole 3.2 a 3.4.2 byl teoreticky předpokládán vliv chlazení na chování SMA pohonu. Tento teoretický předpoklad byl ověřen prostřednictvím použití aktivního chlazení v podobě nuceného proudění okolního vzduchu při měření charakteristik odezvy polohového mechanismu (**Obr. 19b**) v rámci samostatného experimentu. Jeho výsledky jsou ukázány na (**Obr. 22**).



a)



b)



c)

Obr. 22: 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):

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

3.5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A EXPERIMENTŮ

Výsledky měření vybraných statických charakteristik odpovídají teoretickým předpokladům (**Tab. 3**), 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 (**Obr. 9**) [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 tohoto problému a to v podobě integrace „mechanizmu bezpečnostních pružností“, realizovaných pomocí předepjatých vinutých pružin, znázorněných na **Obr. 14b** jako S1 a S2. Tyto pružiny (**Obr. 15**) 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 (Příloha A).

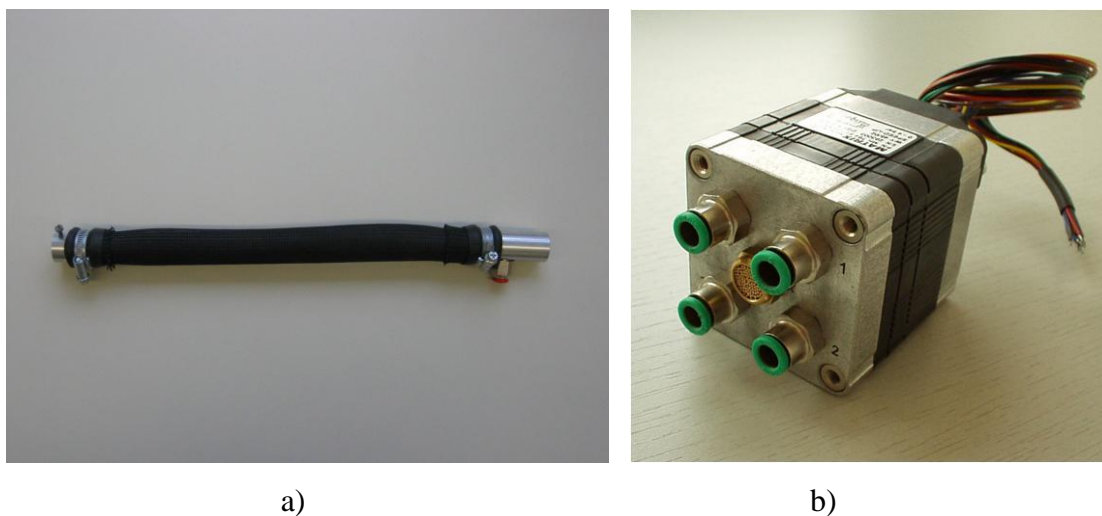
Významným faktorem, ovlivňujícím funkci SMA pohonu, je přítomnost pasivního (samovolné vyzařování generovaného tepla do okolí) nebo aktivního (nucená ventilace, přítomnost chladicího média) chlazení. Příklad vlivu tohoto faktoru je ukázán a na **Obr. 17** a **Obr. 22**. Zajištěním optimálního chlazení 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 3.3 byla diskutována možná použití SMA ve statických i dynamických aplikacích, dále byly popsány základní vlastnosti SMA materiálů a parametry konkrétní SMA slitiny (NiTi). V kapitole 3.4 byly popsány experimenty, provedené s NiTi slitinou, dále pak vydefinovány některé omezující podmínky jejího použití. Na základě závěrů kapitol 3.3 a 3.4 byl proveden návrh vlastní aplikace – modifikované patice pneumatické svaly McKibenna typu s integrovaným sedlovým ventilem, využívajícím SMA slitinu jako akčního členu. Tato aplikace bude popsána v následujícím textu.

4.1 NÁVRH ŘEŠENÍ MODIFIKOVANÉ PATICE

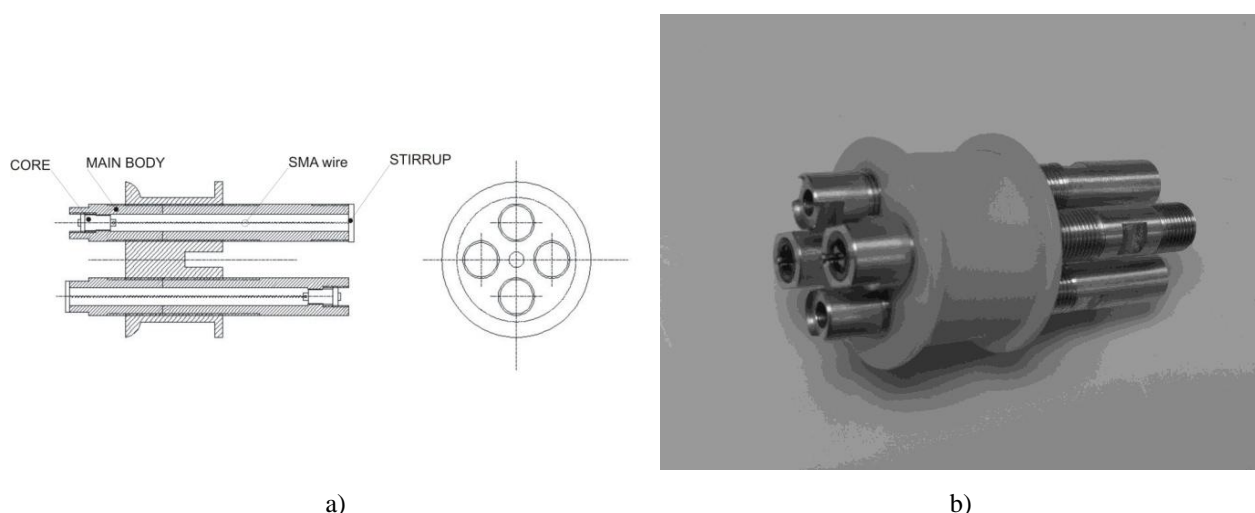
V kapitole 3.3 byl jako další zástupce z kategorie netradičních pohonů uveden umělý pneumatický sval McKibenna typu (**Obr. 23a**) [21]. K zajištění funkčnosti tohoto typu pohonu jsou nutné poměrně složité ovládací elektromechanické subsystémy, jejichž součástí jsou i zpravidla elektricky ovládané ventily (**Obr. 23b**).



Obr. 23: a) Pneumatický sval McKibenna typu [21], b) Rychlý solenoidní ventil [21].

Tyto ventily pak zabezpečují tok vybraného plynného média, a tím umožňují vlastní funkci pneumatického svaly. V rámci řešení projektu 102/02/0782 „Research in Control of Smart Robotic Actuators” byla mimo jiné identifikována potřeba náhrady těchto ventilů za jiné řešení, které by nahradilo stávající, pro mnoho aplikací hmotnostně a rozměrově nevyhovující.

Po provedení teoretického rozboru identifikované potřeby a zvážení možností využití některého z existujících řešení, bylo navrženo řešení vlastní, a to v podobě modifikované patice McKibbenova svalu (**Obr. 24**). Do této modifikované patice byl integrován sedlový ventil, jehož akční člen tvořil SMA, přičemž k aktivaci SMA akčního členu bylo využito jeho elektrických vlastností. Z hlediska typu zapojení akčního členu (**Obr. 10**) se jednalo o zapojení s pružností.



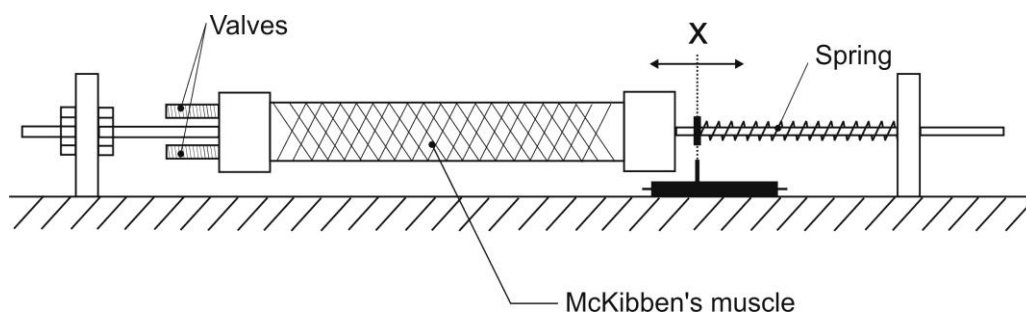
Obr. 24: a) Řez navrženou modifikovanou paticí, b) Navržená modifikovaná patice.

4.2 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI A EXPERIMENTY

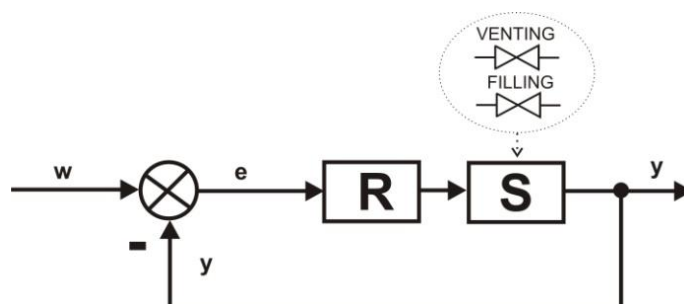
Pro ověření funkčnosti navrženého řešení modifikované patice (**Obr. 24**) byly vyrobeny a otestovány její funkční vzorky. Vlastní testy byly realizovány za využití navržené měřicí stolice (**Obr. 25**), obsahující pneumatický sval McKibbenova typu s integrovanou modifikovanou paticí a antagonisticky zapojenou pružnost.

Pro samotné testování byl navržen regulační obvod dle **Obr. 26**. 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. 4**.



Obr. 25: Meřící lavice pro ověření funkčnosti modifikované patice.



Obr. 26: Schéma regulačního obvodu měřící lavice.

Tab. 4: Vztah rozsahu hodnot regulační odchylky k hodnotě řídicí veličiny.

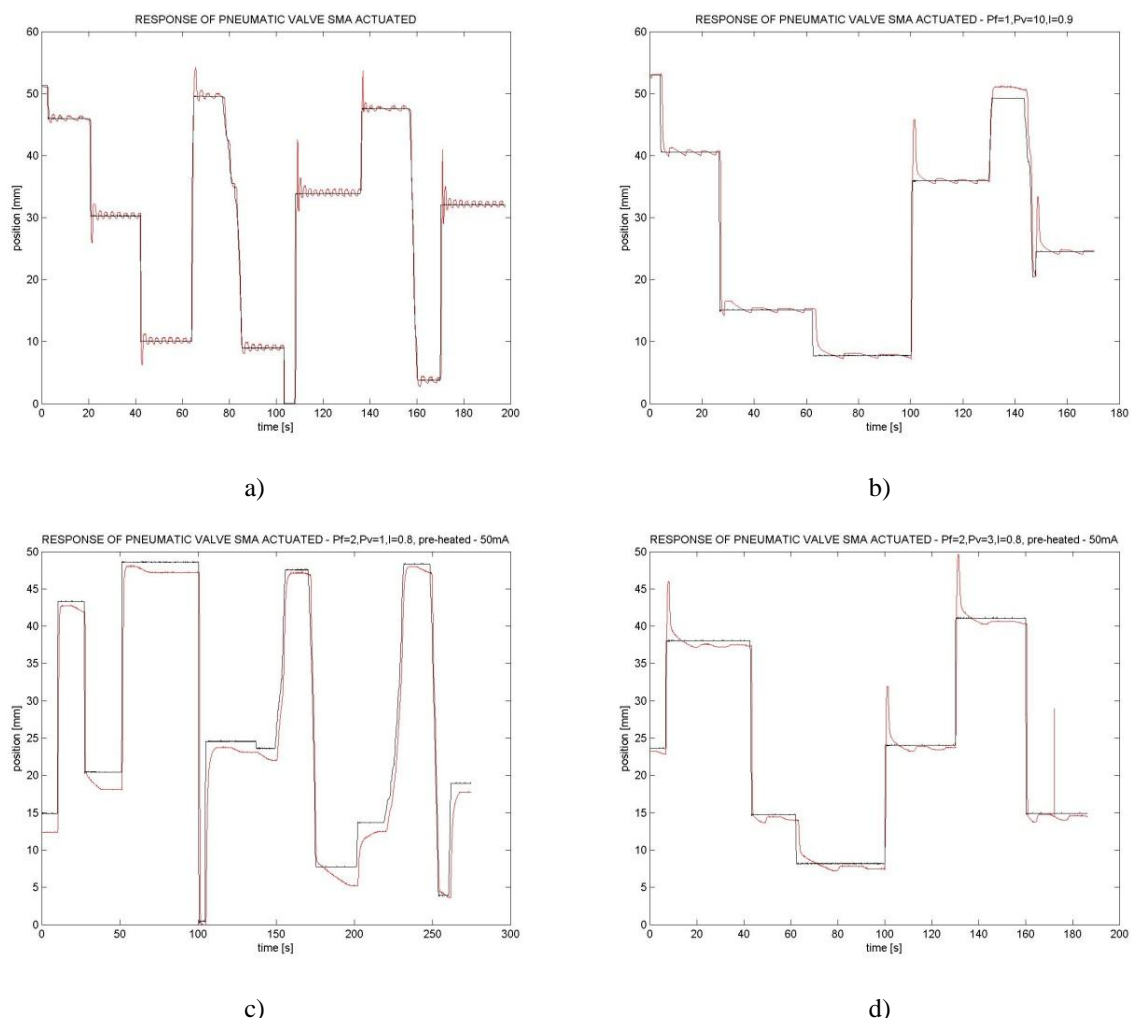
Velikost regulační odchylky	Řídicí veličina (napouštěcí ventily)	Řídicí veličina (vypouštěcí ventily)
< 40	250 mA	200 mA
< 40 : 80 >	350 mA	300 mA
> 80	900 mA	900 mA

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 $\langle 0,900 \rangle$. Frekvence regulační smyčky byla ve všech případech nastavena na 50 Hz. Výsledky experimentů při konkrétních nastaveních regulačního obvodu jsou uvedeny na **Obr. 27**.



Obr. 27: Dynamické charakteristiky pneumatického svalu s modifikovanou paticí a) P-regulátor, b-d) PI-regulátor.

Na základě zkušeností s realizací funkčního vzorku modifikované patice a provedeního 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.

4.3 ZHODNOCENÍ NAVRŽENÉHO ŘEŠENÍ A NÁVRH DALŠÍCH ÚPRAV

Z hlediska optimalizace provozních podmínek navrženého řešení se jako zásadní projevily teplotní rozdíly 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 HYSTEREZE

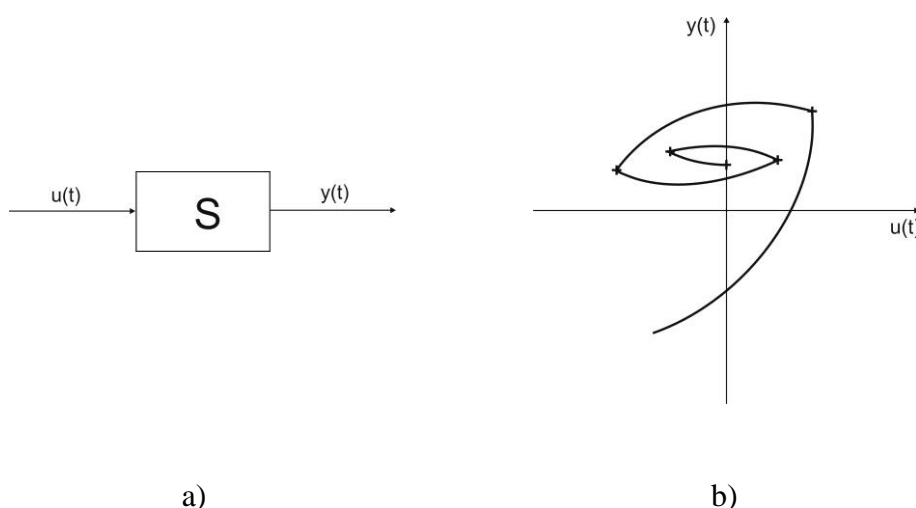
Pojem hystereze je univerzálním označením pro jistý druh chování daného systému [1], [10] [23]. Jak již bylo zmíněno v úvodu, množství oborů, v nichž je možné se s pojmem hystereze setkat, je velké. Je tedy zřejmé, že je potřeba pro konkrétní obor pojem hystereze nějakým způsobem, ať už matematickým zápisem, slovně či jinou formou, definovat.

5.1 TYPY HYSTEREZÍ

Rozdělení hysterezí je rovněž možné pojmut z pohledu oboru, ve kterém jsou zkoumány. Vzhledem k problematice, kterou se budou zabývat následující kapitoly, rozdělíme tento pojem následně.

5.1.1 Skalární hystereze [1]

Skalární hysterezi lze popsat následující definicí. Nechť je dán systém S popsáný pomocí vstupního signálu $u(t)$ a výstupního signálu $y(t)$ (**Obr. 28a**). Systém S bude nazýván systémem s hysterezí, je-li závislost výstupního signálu $y(t)$ na vstupním signálu $u(t)$ popsán jako vícevětá nelinearita, přičemž přechod mezi jednotlivými větvemi je způsoben extrémny vstupního signálu $u(t)$. Grafická podoba hystereze dle této definice je uvedena na **Obr. 28b**.



Obr. 28: a) Systém s nelinearitou typu hystereze, b) Vícevrstvá nelinearita.

V souvislosti s předchozí definicí bude vhodné definovat i podmínky, při kterých hystereze, tak jak byla popsána, bude jednoznačně definována.

Jsou-li jednotlivé větve hystereze dány pouze hodnotami extrému vstupní funkce $u(t)$, a nezávisí-li tvar a velikost těchto větví na rychlosti změny vstupního signálu $u(t)$, označuje se hystereze jako dynamicky-invariantní. V anglické literatuře se tato vlastnost nazývá *rate-independent (R-I)*. Předpokladem správnosti tohoto tvrzení jsou stejné počáteční podmínky systému S .

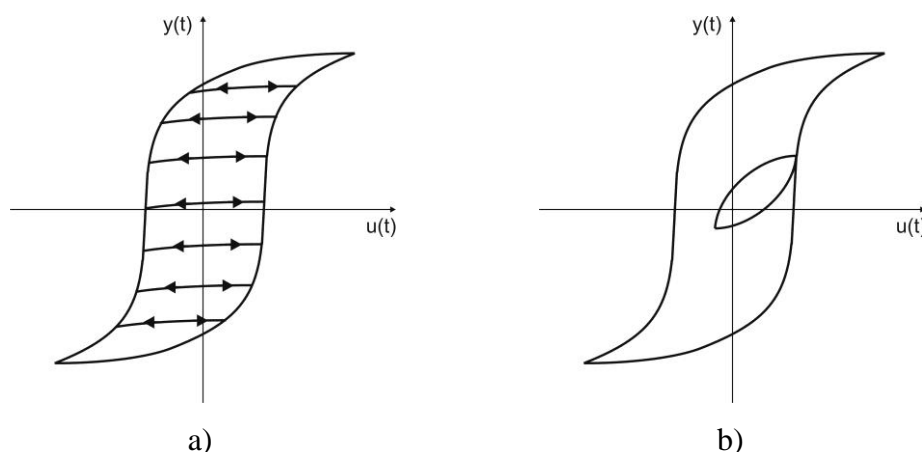
Příkladem R-I hysterezního chování může být závislost elektromagnetické indukce B na intenzitě magnetického pole H . Tvar hlavních, popřípadě vedlejších hysterezních křivek, nezávisí na rychlosti změny intenzity magnetického pole H . Definice R-I hystereze je pro použití v reálných systémech limitována faktem, že při velmi rychlé změně intenzity magnetického pole H , přestává pojem dynamicky-nezávislý platit.

Dalším faktorem ovlivňujícím získání přesného popisu konkrétní hystereze mohou být různá časová měřítka jednotlivých kroků spojených s identifikací vlastní hystereze. V zásadě můžeme stanovit tři. Časové měřítka určené vlastní dynamikou systému S . Měřítka použité pro sledování systému S a měřítka pro měření vstupního signálu $u(t)$ systému S .

Hysterezní jev je ve velkém spojován s vytvářením hysterezních smyček. To může být zavádějící a často vytvářet dojem, že „smyčka“ je základem hystereze. S ohledem na tuto skutečnost vlastní definice hystereze klade důraz na fakt, že podstatou hystereze je větvení a smyčka je pouze jednou z variant, která může při větvení nastat. Podstata vzniku smyček spočívá v oscilaci vstupního signálu $u(t)$ mezi dvěma po sobě jdoucími extrémy tohoto signálu, přičemž na vlastním průběhu signálu $u(t)$ mezi těmito extrémy nezáleží. Odtud lze říci, že skalární hysterezi lze interpretovat jako nelinearitu s pamětí. Vzhledem k definovanému pojmu „dynamicky nezávislý“ lze definovat i opačný případ chování systému, kdy tvar jednotlivých větví závisí na průběhu vstupního signálu mezi dvěma po sobě vyskytujícími se extrémy tohoto signálu. Takovéto chování označujeme jako „dynamicky závislé“. V anglicky psané literatuře jej můžeme najít pod označením „rate-dependent“ (R-D).

Všechny R-I hystereze lze dále rozdělit na hystereze s „lokální pamětí“ - *Local Memory (LM)* a hystereze s „nelokální pamětí“ - *Nonlocal Memory (NM)*.

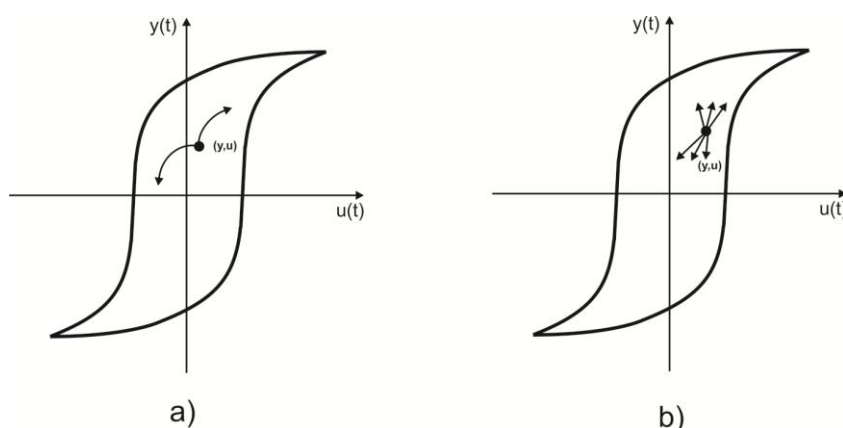
Hysterezi můžeme prohlásit za hysterezi s lokální pamětí, předurčí-li hodnoty výstupu $y(t)$ pro čas $t > t_0$ pouze hodnoty výstupu $u(t_0)$ a hodnoty vstupu $y(t_0)$ v čase $t \geq t_0$. U hystereze s nelokální pamětí je hodnota výstupu $y(t)$ pro $t \geq t_0$ dána nejen hodnotou minulého výstupu, ale také posledními extrémy vstupní funkce $u(t)$. Příklady LM i NM hysterezí jsou demonstrovány na **Obr. 29a** a **Obr. 29b**.



Obr. 29: a) Hystereze s lokální pamětí (LM), b) Hystereze s nelokální pamětí (NM).

Na základě definic uvedených výše je zřejmé, že k takzvanému větvení dochází pro jakýkoli extrém vstupní funkce $u(t)$. Obecně však platí, že vnitřní smyčky nejsou stálé. Tato vlastnost se projevuje posunem konkrétní smyčky i v případě, že se vstupní signál $u(t)$ pohybuje mezi stejnými extrémy.

Hystereze s lokální pamětí mají několik obvyklých rysů. Každý dosažitelný bod v grafu $y - t$ koresponduje s právě jedním definovaným stavem, přičemž tento stav předdefinovává chování systému s hysterezí a určuje právě jednu větev hystereze pro narůstající vstupní signál $u(t)$ a právě jednu větev pro klesající vstupní signál $u(t)$. Jinak řečeno, pro každý konkrétní dosažitelný bod prostoru $y - u$ existují maximálně dvě křivky, které mohou reprezentovat následující chování systému s LM hysterezí (Obr. 30a).



Obr. 30: Chování hystereze a) s lokální pamětí (LM), b) s nelokální pamětí (NM).

Toto neplatí pro NM hystereze, kde každý dosažitelný bod prostoru $y-u$ protíná nekonečně mnoho křivek, které mohou reprezentovat budoucí chování systému s NM hysterezí (**Obr. 30b**). Každá z těchto křivek je dána konkrétní historií, jmenovitě posloupností extrému vstupní funkce $u(t)$. Dle teorie náhodných procesů se jinak LM hystereze nazývá Markovianovou hysterezí a NM hystereze Non-markovianovou hysterezí. Je zřejmé, že popis NM hysterezí bude mnohem komplikovanějším problémem než popis LM hysterezí.

Hystereze s lokální pamětí byly rozsáhle studovány ve spojitosti s použitím diferenciálních a algebraických rovnic. Tyto modely dosáhly vysokého stupně sofistikovanosti, nicméně z dosud publikovaných výsledků týkajících se právě modelů LM hysterezí vyplývá, že neodpovídají chování reálnému systému s LM hysterezí.

5.1.2 Vektorová hystereze [1]

V tomto případě je hystereze charakterizována vektorem vstupních signálů a vektorem výstupních signálů, které ve většině případů bývají, vzhledem k praktickým aplikacím, maximálně třírozměrné. Podstatou úspěšně zvládnutého popisu vektorové hystereze je pochopení, co vytváří hlavní část historie vstupního signálu, jež ovlivňuje následnou změnu výstupu ze systému.

V případě skalární R-I hystereze bylo experimentálně prokázáno, že na budoucí stavy systému má vliv pouze poslední extrém vstupní funkce $u(t)$, nikoli všechny změny této funkce. Jinak řečeno, paměť skalární hystereze má jakousi selektivní funkci. U vektorové hystereze je potřeba počítat s tím, že na výstup ze systému budou mít vliv poslední extrémy všech jednotlivých vstupních funkcí. Lze dokázat, že skalární R-I hysterezi lze získat jako konkrétní případ R-I vektorové hystereze. V případě vektorové hystereze je obdobně jako u skalární hystereze potřeba uchovávat extrémy vstupního signálu bezpodmínečně, ve všech směrech, a vybrat vhodnou hodnotu vektoru výstupu podle uchované historie.

V následujícím textu budou popsány některé známé možnosti modelování LM a NM hysterezí.

5.2 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 fázi tzv. *frakce martensitu* [37]. Matematicky je formulován rovnicí (5.1) pro přechod Austenit-Martensit, a rovnicí (5.2) pro přechod Martensit-Austenit **Obr. 7**.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{mh} &= 1 && \text{pro } T < A_S \\ \varepsilon_{mh} &= 0,5 * \left[1 + \cos \pi \left(\frac{T - A_S}{A_F - A_S} \right) \right] && \text{pro } A_S \leq T \leq A_F \\ \varepsilon_{mh} &= 0 && \text{pro } T > A_F \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{mh} &= 1 && \text{pro } T < M_F \\ \varepsilon_{mc} &= 0,5 * \left[1 + \cos \pi \left(\frac{T - M_F}{M_S - M_F} \right) \right] && \text{pro } M_F \leq T \leq M_S \\ \varepsilon_{mh} &= 0 && \text{pro } T > M_S \end{aligned} \quad (5.2)$$

Ze vztahů (5.1) a (5.2) lze odvodit obecné vztahy pro závislost hodnoty výstupního signálu y na vstupním signálu u do následující podoby.

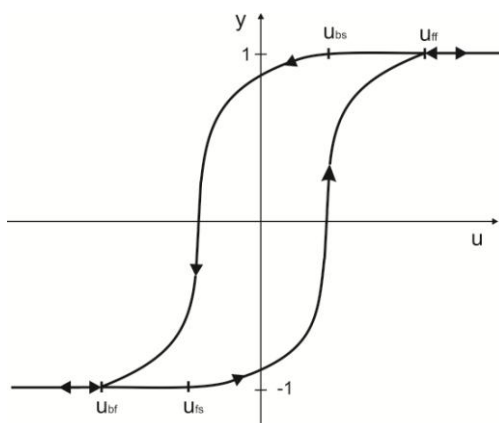
Pro vstupní signál u , narůstající v čase platí:

$$\begin{aligned} y &= -1 && \text{pro } u < u_{fs} \\ y &= \cos \left(\pi \frac{u - u_{fs}}{u_{ff} - u_{fs}} \right) + \pi && \text{pro } u_{fs} \leq u \leq u_{ff} \\ y &= +1 && \text{pro } u > u_{ff} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Pro vstupní signál u , klesající v čase platí:

$$\begin{aligned} y &= -1 && \text{pro } u < u_{bf} \\ y &= \cos \left(\pi \frac{u - u_{bf}}{u_{bs} - u_{bf}} \right) + \pi && \text{pro } u_{bf} \leq u \leq u_{bs} \\ y &= +1 && \text{pro } u > u_{bs} \end{aligned} \quad (5.4)$$

přičemž hodnoty $u_{bf} < u_{fs} < u_{bs} < u_{ff}$ určují šířku hysterezní charakteristiky. Graficky je tento model uveden na **Obr. 31**.



Obr. 31: Zobecněný Liang - Rogersův model hystereze.

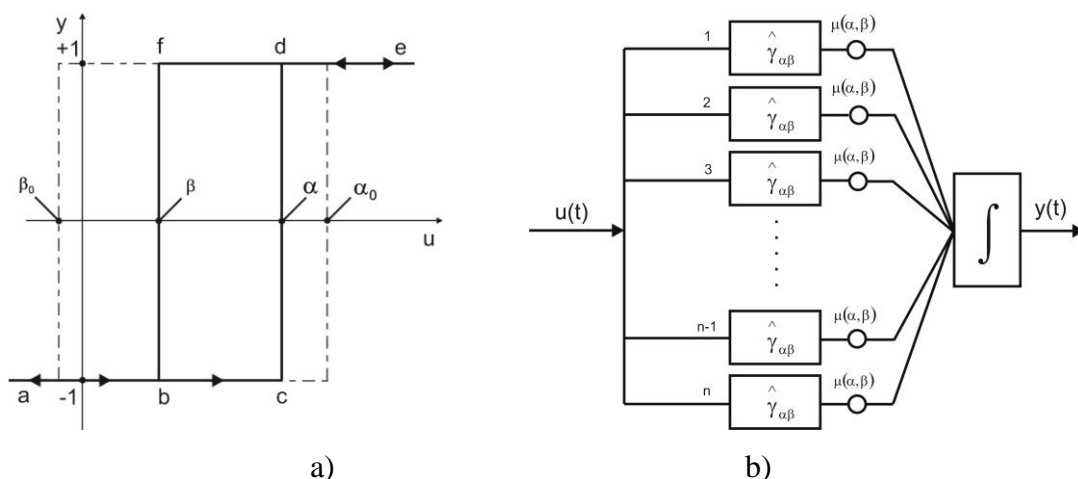
Ze vztahu (5.3) respektive (5.4) je patrné, že tento model bude za předpokladu vhodného zvolení jednotlivých parametrů, schopen popsat LM hysterezní chování. Obdobným způsobem je definován například Tanakův model [34], který pro vlastní výpočet využívá exponenciální funkci.

5.3 PREISACHŮV MODEL [1]

Preisachův model je jedním z nejlépe propracovaných modelů [9] a jako takovému mu bude v této práci věnována největší pozornost. Tento model byl považován za první model hystereze. Jeho základ byl prezentován Ferencem Preisachem již v roce 1935. Přístup ke stavbě tohoto modelu byl čistě intuitivní a vycházel z hypotézy zabývající se fyzikálním mechanismem magnetizace, přičemž většina jeho variant se tedy týká právě oblasti magnetismu. Nezávisle na F. Preisachovi byl tento model sestaven a poměrně rozsáhle rozpracován a testován D.E. Everettem v problematice adsorpce. Lze tedy říci, že model není omezen na oblast zmíněného magnetismu. V letech 1970-1980 se Preisachovým modelem podrobně zabýval M. Krasnoleskii. Výsledkem bylo oddělení modelu od fyzikální podstaty a jeho prezentování v čistě matematické podobě [23].

Struktura Preisachova modelu je postavena na ideje „main block“ a lze ji popsat následovně.

Předpokládejme nekonečně mnoho jednoduchých prvků hysterezního typu $\hat{\gamma}_{\alpha\beta}$ (hysterónů), které budou definovány dle **Obr. 32a** a vztahem (5.5), popisujícím chování hysterónu v časových okamžicích k . Dále bude definována tzv. podmínka konzistence $y(0) = \pm 1$.



Obr. 32: a) Nelinearita typu „Relé s hysterezí“, b) Princip funkce Preisachova modelu.

$$\begin{aligned}
 y(k) &= +1 && \text{pro } u(k) > \alpha \\
 y(k) &= y(k-1) && \text{pro } \beta \leq u(k) \leq \alpha \\
 y(k) &= -1 && \text{pro } u(k) < \beta
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

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 nějž platí, že výstup y může nabývat hodnoty $+1$ respektive -1 . Je patrné, že elementární nelinearita splňuje definici nelinearity s lokální pamětí, tak jak byla diskutována v úvodu kapitoly 5.

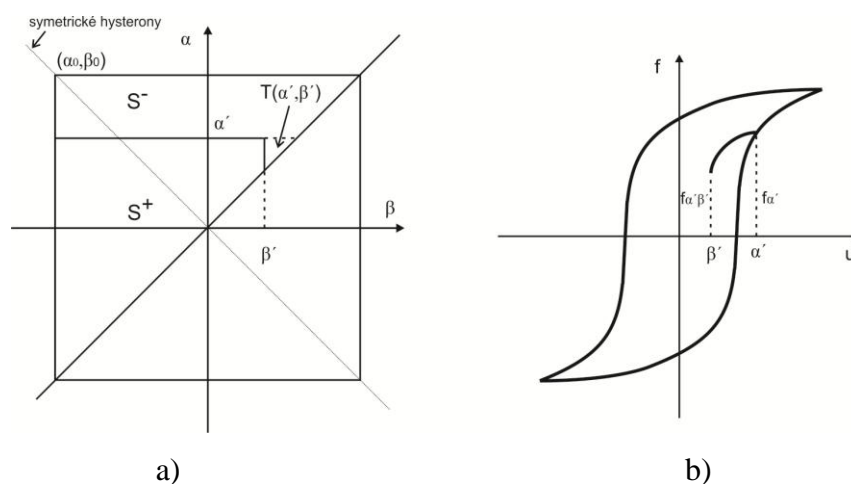
Dále předpokládejme libovolnou váhovou funkci $\mu(\alpha, \beta)$, obvykle nazývanou jako Preisachova funkce. Preisachův model potom můžeme definovat následovně:

$$f(t) = \hat{\Gamma}u(t) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \hat{\gamma}_{\alpha, \beta} u(t) d\alpha d\beta \tag{5.6}$$

Označení $\hat{\Gamma}$ se často používá jako stručnější zápis takzvaného Preisachova hysterezního operátoru. Z rovnice (5.6) je zřejmá definice Preisachova modelu jako spojitého systému, sestávajícího z nekonečně mnoha paralelně spojených relé s hysterezí (Obr. 32b), 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. 33: 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. 33a 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 $u = \beta'$.

Pro odvození vztahu určujícího hodnotu váhy $\mu(\alpha, \beta)$ byl zaveden pomocný vztah:

$$F(\alpha', \beta') = \frac{1}{2}(f_{\alpha'} - f_{\alpha' \beta'}) \quad (5.7)$$

odpovídající polovině přírůstku hodnoty výstupu f na rostoucí křivce obálky hystereze. Postupnými matematickými úpravami za využití Taylorova rozvoje získáme vztah (5.8):

$$f_{\alpha'\beta'} - f_{\alpha'} = -2 \iint_{T(\alpha',\beta')} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (5.8)$$

jehož úpravou pomocí vztahu (5.7) dostaneme vztah (5.9) a jeho následnou úpravou vztah (5.10):

$$F(\alpha', \beta') = \iint_{T(\alpha',\beta')} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (5.9)$$

$$F(\alpha', \beta') = \int_{\beta'}^{\alpha'} \left(\int_{\beta}^{\alpha'} \mu(\alpha, \beta) d\alpha \right) d\beta \quad (5.10)$$

Derivací vztahu (5.10) nejprve podle β' a následně podle α' dostaneme rovnici (5.11):

$$\mu(\alpha', \beta') = -\frac{d^2 F(\alpha', \beta')}{d\alpha' d\beta'} \quad (5.11)$$

Dosazením rovnice (5.8) do rovnice (5.11) dostaneme vztah (5.12):

$$\mu(\alpha', \beta') = \frac{1}{2} \frac{d^2 f_{\alpha'\beta'}}{d\alpha' d\beta'} \quad (5.12)$$

Vztah (5.12) umožňuje zjednodušenou geometrickou interpretaci váhy $\mu(\alpha', \beta')$ respektive obecně váhy $\mu(\alpha, \beta)$. Další úpravou vztahu (5.12) pomocí derivace $f_{\alpha'\beta'}$ podle β' dostaneme vztah (5.13), kde $\Theta(\alpha', \beta')$ odpovídá úhlu, který svírá osa x reprezentující vstupní hodnoty u a tangentě k rostoucí křivce obálky hystereze v bodě $u = \beta'$.

$$\frac{df_{\alpha'\beta'}}{d\beta'} = \tan \Theta(\alpha', \beta') \quad (5.13)$$

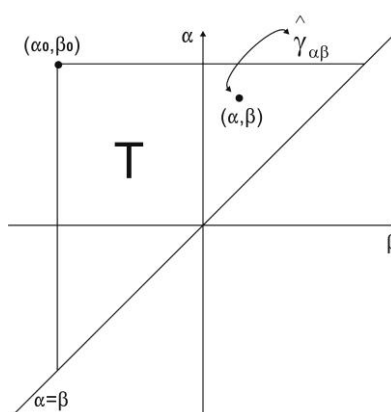
Úpravou (5.12) pomocí (5.13) dostaneme rovnici (5.14), která popisuje vztah mezi váhou příslušného hysteronu Preisachova modelu a konkrétním průběhem modelované charakteristiky.

$$\mu(\alpha', \beta') = \frac{1}{2} \frac{d \tan \Theta(\alpha', \beta')}{d\alpha'} \quad (5.14)$$

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.

5.3.1 Geometrická interpretace principu Preisachova modelu

Geometrická interpretace Preisachova modelu je založena na předpokladu, že každému hysteronu $\hat{\gamma}_{\alpha, \beta}$ v polorovině $\alpha \geq \beta$ odpovídá právě jeden bod o souřadnicích α, β .

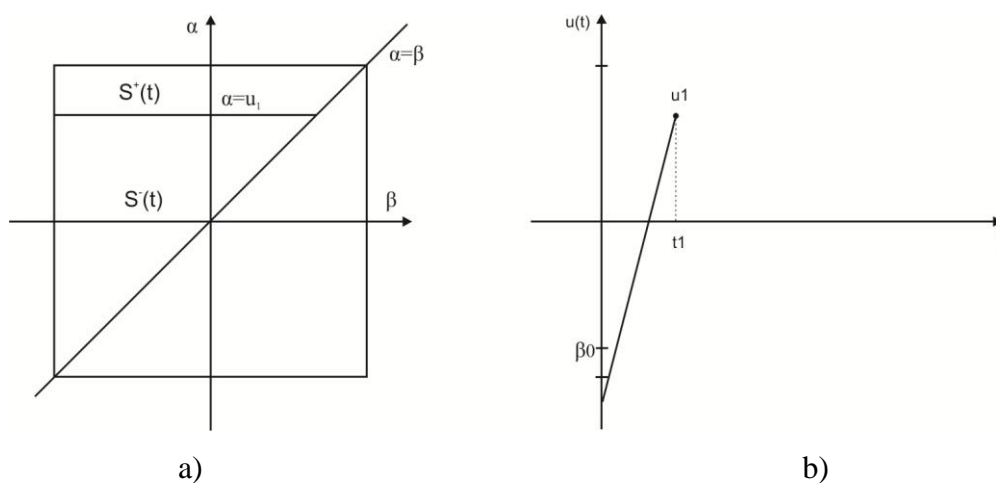


Obr. 34: Geometrická interpretace Preisachova modelu - rozložení hysteronů.

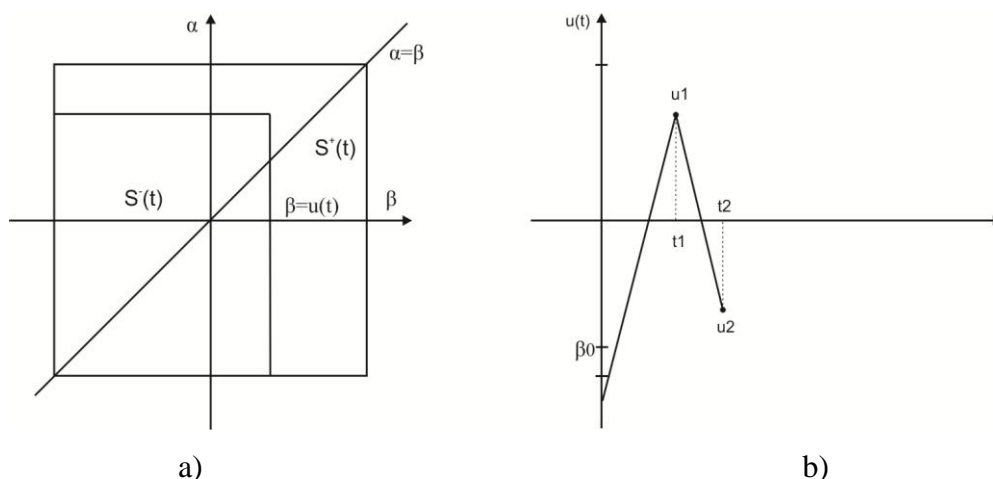
Předpokládejme pravoúhlý trojúhelník T (**Obr. 34**), jehož přepona je tvořena částí přímky $\alpha = \beta$ a vrchol pravého úhlu leží v bodě o souřadnicích α_0, β_0 , za předpokladu $\beta_0 = -\alpha_0$. Tento trojúhelník bude nazýván limitujícím trojúhelníkem a bude použit k popisu konečné váhové funkce $\mu(\alpha, \beta)$ tak, že budeme předpokládat její rovnost nule vně tohoto trojúhelníku.

Pro následující popis funkce Preisachova modelu předpokládejme, že vstupní signál $u(t)$ v nějakém čase t_0 nabývá hodnoty menší než β_0 a že hodnoty všech hysteronů $\hat{\gamma}_{\alpha, \beta}$ nabývají

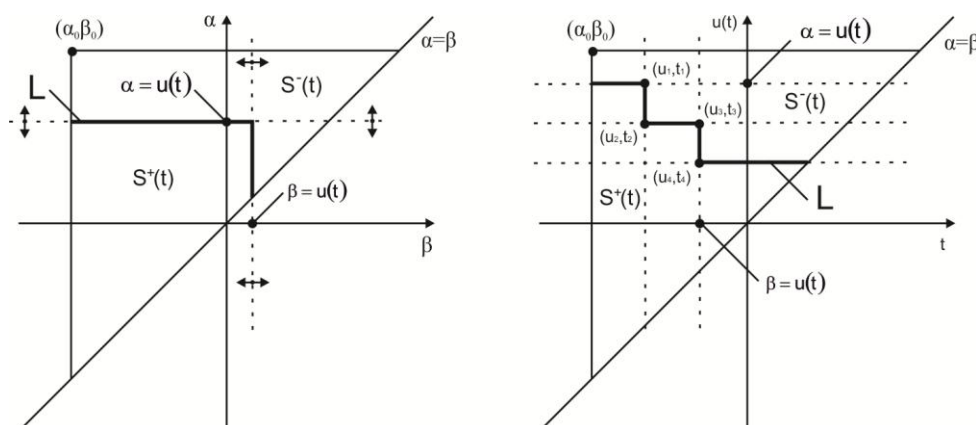
hodnoty -1 . Tento stav odpovídá stavu takzvané negativní saturace. Nyní předpokládejme, že vstupní signál $u(t)$ začne monotónně narůstat až do času t_1 . Hodnotu signálu $u(t)$ v čase t_1 označíme u_1 (**Obr. 35b**). V průběhu nárůstu signálu $u(t)$ se hodnoty hysteronů $\hat{\gamma}_{\alpha,\beta}$, jejichž hodnota parametru α je v daný moment menší než hodnota signálu $u(t)$, změní z hodnoty -1 na hodnotu $+1$. V geometrickém popisu to bude znamenat, že se definovaný trojúhelník T rozdělí na oblasti $S^+(t)$ a $S^-(t)$, přičemž v oblasti $S^+(t)$ budou nabývat příslušné hysterony $\hat{\gamma}_{\alpha,\beta}$ hodnoty $+1$ a v oblasti $S^-(t)$ hodnoty -1 . Hranice mezi těmito oblastmi je definovaná přímkou procházející bodem $\alpha = u(t)$ (**Obr. 35a**). Poloha této přímky se mění směrem ke kladnějším hodnotám α dokud má signál $u(t)$ rostoucí charakter, v našem případě do hodnoty u_1 . Dále předpokládejme, že vstupní signál $u(t)$ začne od času t_1 monotónně klesat až do okamžiku t_2 , kde nabude hodnoty u_2 (**Obr. 36b**). Po tuto dobu se budou jednotlivé hysterony $\hat{\gamma}_{\alpha,\beta}$, jejichž parametr β je větší než aktuální hodnota vstupního signálu $u(t)$, překlápět do hodnoty -1 . V tomto okamžiku se již křivka oddělující plochy $S^+(t)$ a $S^-(t)$ skládá ze dvou přímek, horizontální a vertikální, přičemž vertikální se pohybuje zprava doleva a je definovaná vztahem $\beta = u(t)$ (**Obr. 36a**). Princip separace ploch $S^+(t)$ a $S^-(t)$ je zobrazen na **Obr. 37a**.



Obr. 35: Geometrická interpretace Preisachova modelu - princip separace ploch (1. krok).



Obr. 36: Geometrická interpretace Preisachova modelu - princip separace ploch (2. krok).



Obr. 37: Geometrická interpretace Preisachova modelu - obecný princip separace ploch (n-tý krok).

Tento princip bude samozřejmě platit i pro další změny vstupního signálu. Průběh formování separační křivky je naznačen na **Obr. 37**.

Obecně lze tedy říci, že trojúhelník T je v každém časovém okamžiku rozdělen na plochy $S^+(t)$ a $S^-(t)$. Tyto plochy se skládají z bodů o souřadnicích (α, β) , přičemž každý z těchto bodů představuje právě jeden hysteron $\hat{\gamma}_{\alpha, \beta}$. Přísluší-li tento hysteron ploše $S^+(t)$, nabývá hodnoty $+1$, přísluší-li $S^-(t)$, nabývá hodnoty -1 . Hraniční přímka $L(t)$, oddělující plochy $S^+(t)$ a $S^-(t)$ je schodovitá funkce, u které souřadnice jednotlivých zlomů odpovídají lokálním minimům respektive maximům vstupního signálu $u(t)$. Výsledná křivka $L(t)$ spojuje vždy přeponu trojúhelníku T s některou z jeho odvěsen. Začne-li se měnit vstupní signál $u(t)$, dojde i ke změně tvaru křivky $L(t)$. Můžeme tedy říci, že v každém časovém okamžiku t lze přepsat definiční vztah (5.6) pomocí základních pravidel integrálního počtu do vztahu:

$$f(t) = \hat{\Gamma}u(t) = \iint_{S^+(t)} \mu(\alpha, \beta) \hat{\gamma}_{\alpha, \beta} u(t) d\alpha d\beta + \iint_{S^-(t)} \mu(\alpha, \beta) \hat{\gamma}_{\alpha, \beta} u(t) d\alpha d\beta \quad (5.15)$$

Použijeme-li k další úpravě předpoklady, které byly definovány již dříve a sice:

$$\hat{\gamma}_{\alpha, \beta} u(t) = +1 \quad \text{pro} \quad (\alpha, \beta) \in S^+(t) \quad (5.16)$$

a

$$\hat{\gamma}_{\alpha, \beta} u(t) = -1 \quad \text{pro} \quad (\alpha, \beta) \in S^-(t) \quad (5.17)$$

dostáváme z rovnice (5.15) rovnici:

$$f(t) = \iint_{S^+(t)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta - \iint_{S^-(t)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta. \quad (5.18)$$

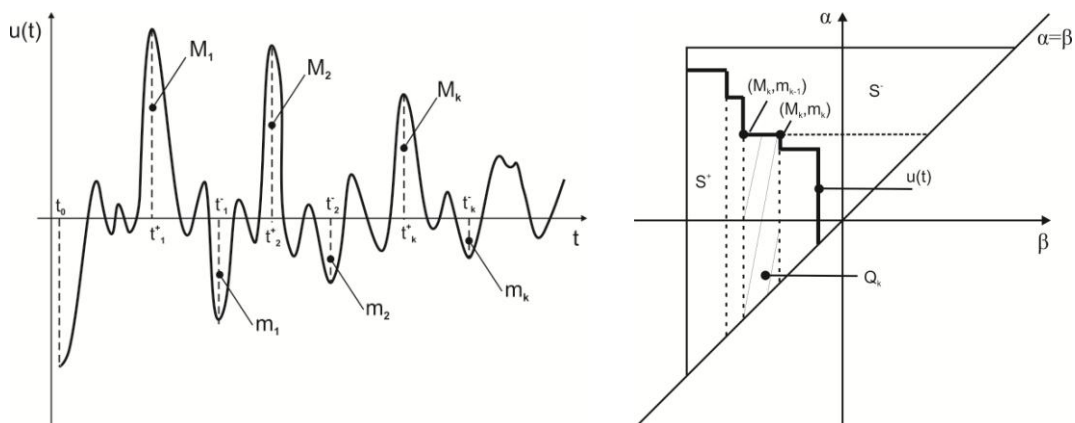
Uvedený postup ukázal, jakým způsobem dochází k vytváření paměti v Preisachově modelu. Paměť je formována dvěma různými pravidly pro vznik křivky $L(t)$ a vztah mezi jejím tvarem a hodnotami extrémů vstupního signálu $u(t)$.

Z předchozí analýzy je patrné, že Preisachův model může být definován čistě geometricky bez jakéhokoli odkazu na definici pomocí analytického vztahu (5.6). Lze říci, že rovnice (5.18), ve spojení s pravidly pro formování hraniční křivky $L(t)$, je plnohodnotnou nezávislou definicí Preisachova modelu. Zároveň se tato definice jeví jako vhodnější z pohledu vlastní realizace modelu a identifikace případně vzniklé chyby jeho funkce.

5.3.2 Numerická implementace Preisachova modelu

V první části kapitoly 5.3 byl dán vztah pro stanovení hodnoty výstupní funkce $f(t)$ (5.6) a odvozen vztah pro výpočet váhy respektive váhové funkce $\mu(\alpha, \beta)$. Výpočet hodnoty výstupní funkce $f(t)$ pomocí těchto vztahů může být poměrně časově náročný. Tento fakt částečně limituje použití Preisachova modelu v praktických aplikacích. Předpokladem pro stanovení konkrétní váhy $\mu(\alpha, \beta)$ je využití experimentálně získaných dat. Chyby (šum) v těchto datech mohou díky způsobu výpočtu silně ovlivňovat celkový výpočet hodnoty $f(t)$.

Následující text se bude věnovat způsobu výpočtu hodnoty výstupní funkce $f(t)$ pomocí znalosti hraniční křivky $L(t)$ a jejich vrcholů definovaných souřadnicemi M_k a m_k (**Obr. 38**) a ploch S^+ , S^- .



Obr. 38: Vliv dominantních extrémů funkce $u(t)$ na separaci ploch S^+ , S^- .

Za pomoci stejného předpokladu jako v případě vztahu (5.6) a přidání váhy $\mu(\alpha, \beta)$ dostaneme vztah:

$$f(t) = - \int_T \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta + \iint_{S^+(t)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (5.19)$$

kde T je limitující trojúhelník definovaný v 5.3.1. S využitím rovnice (5.9) definujeme vztah (3.1):

$$\iint_T \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta = F(\alpha_0, \beta_0) \quad (5.20)$$

Dle Obr. 38 lze plochu S^+ rozdělit na n lichoběžníků Q_k . Odtud lze definovat vztah (5.21):

$$\iint_{S^+(t)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta = \sum_{k=1}^{n(t)} \iint_{Q_k(t)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (5.21)$$

Je zřejmé, že počet lichoběžníků Q_k se bude v čase měnit. Z toho důvodu byly ve vztahu (5.21) vyjádřeny proměnné Q_k a n jako funkce času t .

Každá lichoběžníková plocha Q_k je definována jako rozdíl trojúhelníkových ploch $T(M_k, m_{k-1})$ a $T(M_k, m_k)$. Tento stav lze zapsat v podobě rovnice:

$$\iint_{Q_k(t)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta = \iint_{T(M_k, m_{k-1})} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta - \iint_{T(M_k, m_k)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta. \quad (5.22)$$

Dosazením vztahu (5.9) do (5.22) vzniknou rovnice (5.23) a (5.24):

$$\iint_{T(M_k, m_{k-1})} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta = F(M_k, m_{k-1}) \quad (5.23)$$

$$\iint_{T(M_k, m_k)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta = F(M_k, m_k) \quad (5.24)$$

Ze vztahů (5.22), (5.23) a (5.24) lze odvodit (5.25):

$$\iint_{Q_k(t)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta = F(M_k, m_{k-1}) - F(M_k, m_k) \quad (5.25)$$

Postupným dosazením (5.19), (5.20), (5.21) a (5.25) lze získat rovnici (5.26):

$$f(t) = -F(\alpha_0, \beta_0) + 2 \sum_{k=1}^{n(t)} [F(M_k, m_{k-1}) - F(M_k, m_k)] \quad (5.26)$$

Z **Obr. 38** lze dovést, že hodnota m_n odpovídá okamžité hodnotě vstupního signálu $u(t)$, tj. $m_n = u(t)$. Odtud lze vztah (5.26) přepsat do vztahu (5.27):

$$f(t) = -F(\alpha_0, \beta_0) + 2 \sum_{k=1}^{n(t)-1} [F(M_k, m_{k-1}) - F(M_k, m_k)] + 2[F(M_n, m_{n-1}) - F(M_n, u(t))]. \quad (5.27)$$

Odvození vztahu (5.27) bylo provedeno pro případ, kdy je vstupní signál $u(t)$ klasající. Z **Obr. 38** je zřejmé, že separační křivka $L(t)$ bude mít ve své poslední části vertikální orientaci. Pro případ, kde je vstupní signál $u(t)$ rostoucí, lze pomocí obdobného postupu odvodit vztah (5.28):

$$f(t) = -F(\alpha_0, \beta_0) + 2 \sum_{k=1}^{n(t)-1} [F(M_k, m_{k-1}) - F(M_k, m_k)] + 2F(u(t), m_{n-1}) \quad (5.28)$$

Jak již bylo uvedeno dříve, funkce $F(\alpha', \beta')$ je vztažena k experimentálně získaným datům prostřednictvím vztahu (5.7). Použitím rovnic (5.27) a (5.28) můžeme stanovit vztahy pro výpočet hodnoty výstupního signálu $f(t)$ v podobě (5.29) pro klesající a (5.30) pro rostoucí hodnotu vstupního signálu $u(t)$:

$$f(t) = -f^+ + \sum_{k=1}^{n-1} (f_{M_k m_k} - f_{M_k m_{k-1}}) + f_{M_n u(t)} - f_{M_n m_{n-1}} \quad (5.29)$$

$$f(t) = -f^+ + \sum_{k=1}^{n-1} (f_{M_k m_k} - f_{M_k m_{k-1}}) + f_{-m_{n-1}} - f_{-m_{n-1}, -u(t)} \quad (5.30)$$

kde f^+ odpovídá hodnotě kladné saturace výstupu.

5.3.3 Vlastnosti Preisachova modelu

S využitím poznatků z předchozích kapitol můžeme stanovit základní vlastnosti Preisachova modelu. První z nich je rovnost absolutních hodnot výstupů z modelu v případě kladného a záporného nasycení. Kladné nasycení lze matematicky popsat rovnicí (5.31), záporné nasycení rovnicí (5.32):

$$f^+ = \iint_T \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad \text{pro} \quad u(t) > \alpha_0 \quad (5.31)$$

$$f^- = \iint_T \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad \text{pro} \quad u(t) < \beta_0 \quad (5.32)$$

Další významnou vlastností Preisachova modelu je selektivnost. Preisachův model dokáže, na základě způsobu formování křivky $L(t)$ (**Obr. 37**), „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.

5.4 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. 39b**) [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. 39a**). Takto zvolený hysteron lze matematicky popsat pomocí následujících vztahů.

Záběrové přímky hysteronu jsou definovány vztahy:

$$\begin{aligned} y &= K(u - h) \quad \text{pro rostoucí hodnotu vstupu} \\ y &= K(u + h) \quad \text{pro klesající hodnotu vstupu} \end{aligned} \quad (5.33)$$

Hodnota výstupu z hysteronu v časových okamžicích k je definována takto:

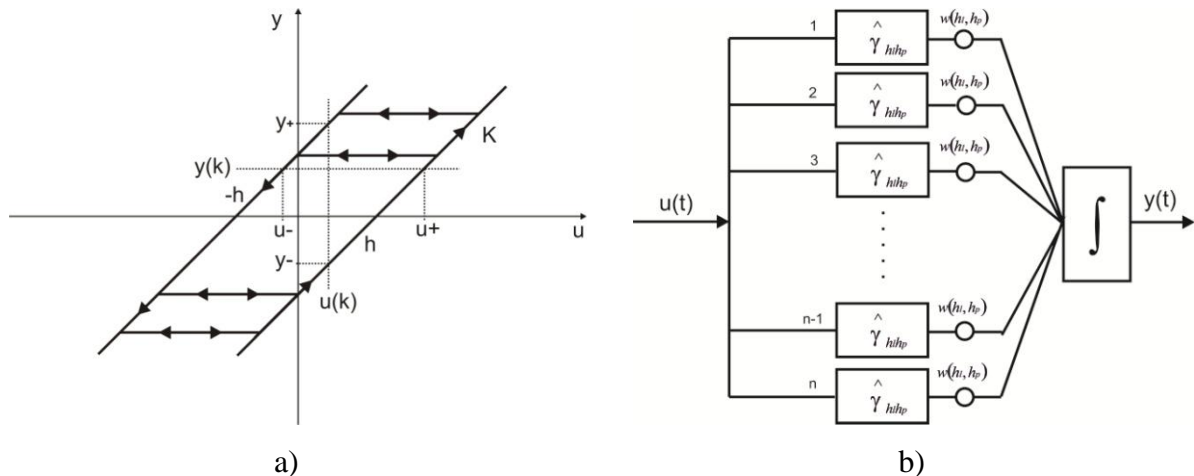
$$\begin{aligned} y(k) &= K(u(k) + h) \quad \text{pro } u(k) < u_- \\ y(k) &= y(k - 1) \quad \text{pro } u(k) \in \langle u_-; u_+ \rangle \\ y(k) &= K(u(k) - h) \quad \text{pro } u(k) > u_+ \end{aligned} \quad (5.34)$$

kde

$$\begin{aligned} u_- &= \frac{y(k-1)}{K} - h \\ u_+ &= \frac{y(k-1)}{K} + h \end{aligned}$$

Obecně musí být splněny takzvané *podmínky konzistence*, kdy pro hodnoty pro okamžik k je výstup $y(k)$ určen vstupem $u(k)$ z intervalu hodnot $\langle u_-; u_+ \rangle$ a obráceně, je-li v okamžicích k vstupem $u(k)$, pak výstup $y(k)$ je z intervalu hodnot $\langle y_-; y_+ \rangle$. Dle této definice tedy bude platit (5.35):

$$\begin{aligned} u_-(k) &= \frac{y(k)}{K} - h \quad \text{resp.} \quad u_+(k) = \frac{y(k)}{K} + h \\ y_-(k) &= K(u(k) - h) \quad \text{resp.} \quad y_+(k) = K(u(k) + h) \end{aligned} \quad (5.35)$$



Obr. 39: 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. Výstup y bude dán rovnicemi (5.34) a (5.35).

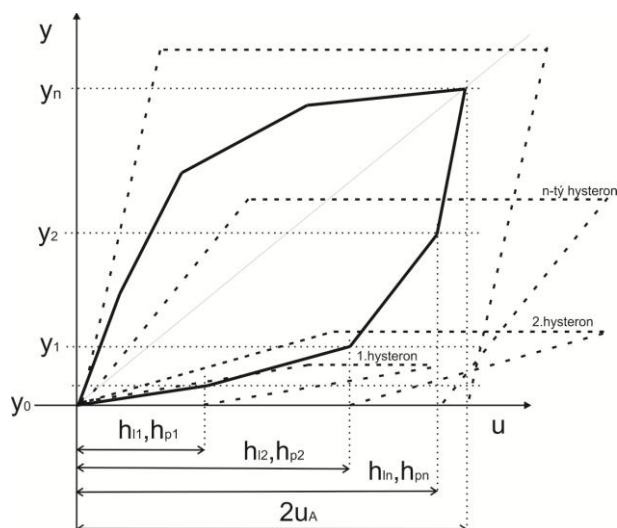
Analogicky ke vztahu (5.6) lze obecně zapsat vztah pro výpočet výstupu z Prandtl-Ishlinského modelu následovně:

$$f(t) = \iint_{h_l \geq h_p} w(h_l, h_p) \hat{\gamma}_{h_l h_p} u(t) dh_l dh_p \quad (5.36)$$

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 ,

hysteron $\hat{y}_{h_l h_p}$ je definován dle rovnice (5.34). Váhy $w(h_l, h_p)$ jednotlivých hysteronů jsou v případě PI modelu odvozeny z takzvané *panenské křivky* konkrétní hystereze.

Jednotlivé váhy odpovídají sklonu panenské křivky v definovaném úseku. Počet a rozložení úseků odpovídá zvolenému počtu hysteronů, které mají být využity pro výpočet výstupní hodnoty $y(t)$ modelu. Možný postup stanovení vah jednotlivých hysteronů PI modelu pro konkrétní hysterezi lze popsat následovně:



Obr. 40: Stanovení vah pomocí panenské křivky.

Amplituda vstupního signálu $u(t)$ je zvolena tak, aby bylo dosaženo, v rámci charakteristiky $y - t$, maximálních mezí hystereze, tzn. byla stanovena výše uvedená panenská křivka modelované hystereze. Odpovídajícím přepočtem je proveden posun získané křivky tak, aby byl bod záporného nasycení totožný s hodnotou 0. Následně je zvolen počet hysteronů n . Přepočtený rozsah vstupního signálu $u(t)$ je rozdělen do $n + 1$ částí. Následně je stanoven vztah vektoru hodnot výstupu $y(t)$ vzhledem k šířce příslušného hysteronu (**Obr. 40**) a trojúhelníková matice A , jejíž hodnoty prvků reprezentují šířky hysteronů.

Úpravou rovnice (5.37), kde $bw_i = h_{pi} - |h_{li}|$

$$y(n) = \sum_{i=1}^n (bw_{n+1} - bw_i)w_i \quad (5.37)$$

lze vyjádřit vztah mezi šířkami hysteronů bw , odpovídajícími hodnotami výstupu $y(t)$ a váhami w rovnicí (5.38):

$$\{y\} = [A] * \{w\} \quad (5.38)$$

respektive rovnicí (5.39):

$$\{w\} = [A]^{-1} * \{y\} \quad (5.39)$$

5.5 MODIFIKOVANÝ PRANDTL-ISHLINSKÉHO MODEL

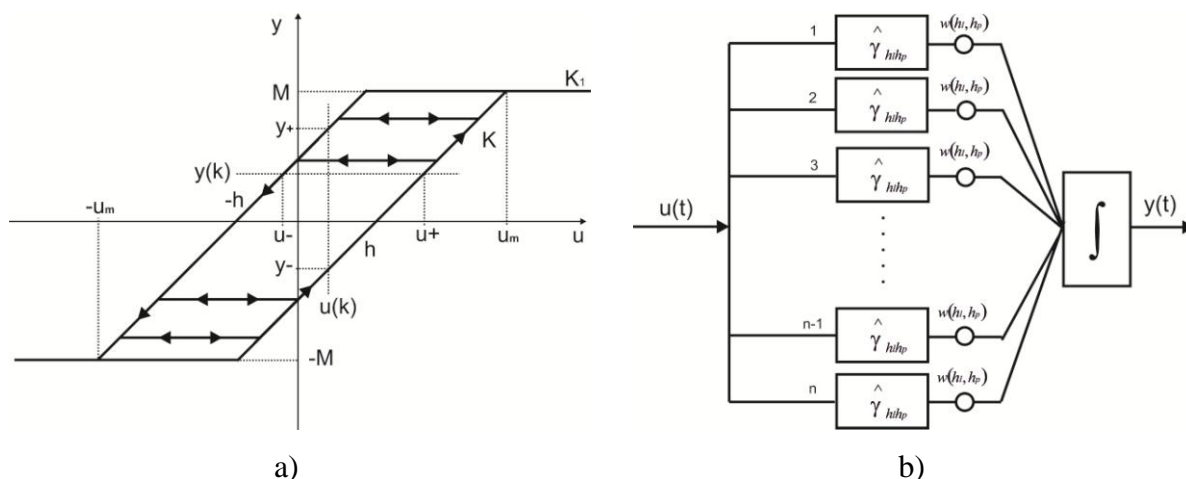
Modifikovaný Prandtl-Ishlinského (MPI) [38] model vychází z modelu, popsaného v předchozí kapitole. Jednotlivé funkční principy zůstaly zachovány, nicméně jako základní stavební nelinearity (hysteronu) je využito charakteristiky vůle v převodech s nasycením tzv. *saturated backlash* operátoru (**Obr. 41a**).

Záběrové přímky jsou definovány vztahy:

$$\begin{aligned} y &= K(u - h) && \text{pro narůstající hodnotu vstupu} \\ y &= K(u + h) && \text{pro klesající hodnotu vstupu} \end{aligned} \quad (5.40)$$

Rovnice kladného a záporného nasycení jsou definovány vztahy:

$$\begin{aligned} y &= K_1 u + M && \text{pro kladné nasycení} \\ y &= K_1 u - M && \text{pro záporné nasycení} \end{aligned} \quad (5.41)$$



Obr. 41: 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:

$$y(k) = y(k-1) + K_1[u(k) - u(k-1)] \quad (5.42)$$

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

$$u_m = \frac{Kh + M}{K - K_1} \quad (5.43)$$

Pokud bude hodnota $u \in \langle -u_m, +u_m \rangle$, musí pro vstupní hodnoty u a výstupní hodnoty y platit obdobné podmínky konzistence jako v kapitole 5.4. Hodnoty hranic konzistence lze nejnadhěji definovat v bodech u_- , u_+ takto:

$$\begin{aligned} u_- &= \frac{y - K_1 u - Kh}{K - K_1} \\ u_+ &= \frac{y - K_1 u + Kh}{K - K_1} \end{aligned} \quad (5.44)$$

za podmínky, že $-u_m < u_- < u_+ < u_m$. Hodnota výstupu y_k z hysteronu v časových okamžicích k bude definována takto:

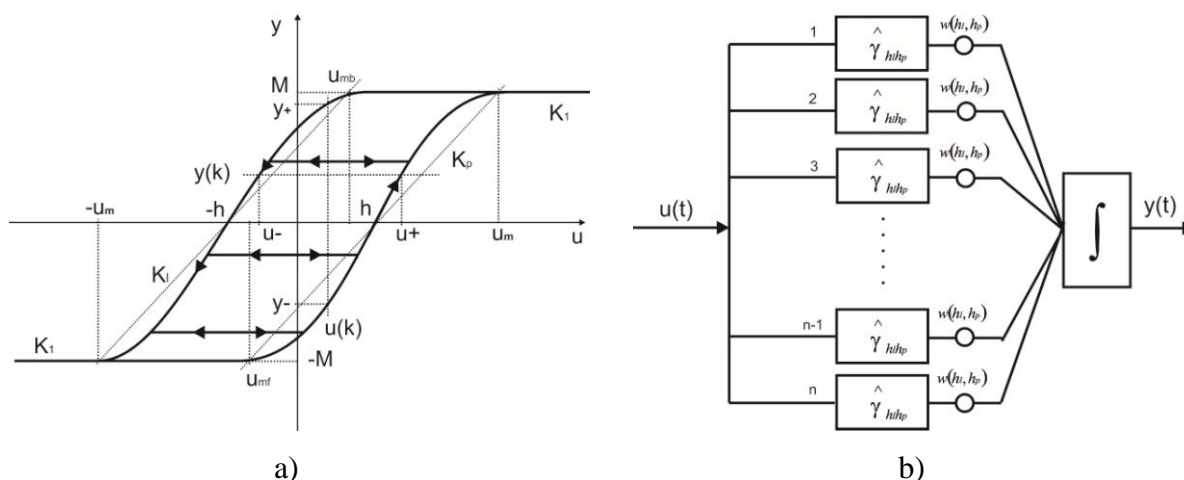
$$\begin{aligned}
 y(k) &= K_1 u(k) + M && \text{pro } u(k) \geq u_m \\
 y(k) &= K_1 u(k) - M && \text{pro } u(k) \leq -u_m \\
 y(k) &= K(u(k) - h) && \text{pro } u_+ \leq u(k) < u_m \\
 y(k) &= K(u(k) + h) && \text{pro } -u_m \leq u(k) < u_- \\
 y(k) &= y(k-1) + K_1[u(k) - u(k-1)] && \text{pro } u_- < u(k) < u_+
 \end{aligned} \tag{5.45}$$

Hodnota výstupu y z MPI modelu je dána identicky, vzhledem k původnímu modelu, a to vztahem (5.36). Princip stanovení vah jednotlivých hysteronů je rovněž totožný.

5.6 NÁVRH VLASTNÍHO MODELU

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

Na základě teoretických předpokladů, rozebraných v kapitolách 5.3 až 5.5, 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, obdobně jako v kapitole 5.2. 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. 42a**, struktura vlastního modelu pak na **Obr. 42b**.



Obr. 42: a) Charakteristika typu „Modifikovaná vůle v převodech s nasycením“, b) Blokové schéma CMPI modelu.

Záběrové přímky jsou definovány vztahy:

$$\begin{aligned} y &= K_p \left[\cos \left(\pi \frac{u - u_{mf}}{u_m - u_{mf}} \right) + \pi \right] \quad \text{pro narůstající hodnotu vstupu} \\ y &= K_l \left[\cos \left(\pi \frac{u - u_m}{u_{mb} - u_m} \right) + \pi \right] \quad \text{pro klesající hodnotu vstupu} \end{aligned} \quad (5.46)$$

Rovnice kladného a záporného nasycení jsou definovány vztahy:

$$\begin{aligned} y &= K_1 u + M \quad \text{pro kladné nasycení} \\ y &= K_1 u - M \quad \text{pro záporné nasycení} \end{aligned} \quad (5.47)$$

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:

$$y(k) = y(k-1) + K_1[u(k) - u(k-1)] \quad (5.48)$$

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

$$u_m = \frac{Kh + M}{K - K_1} \quad (5.49)$$

Pokud bude hodnota $u \in \langle -u_m, +u_m \rangle$, musí pro vstupní hodnoty u a výstupní hodnoty y platit obdobné podmínky konzistence jako ve vztahu (5.44), za podmínky $-u_m < u_- < u_+ < u_m$.

Hodnota výstupu z hysteronu v časových okamžicích k bude definována takto:

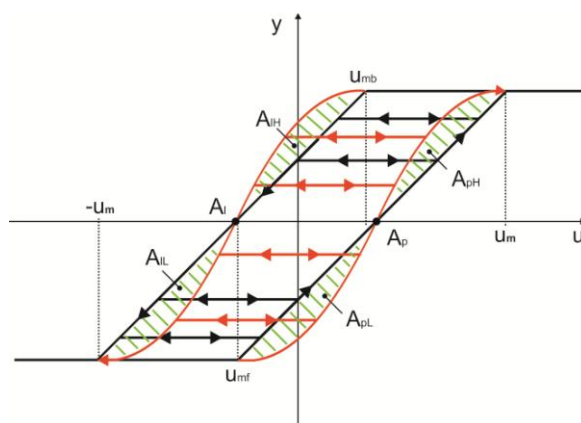
$$\begin{aligned} y(k) &= K_1 u(k) + M && \text{pro } u(k) \geq u_m \\ y(k) &= K_1 u(k) - M && \text{pro } u(k) \leq -u_m \\ y(k) &= K_p \left[\cos \left(\pi \frac{u(k) - u_{mf}}{u_m - u_{mf}} \right) + \pi \right] && \text{pro } u_+ \leq u(k) < u_m \\ y(k) &= K_l \left[\cos \left(\pi \frac{u(k) - u_m}{u_{mb} - u_m} \right) + \pi \right] && \text{pro } -u_m \leq u(k) < u_- \\ y(k) &= y(k-1) + K_1[u(k) - u(k-1)] && \text{pro } u_- < u(k) < u_+ \end{aligned} \quad (5.50)$$

Hodnota výstupu y z CMPI modelu je dána identicky obdobně vzhledem k původnímu Prandtl-Ishlinského modelu a to vztahem (5.36). Princip stanovení vah jednotlivých hysteronů je rovněž totožný.

Pro možnost optimalizace navrženého hysteronu (**Obr. 42a**) jsou zavedeny pomocné parametry A_p , A_l . Tyto parametry jsou definovány vztahy (5.51) a (3.1) a reprezentují asymetričnost přepočtení charakteristiky vůči její ose, která prochází body u_{mf} , u_m respektive u_{mb} , $-u_m$ (**Obr. 43**) CMPI modelu. Definováním parametrů A_p , A_l je tedy stanovena určitá část goniometrické funkce kosinus, použitá jako přepočtení charakteristika hysteronu.

$$A_p = \frac{A_{pH}}{A_{pL}} \quad (5.51)$$

$$A_l = \frac{A_{lH}}{A_{lL}} \quad (5.52)$$



Obr. 43: 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 hysteryony příslušného modelu.

5.7 SIMULACE A VZÁJEMNÉ POROVNÁNÍ MODELŮ

Z hlediska rozdělení druhů hysterezí na LM a NM, diskutovaného v kapitole 5, 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 3.4.2. V rámci porovnání nebude zařazen původní PI model, u něž absence kladné respektive záporné saturace fakticky eliminuje jeho relevantní použití.

Pro možnost porovnání výsledků simulací vybraných modelů, diskutovaných v kapitolách 5.3 až 5.6, budou tyto modely upraveny pomocí odpovídajícího přepisu základních matematických vztahů. Princip výpočtu výstupů jednotlivých modelů pak lze postupnými úpravami přepsat do zobecněného vztahu (5.53):

$$y = \sum_{S^+} \hat{Y}_{h_l h_p} w_{h_l h_p} + \sum_{S^-} \hat{Y}_{h_l h_p} w_{h_l h_p} \quad (5.53)$$

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 (5.54)

$$y(k) = \sum_{S^+(k)} \hat{Y}_{h_l h_p} w_{h_l h_p} + \sum_{S^-(k)} \hat{Y}_{h_l h_p} w_{h_l h_p} \quad (5.54)$$

5.7.1 Simulace

Pro potřeby jednotlivých simulací budou stanovena následující kritéria. 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 (5.55):

$$\sigma(k) = |y_m(k) - y_r(k)| \quad (5.55)$$

respektive jako suma těchto hodnot (5.56).

$$\Delta = \sum_{k=1}^n \sigma(k) \quad (5.56)$$

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 3.4.2, 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. 21**, 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. 20**), popsané v kapitole 3.4. Na základě předpokladu výskytu největších nepřesností modelů v oblasti okolo hodnot A_S , A_F , M_S , M_F (**Obr. 7**), bude pro simulace a související výpočty primárně použita charakteristika u1.

Průběhy, uvedené na **Obr. 44** až **Obr. 61**, zobrazují vybrané specifické části chování výstupů $y(k)$ jednotlivých modelů tak, aby byly zdůrazněny rozdíly v jejich přesnosti, definované vztahem (5.55). Průběhy, zobrazující chování výstupů $y(k)$ v celém sledovaném rozsahu jsou uvedeny na **Obr. 65** až **Obr. 73**, uvedených v **Příloze B** této práce.

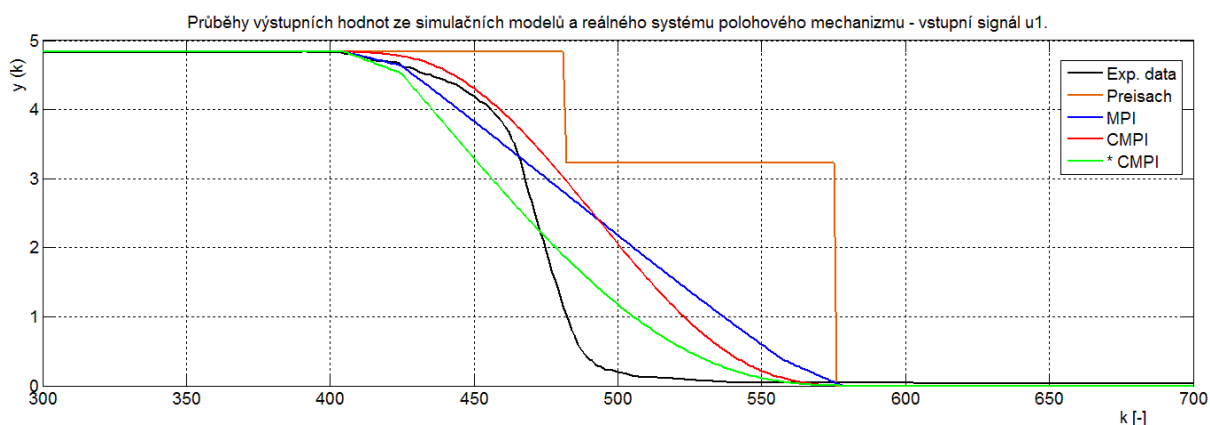
Pro možnost širšího porovnání přesnosti navrženého modelu s již existujícími modely, budou jednotlivé simulace provedeny pro různé hodnoty těchto tří základních parametrů:

- 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, $K_l \in \langle 0.5, 1, 2 \rangle$,

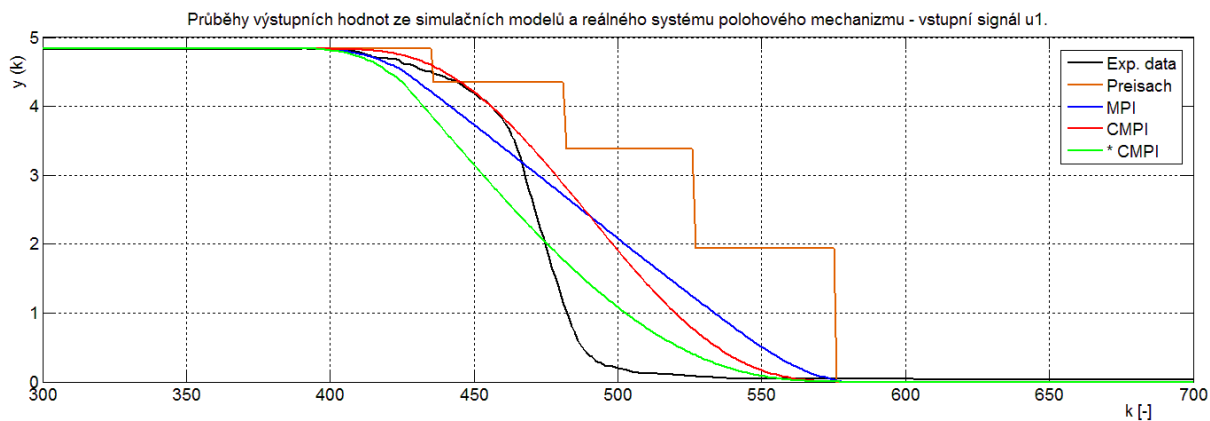
V souladu s definicí hysteronu Preisachova modelu budou hodnoty K_p , K_l odpovídat 90° sklonu přepočtení charakteristiky.

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

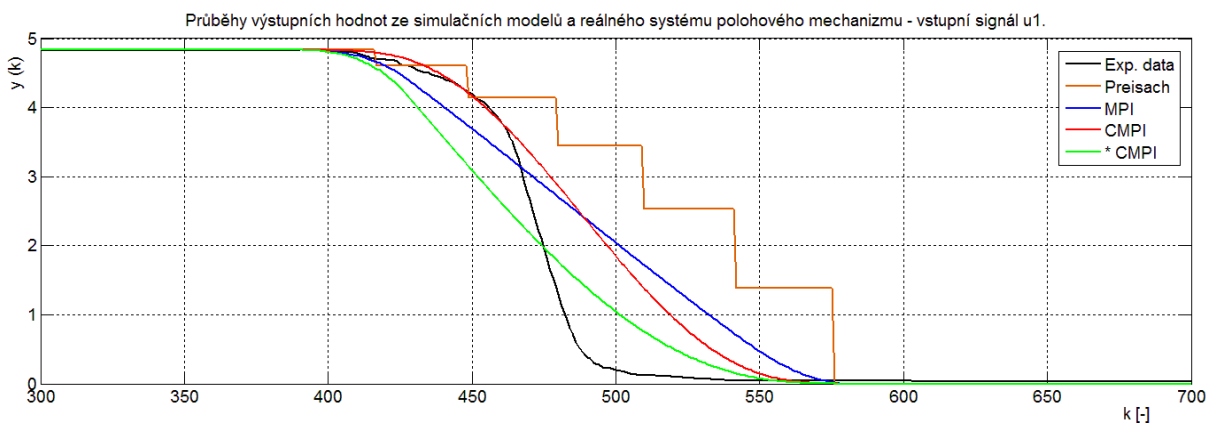
- $\langle -\pi, 0 \rangle$ pro CMPI model,
- $\langle -\pi, -\frac{\pi}{2} \rangle$ pro *CMPI model.



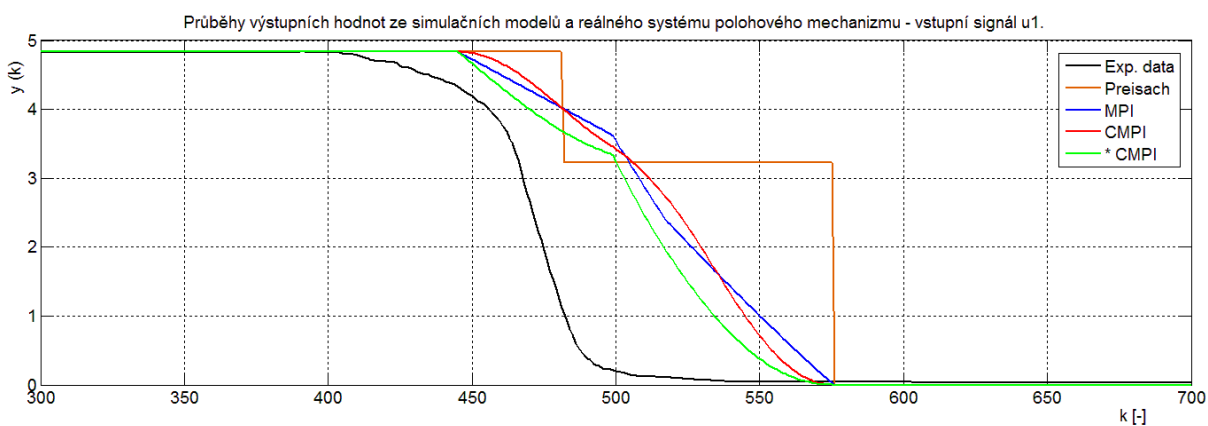
Obr. 44: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_1 , $K_p=K_l=0,5$, $N=3$.



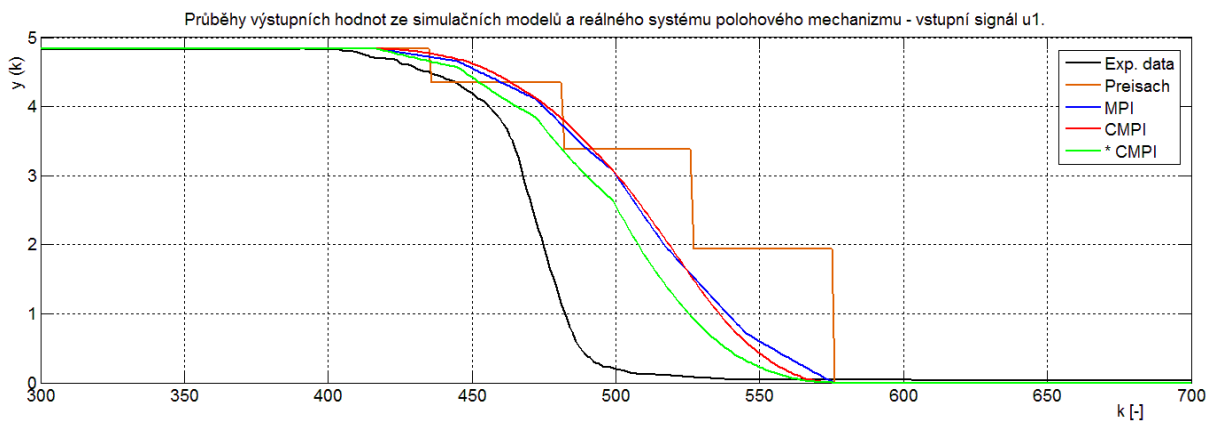
Obr. 45: Hodnoty výstupu z reálného systému a jednotlivých modelů - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_1 , $K_p=K_l=0,5$, $N=10$.



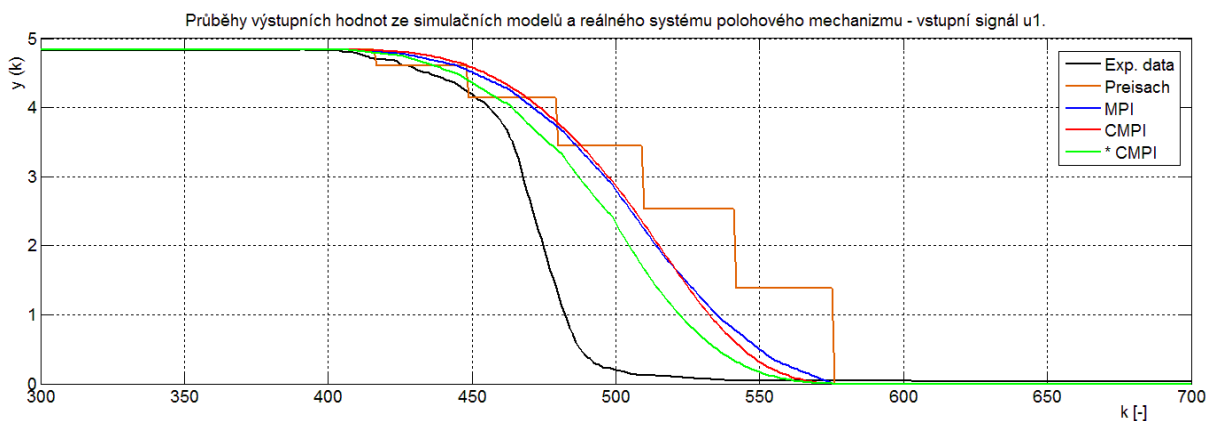
Obr. 46: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_1 , $K_p=K_I=0,5$, $N=21$.



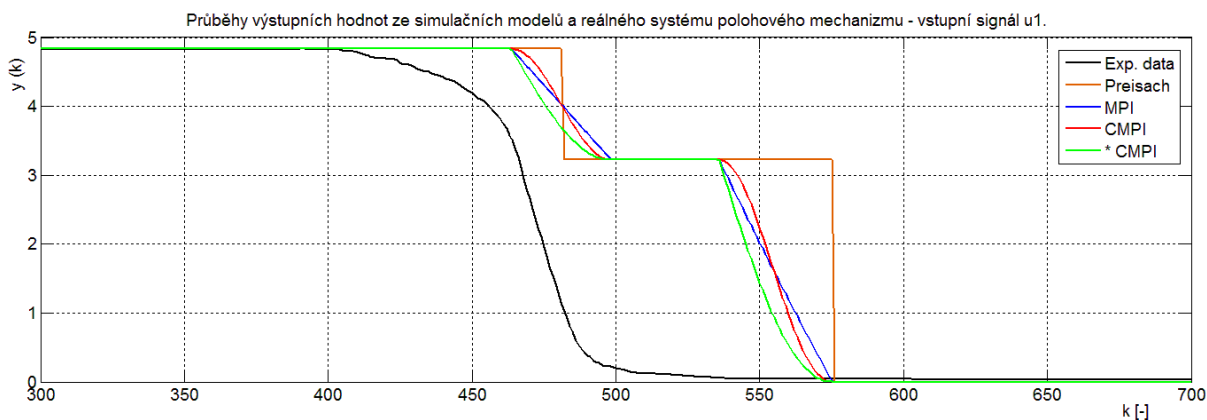
Obr. 47: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_1 , $K_p=K_I=1$, $N=3$.



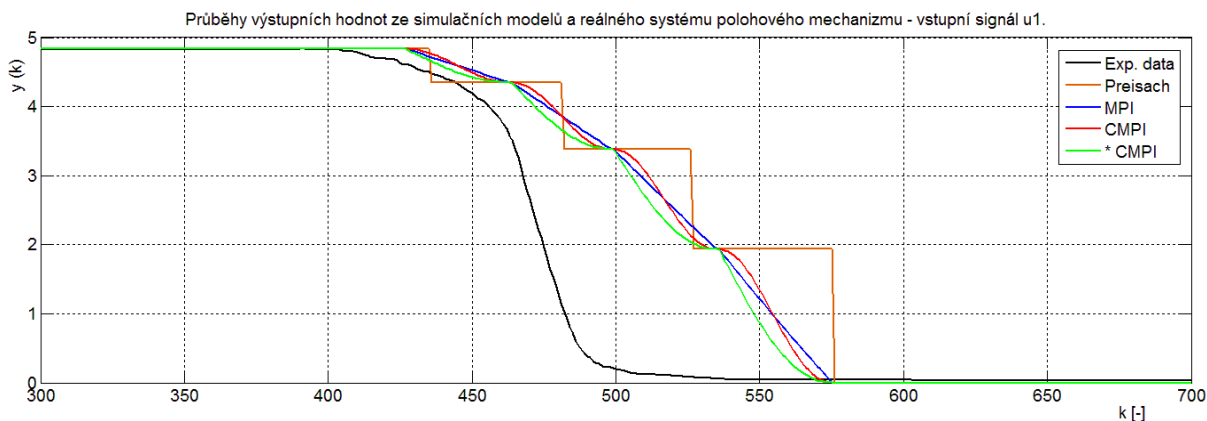
Obr. 48: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_1 , $K_p=K_I=1$, $N=10$.



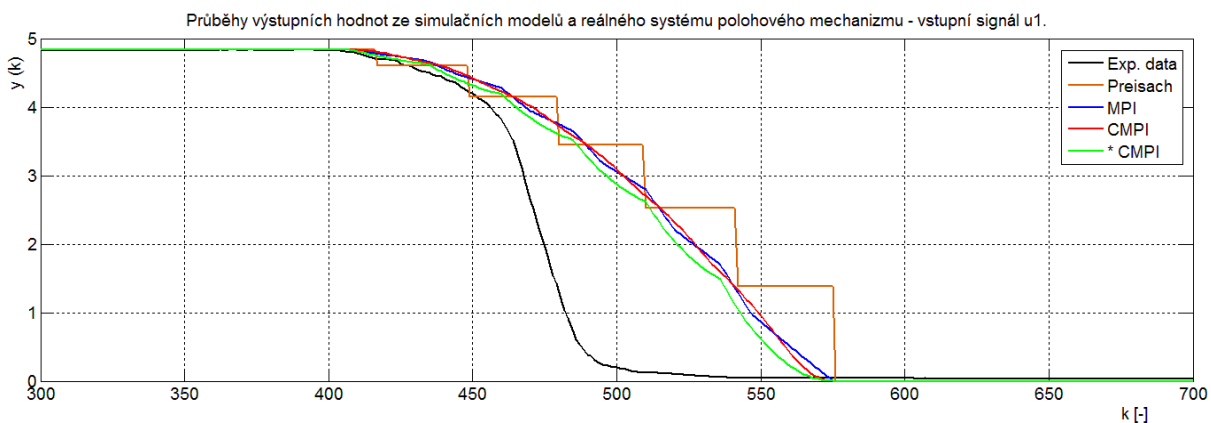
Obr. 49: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_1 , $K_p=K_I=1$, $N=21$.



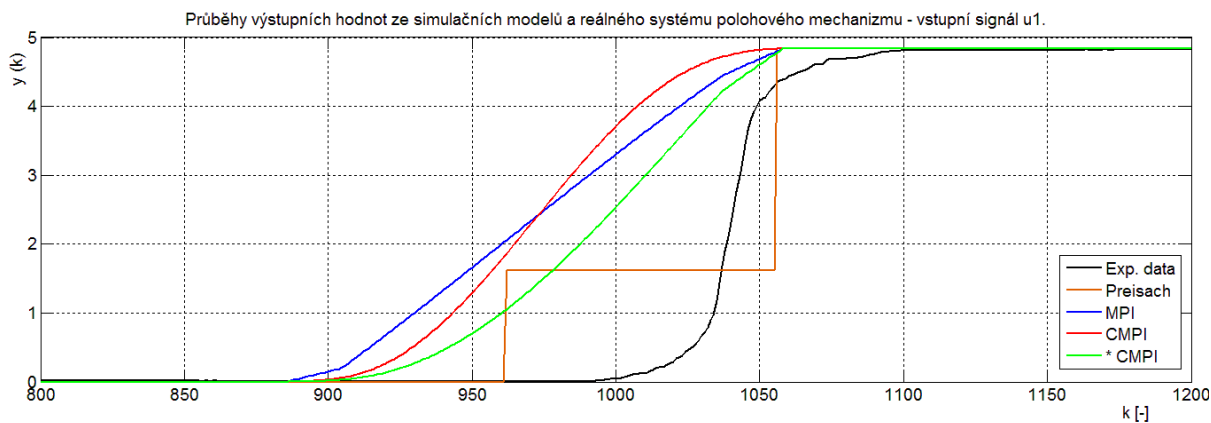
Obr. 50: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_1 , $K_p=K_I=2$, $N=3$.



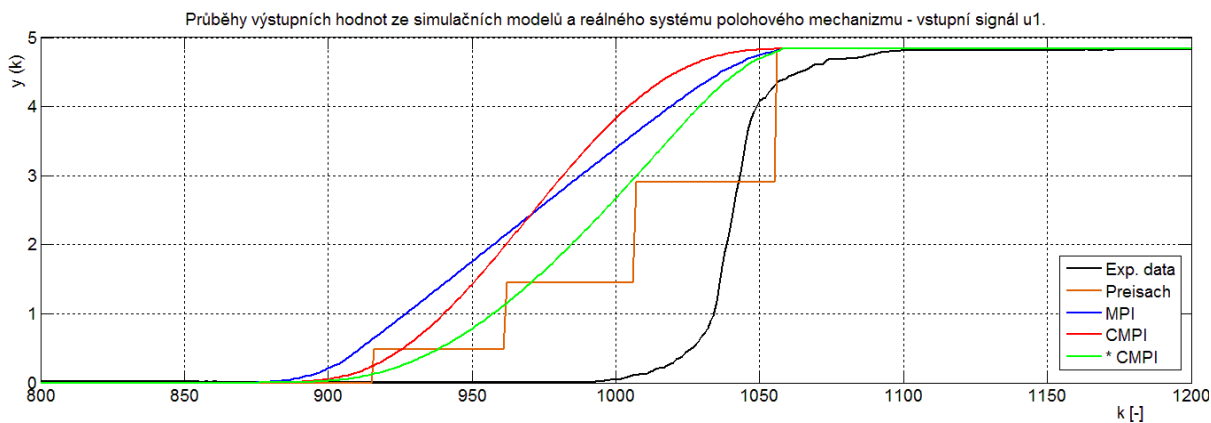
Obr. 51: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_1 , $K_p=K_I=2$, $N=10$.



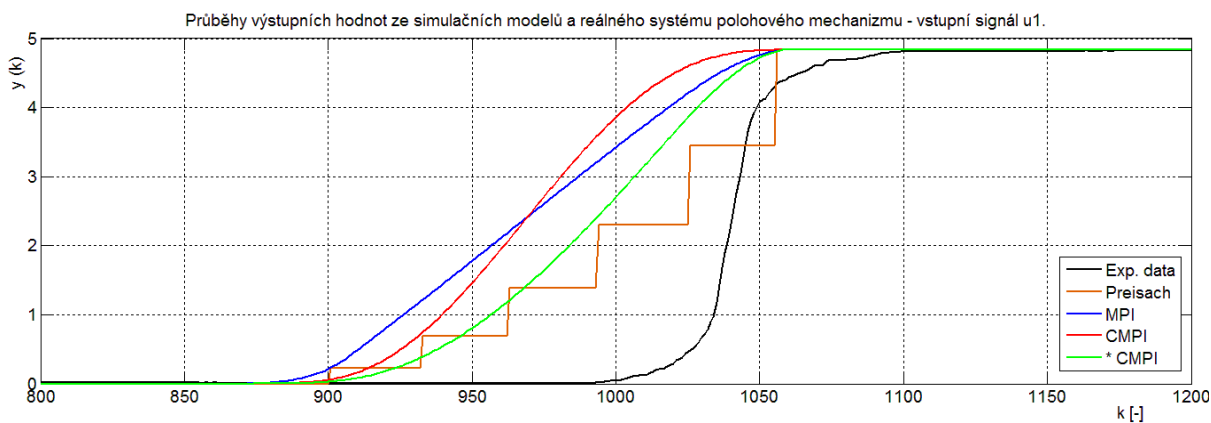
Obr. 52: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_1 , $K_p=K_I=2$, $N=21$.



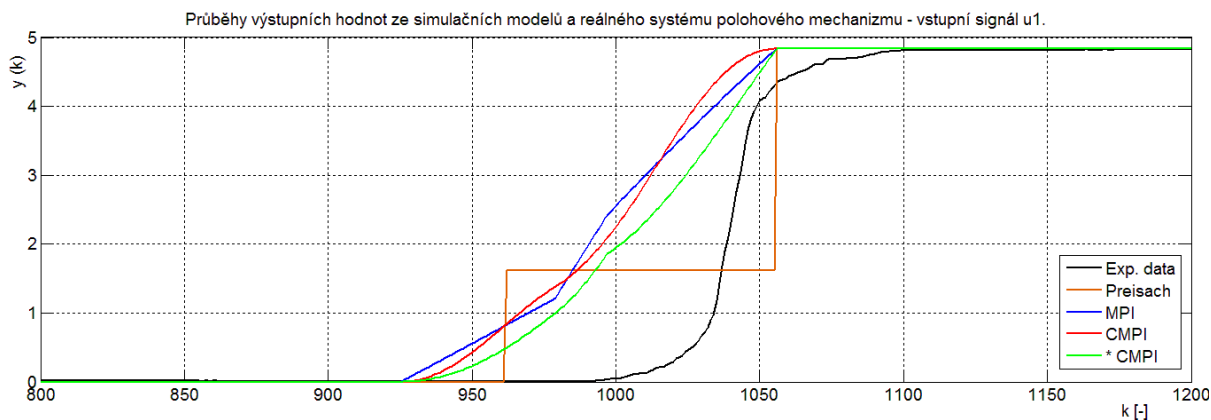
Obr. 53: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_2 , $K_p=K_I=0,5$, $N=3$.



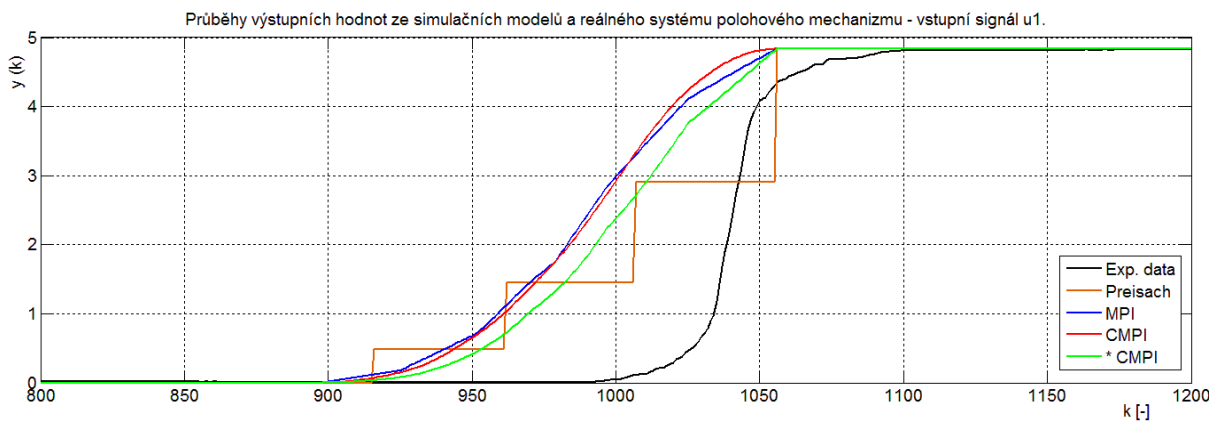
Obr. 54: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_2 , $K_p=K_I=0,5$, $N=10$.



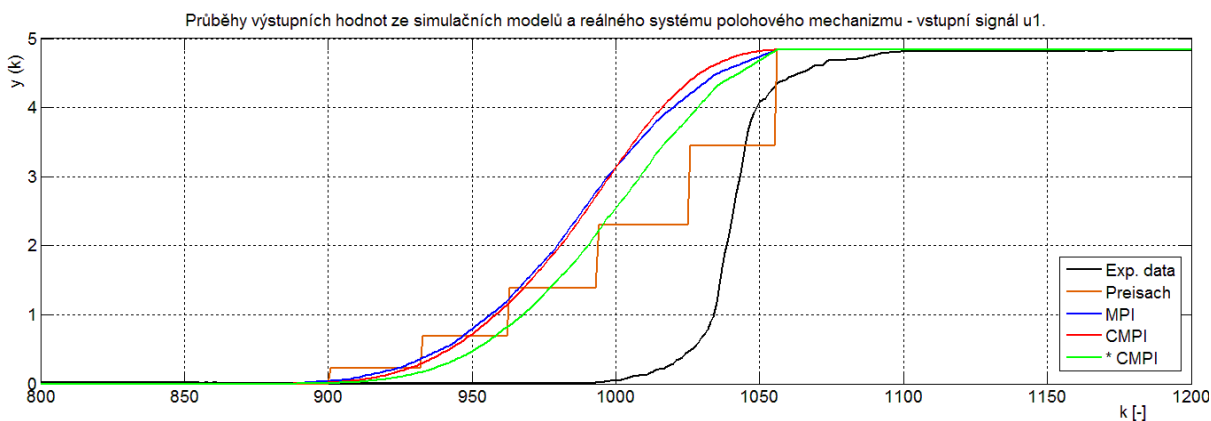
Obr. 55: Hodnoty výstupů z reálného systému a jednotlivých modelů - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_2 , $K_p=K_I=0,5$, $N=21$.



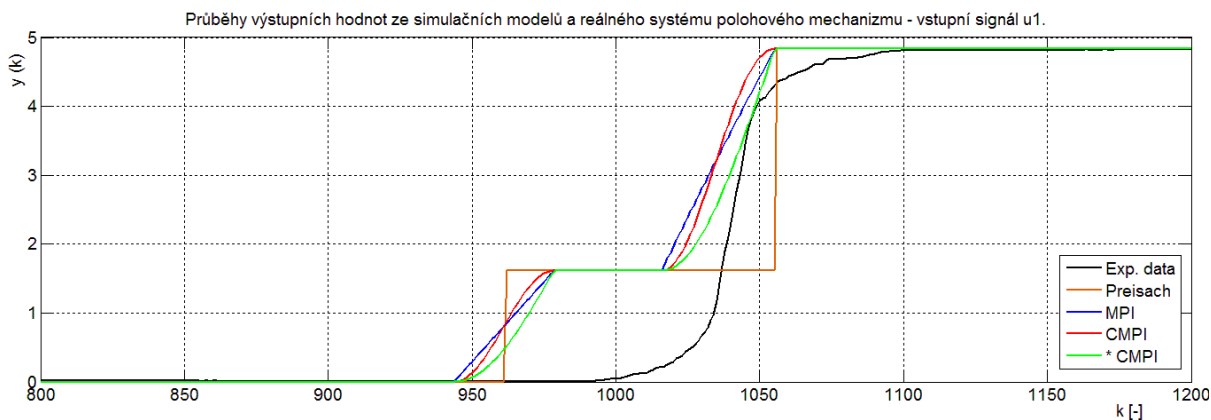
Obr. 56: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_2 , $K_p=K_I=1$, $N=3$.



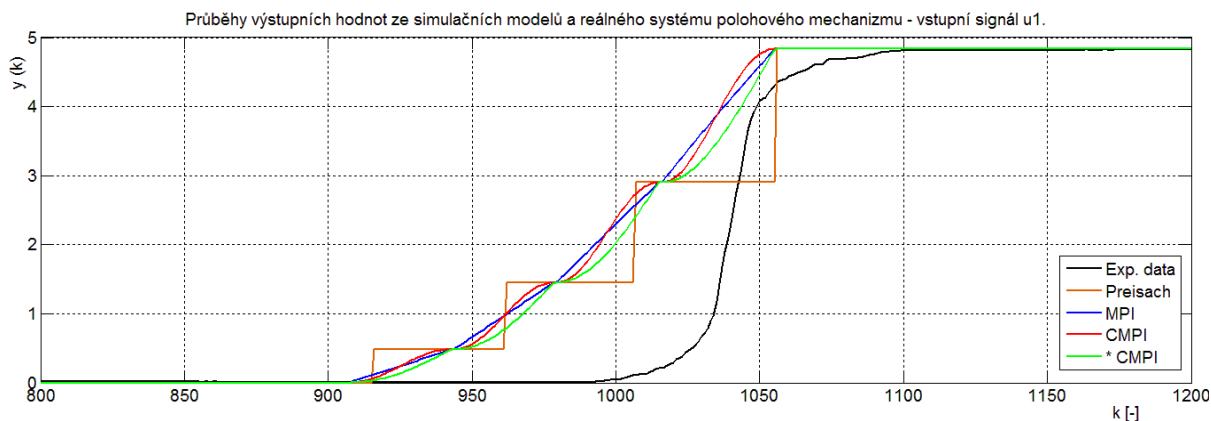
Obr. 57: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_2 , $K_p=K_I=1$, $N=10$.



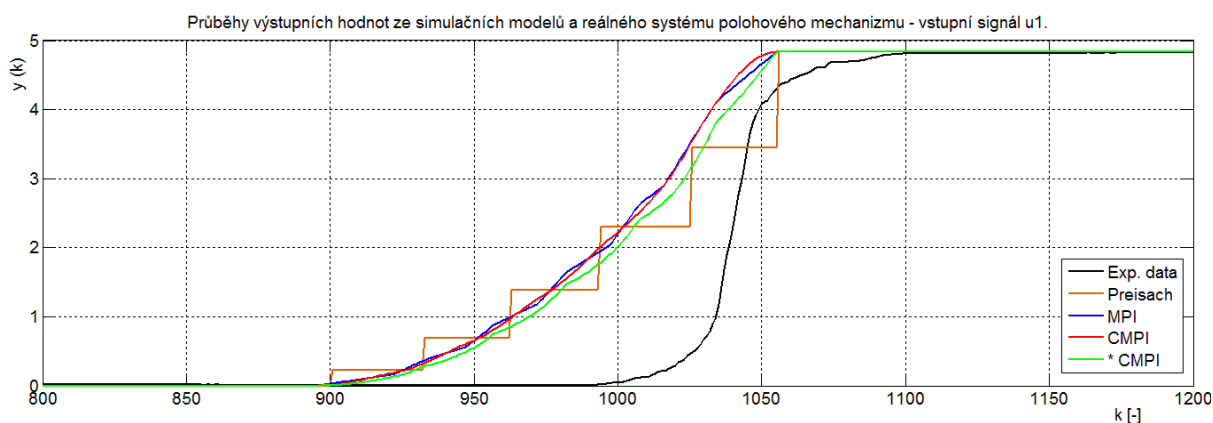
Obr. 58: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_2 , $K_p=K_I=1$, $N=21$.



Obr. 59: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_2 , $K_p=K_I=2$, $N=3$.



Obr. 60: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_2 , $K_p=K_I=2$, $N=10$.



Obr. 61: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , rozsah kroku k_2 , $K_p=K_l=2$, $N=21$.

5.7.2 Porovnání modelů

Výsledky provedených simulací vybraných modelů a jejich srovnání z pohledu přesnosti definované vtahem (3.1) jsou uvedeny v tabulkách **Tab. 5**, **Tab. 6** a **Tab. 7**. Zvýrazněné hodnoty představují nejlepší dosaženou přesnost konkrétního modelu při vybraném nastavení parametrů K_x a N , kde $K_x = K_l = K_p$.

Tab. 5: 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. 6: 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. 7: 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.

5.8 ZHODNOCENÍ NAVRŽENÉHO ŘEŠENÍ A VÝSLEDKŮ SIMULACÍ

Vyhodnocením výsledků, uvedených v kapitole 5.7.2, lze stanovit tyto závěry.

Pro systém, definovaný v kapitole 3.4.2, lze pomocí goniometrické funkce kosinus vytvořit model typu „main block“. Přesnost tohoto modelu, definovaná vztahem (5.56), je v porovnání s Preisachovým a MPI modelem větší. V případě nastavení rozsahu parametrů dle 5.7.1, 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. 8**).

Tab. 8: 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.

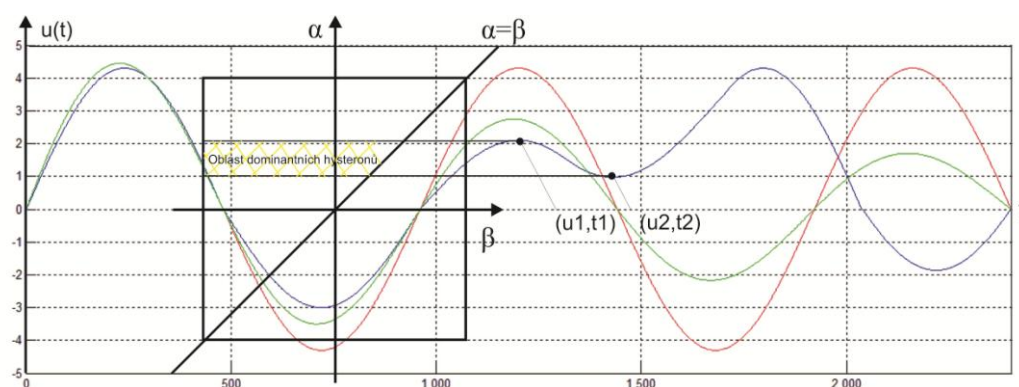
Přesnost modelů lze upravit nastavením různých hodnot pro K_p a K_l a to jak jednotlivě pro každý hysteron, tak i jednotně pro celý model.

5.9 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 5.3 a 5.4. 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. 62)** 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. 62: Identifikace dominantních hysteronů.

Kombinaci teoretického a empirického přístupu lze také použít následujícím způsobem.

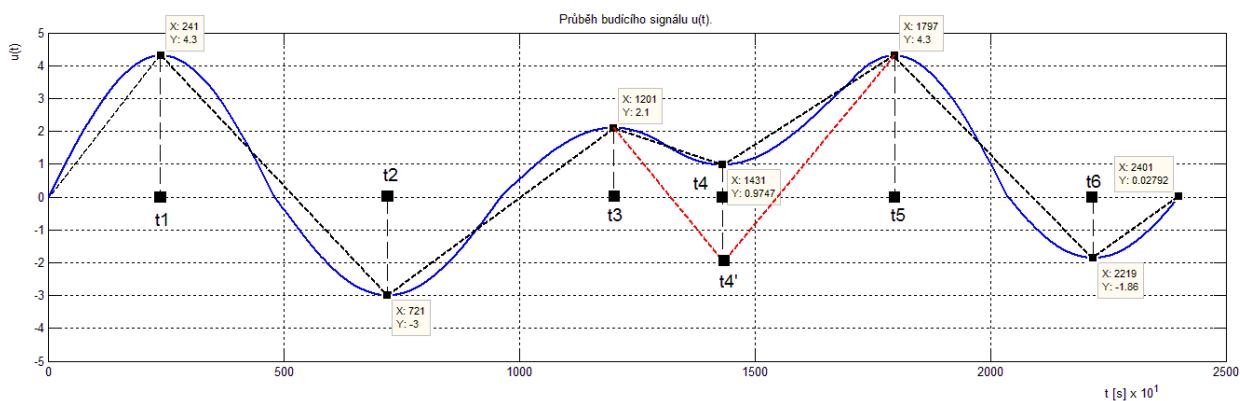
Na základě znalosti vstupního signálu $u(t)$ (**Obr. 20**), respektive jeho hodnot $u(k)$ v kroku k , můžeme identifikovat jednotlivé extrémy $t_1, t_2, t_3 \dots t_n$ vstupní funkce $u(t)$ a definovat je pomocí hodnot $[u(k), n]$ (**Obr. 63**).

V kapitole 5.1.1 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. 63**). Při globální korekci bude vstupní funkce $u(t)$ fakticky substituována například její linearizovanou podobou $u_l(t)$. V případě lokální

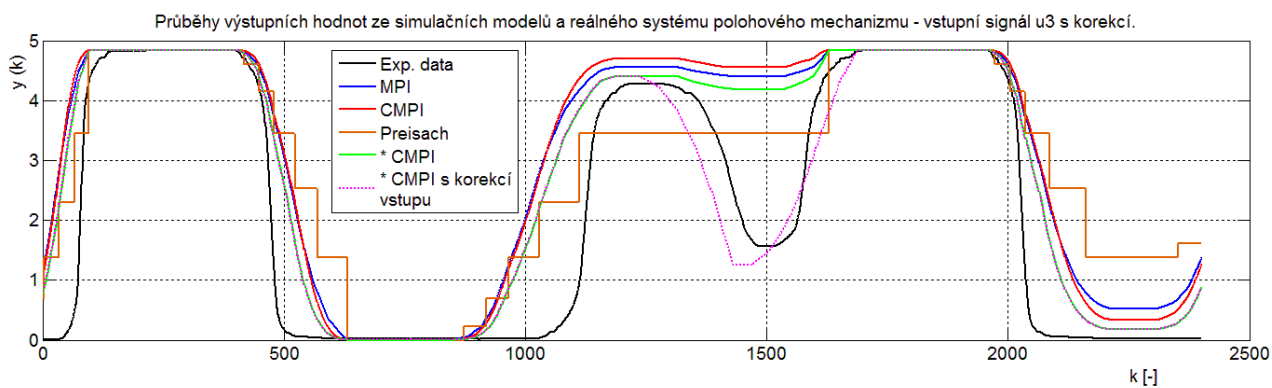
korekce bude vstupní funkce $u(t)$ substituována pouze ve vybraných oblastech např. $\langle t_3, t_4, t_5 \rangle$ (**Obr. 63**).

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



Obr. 63: 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. 64**, a numericky vyčíslena v **Tab. 9**.



Obr. 64: Úprava přesnosti modelu pomocí korekce vstupního signálu $u(t)$.

Tab. 9: 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 extrémy 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 (Příloha A). 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 (Příloha D). 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 SMA akčního členu o nejméně 14% (Příloha B). 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., TIAHJOWIDODO, 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]PFEIFFERA, CH., MAVROIDISA, C., BAR-COHENB, 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, Department 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.

8 PŘÍLOHA A

Název: Pohon servomechanizmu využívající teplotní deformace slitin kovů s tvarovou pamětí

Typ patentu: patent

Abstrakt: Pohon využívá SMA k vytvoření spojitého pohybu

Klíčová slova: servomechanizmus, kovy s tvarovou pamětí

Autoři: HODER, K.; VAŠINA, M.; ŠOLC, F.

Číslo patentu: 297963

Datum zápisu: 29.03.2007

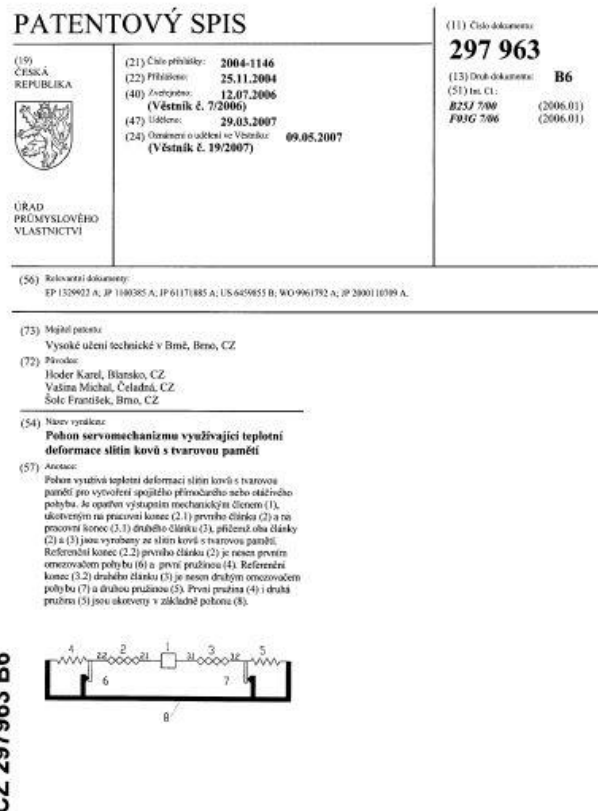
Datum skončení platnosti: 25.11.2024

Vydavatel: Úřad průmyslového vlastnictví ant. Čermáka 2a 160 68 Praha

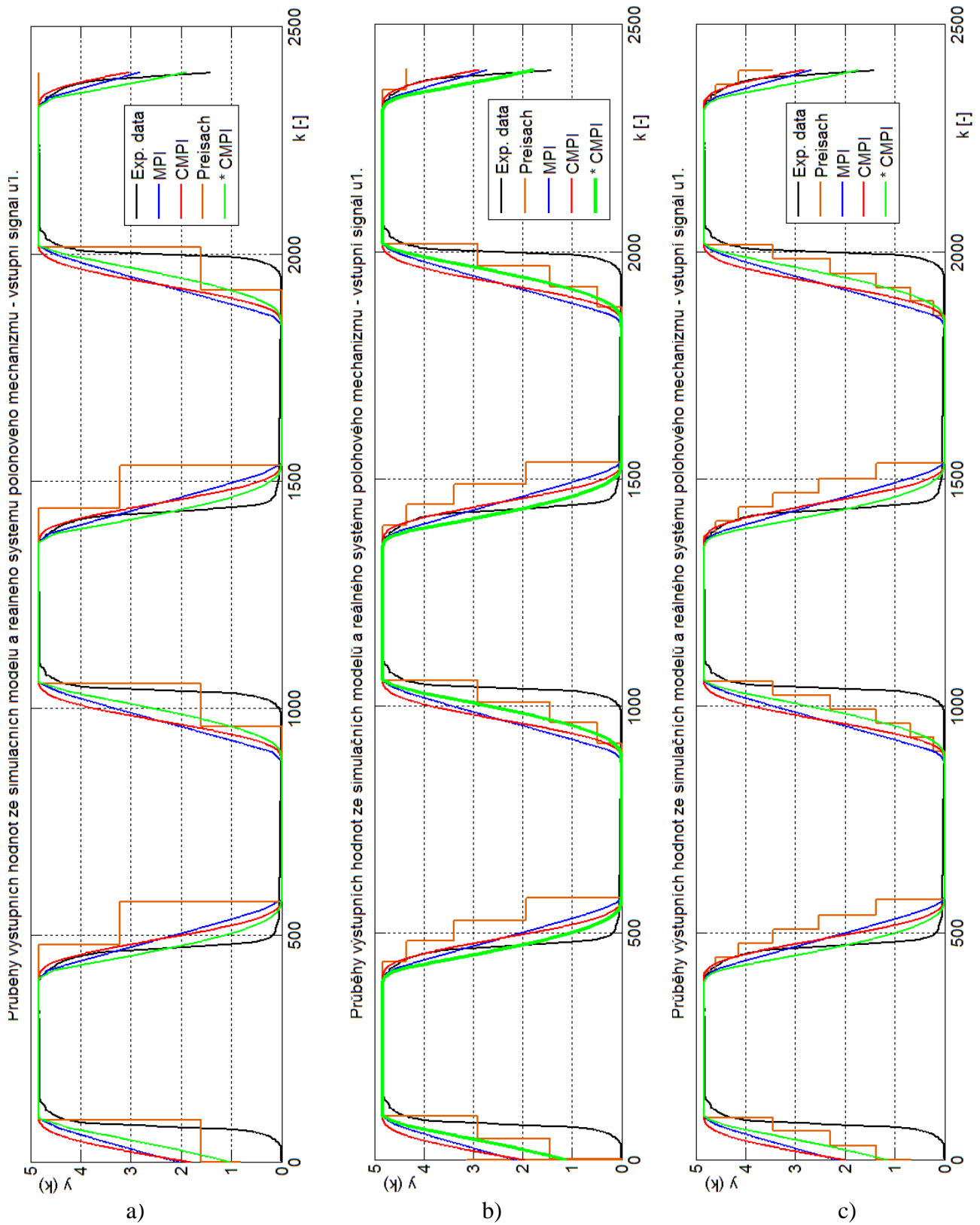
Vlastník: Vysoké učení technické v Brně

Možnosti využití: Využití výsledku jiným subjektem je možné bez nabytí licence (výsledek není licencován)

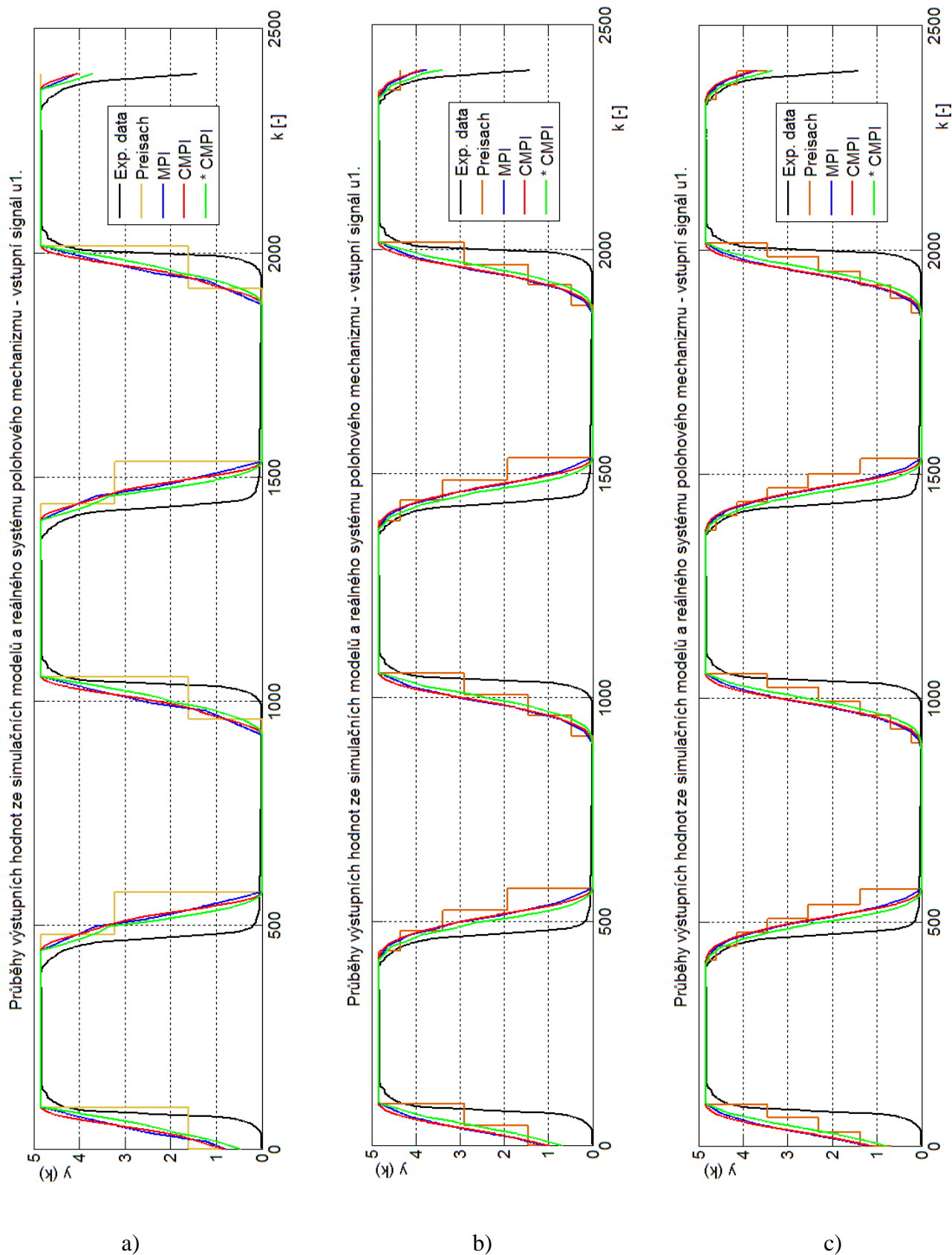
Licenční poplatek: Poskytovatel licence na výsledek nepožaduje licenční poplatek



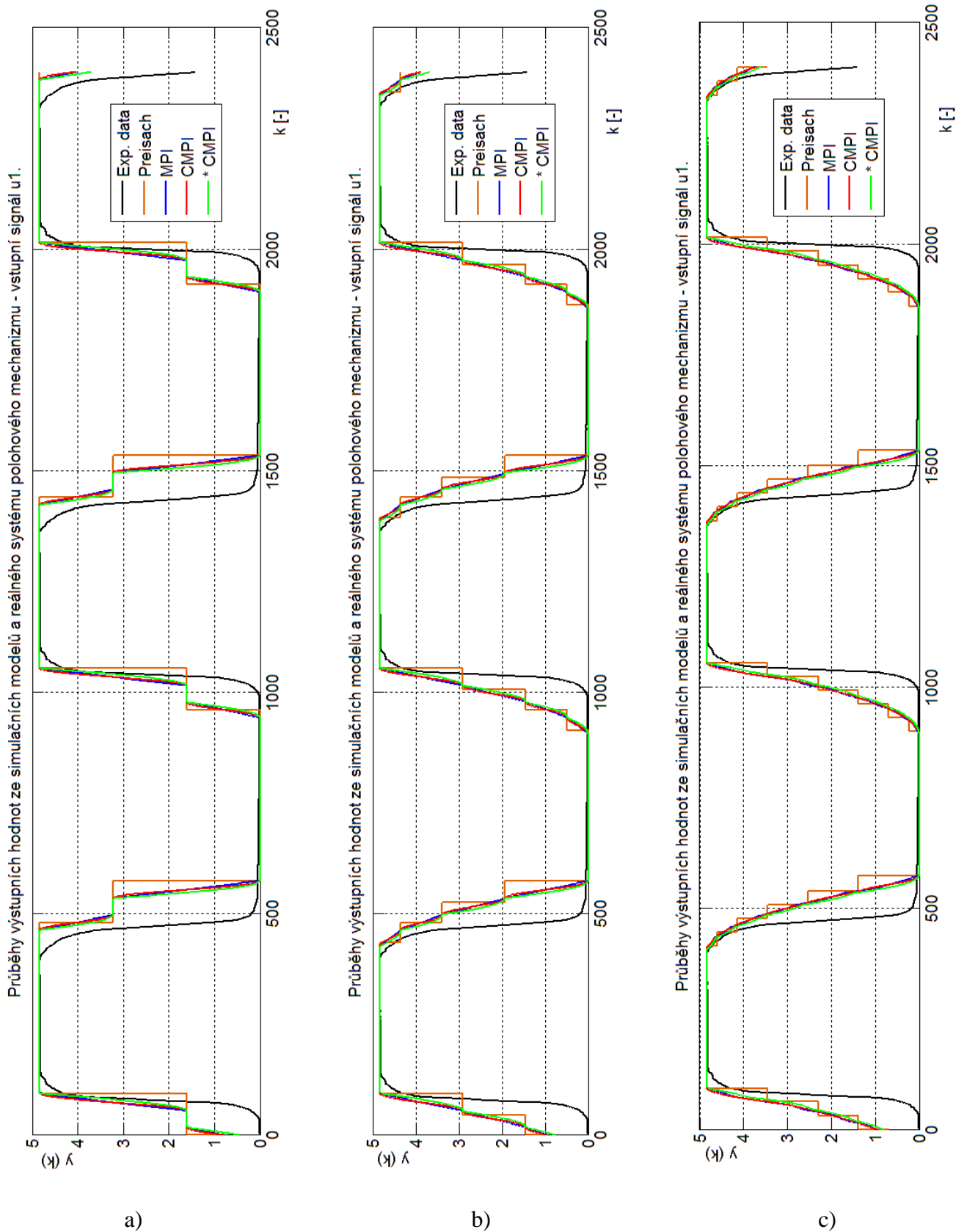
9 PŘÍLOHA B



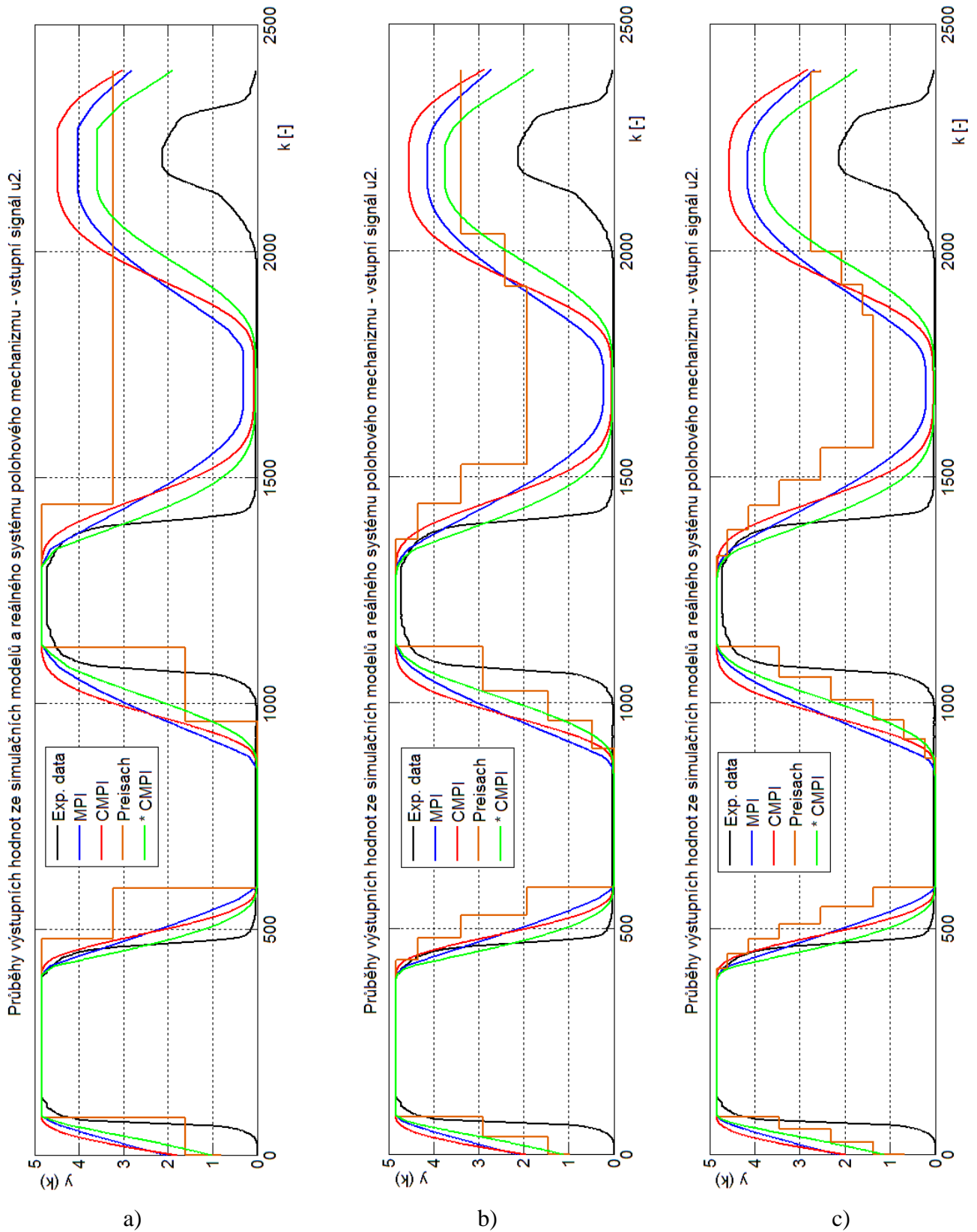
Obr. 65: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , $K_p=K_I=0,5$, a) $N=3$, b) $N=10$, c) $N=21$.



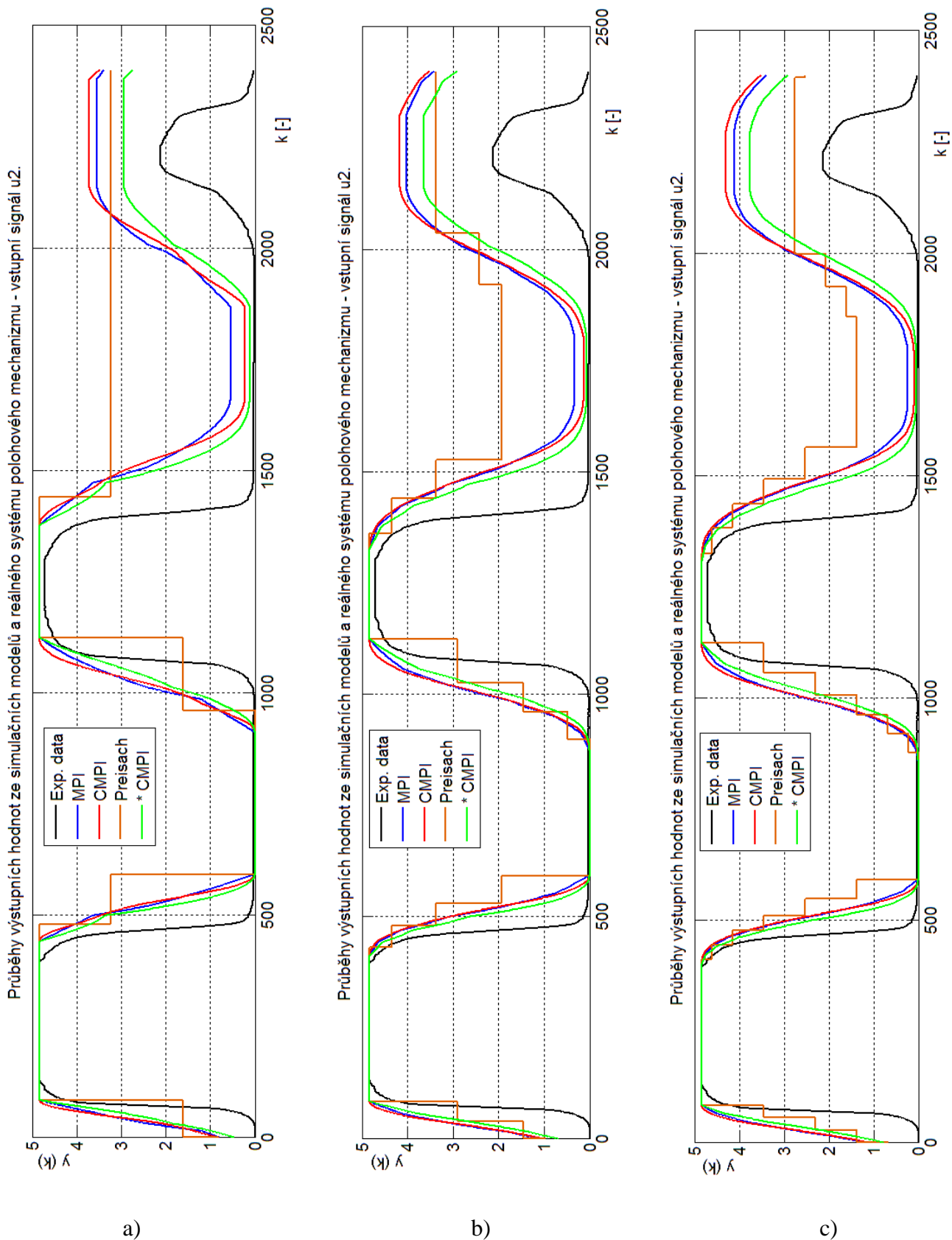
Obr. 66: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , $K_p=K_I=1$, a) $N=3$, b) $N=10$, c) $N=21$.



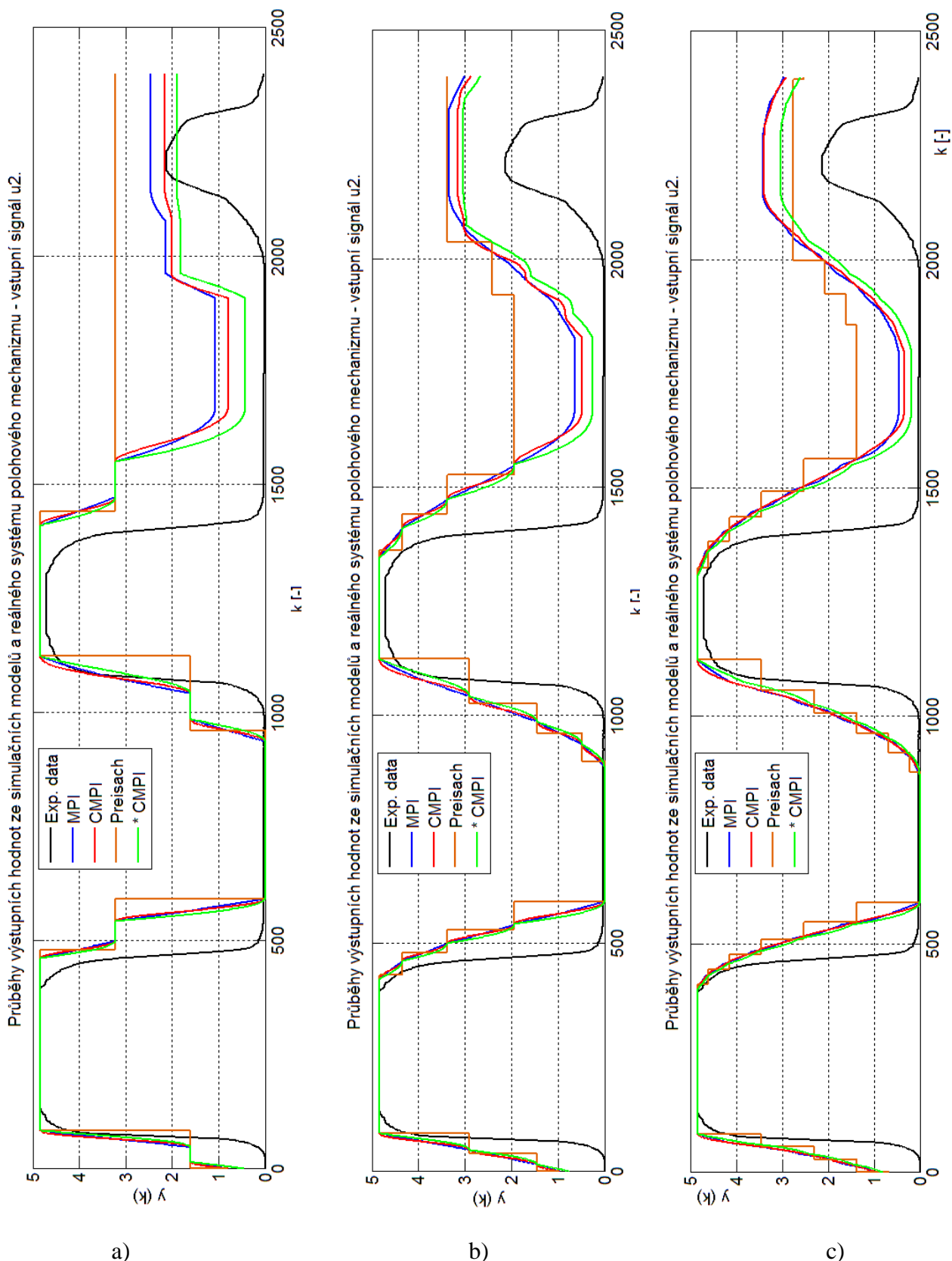
Obr. 67: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_1 , $K_p=K_I=2$, a) $N=3$, b) $N=10$, c) $N=21$.



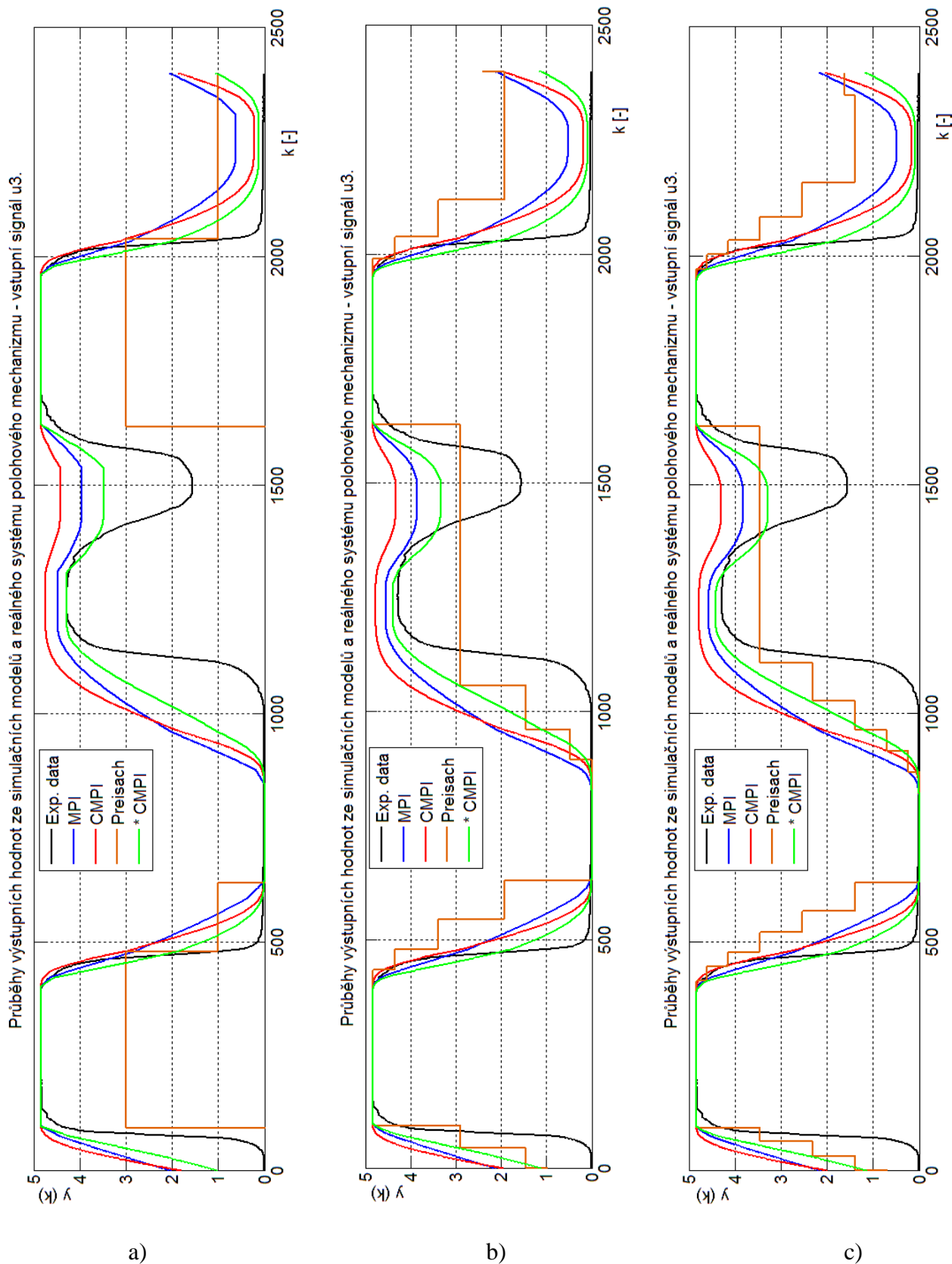
Obr. 68: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_2 , $K_p=K_I=0,5$, a) $N=3$, b) $N=10$, c) $N=21$.



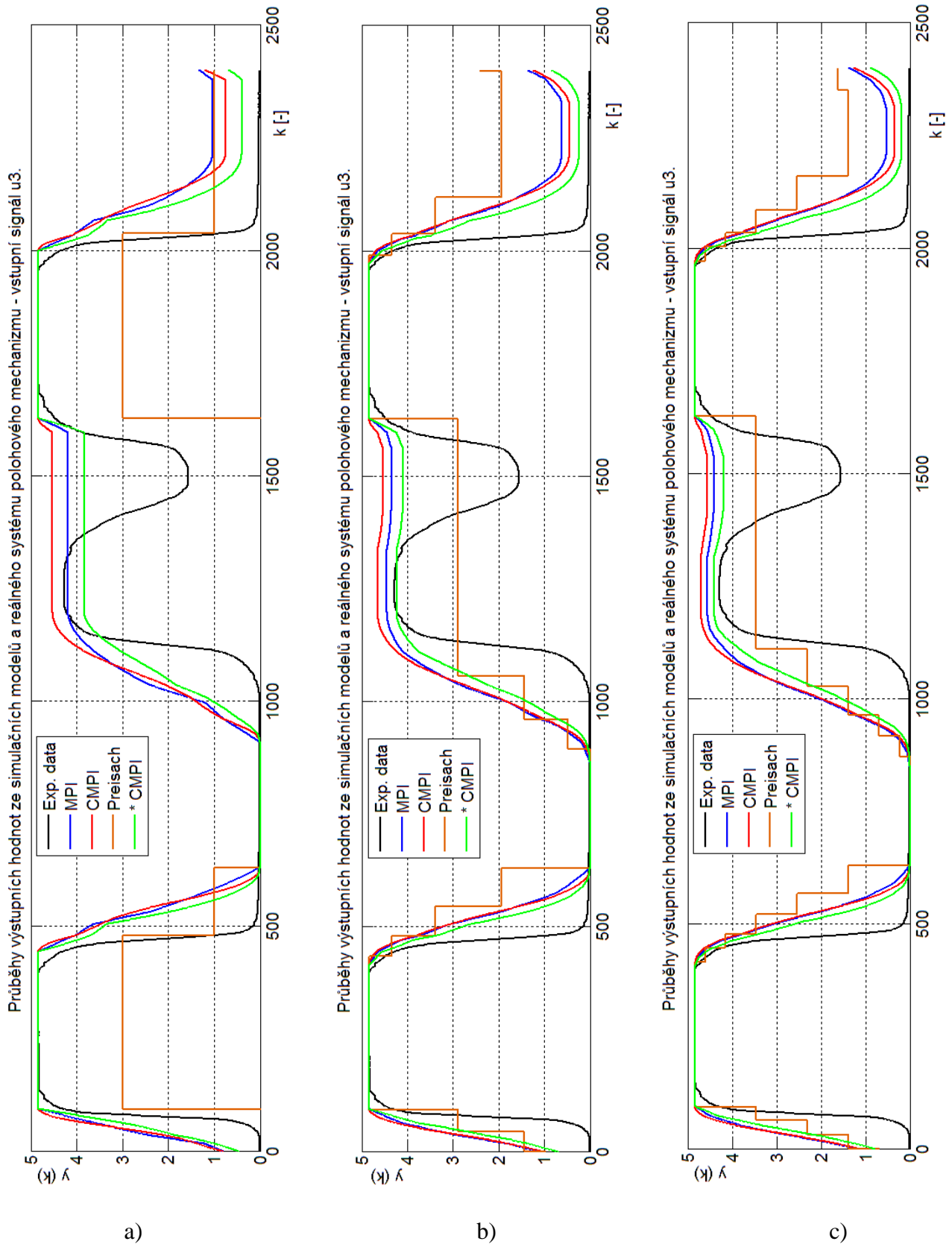
Obr. 69: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_2 , $K_p=K_I=1$, a) $N=3$, b) $N=10$, c) $N=21$.



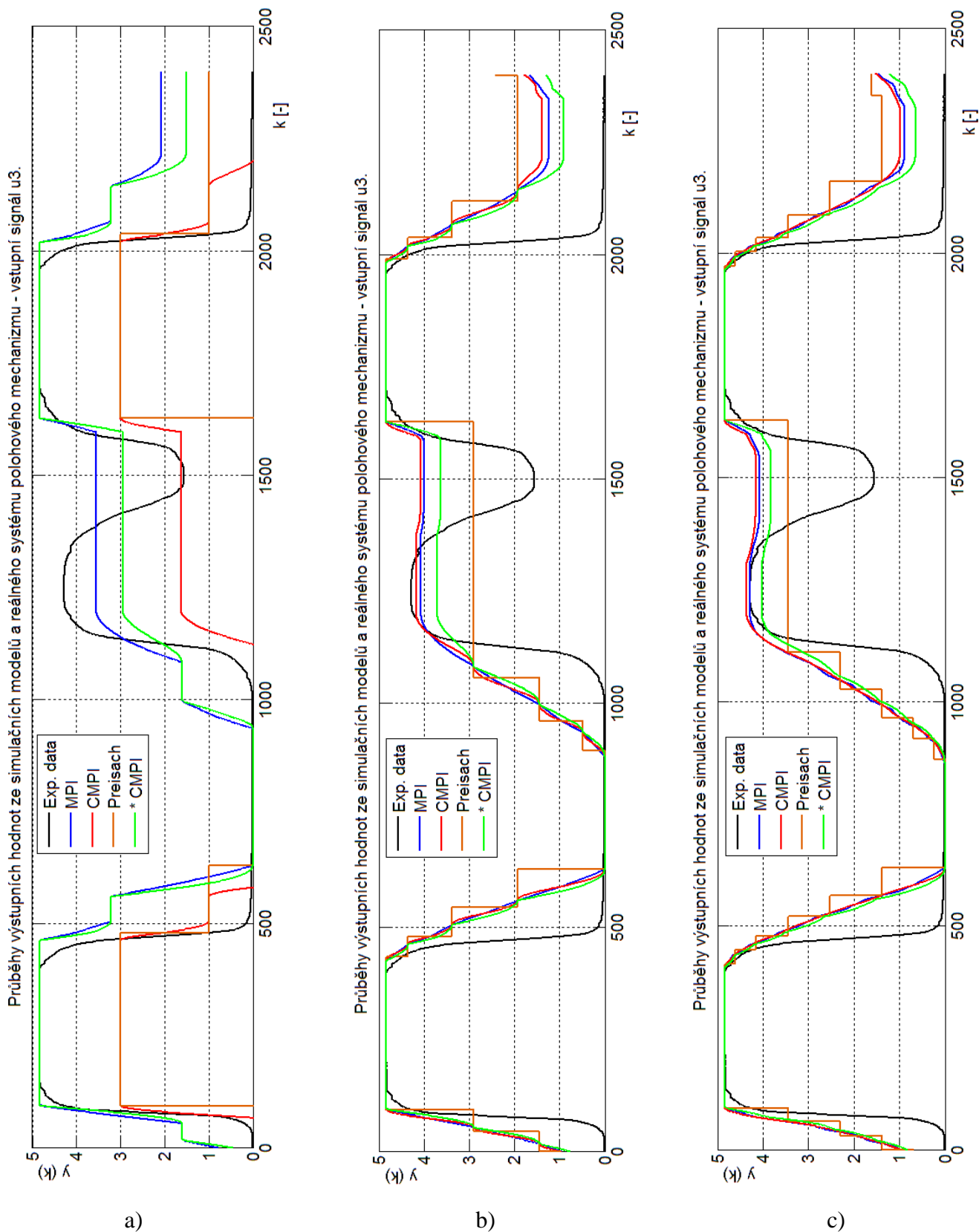
Obr. 70: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_2 , $K_p=K_I=2$, a) $N=3$, b) $N=10$, c) $N=21$.



Obr. 71: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_3 , $K_p=K_I=0,5$, a) $N=3$, b) $N=10$, c) $N=21$.



Obr. 72: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_3 , $K_p=K_I=1$, a) $N=3$, b) $N=10$, c) $N=21$.



Obr. 73: Hodnoty výstupů z jednotlivých modelů a reálného systému - vstupní signál u_3 , $K_p=K_I=2$, a) $N=3$, b) $N=10$, c) $N=21$.

10 PŘÍLOHA C

Hodnoty signálu $u_3(t)$ pro $t = 0:0.1:240$;

0,00000	0,02814	0,05629	0,08442	0,11256	0,14069	0,16882	0,19693	0,22504
0,25314	0,28123	0,30931	0,33737	0,36542	0,39345	0,42147	0,44947	0,47745
0,50540	0,53334	0,56126	0,58915	0,61701	0,64485	0,67266	0,70044	0,72819
0,75591	0,78360	0,81126	0,83888	0,86646	0,89401	0,92152	0,94899	0,97642
1,00380	1,03110	1,05840	1,08570	1,11290	1,14010	1,16720	1,19420	1,22130
1,24820	1,27510	1,30200	1,32880	1,35550	1,38220	1,40880	1,43540	1,46180
1,48830	1,51470	1,54100	1,56720	1,59340	1,61950	1,64550	1,67150	1,69740
1,72320	1,74890	1,77460	1,80020	1,82570	1,85120	1,87650	1,90180	1,92700
1,95210	1,97720	2,00210	2,02700	2,05180	2,07640	2,10100	2,12560	2,15000
2,17430	2,19850	2,22270	2,24670	2,27070	2,29450	2,31830	2,34190	2,36550
2,38890	2,41230	2,43550	2,45870	2,48170	2,50460	2,52740	2,55020	2,57280
2,59530	2,61760	2,63990	2,66210	2,68410	2,70600	2,72790	2,74960	2,77110
2,79260	2,81390	2,83520	2,85630	2,87720	2,89810	2,91880	2,93940	2,95990
2,98020	3,00050	3,02060	3,04050	3,06040	3,08010	3,09960	3,11910	3,13840
3,15760	3,17660	3,19550	3,21430	3,23290	3,25140	3,26970	3,28790	3,30600
3,32390	3,34170	3,35930	3,37680	3,39420	3,41140	3,42840	3,44540	3,46210
3,47870	3,49520	3,51150	3,52770	3,54370	3,55960	3,57530	3,59080	3,60630
3,62150	3,63660	3,65150	3,66630	3,68090	3,69540	3,70970	3,72390	3,73790
3,75170	3,76540	3,77890	3,79220	3,80540	3,81840	3,83130	3,84400	3,85650
3,86890	3,88110	3,89310	3,90500	3,91670	3,92820	3,93960	3,95080	3,96180
3,97270	3,98330	3,99390	4,00420	4,01440	4,02440	4,03420	4,04390	4,05330
4,06260	4,07180	4,08070	4,08950	4,09810	4,10660	4,11480	4,12290	4,13080
4,13850	4,14610	4,15350	4,16070	4,16770	4,17450	4,18120	4,18770	4,19400
4,20010	4,20600	4,21180	4,21740	4,22280	4,22800	4,23300	4,23790	4,24260
4,24700	4,25140	4,25550	4,25940	4,26320	4,26680	4,27020	4,27340	4,27640
4,27930	4,28200	4,28440	4,28670	4,28890	4,29080	4,29250	4,29410	4,29550
4,29670	4,29770	4,29850	4,29920	4,29960	4,29990	4,30000	4,29990	4,29960
4,29920	4,29850	4,29770	4,29670	4,29550	4,29410	4,29250	4,29080	4,28890
4,28680	4,28450	4,28200	4,27930	4,27650	4,27340	4,27020	4,26680	4,26320
4,25950	4,25550	4,25140	4,24710	4,24260	4,23790	4,23310	4,22800	4,22280
4,21740	4,21180	4,20610	4,20010	4,19400	4,18770	4,18120	4,17460	4,16770
4,16070	4,15350	4,14610	4,13860	4,13090	4,12300	4,11490	4,10660	4,09820
4,08960	4,08080	4,07180	4,06270	4,05340	4,04390	4,03430	4,02440	4,01440
4,00430	3,99390	3,98340	3,97270	3,96190	3,95080	3,93970	3,92830	3,91680
3,90510	3,89320	3,88120	3,86900	3,85660	3,84410	3,83140	3,81850	3,80550
3,79230	3,77900	3,76550	3,75180	3,73800	3,72400	3,70980	3,69550	3,68100
3,66640	3,65160	3,63670	3,62160	3,60630	3,59090	3,57540	3,55970	3,54380
3,52780	3,51160	3,49530	3,47880	3,46220	3,44550	3,42860	3,41150	3,39430
3,37690	3,35940	3,34180	3,32400	3,30610	3,28800	3,26980	3,25150	3,23300
3,21440	3,19560	3,17670	3,15770	3,13850	3,11920	3,09980	3,08020	3,06050
3,04070	3,02070	3,00060	2,98040	2,96000	2,93950	2,91890	2,89820	2,87740
2,85640	2,83530	2,81410	2,79270	2,77130	2,74970	2,72800	2,70620	2,68430

2,66220	2,64010	2,61780	2,59540	2,57290	2,55030	2,52760	2,50480	2,48180
2,45880	2,43570	2,41240	2,38910	2,36560	2,34210	2,31840	2,29470	2,27080
2,24690	2,22280	2,19870	2,17450	2,15010	2,12570	2,10120	2,07660	2,05190
2,02710	2,00230	1,97730	1,95230	1,92720	1,90200	1,87670	1,85130	1,82590
1,80040	1,77480	1,74910	1,72340	1,69750	1,67160	1,64570	1,61960	1,59350
1,56740	1,54110	1,51480	1,48840	1,46200	1,43550	1,40900	1,38230	1,35570
1,32890	1,30210	1,27530	1,24840	1,22140	1,19440	1,16730	1,14020	1,11310
1,08590	1,05860	1,03130	1,00400	0,97659	0,94916	0,92169	0,89418	0,86663
0,83905	0,81143	0,78377	0,75609	0,72837	0,70061	0,67283	0,64502	0,61718
0,58932	0,56143	0,53351	0,50558	0,47762	0,44964	0,42164	0,39363	0,36559
0,33754	0,30948	0,28140	0,25332	0,22522	0,19711	0,16899	0,14086	0,11273
0,08460	0,05646	0,02832	0,00012	-0,01951	-0,03915	-0,05878	-0,07841	-0,09803
-0,11766	-0,13727	-0,15688	-0,17649	-0,19609	-0,21567	-0,23525	-0,25482	-0,27438
-0,29393	-0,31346	-0,33298	-0,35249	-0,37198	-0,39145	-0,41091	-0,43035	-0,44977
-0,46918	-0,48856	-0,50792	-0,52726	-0,54658	-0,56587	-0,58514	-0,60439	-0,62361
-0,64280	-0,66196	-0,68110	-0,70021	-0,71929	-0,73833	-0,75735	-0,77633	-0,79528
-0,81419	-0,83307	-0,85192	-0,87073	-0,88950	-0,90823	-0,92692	-0,94558	-0,96419
-0,98276	-1,00130	-1,01980	-1,03820	-1,05660	-1,07500	-1,09330	-1,11150	-1,12980
-1,14790	-1,16600	-1,18410	-1,20210	-1,22010	-1,23800	-1,25590	-1,27370	-1,29140
-1,30910	-1,32670	-1,34430	-1,36180	-1,37930	-1,39670	-1,41410	-1,43140	-1,44860
-1,46570	-1,48280	-1,49990	-1,51680	-1,53380	-1,55060	-1,56740	-1,58410	-1,60070
-1,61730	-1,63380	-1,65020	-1,66660	-1,68290	-1,69910	-1,71520	-1,73130	-1,74730
-1,76320	-1,77910	-1,79490	-1,81060	-1,82620	-1,84170	-1,85720	-1,87250	-1,88780
-1,90310	-1,91820	-1,93330	-1,94820	-1,96310	-1,97790	-1,99260	-2,00730	-2,02180
-2,03630	-2,05070	-2,06500	-2,07920	-2,09330	-2,10730	-2,12120	-2,13510	-2,14880
-2,16250	-2,17600	-2,18950	-2,20290	-2,21610	-2,22930	-2,24240	-2,25540	-2,26830
-2,28110	-2,29380	-2,30640	-2,31890	-2,33130	-2,34360	-2,35590	-2,36800	-2,38000
-2,39190	-2,40370	-2,41540	-2,42700	-2,43840	-2,44980	-2,46110	-2,47230	-2,48340
-2,49430	-2,50520	-2,51590	-2,52660	-2,53710	-2,54750	-2,55780	-2,56800	-2,57810
-2,58810	-2,59800	-2,60780	-2,61740	-2,62690	-2,63640	-2,64570	-2,65490	-2,66400
-2,67290	-2,68180	-2,69050	-2,69920	-2,70770	-2,71610	-2,72440	-2,73250	-2,74060
-2,74850	-2,75630	-2,76400	-2,77160	-2,77900	-2,78640	-2,79360	-2,80070	-2,80770
-2,81450	-2,82130	-2,82790	-2,83440	-2,84070	-2,84700	-2,85310	-2,85910	-2,86500
-2,87080	-2,87640	-2,88190	-2,88730	-2,89260	-2,89770	-2,90280	-2,90770	-2,91240
-2,91710	-2,92160	-2,92600	-2,93030	-2,93440	-2,93840	-2,94230	-2,94610	-2,94970
-2,95320	-2,95660	-2,95990	-2,96300	-2,96600	-2,96890	-2,97170	-2,97430	-2,97680
-2,97920	-2,98140	-2,98350	-2,98550	-2,98740	-2,98910	-2,99070	-2,99220	-2,99360
-2,99480	-2,99590	-2,99680	-2,99770	-2,99840	-2,99900	-2,99940	-2,99970	-2,99990
-3,00000	-2,99990	-2,99970	-2,99940	-2,99900	-2,99840	-2,99770	-2,99690	-2,99590
-2,99480	-2,99360	-2,99220	-2,99080	-2,98920	-2,98740	-2,98560	-2,98360	-2,98150
-2,97920	-2,97690	-2,97440	-2,97170	-2,96900	-2,96610	-2,96310	-2,96000	-2,95670
-2,95330	-2,94980	-2,94620	-2,94240	-2,93850	-2,93450	-2,93030	-2,92610	-2,92170
-2,91720	-2,91250	-2,90770	-2,90280	-2,89780	-2,89270	-2,88740	-2,88200	-2,87650
-2,87090	-2,86510	-2,85920	-2,85320	-2,84710	-2,84090	-2,83450	-2,82800	-2,82140
-2,81460	-2,80780	-2,80080	-2,79370	-2,78650	-2,77920	-2,77170	-2,76410	-2,75650

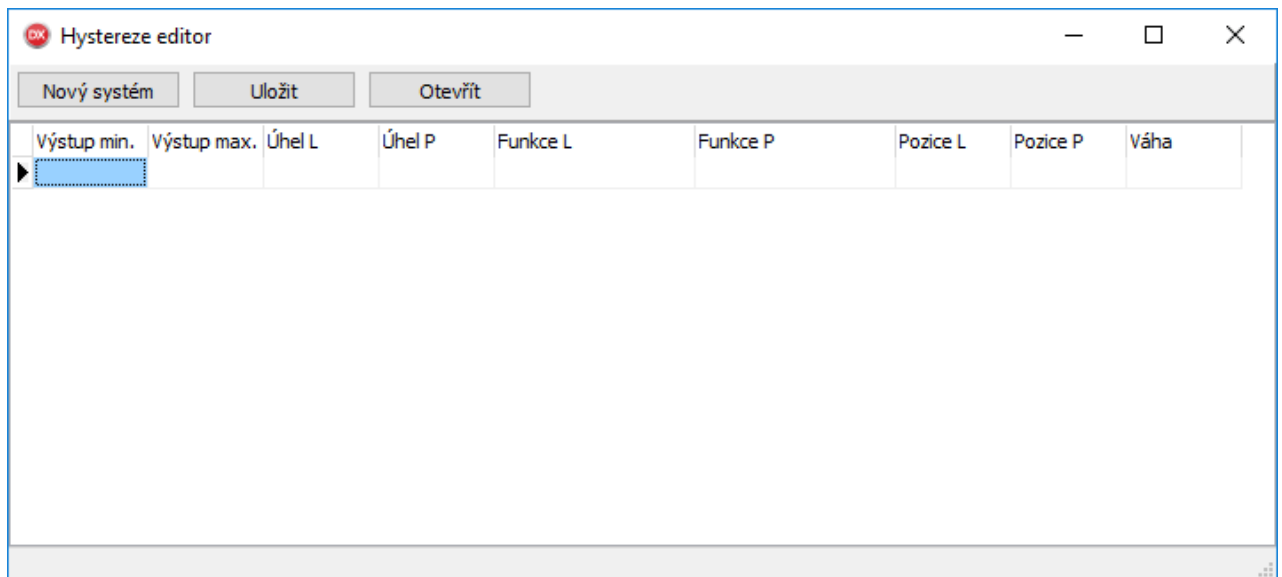
-2,74860	-2,74070	-2,73270	-2,72450	-2,71620	-2,70780	-2,69930	-2,69070	-2,68200
-2,67310	-2,66410	-2,65510	-2,64590	-2,63650	-2,62710	-2,61760	-2,60790	-2,59820
-2,58830	-2,57830	-2,56820	-2,55800	-2,54770	-2,53730	-2,52680	-2,51610	-2,50540
-2,49450	-2,48360	-2,47250	-2,46130	-2,45000	-2,43870	-2,42720	-2,41560	-2,40390
-2,39210	-2,38020	-2,36820	-2,35610	-2,34390	-2,33160	-2,31920	-2,30670	-2,29410
-2,28140	-2,26860	-2,25570	-2,24270	-2,22960	-2,21640	-2,20310	-2,18970	-2,17630
-2,16270	-2,14910	-2,13530	-2,12150	-2,10750	-2,09350	-2,07940	-2,06520	-2,05090
-2,03660	-2,02210	-2,00760	-1,99290	-1,97820	-1,96340	-1,94850	-1,93350	-1,91850
-1,90330	-1,88810	-1,87280	-1,85750	-1,84200	-1,82650	-1,81080	-1,79510	-1,77940
-1,76350	-1,74760	-1,73160	-1,71550	-1,69940	-1,68320	-1,66690	-1,65050	-1,63410
-1,61760	-1,60100	-1,58440	-1,56770	-1,55090	-1,53410	-1,51720	-1,50020	-1,48320
-1,46610	-1,44890	-1,43170	-1,41440	-1,39700	-1,37960	-1,36220	-1,34460	-1,32710
-1,30940	-1,29170	-1,27400	-1,25620	-1,23830	-1,22040	-1,20250	-1,18440	-1,16640
-1,14830	-1,13010	-1,11190	-1,09360	-1,07530	-1,05700	-1,03860	-1,02010	-1,00160
-0,98311	-0,96454	-0,94592	-0,92727	-0,90858	-0,88985	-0,87108	-0,85227	-0,83343
-0,81455	-0,79563	-0,77668	-0,75770	-0,73869	-0,71964	-0,70056	-0,68146	-0,66232
-0,64316	-0,62397	-0,60475	-0,58550	-0,56623	-0,54694	-0,52762	-0,50828	-0,48892
-0,46954	-0,45014	-0,43071	-0,41127	-0,39182	-0,37234	-0,35285	-0,33334	-0,31382
-0,29429	-0,27474	-0,25519	-0,23562	-0,21604	-0,19645	-0,17685	-0,15725	-0,13764
-0,11802	-0,09840	-0,07877	-0,05914	-0,03951	-0,01988	-0,00017	0,01357	0,02732
0,04106	0,05480	0,06854	0,08227	0,09601	0,10973	0,12346	0,13717	0,15089
0,16459	0,17829	0,19198	0,20566	0,21934	0,23300	0,24666	0,26030	0,27393
0,28755	0,30116	0,31476	0,32834	0,34191	0,35546	0,36900	0,38252	0,39603
0,40952	0,42299	0,43644	0,44988	0,46329	0,47669	0,49006	0,50342	0,51675
0,53006	0,54335	0,55661	0,56985	0,58307	0,59626	0,60943	0,62257	0,63568
0,64877	0,66182	0,67485	0,68785	0,70082	0,71377	0,72668	0,73956	0,75240
0,76522	0,77800	0,79075	0,80347	0,81615	0,82880	0,84141	0,85398	0,86652
0,87902	0,89148	0,90391	0,91629	0,92864	0,94095	0,95322	0,96544	0,97763
0,98977	1,00190	1,01390	1,02590	1,03790	1,04980	1,06170	1,07360	1,08530
1,09710	1,10880	1,12040	1,13200	1,14360	1,15510	1,16650	1,17790	1,18930
1,20060	1,21190	1,22310	1,23420	1,24530	1,25630	1,26730	1,27820	1,28910
1,29990	1,31070	1,32140	1,33210	1,34270	1,35320	1,36370	1,37410	1,38450
1,39480	1,40500	1,41520	1,42530	1,43540	1,44540	1,45530	1,46520	1,47500
1,48480	1,49450	1,50410	1,51370	1,52320	1,53260	1,54190	1,55120	1,56050
1,56960	1,57870	1,58780	1,59670	1,60560	1,61440	1,62320	1,63190	1,64050
1,64900	1,65750	1,66590	1,67430	1,68250	1,69070	1,69880	1,70690	1,71480
1,72270	1,73060	1,73830	1,74600	1,75360	1,76110	1,76850	1,77590	1,78320
1,79040	1,79760	1,80470	1,81160	1,81860	1,82540	1,83210	1,83880	1,84540
1,85190	1,85840	1,86470	1,87100	1,87720	1,88330	1,88940	1,89530	1,90120
1,90700	1,91270	1,91840	1,92390	1,92940	1,93480	1,94010	1,94530	1,95040
1,95550	1,96040	1,96530	1,97010	1,97480	1,97950	1,98400	1,98850	1,99290
1,99720	2,00140	2,00550	2,00950	2,01350	2,01730	2,02110	2,02480	2,02840
2,03190	2,03530	2,03870	2,04190	2,04510	2,04820	2,05120	2,05410	2,05690
2,05960	2,06220	2,06480	2,06730	2,06960	2,07190	2,07410	2,07620	2,07820
2,08020	2,08200	2,08380	2,08540	2,08700	2,08850	2,08990	2,09120	2,09240

2,09350	2,09450	2,09550	2,09630	2,09710	2,09780	2,09840	2,09890	2,09930
2,09960	2,09980	2,10000	2,10000	2,10000	2,09980	2,09960	2,09930	2,09890
2,09840	2,09780	2,09710	2,09640	2,09550	2,09460	2,09350	2,09240	2,09120
2,08990	2,08850	2,08700	2,08550	2,08380	2,08210	2,08020	2,07830	2,07630
2,07420	2,07200	2,06970	2,06730	2,06490	2,06230	2,05970	2,05700	2,05420
2,05130	2,04830	2,04520	2,04200	2,03880	2,03540	2,03200	2,02850	2,02490
2,02120	2,01740	2,01360	2,00960	2,00560	2,00150	1,99730	1,99300	1,98860
1,98420	1,97960	1,97500	1,97030	1,96550	1,96060	1,95560	1,95060	1,94540
1,94020	1,93490	1,92960	1,92410	1,91850	1,91290	1,90720	1,90140	1,89550
1,88960	1,88350	1,87740	1,87120	1,86490	1,85860	1,85210	1,84560	1,83900
1,83240	1,82560	1,81880	1,81190	1,80490	1,79780	1,79070	1,78340	1,77620
1,76880	1,76130	1,75380	1,74620	1,73850	1,73080	1,72300	1,71510	1,70710
1,69910	1,69100	1,68280	1,67450	1,66620	1,65780	1,64930	1,64080	1,63220
1,62350	1,61470	1,60590	1,59700	1,58800	1,57900	1,56990	1,56080	1,55150
1,54220	1,54220	1,53280	1,52350	1,51430	1,50510	1,49600	1,48700	1,47800
1,46910	1,46030	1,45160	1,44290	1,43430	1,42570	1,41720	1,40880	1,40050
1,39220	1,38400	1,37590	1,36790	1,35990	1,35200	1,34420	1,33640	1,32880
1,32120	1,31360	1,30620	1,29880	1,29150	1,28430	1,27720	1,27010	1,26310
1,25620	1,24940	1,24260	1,23590	1,22930	1,22280	1,21640	1,21000	1,20370
1,19750	1,19140	1,18540	1,17940	1,17350	1,16770	1,16200	1,15640	1,15080
1,14540	1,14000	1,13470	1,12940	1,12430	1,11930	1,11430	1,10940	1,10460
1,09990	1,09520	1,09070	1,08620	1,08190	1,07760	1,07340	1,06920	1,06520
1,06130	1,05740	1,05360	1,04990	1,04630	1,04280	1,03940	1,03600	1,03280
1,02960	1,02650	1,02360	1,02070	1,01780	1,01510	1,01250	1,00990	1,00750
1,00510	1,00280	1,00060	0,99850	0,99650	0,99450	0,99270	0,99100	0,98930
0,98770	0,98620	0,98480	0,98350	0,98230	0,98120	0,98020	0,97920	0,97840
0,97760	0,97690	0,97630	0,97580	0,97540	0,97510	0,97490	0,97470	0,97470
0,97470	0,97490	0,97510	0,97540	0,97580	0,97630	0,97690	0,97760	0,97830
0,97920	0,98010	0,98120	0,98230	0,98350	0,98480	0,98620	0,98770	0,98920
0,99090	0,99260	0,99450	0,99640	0,99840	1,00050	1,00270	1,00500	1,00740
1,00980	1,01240	1,01500	1,01770	1,02050	1,02340	1,02640	1,02950	1,03270
1,03590	1,03920	1,04270	1,04620	1,04980	1,05350	1,05720	1,06110	1,06500
1,06910	1,07320	1,07740	1,08170	1,08600	1,09050	1,09510	1,09970	1,10440
1,10920	1,11410	1,11900	1,12410	1,12920	1,13440	1,13970	1,14510	1,15060
1,15610	1,16180	1,16750	1,17330	1,17910	1,18510	1,19110	1,19720	1,20340
1,20970	1,21610	1,22250	1,22900	1,23560	1,24230	1,24910	1,25590	1,26280
1,26980	1,27690	1,28400	1,29120	1,29850	1,30590	1,31330	1,32080	1,32840
1,33610	1,34390	1,35170	1,35960	1,36750	1,37560	1,38370	1,39190	1,40010
1,40850	1,41690	1,42530	1,43390	1,44250	1,45120	1,45990	1,46880	1,47760
1,48660	1,49560	1,50470	1,51390	1,52310	1,53240	1,54180	1,55120	1,56070
1,57020	1,57990	1,58950	1,59930	1,60910	1,61900	1,62890	1,63890	1,64900
1,65910	1,66930	1,67950	1,68980	1,70020	1,71060	1,72110	1,73160	1,74220
1,75290	1,76360	1,77430	1,78520	1,79600	1,80700	1,81800	1,82900	1,84010
1,85120	1,86240	1,87370	1,88500	1,89630	1,90770	1,91920	1,93070	1,94220
1,95380	1,96550	1,97720	1,98890	2,00070	2,01250	2,02440	2,03630	2,04830

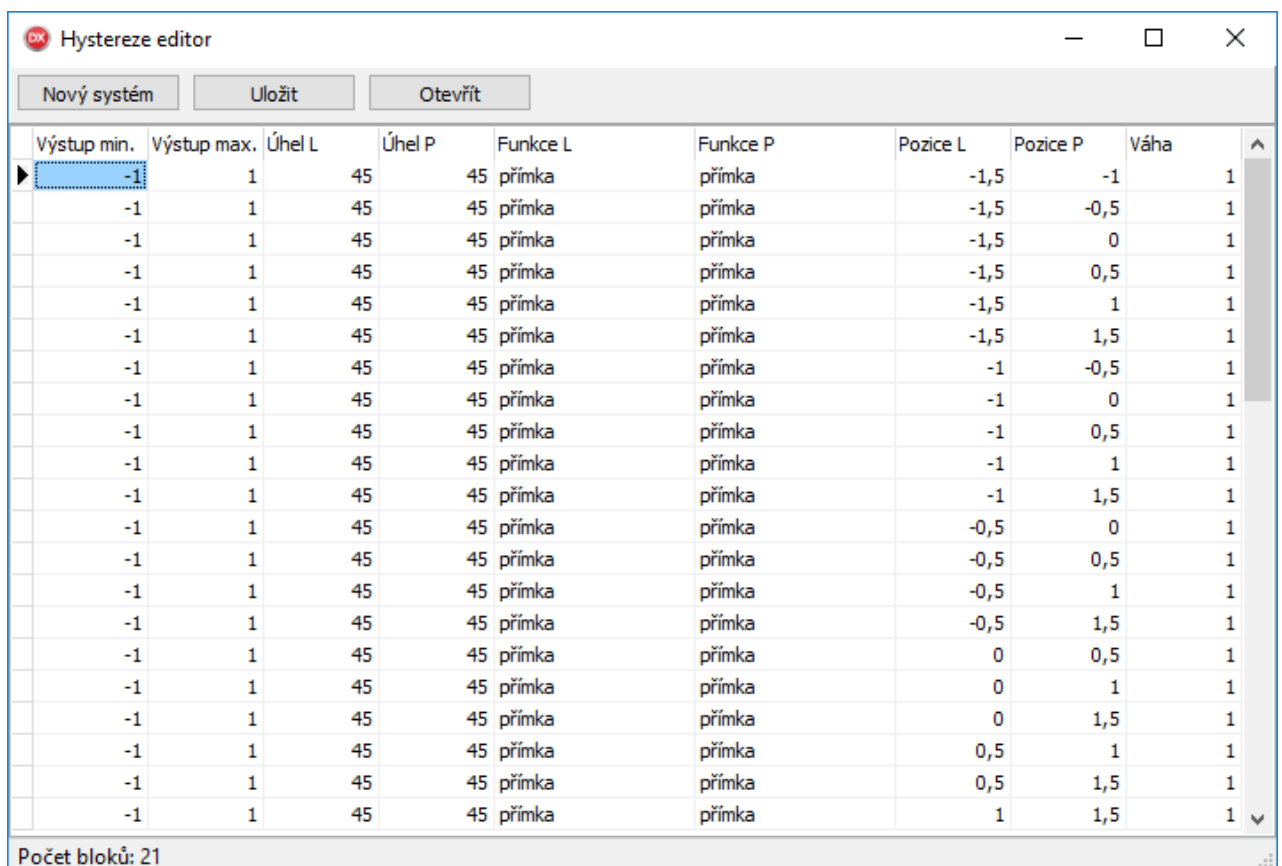
2,06030	2,07240	2,08450	2,09660	2,10880	2,12100	2,13330	2,14560	2,15790
2,17030	2,18280	2,19520	2,20770	2,22030	2,23280	2,24540	2,25810	2,27080
2,28350	2,29620	2,30900	2,32180	2,33470	2,34750	2,36050	2,37340	2,38640
2,39940	2,41240	2,42550	2,43850	2,45160	2,46480	2,47790	2,49110	2,50440
2,51760	2,53090	2,54410	2,55750	2,57080	2,58410	2,59750	2,61090	2,62430
2,63780	2,65120	2,66470	2,67820	2,69170	2,70520	2,71870	2,73230	2,74580
2,75940	2,77300	2,78660	2,80030	2,81390	2,82750	2,84120	2,85480	2,86850
2,88220	2,89590	2,90960	2,92330	2,93700	2,95070	2,96440	2,97820	2,99190
3,00570	3,01940	3,03310	3,04690	3,06060	3,07440	3,08810	3,10180	3,11560
3,12930	3,14310	3,15680	3,17050	3,18430	3,19800	3,21170	3,22540	3,23910
3,25280	3,26650	3,28020	3,29390	3,30750	3,32120	3,33480	3,34850	3,36210
3,37570	3,38930	3,40290	3,41640	3,43000	3,44350	3,45710	3,47060	3,48400
3,49750	3,51150	3,52770	3,54370	3,55960	3,57530	3,59080	3,60630	3,62150
3,63660	3,65150	3,66630	3,68090	3,69540	3,70970	3,72390	3,73790	3,75170
3,76540	3,77890	3,79220	3,80540	3,81840	3,83130	3,84400	3,85650	3,86890
3,88110	3,89310	3,90500	3,91670	3,92820	3,93960	3,95080	3,96180	3,97270
3,98330	3,99390	4,00420	4,01440	4,02440	4,03420	4,04390	4,05330	4,06260
4,07180	4,08070	4,08950	4,09810	4,10660	4,11480	4,12290	4,13080	4,13850
4,14610	4,15350	4,16070	4,16770	4,17450	4,18120	4,18770	4,19400	4,20010
4,20600	4,21180	4,21740	4,22280	4,22800	4,23300	4,23790	4,24260	4,24700
4,25140	4,25550	4,25940	4,26320	4,26680	4,27020	4,27340	4,27640	4,27930
4,28200	4,28440	4,28670	4,28890	4,29080	4,29250	4,29410	4,29550	4,29670
4,29770	4,29850	4,29920	4,29960	4,29990	4,30000	4,29990	4,29960	4,29920
4,29850	4,29770	4,29670	4,29550	4,29410	4,29250	4,29080	4,28890	4,28680
4,28450	4,28200	4,27930	4,27650	4,27340	4,27020	4,26680	4,26320	4,25950
4,25550	4,25140	4,24710	4,24260	4,23790	4,23310	4,22800	4,22280	4,21740
4,21180	4,20610	4,20010	4,19400	4,18770	4,18120	4,17460	4,16770	4,16070
4,15350	4,14610	4,13860	4,13090	4,12300	4,11490	4,10660	4,09820	4,08960
4,08080	4,07180	4,06270	4,05340	4,04390	4,03430	4,02440	4,01440	4,00430
3,99390	3,98340	3,97270	3,96190	3,95080	3,93970	3,92830	3,91680	3,90510
3,89320	3,88120	3,86900	3,85660	3,84410	3,83140	3,81850	3,80550	3,79230
3,77900	3,76550	3,75180	3,73800	3,72400	3,70980	3,69550	3,68100	3,66640
3,65160	3,63670	3,62160	3,60630	3,59090	3,57540	3,55970	3,54380	3,52780
3,51160	3,49530	3,47880	3,46220	3,44550	3,42860	3,41150	3,39430	3,37690
3,35940	3,34180	3,32400	3,30610	3,28800	3,26980	3,25150	3,23300	3,21440
3,19560	3,17670	3,15770	3,13850	3,11920	3,09980	3,08020	3,06050	3,04070
3,02070	3,00060	2,98040	2,96000	2,93950	2,91890	2,89820	2,87740	2,85640
2,83530	2,81410	2,79270	2,77130	2,74970	2,72800	2,70620	2,68430	2,66220
2,64010	2,61780	2,59540	2,57290	2,55030	2,52760	2,50480	2,48180	2,45880
2,43570	2,41240	2,38910	2,36560	2,34210	2,31840	2,29470	2,27080	2,24690
2,22280	2,19870	2,17450	2,15010	2,12570	2,10120	2,07660	2,05190	2,02710
2,00230	1,97730	1,95230	1,92720	1,90200	1,87670	1,85130	1,82590	1,80040
1,77480	1,74910	1,72340	1,69750	1,67160	1,64570	1,61960	1,59350	1,56740
1,54110	1,51480	1,48840	1,46200	1,43550	1,40900	1,38230	1,35570	1,32890
1,30210	1,27530	1,24840	1,22140	1,19440	1,16730	1,14020	1,11310	1,08590

1,05860	1,03130	1,00400	0,97659	0,94916	0,92169	0,89418	0,86663	0,83905
0,81143	0,78377	0,75609	0,72837	0,70061	0,67283	0,64502	0,61718	0,58932
0,56143	0,53351	0,50558	0,47762	0,44964	0,42164	0,39363	0,36559	0,33754
0,30948	0,28140	0,25332	0,22522	0,19711	0,16899	0,14086	0,11273	0,08460
0,05646	0,02832	0,02832	0,01002	-0,00808	-0,02618	-0,04428	-0,06228	-0,08028
-0,09818	-0,11608	-0,13388	-0,15158	-0,16928	-0,18688	-0,20448	-0,22198	-0,23948
-0,25688	-0,27428	-0,29158	-0,30878	-0,32588	-0,34298	-0,36008	-0,37698	-0,39398
-0,41078	-0,42758	-0,44428	-0,46088	-0,47748	-0,49398	-0,51038	-0,52678	-0,54308
-0,55928	-0,57538	-0,59148	-0,60748	-0,62338	-0,63928	-0,65508	-0,67078	-0,68638
-0,70188	-0,71738	-0,73268	-0,74798	-0,76328	-0,77838	-0,79348	-0,80838	-0,82328
-0,83808	-0,85278	-0,86748	-0,88198	-0,89648	-0,91088	-0,92518	-0,93938	-0,95348
-0,96748	-0,98138	-0,99528	-1,00900	-1,02270	-1,03620	-1,04970	-1,06310	-1,07630
-1,08950	-1,10260	-1,11560	-1,12850	-1,14130	-1,15400	-1,16660	-1,17910	-1,19150
-1,20380	-1,21610	-1,22820	-1,24020	-1,25210	-1,26390	-1,27560	-1,28720	-1,29860
-1,31000	-1,32130	-1,33250	-1,34360	-1,35450	-1,36540	-1,37610	-1,38680	-1,39730
-1,40770	-1,41800	-1,42820	-1,43830	-1,44830	-1,45820	-1,46800	-1,47760	-1,48710
-1,49660	-1,50590	-1,51510	-1,52420	-1,53310	-1,54200	-1,55070	-1,55940	-1,56790
-1,57630	-1,58460	-1,59270	-1,60080	-1,60870	-1,61650	-1,62420	-1,63180	-1,63920
-1,64660	-1,65380	-1,66090	-1,66790	-1,67470	-1,68150	-1,68810	-1,69460	-1,70090
-1,70720	-1,71330	-1,71930	-1,72520	-1,73100	-1,73660	-1,74210	-1,74750	-1,75280
-1,75790	-1,76300	-1,76790	-1,77260	-1,77730	-1,78180	-1,78620	-1,79050	-1,79460
-1,79860	-1,80250	-1,80630	-1,80990	-1,81340	-1,81680	-1,82010	-1,82320	-1,82620
-1,82910	-1,83190	-1,83450	-1,83700	-1,83940	-1,84160	-1,84370	-1,84570	-1,84760
-1,84930	-1,85090	-1,85240	-1,85380	-1,85500	-1,85610	-1,85700	-1,85790	-1,85860
-1,85920	-1,85960	-1,85990	-1,86010	-1,86020	-1,86010	-1,85990	-1,85960	-1,85920
-1,85860	-1,85790	-1,85710	-1,85610	-1,85500	-1,85380	-1,85240	-1,85100	-1,84940
-1,84760	-1,84580	-1,84380	-1,84170	-1,83940	-1,83710	-1,83460	-1,83190	-1,82920
-1,82630	-1,82330	-1,82020	-1,81690	-1,81350	-1,81000	-1,80640	-1,80260	-1,79870
-1,79470	-1,79050	-1,78630	-1,78190	-1,77740	-1,77270	-1,76790	-1,76300	-1,75800
-1,75290	-1,74760	-1,74220	-1,73670	-1,73110	-1,72530	-1,71940	-1,71340	-1,70730
-1,70110	-1,69470	-1,68820	-1,68160	-1,67480	-1,66800	-1,66100	-1,65390	-1,64670
-1,63940	-1,63190	-1,62430	-1,61670	-1,60880	-1,60090	-1,59290	-1,58470	-1,57640
-1,56800	-1,55950	-1,55090	-1,54220	-1,53330	-1,52430	-1,51530	-1,50610	-1,49670
-1,48730	-1,47780	-1,46810	-1,45840	-1,44850	-1,43850	-1,42840	-1,41820	-1,40790
-1,39750	-1,38700	-1,37630	-1,36560	-1,35470	-1,34380	-1,33270	-1,32150	-1,31020
-1,29890	-1,28740	-1,27580	-1,26410	-1,25230	-1,24040	-1,22840	-1,21630	-1,20410
-1,19180	-1,17940	-1,16690	-1,15430	-1,14160	-1,12880	-1,11590	-1,10290	-1,08980
-1,07660	-1,06330	-1,04990	-1,03650	-1,02290	-1,00930	-0,99548	-0,98168	-0,96768
-0,95368	-0,93958	-0,92538	-0,91108	-0,89678	-0,88228	-0,86778	-0,85308	-0,83838
-0,82358	-0,80868	-0,79368	-0,77868	-0,76348	-0,74828	-0,73298	-0,71768	-0,70218
-0,68668	-0,67098	-0,65528	-0,63958	-0,62368	-0,60778	-0,59178	-0,57568	-0,55958
-0,54338	-0,52708	-0,51068	-0,49428	-0,47778	-0,46118	-0,44458	-0,42788	-0,41108
-0,39428	-0,37738	-0,36038	-0,34338	-0,32628	-0,30908	-0,29188	-0,27458	-0,25718
-0,23978	-0,22238	-0,20478	-0,18728	-0,16958	-0,15188	-0,13418	-0,11638	-0,09848
-0,08058	-0,06268	-0,04458	-0,02658	-0,00848	0,00972	0,02792		

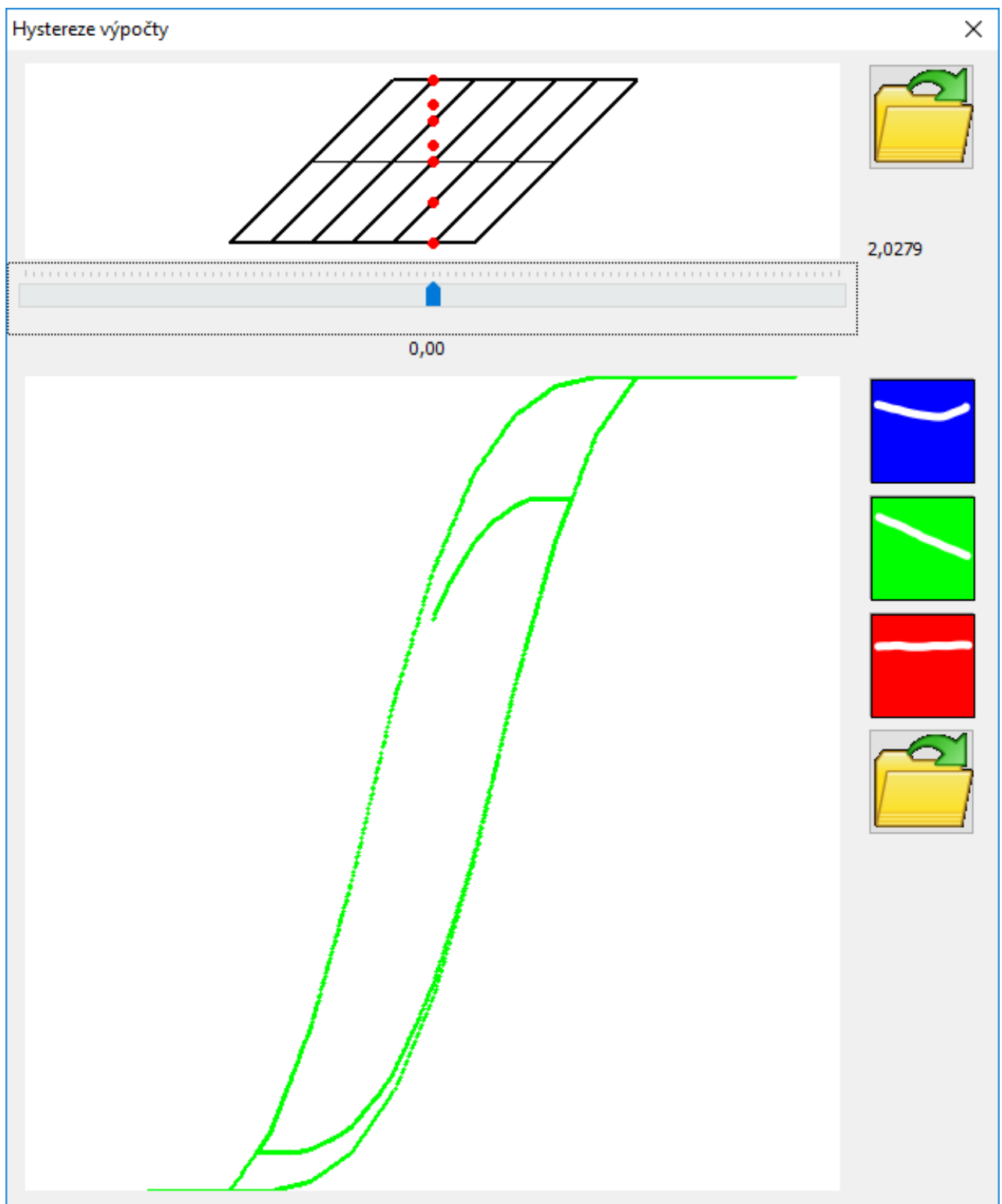
11 PŘÍLOHA D



Obr. 74: GUI generátoru hysteronů.



Obr. 75: GUI editoru hysteronů.



Obr. 76: GUI programu Hysteron.