

**TAČR: TAČR: Pokročilé robotické architektury pro  
průmyslové inspekce  
(ADRA-2I)**

Číslo projektu: TF02000041

**Řízení pohybu prostřednictvím SMA drátů (dráty s  
tvarovou pamětí)**

(Výzkumná zpráva)

Martin Švejda (ZČU)

27. března 2017

**T A**  
**Č R**

Identifikátor společnosti:

ZČU - Západočeská univerzita v Plzni, SM - SmartMotion s.r.o., ÚJV - ÚJV Řež, a. s

## **Abstrakt**

Předložená technická zpráva se zabývá řízením polohy drátů s tvarovou pamětí (tzv. smart memory alloy - SMA), které lze využít jako levný lineární aktuátor s malým zástavbovým prostorem. Algoritmy řízení jsou, oproti celé řadě existujících výzkumných prací na toto téma, voleny v podobě kaskádní regulace (prokový regulátor, regulátor síly, regulátor polohy) v různých modifikacích. Všechny navržené strategie řízení (v konfiguraci dvojice protichůdných drátů a drátu předepínaného pružinou) jsou ověřeny na experimentálním standu a dosažené výsledky jsou graficky zpracovány a stručně analyzovány.

## Obsah

1	Úvod	4
2	Řízení polohy dvěma protichůdnými dráty	4
3	Řízení polohy s 1 drátem a protichůdnou pružinou (plná kaskáda)	17
4	Řízení polohy s 1 drátem a protichůdnou pružinou (redukovaná kaskáda)	23
5	Závěr	27

# 1 Úvod

Předložená technická zpráva se zabývá novým směrem jednoduchých aktuátorů na principu tzv. *drátů s tvarovou pamětí* (cizojazyčné označení často jako *Shape Memory Alloy (SMA)*, *Smart Wires*, *Mucle Wires*, či obchodní označení jako *NiTiinol*, *Flexinol*). Ve všech případech se jedná sloučeninu niklu (55-60%) a titanu ve formě drátů s různými průřezy. Díky zvýšení teploty dochází k přechodu ve strukturálním uspořádání materiálu drátu z podoby martensitu do podoby austenitu. Z pohledu realizace jednoduchého aktuátoru pro řízení pohybu je důležité, že tento přechod je doprovázen výraznou (3-5%) změnou v délce drátu (se zvyšováním teploty dochází ke zkracování) a zároveň poměrně velkými generovanými silami (pro průměr drátu 0.375mm činí tahová síla cca 20N). Takové vlastnosti drátů s tvarovou pamětí je možno využít právě pro realizaci jednoduchých lineárních aktuátorů robotů a dalších mechatronických zařízení jako alternativu ke konvenčním pohonům. Klíčovou výhodou je právě jednoduchost v konstrukci takového pohonu, malá hmotnost a zástavbový prostor. V technické zprávě je předložena prvotní studie a analýza možností polohového řízení SMA drátů včetně návrhu řídicího algoritmu a výsledků experimentů na jednoduchých testovacích standech.

## Modelování a řízení SMA drátů

V literatuře lze nalézt celou řadu publikací zabývajících se nalezením korektního modelu SMA drátů [4, 1, 15, 18, 13] na základě provedených identifikačních experimentů. Většinou se jedná o nalezení parametrizace známých matematických modelů SMA drátů (rovnice přechodu mezi fázemi austenit/martensit, rovnice výměny tepla v drátu, mechanická rovnice, atd.). S ohledem na implementaci řídicích algoritmů pro řízení síly či polohy prostřednictvím SMA drátů lze často nalézt různé regulační techniky jako adaptivní řízení [3], řízení s klouzavým režimem [2], fuzzy řízení [14], neuronové sítě [16, 12]. Často je řízení polohy či síly SMA drátů založeno na využití kompenzátoru hystereze<sup>1</sup> [5, 10] a s tím souvisejících tématech modelování hystereze a následné generování inverzního modelu pro její kompenzaci [8, 9, 7, 6].

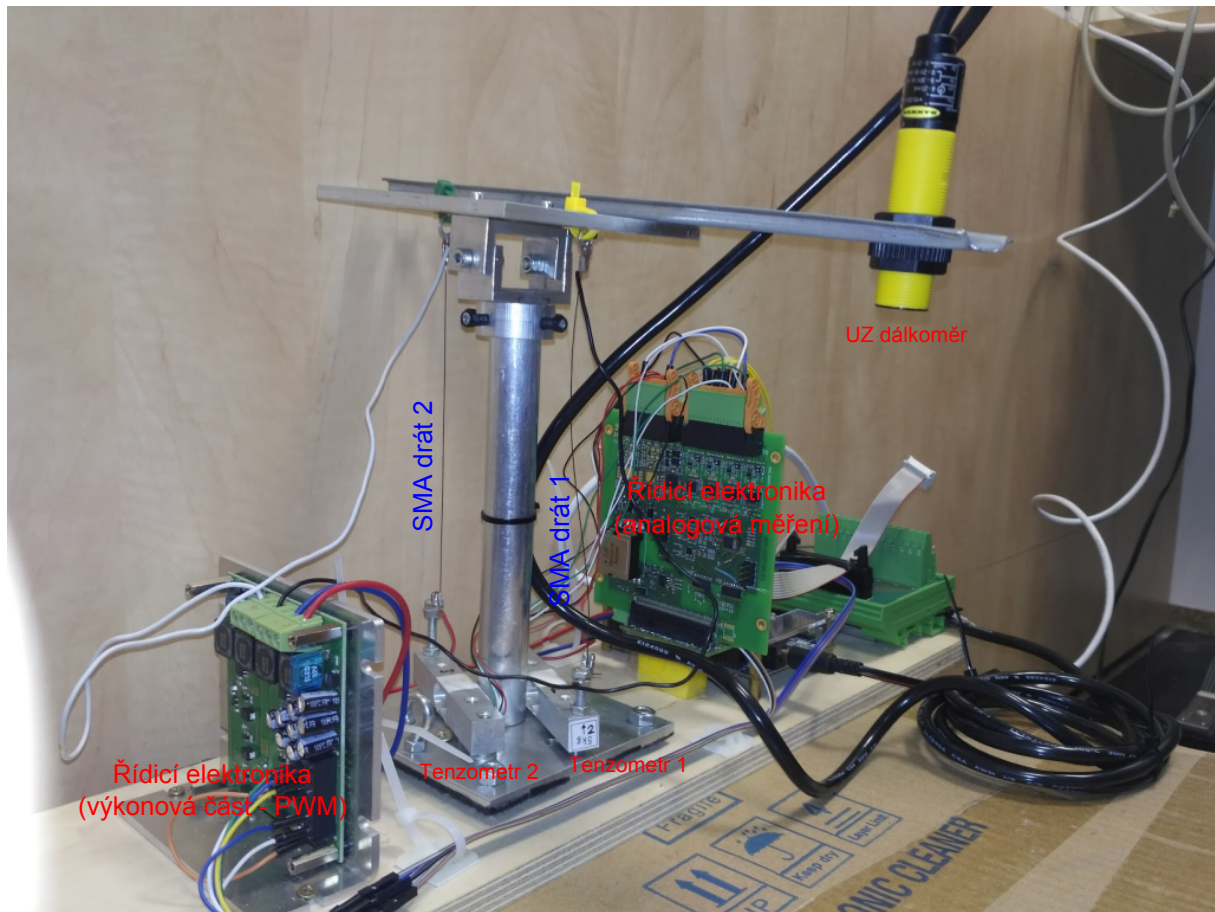
Bohužel, drtivá většina předložených přístupů k řízení polohy SMA drátů je založena na přesné znalosti matematického modelu. I když připustíme, že takový model je možné v laboratorních podmínkách identifikovat a využít (např. pro kompenzaci hystereze), stále zde existuje celá řada jevů jako např. vliv okolního prostředí s nedeterministickým ochlazováním drátu, mechanické tření a další nepřesnosti v konstrukci uchycení drátu, atd., které v konečném důsledku nezanedbatelným způsobem zatěžují identifikovaný matematický model. Právě proto se předložený přístup řízení polohy SMA drátu (za účelem analýzy možnosti jeho využití pro polohování článku alternativní části snake-like robotu ROBIN [19, 20]) liší od v literatuře nalezených postupů a klíčový důraz je kladen především na robustnost navrženého řízení ve smyslu eliminace okolních nepředvídatelných jevů (proudění vzduchu, změna teploty, atd.), nepřesností v mechanické konstrukci a možnosti uspokojivého odregulování externích působících poruch v důsledku potenciálního vzájemného ovlivňování dílčích článků snake-like robotu (s ohledem na decentralizované řízení dílčích článků robotu). Poznamenejme, že za účelem ověření možnosti využití SMA drátů jsou následující experimentální standy koncipovány vždy jen jako 1 DoF zařízení pro řízení jedné polohy/orientace.

## 2 Řízení polohy dvěma protichůdnými dráty

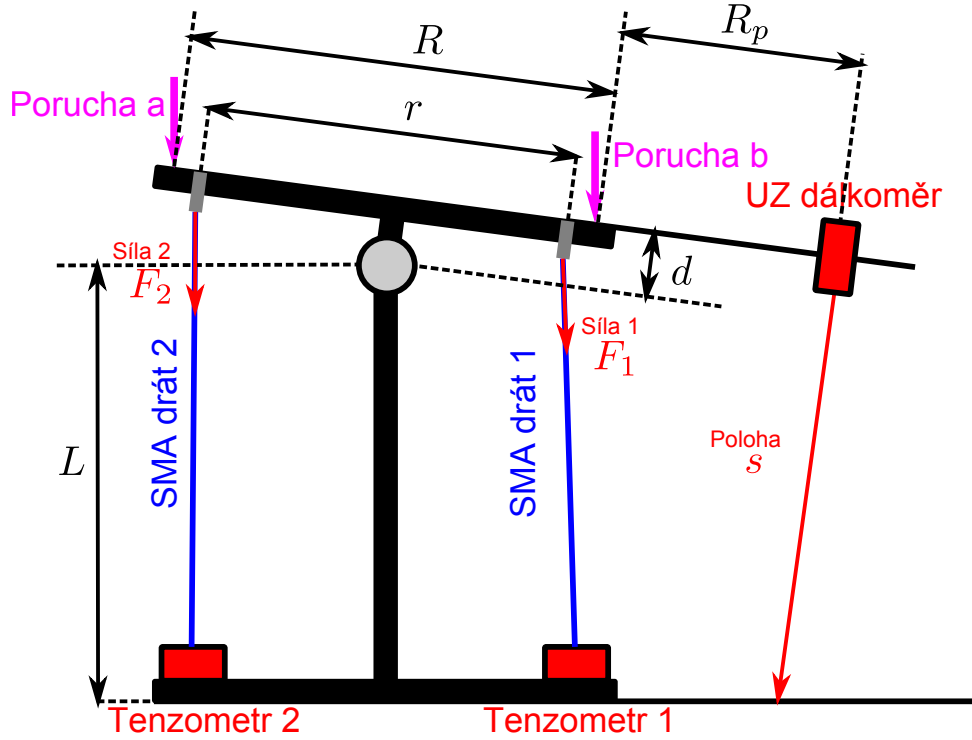
Testovací stand v navržené podobě je realizován jako pákový převod s uchycenými SMA dráty na každé straně, odměřováním polohy páky prostřednictvím UZ dálkoměru a odměřováním sil

<sup>1</sup>Hystereze u SMA drátů se projevuje typicky mezi teplotou, generovaným zkrácením drátu a odpovídající silou.

v jednotlivých drátech prostřednictvím tenzometrických snímačů, viz Obrázek 2. Vlastní vyhodnocení signálů včetně generování požadovaného PWM výkonového buzení do dílčích drátů je realizováno vlastní vyvíjenou elektronikou. Řídicím software reálného času je řídicí systém REX [11] (opět vlastního vývoje). Reálný testovací stand je znázorněn na Obrázku 1.



Obrázek 1: Reálný testovací stand



Obrázek 2: Schématické uspořádání testovacího standu

Rozměry testovacího standu jsou následující:

$$L = 205 [mm], d = 20 [mm], r = 65 [mm], R = 100 [mm], R_p = 90 [mm] \quad (1)$$

Poruchy jsou reprezentovány dvěma závažími:

$$m_1 = 235 [g] \Rightarrow \text{Porucha 1 (a,b)} \quad \text{a} \quad m_2 = 575 [g] \Rightarrow \text{Porucha 2 (a,b)} \quad (2)$$

## Algoritmus řízení

Přesto, že návrh řídicího systému byl inspirován přístupem [17], vzhledem k výše zmíněným problémům s využitím exaktních návrhových metod řídicích algoritmů na základě identifikovaného modelu (včetně dopředného kompenzačního řízení eliminující hysterezní chování SMA drátů) byl využit praxí ověřený a často nasazovaný přístup kaskádní regulace s určitými modifikacemi. Blokové schématické znázornění řídicího algoritmu je znázorněno na Obrázku 3. Prvním (nejrychlejším) regulátorem kaskády byl volen regulátor proudu, který zajistil korektní buzení výkonovým 5V PWM tak, aby byl sledován požadovaný proud (řízení výkonu dodávaného do drátu - dílčí změna elektrického odporu SMA drátu při zahřívání a ochlazování v řádu desetin Ohmu byla zanedbána). Nadřazeným regulátorem byl regulátor síly napětí v SMA drátu (akční veličinou byl požadovaný proud jako setpoint regulátoru proudu). Proudový regulátor a nadřazený regulátor síly byl zrealizován pro oba SMA dráty. Posledním (nejpomalejším) regulátorem kaskády byl regulátor polohy, jehož akční veličina reprezentovala kladný a záporný přírůstek požadované síly v dílčích SMA drátech od konstantního předepnutí obou drátů silou  $F_{off} = 0.8[kg]$ . Všechny regulátory jsou voleny jako PI regulátory v uspořádání, jak je specifikováno v dokumentaci řídicího systému REX [11] s rovnicí přenosu (3).

$$U(s) = K \{ bW(s) - Y(s) + \frac{1}{T_i s} [W(s) - Y(s)] \} \quad (3)$$

kde  $W(s)$ ,  $U(s)$ ,  $Y(s)$  jsou Laplaceovy obrazy požadované hodnoty, akční veličiny a řízené veličiny,  $K$  je zesílení regulátoru,  $T_i$  je časová konstanta integrátoru,  $b = 1$ .

Všechny regulátory jsou vybaveny vstupem  $tv$  pro vysledování (zabránění unášení integrační složky). Korektní zapojení vstupu vysledování v kaskádní regulaci je nezbytně nutné pro správnou funkci řídicího obvodu jako celku (především s ohledem na limity/saturace akčních veličin regulátorů a případně přepínání z manuálního do automatického módu - bezrázové přepínání). Výsledné zapojení řídicího algoritmu v řídicím systému REX je součástí přílohy technické zprávy. Regulátory síly jsou navíc vybaveny přepínáním, které zajistí, že v případě, že regulační odchylka je v absolutní hodnotě větší než daná mez (použito  $F = 0.05[kg]$ ), je výstup regulátoru generován jako maximální ( $I = 600 [mA]$ ) či minimální ( $I = 0 [mA]$ ) hodnota řízeného proudu (dle znaménka regulační odchylky). Takový režim řízení umožňuje korektně nastavit parametry PI regulátorů síly pouze v malém okolí řízené hodnoty síly a velké odchylky regulovat standardním reléovým regulátorem (paralela s řízením s klouzavým režimem).

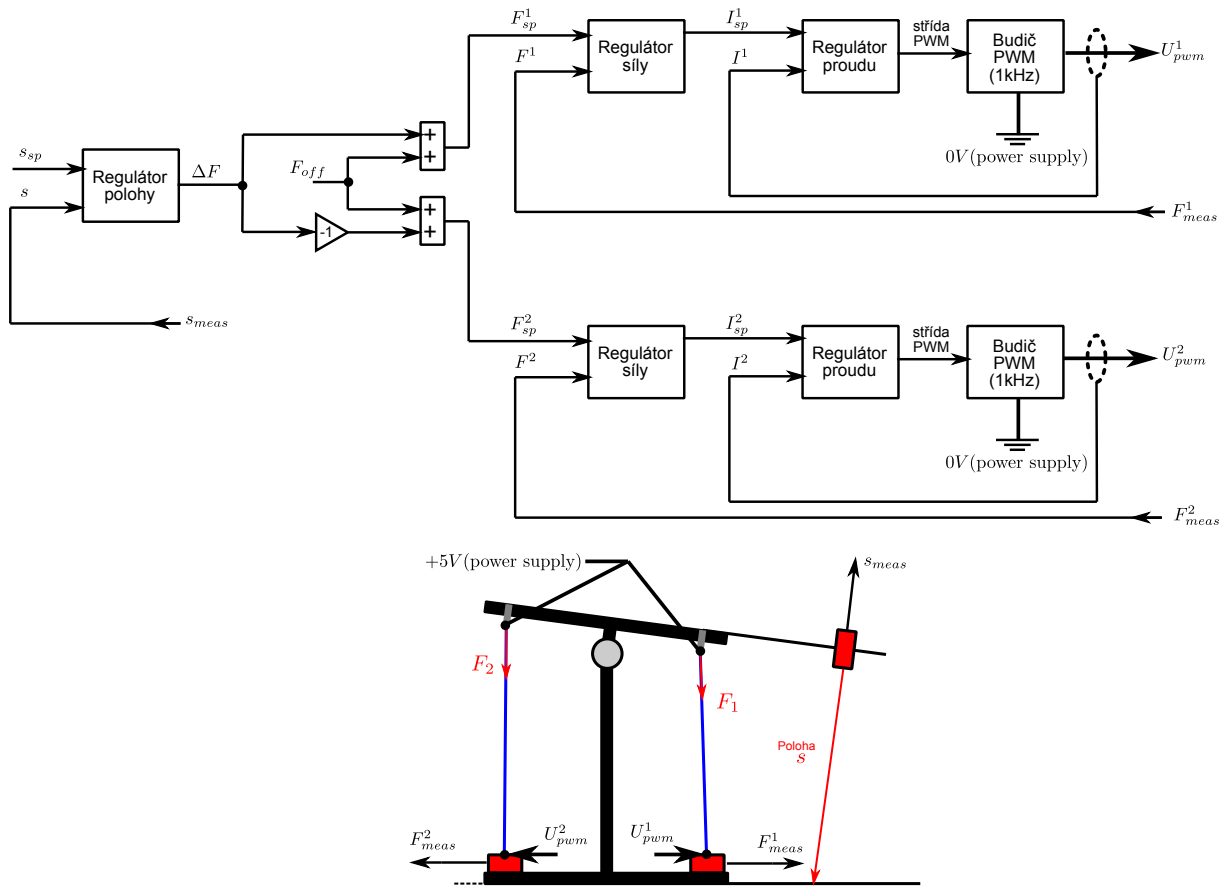
Dílní regulátory byly voleny s parametry shrnutými v následující tabulce<sup>2</sup>

	Regulátor/typ		
	Proud $I_1, I_2$ / PI	Síla $F_1, F_2$ / PI	Poloha / PI
$K$	0.0001	4000	0.04
$T_i$	0.001	0.6	0.9
$b$	1	1	1
$tt$	0.01	0.001	0.1
$hlim$	0.2	800	0.7
$lolim$	0	0	-0.7
$dz$	0	0.01	0.1

**[2 SMA dráty (reg: proud 1, proud 2 → síla 1, síla 2 → poloha)]**

Tabulka 1: Parametry PI regulátorů

<sup>2</sup>Parametry  $tt, hlim, lolim, dz$  reprezentují časovou konstantu vysledování integrátoru regulátoru dle vstupu  $tv$ , horní a dolní mez akční veličiny a pásmo necitlivosti integrační složky (zastavení integrace regulátoru), více v [11].



[2 SMA dráty (reg: proud 1, proud 2 → síla 1, síla 2 → poloha)]

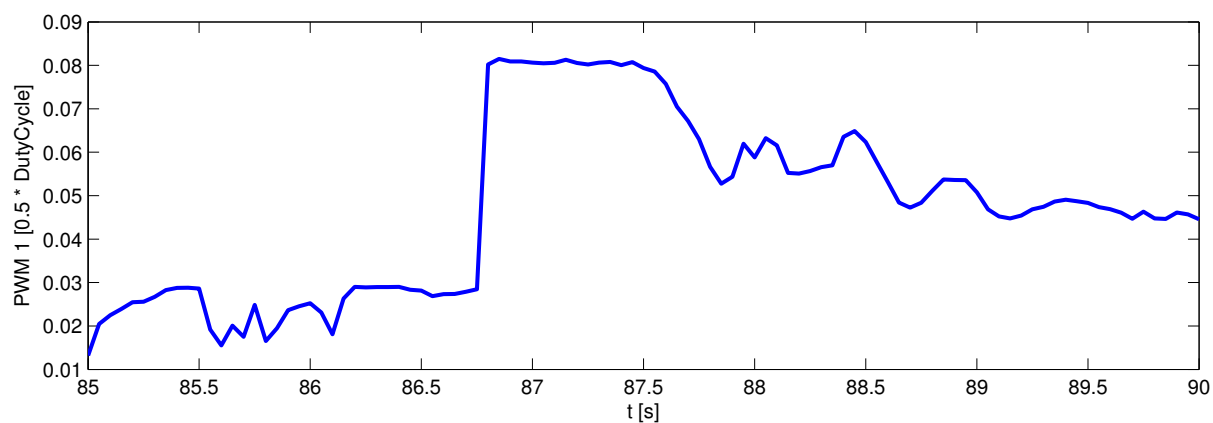
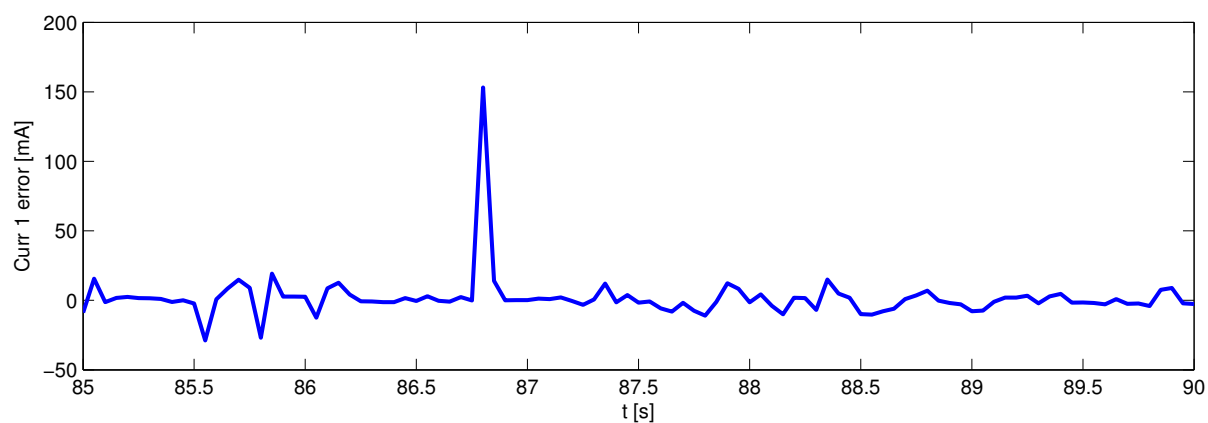
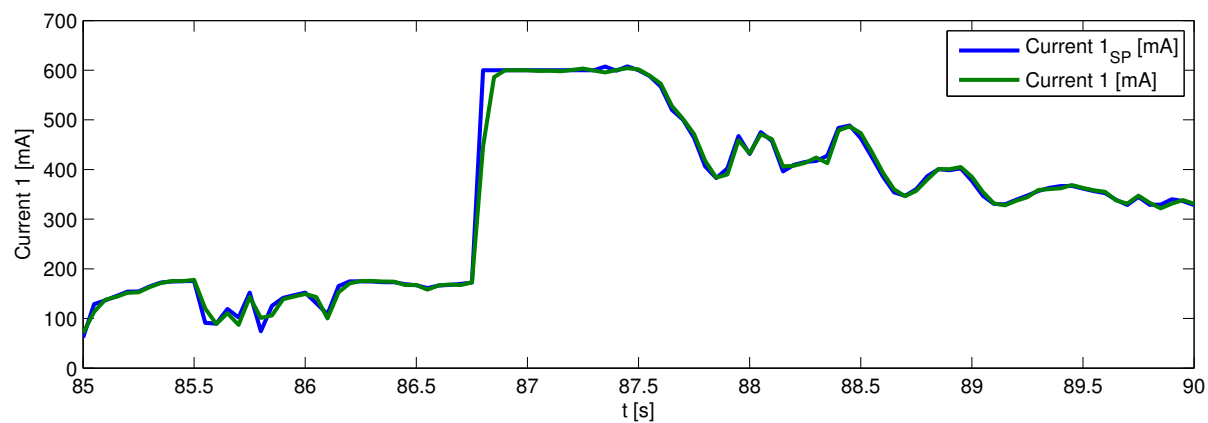
Obrázek 3: Blokové schématické znázornění řídicího algoritmu

Na Obrázku 4 je znázorněna požadovaná hodnota proudu  $I_{sp}^1$  a skutečná hodnota proudu  $I^1$ . SMA drátem včetně regulační odchylky a akční veličina regulátoru proudu v podobě  $\frac{1}{2}$  střidy PWM. Požadovaná hodnota síly  $F_{sp}^1$  a skutečná hodnota síly  $F^1$  vyvinutá 1. SMA drátem včetně regulační odchylky a akční veličiny v podobě požadovaného proudu  $I_{sp}^1$  drátem jsou znázorněny na Obrázku 5. Úseky s působící poruchou v podobě zavěšení odpovídajícího závaží, viz (2), na páku testovacího standu, jsou znázorněny stínováním. Chování regulátoru proudu a síly 2. SMA drátu je analogické.

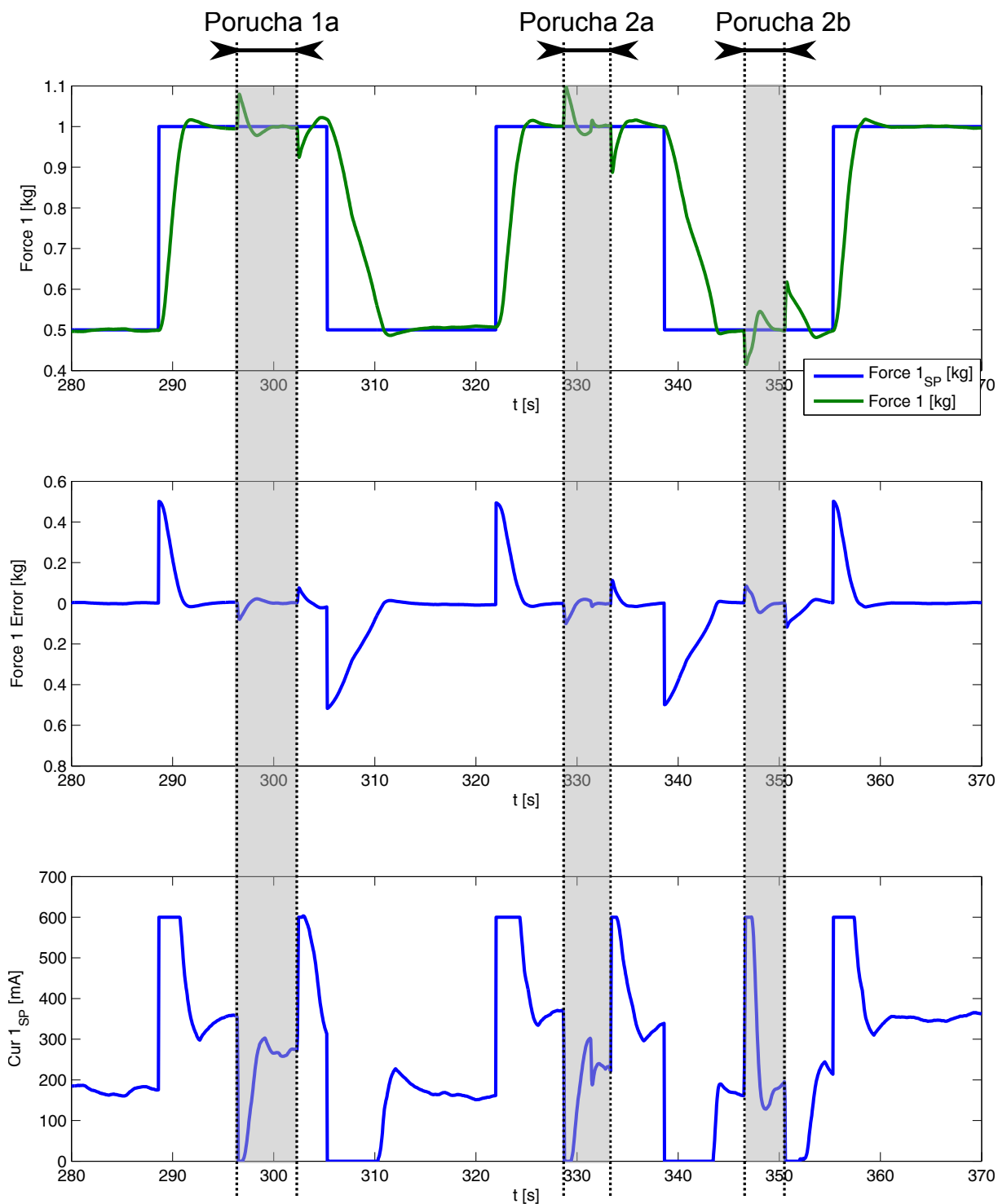
#### Použité značení:

Position -  $s$ , Position<sub>SP</sub> -  $s_{sp}$ , Force 1<sub>SP</sub> -  $F_{sp}^1$ , Force 2<sub>SP</sub> -  $F_{sp}^2$ , Force 1 -  $F^1$ , Force 2 -  $F^2$ , Current 1<sub>SP</sub> -  $I_{sp}^1$ , Current 2<sub>SP</sub> -  $I_{sp}^2$ , Current 1 -  $I^1$ , Current 2 -  $I^2$





Obrázek 4: Výsledky regulátoru proudu pro 1. SMA drát



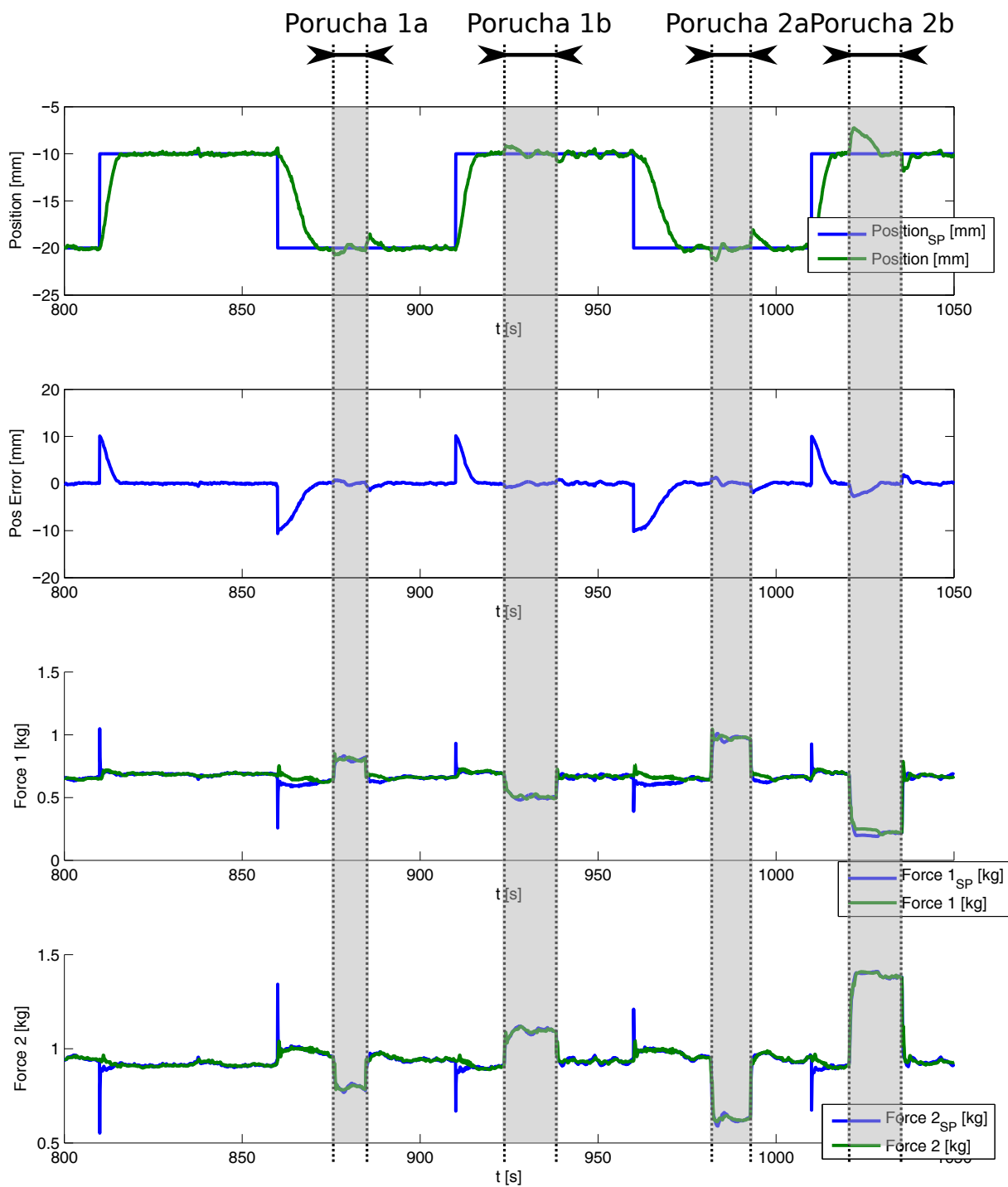
Obrázek 5: Výsledky regulátoru proudu pro 1. SMA drát

V následujících grafech jsou znázorněny průběhy požadované polohy  $s_{sp}$  a skutečné polohy  $s$ , požadované síly  $F_{sp}^1$ ,  $F_{sp}^2$  a skutečné síly  $F^1$ ,  $F^2$  a odpovídající průběhy požadovaných proudů  $I_{sp}^1$ ,  $I_{sp}^2$ . Ve všech grafech jsou dále znázorněny úseky s působící poruchou v podobě zavěšení odpovídajícího závaží, viz (2) na páku testovacího standu. Experimenty byly provedeny pro tři různé průběhy hodnoty požadované polohy páky  $s_{sp}$ :

**SP1** Obdélník s periodou  $T = 100$  [s] resp.  $T = 50$  [s] (viz Kapitoly 3, 4) a min/max hodnotami:  
 $s_{sp}^{MAX} = -10$  [mm],  $s_{sp}^{MIN} = -20$  [mm]

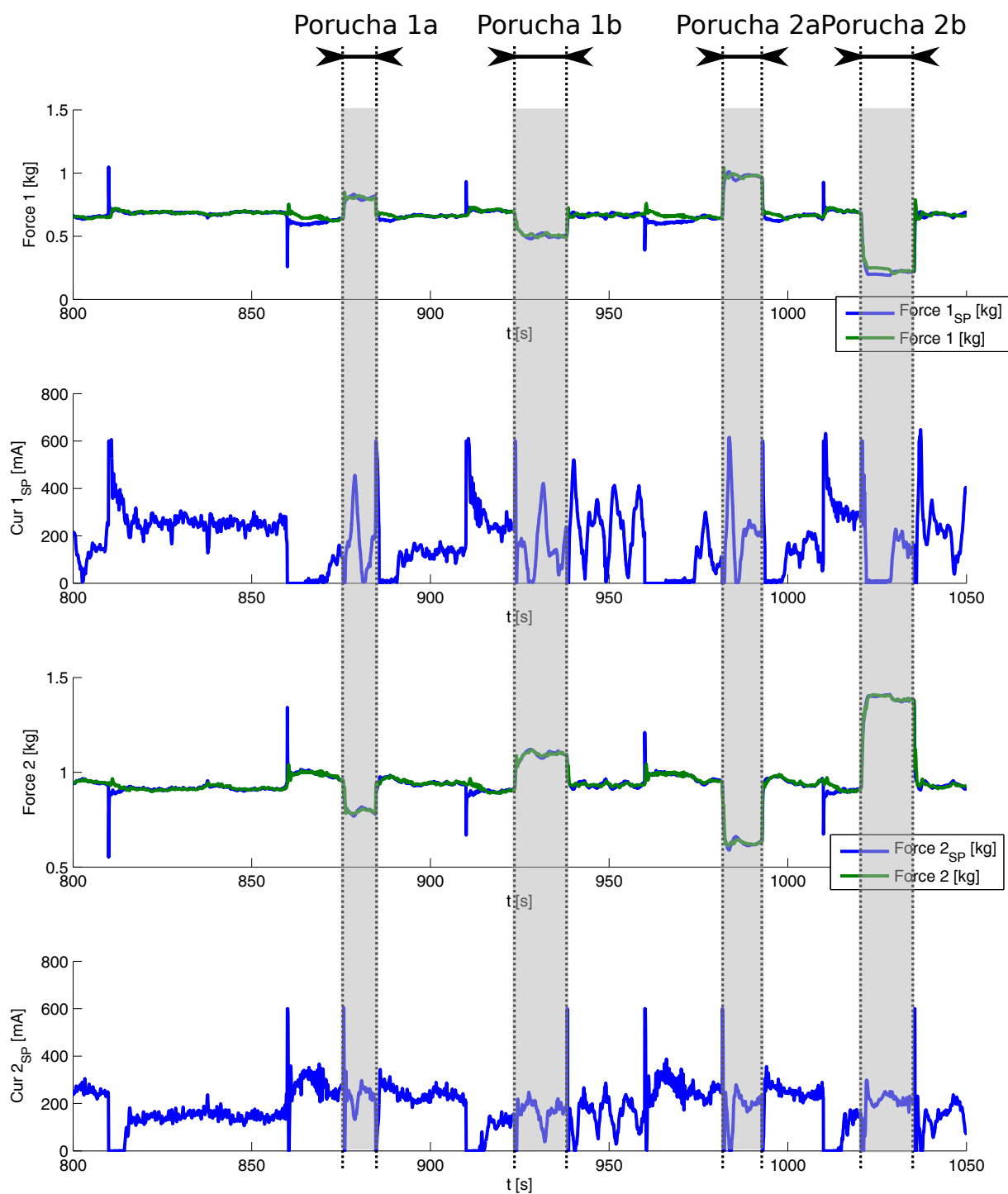
**SP2** Obdélník s periodou  $T = 100 [s]$  resp.  $T = 50 [s]$  (viz Kapitoly 3, 4) a min/max hodnotami:  
 $s_{sp}^{MAX} = -10 [mm]$ ,  $s_{sp}^{MIN} = -13 [mm]$

**SP3** Sínus s periodou  $T = 50 [s]$  a min/max hodnotami:  $s_{sp}^{MAX} = -10 [mm]$ ,  $s_{sp}^{MIN} = -20 [mm]$



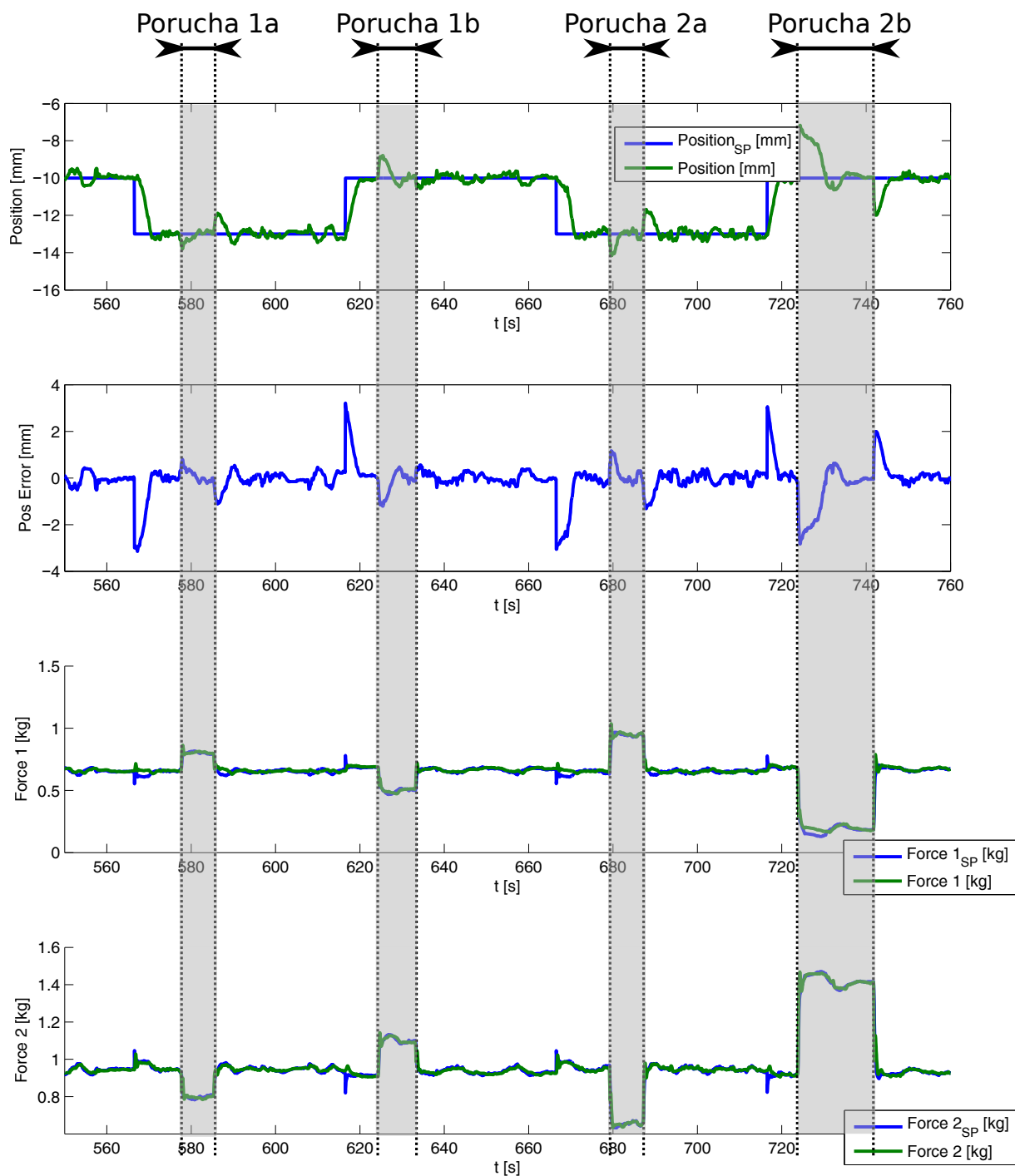
[2 SMA dráty (reg: proud 1, proud 2 → síla 1, síla 2 → poloha)]

Obrázek 6: Výsledky regulátoru polohy pro požadovaný průběh SP1



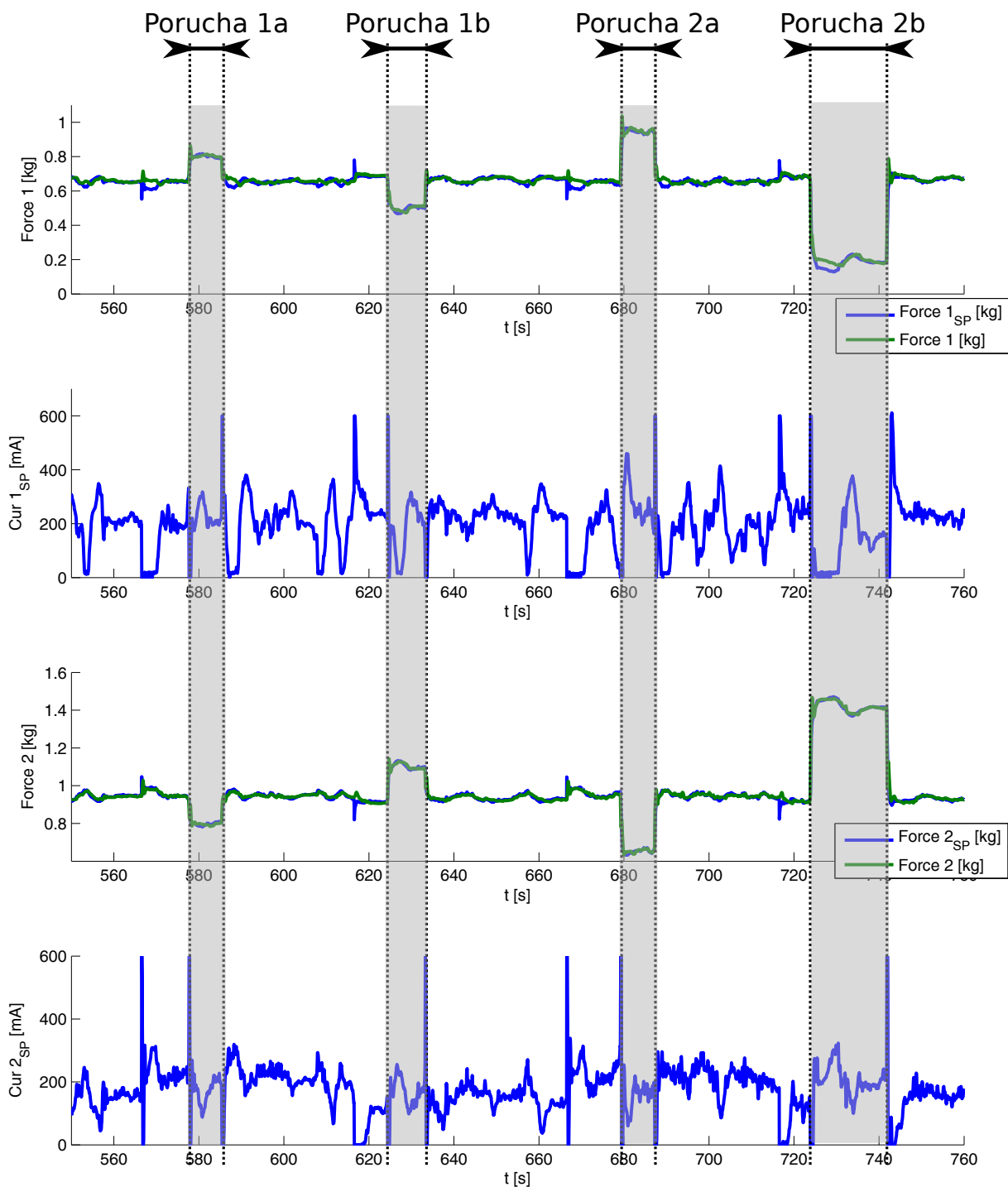
[2 SMA dráty (reg: proud 1, proud 2 → síla 1, síla 2 → poloha)]

Obrázek 7: Výsledky regulátoru síly pro požadovaný průběh SP1



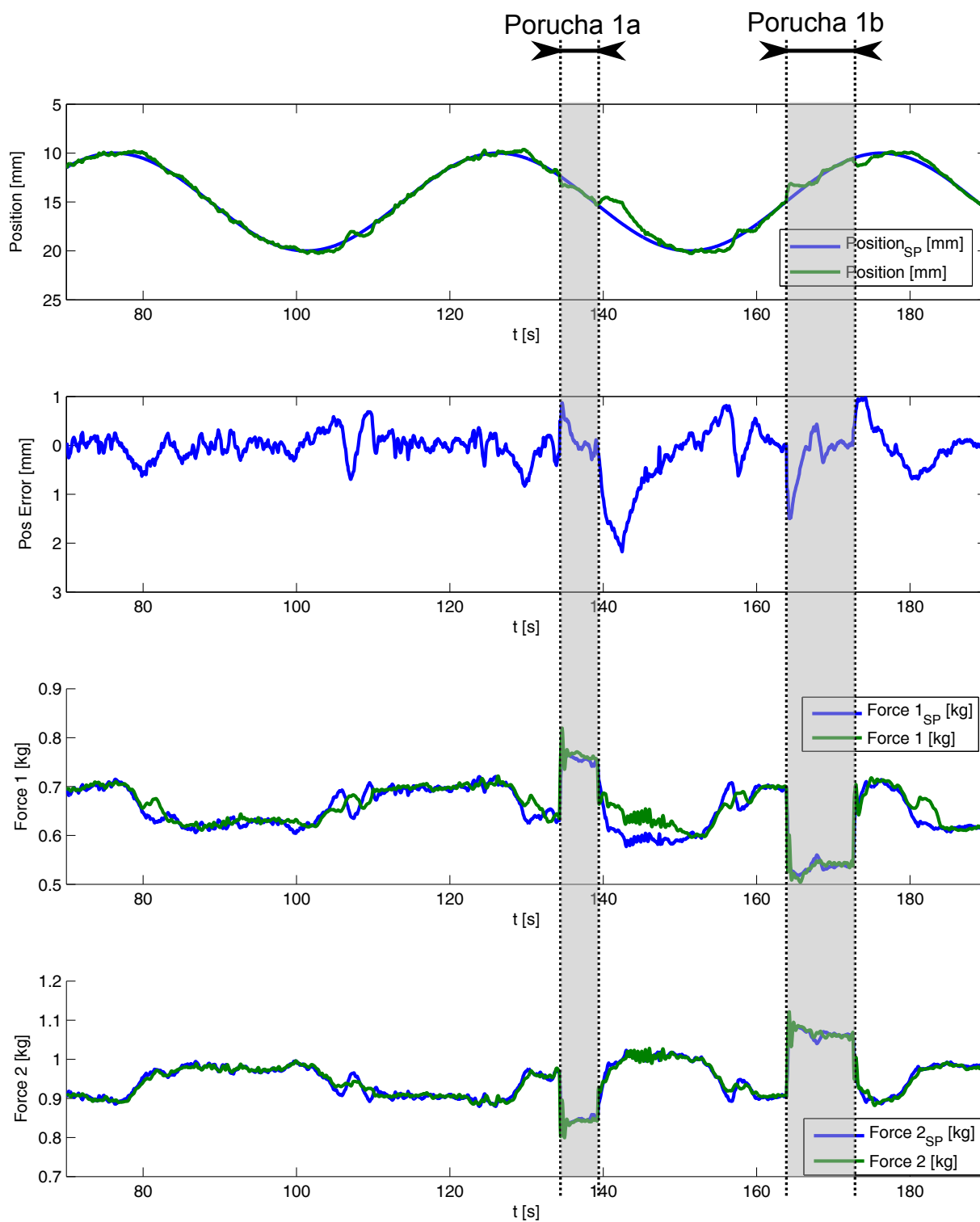
[2 SMA dráty (reg: proud 1, proud 2 → síla 1, síla 2 → poloha)]

Obrázek 8: Výsledky regulátoru polohy pro požadovaný průběh SP2



[2 SMA dráty (reg: proud 1, proud 2 → síla 1, síla 2 → poloha)]

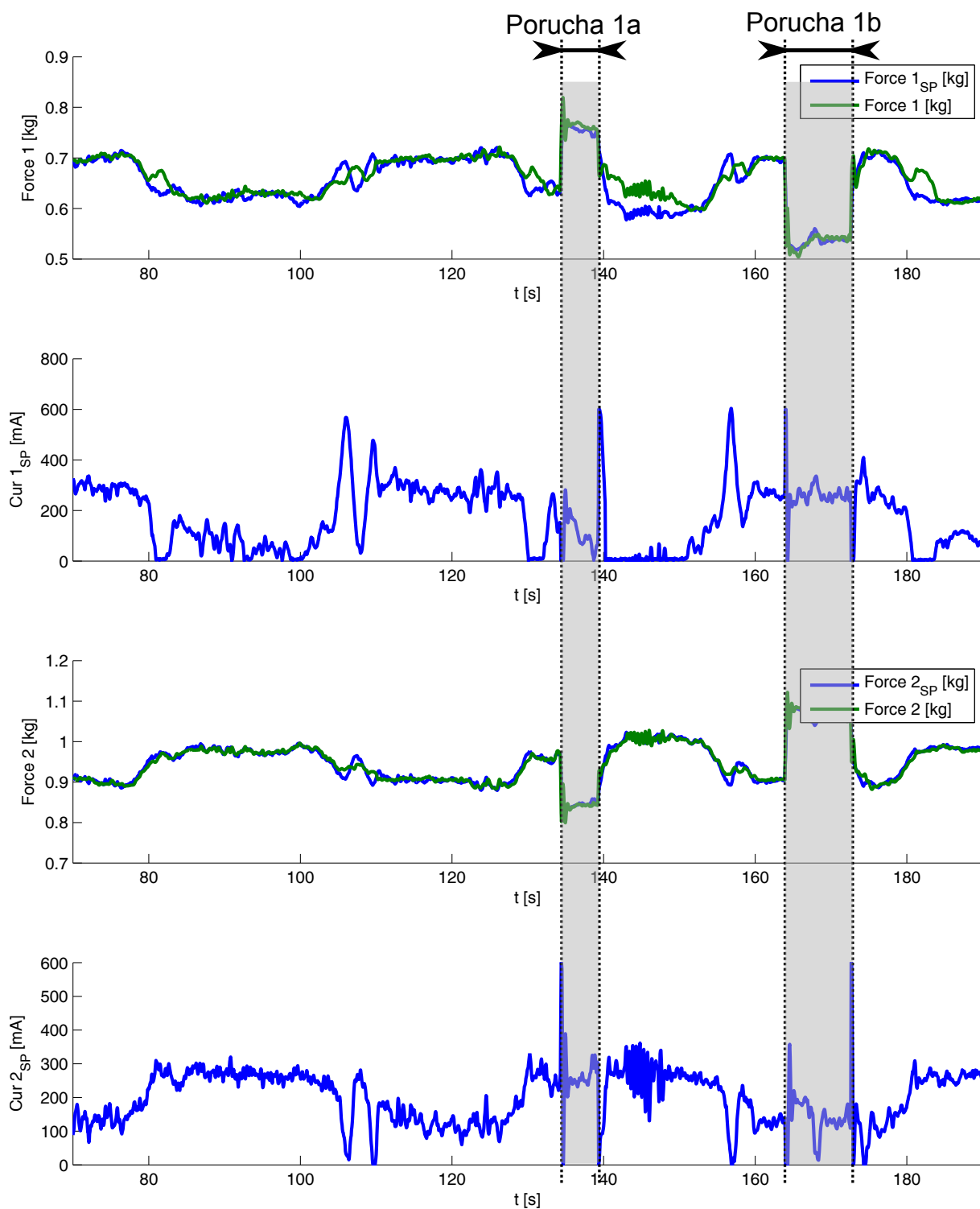
Obrázek 9: Výsledky regulátoru síly pro požadovaný průběh SP2



[2 SMA dráty (reg: proud 1, proud 2 → síla 1, síla 2 → poloha)]

Obrázek 10: Výsledky regulátoru polohy pro požadovaný průběh SP3



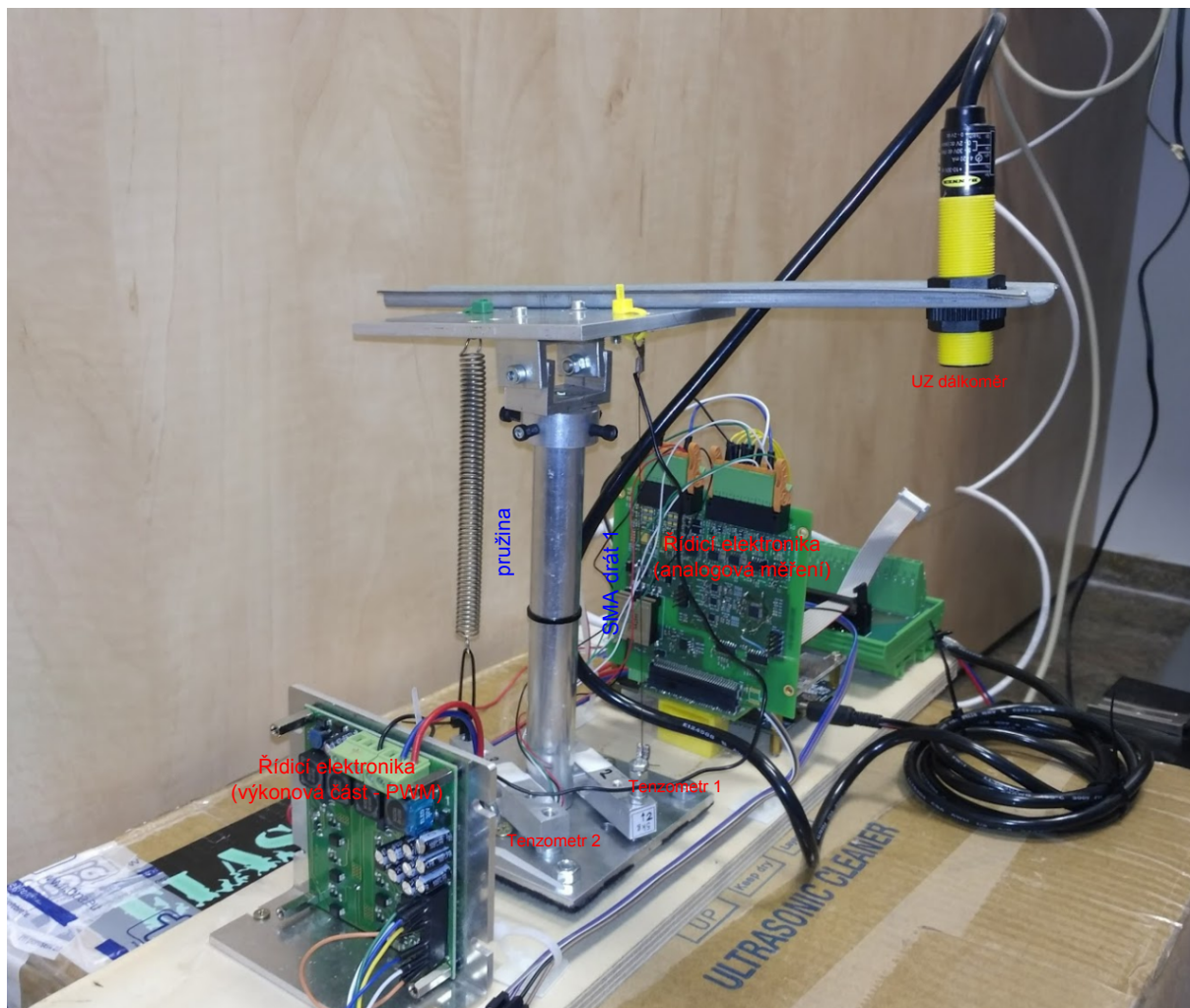


[2 SMA dráty (reg: proud 1, proud 2 → síla 1, síla 2 → poloha)]

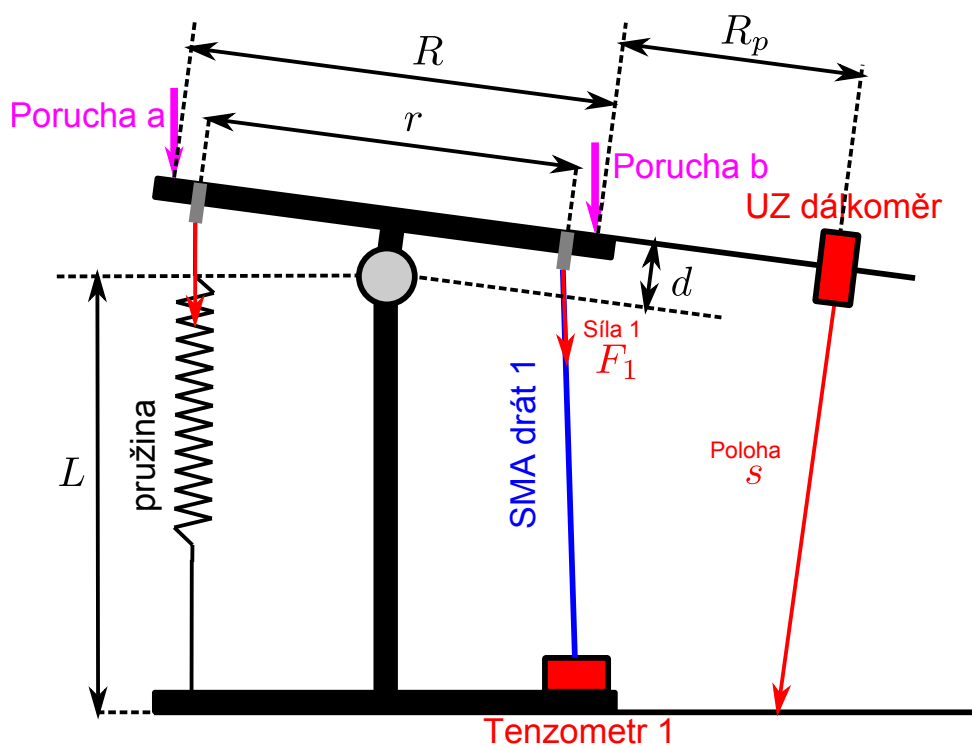
Obrázek 11: Výsledky regulátoru síly pro požadovaný průběh SP3

### 3 Řízení polohy s 1 drátem a protichůdnou pružinou (plná kaskáda)

Alternativní variantou je možnost nahradit jeden ze SMA drátů pasivní pružinou zajišťující předepínání drátu v odpovídajícím směru, viz Obrázky 12, 13.



Obrázek 12: Reálný testovací stand - nahrazení SMA drátu 2 pružinou



Obrázek 13: Schématické uspořádání testovacího standu - nahrazení SMA drátu 2 pružinou

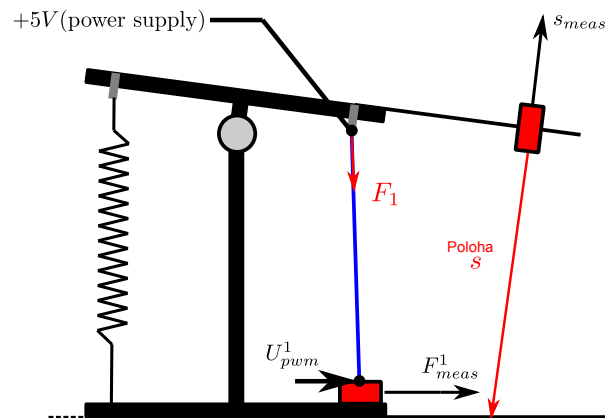
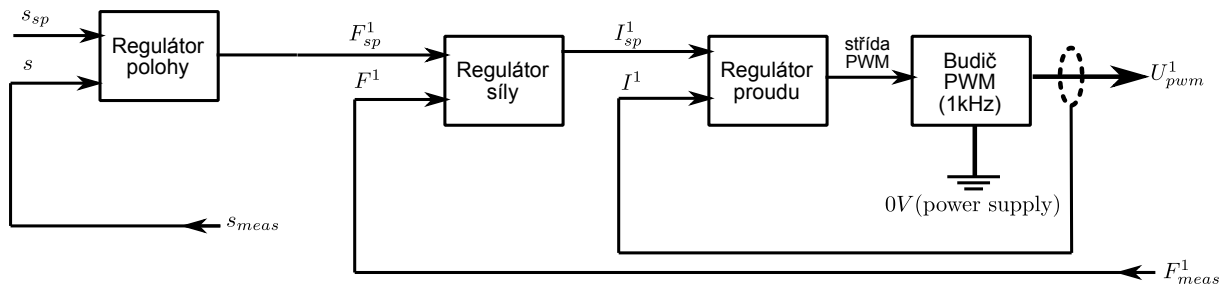
### Algoritmus řízení

Algoritmus řízení je opět realizován kaskádní regulací v pořadí (od nejrychlejšího regulátoru) proudový regulátor - regulátor síly - regulátor polohy, viz blokové schéma na Obrázku 14, a s parametry regulátoru voleny viz Tabulka 2

	Regulátor/typ		
	Proud $I_1$ / PI	Síla $F_1$ / PI	Poloha / PI
$K$	0.0001	5000	0.06
$T_i$	0.001	0.8	0.8
$b$	1	1	1
$tt$	0.01	0.001	0.1
$hlim$	0.2	800	2.2
$lolim$	0	0	0
$dz$	0	0	0

[1 SMA drát a pružina (reg: proud 1 → síla 1 → poloha)]

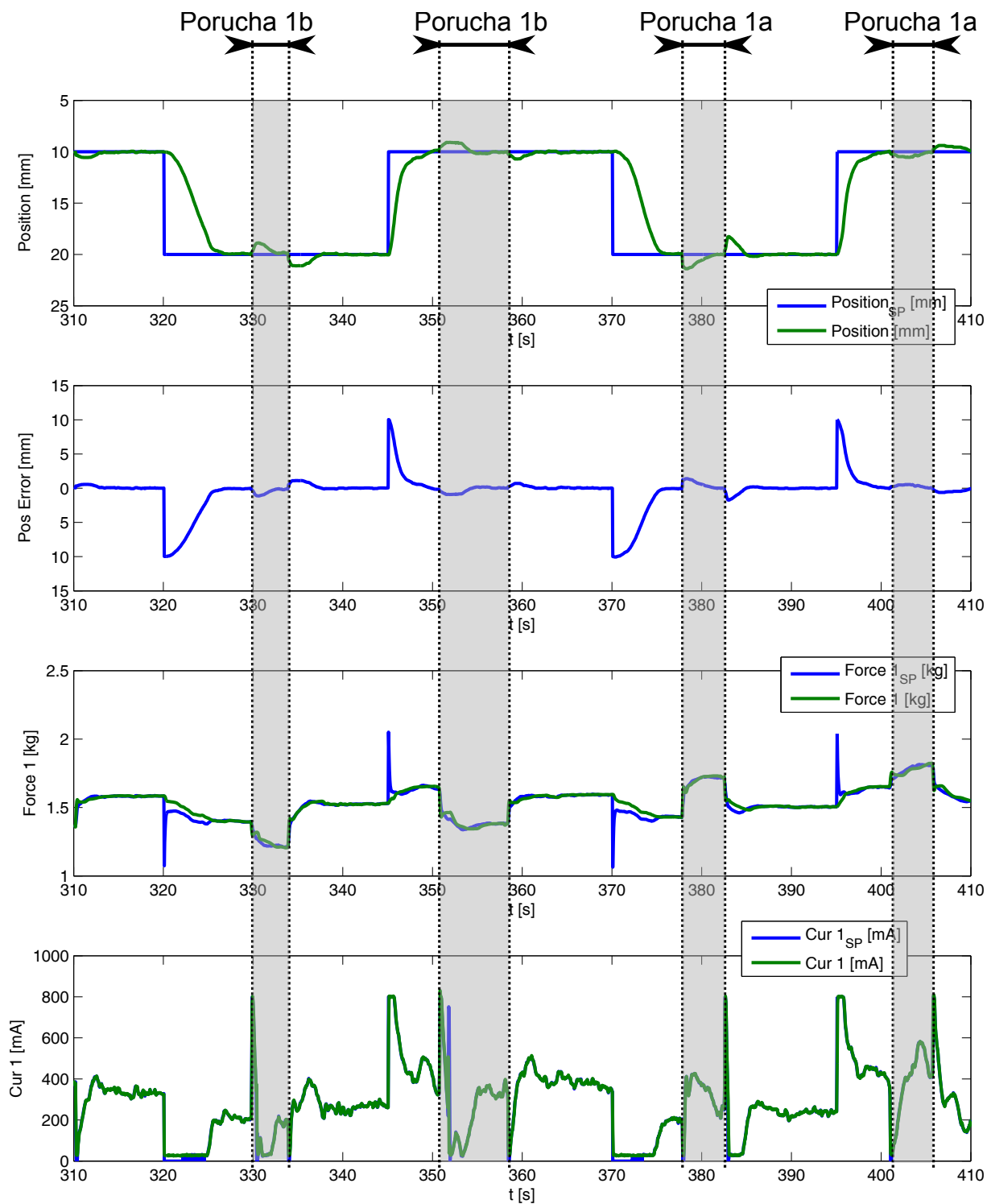
Tabulka 2: Parametry PI regulátorů (u regulátoru síly je hodnota max. proudu při velké regulační odchylce změněna na  $I = 800 [mA]$ )



[1 SMA drát a pružina (reg: proud 1 → síla 1 → poloha)]

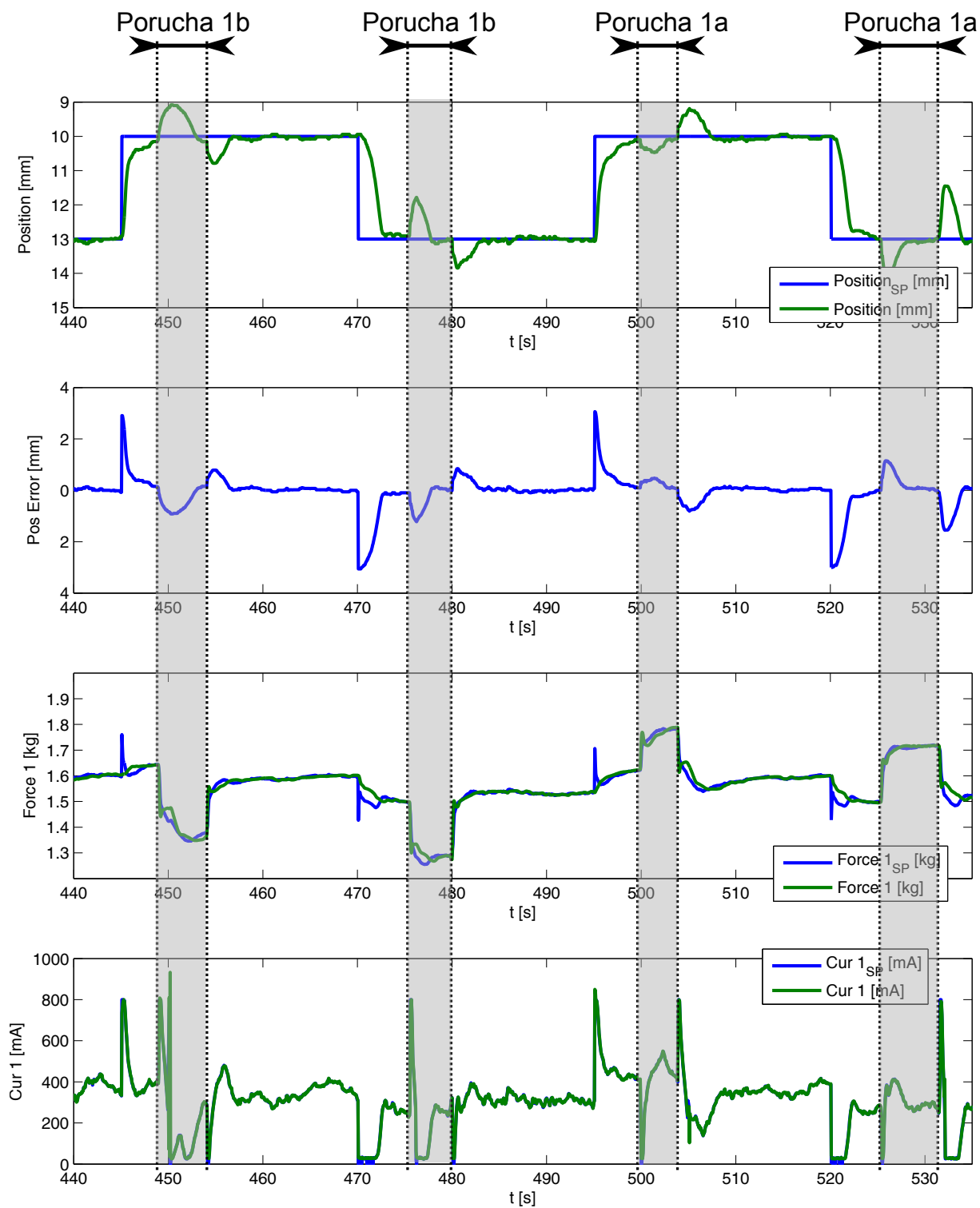
Obrázek 14: Blokové schématické znázornění řídicího algoritmu

Odpovídající výsledky experimentů (analogicky jako v Kapitole 2) jsou znázorněny na následujících obrázcích. Poznamenejme, že vzhledem k použití pružiny ztrácí řízený systém možnosti plného využití generované síly SMA drátem, neboť v akčním rozsahu pohybu je SMA drát neustále pružinou předepínán. Z toho důvodu je ke generování poruchy použito pouze menší závaží ( $m_1 = 235[g]$ ).



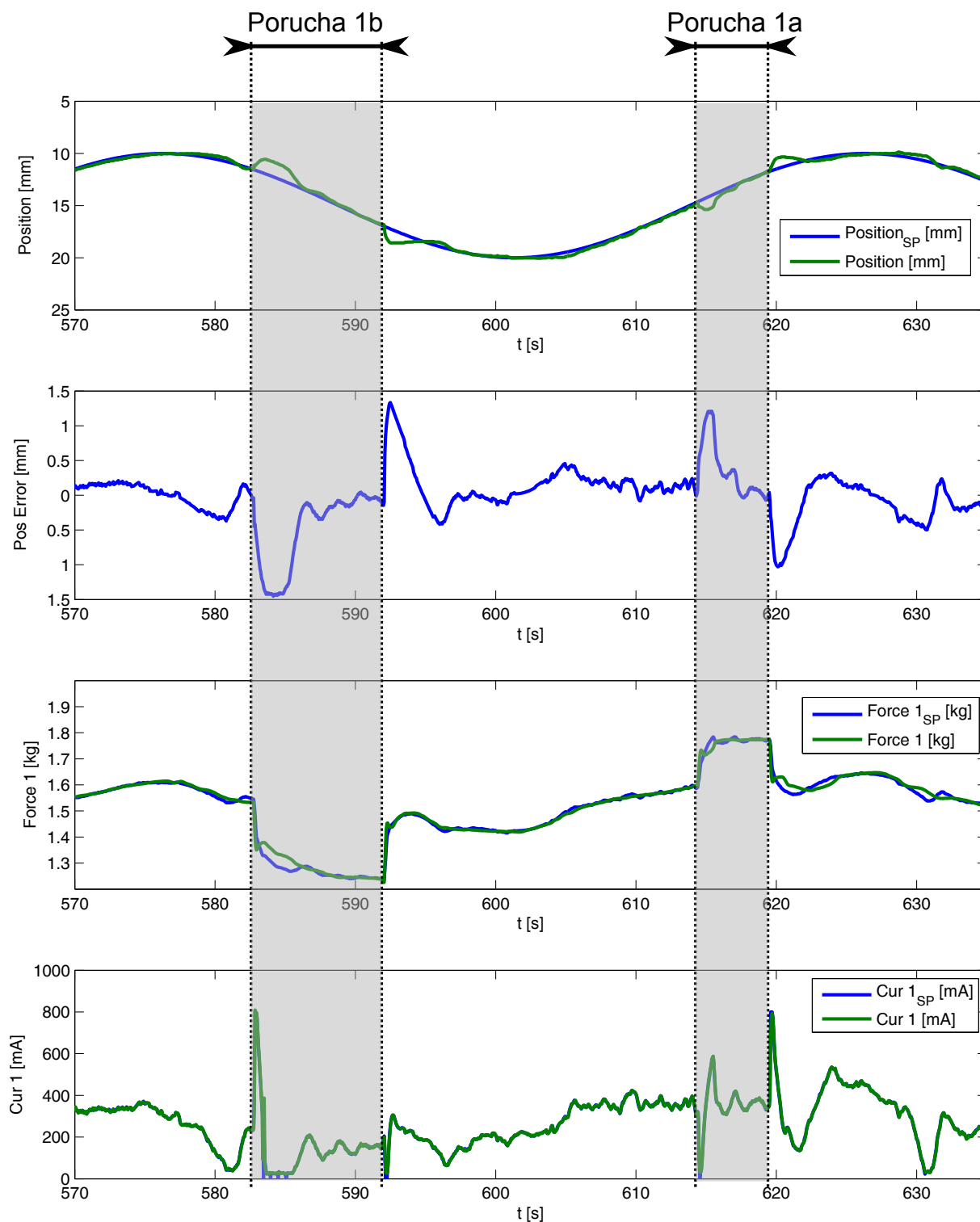
[1 SMA drát a pružina (reg: proud 1 → síla 1 → poloha)]

Obrázek 15: Výsledky řízení polohy, síly a proudu v kaskádě pro požadovaný průběh SP1



[1 SMA drát a pružina (reg: proud 1 → síla 1 → poloha)]

Obrázek 16: Výsledky řízení polohy, síly a proudu v kaskádě pro požadovaný průběh **SP2**



[1 SMA drát a pružina (reg: proud 1 → síla 1 → poloha)]

Obrázek 17: Výsledky řízení polohy, síly a proudu v kaskádě pro požadovaný průběh **SP3**

#### 4 Řízení polohy s 1 drátem a protichůdnou pružinou (redukováná kaskáda)

Konfigurace řízení polohy SMA drátu s protichůdnou pružinou nabízí možnost využití redukováné kaskády bez regulátoru síly, což v případě konfigurace s dvěma protichůdnými SMA dráty, viz

Kapitola 2, není možné.

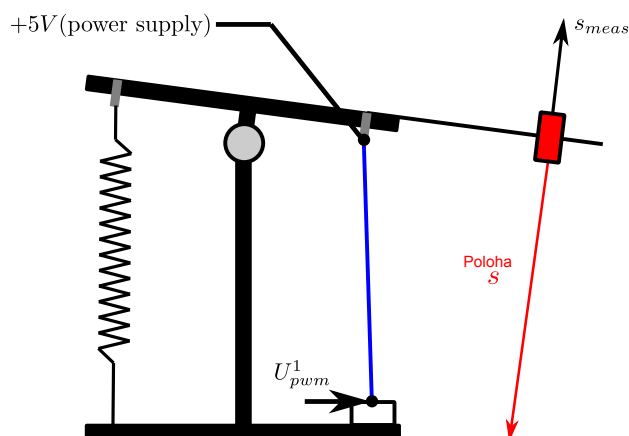
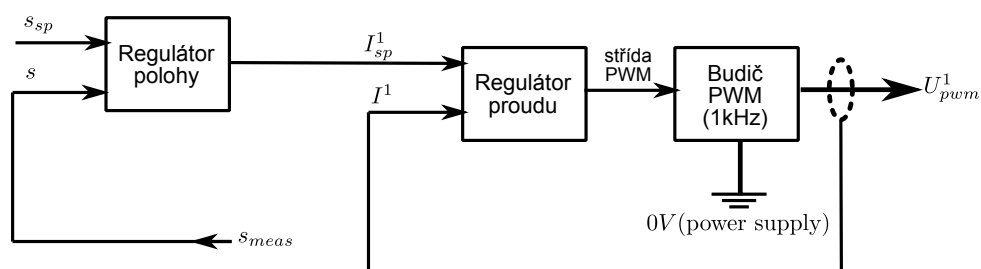
## Algoritmus řízení

V takovém případě je poloha drátu řízena pouze v kaskádě s regulátorem proudu a nadřazeným regulátorem polohy, viz blokové schéma na Obrázku 18, parametry regulátorů jsou shrnuty v Tabulce 3. Výhodou takové konfigurace je zásadní technické zjednodušení řídicího algoritmu (není nutné osazovat měření síly). Přesto je z provedených experimentů patrné, že kvalita řízení je téměř shodná.

	Regulátor/typ	
	Proud $I_1$ / PI	Poloha / PI
$K$	0.0001	250
$T_i$	0.001	1
$b$	1	1
$tt$	0.01	0.1
$hlim$	0.2	800
$lolim$	0	0
$dz$	0	0

[1 SMA drát a pružina (reg: proud 1 → poloha)]

Tabulka 3: Parametry PI regulátorů

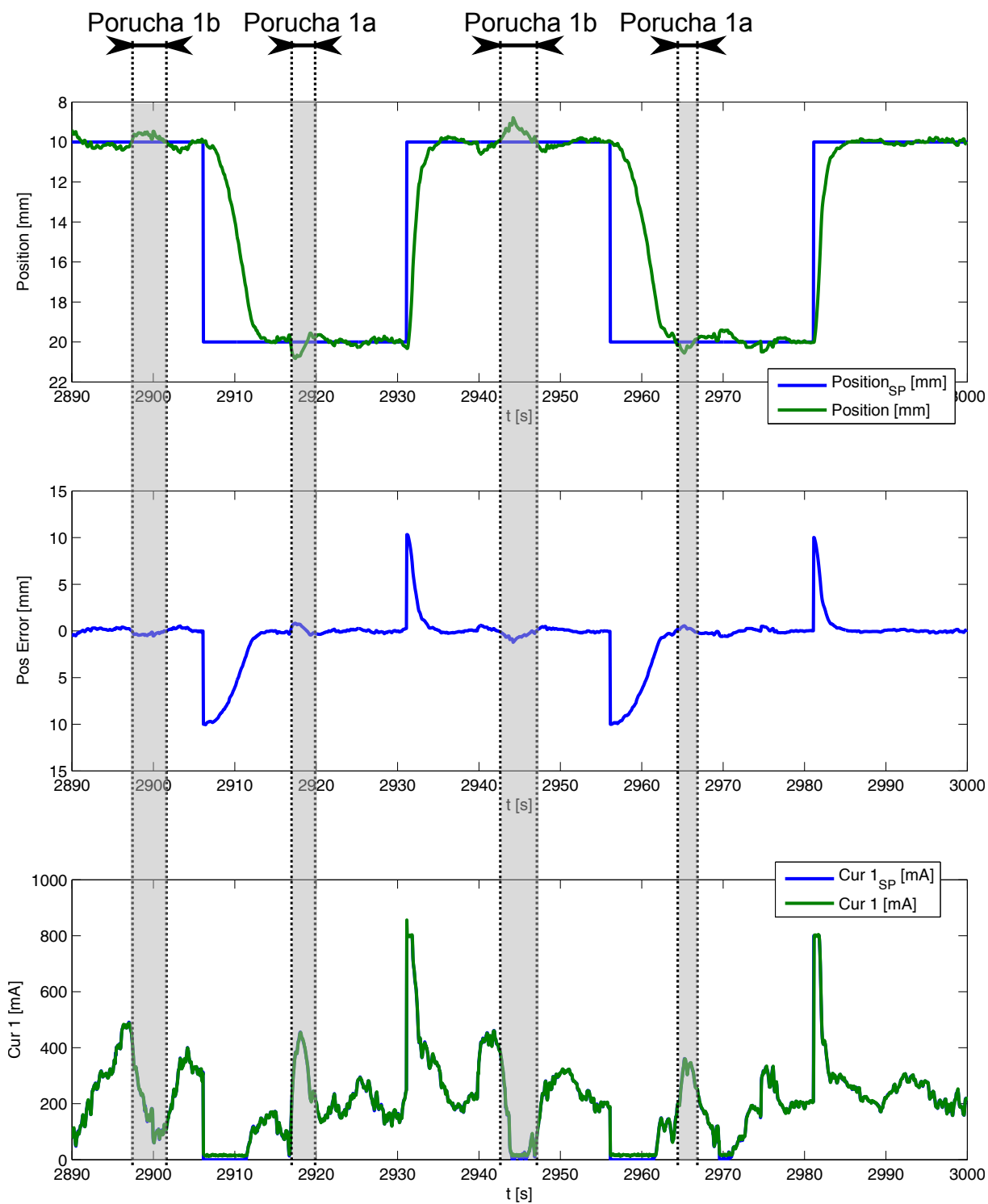


[1 SMA drát a pružina (reg: proud 1 → poloha)]

Obrázek 18: Blokové schématické znázornění řídicího algoritmu

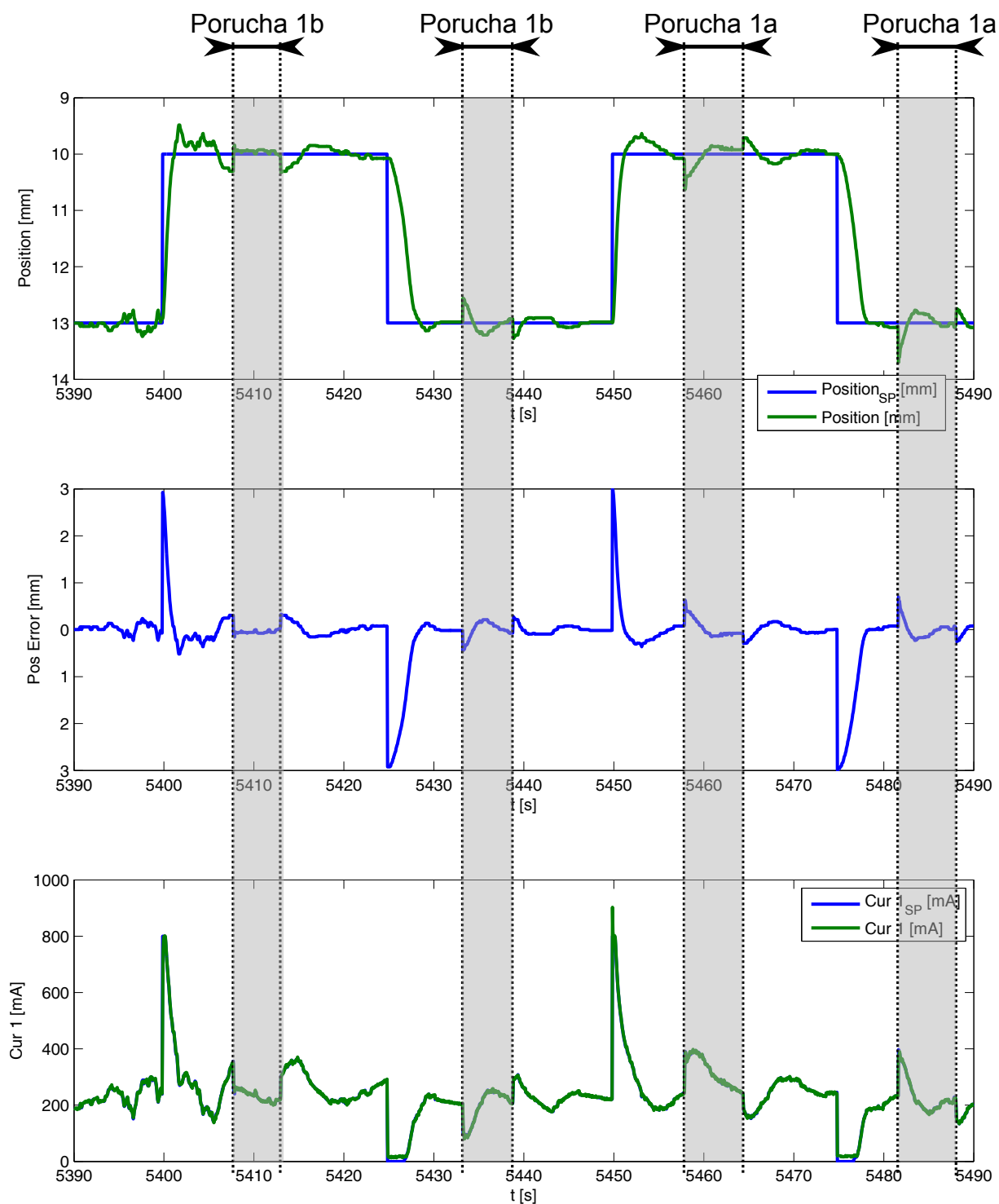
Odpovídající výsledky experimentů (analogicky jako v Kapitole 2) jsou znázorněny na následujících obrázcích.





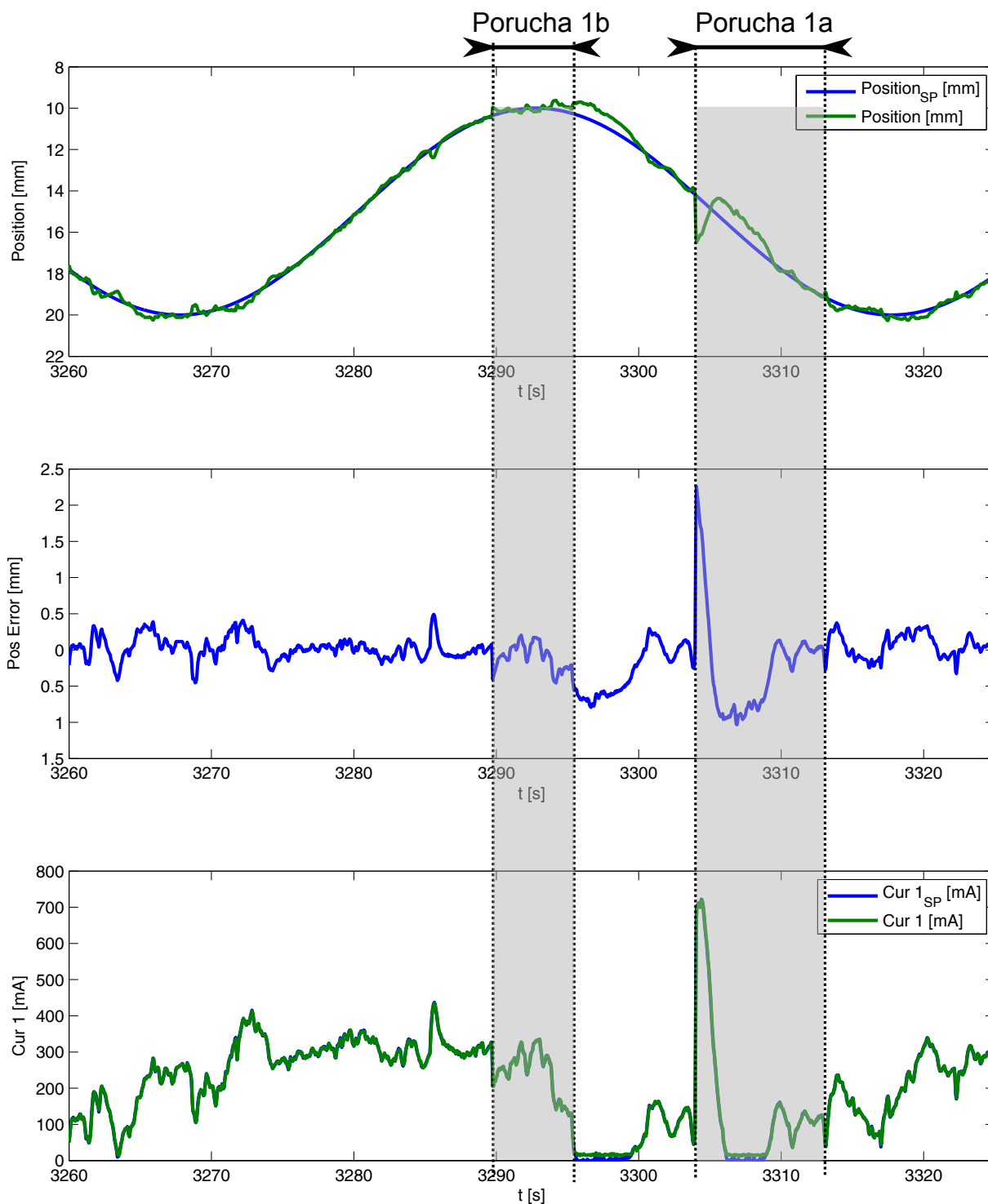
[1 SMA drát a pružina (reg: proud 1 → poloha)]

Obrázek 19: Výsledky řízení polohy a proudu v kaskádě pro požadovaný průběh SP1



[1 SMA drát a pružina (reg: proud 1 → poloha)]

Obrázek 20: Výsledky řízení polohy a proudu v kaskádě pro požadovaný průběh SP2



[1 SMA drát a pružina (reg: proud 1 → poloha)]

Obrázek 21: Výsledky řízení polohy a proudu v kaskádě pro požadovaný průběh **SP3**

## 5 Závěr

V předložené technické zprávě byly ověřeny možnosti polohového řízení jednoduchého testovacího standu s 1 DoF prostřednictvím SMA drátů. Simulační výsledky shrnuje následující výčet dle použitých strategií řízení:

### 1. Dva protichůdné dráty:

- **Přesnost regulace polohy (obdélník):** cca  $\pm 0.3$  [mm]
- **Odregulování poruchy:** Obě poruchy  $m_1 = 235$  [g],  $m_2 = 575$  [g]
- **Klíčové výhody:** Plné využití generované síly SMA dráty (nespotřebovává se potenciál v tahu na předeprnutí pružinou - resp. lze toto předeprnutí libovolně měnit regulací offsetu síly  $F_{off}$ , viz Obrázek 3).
- **Nevýhody:** Nutno použít plnou kaskádní regulaci (proud  $\rightarrow$  síla  $\rightarrow$  poloha) pro oba SMA dráty.

### 2. 1 drát s protichůdnou pružinou (plná kaskáda)

- **Přesnost regulace polohy (obdélník):** cca  $\pm 0.2$  [mm]
- **Odregulování poruchy:** Porucha  $m_1 = 235$  [g] (menší možné silové kompenzace - předeprnutí pružinou)
- **Klíčové výhody:** Možnost použití pouze 1 SMA drátu, jednodušší řízení (SW i HW).
- **Nevýhody:** Omezení působící síly vlivem nutnosti drátem předeprnat pružinu.

### 3. 1 drát s protichůdnou pružinou (redukovaná kaskáda)

- **Přesnost regulace polohy (obdélník):** cca  $\pm 0.3$  [mm]
- **Odregulování poruchy:** Porucha  $m_1 = 235$  [g] (menší možné silové kompenzace - předeprnutí pružinou)
- **Klíčové výhody:** Možnost použití pouze 1 SMA drátu bez regulátoru síly, jednodušší řízení (SW i HW - zejména měření síly),
- **Nevýhody:** Omezení působící síly vlivem nutnosti drátem předeprnat pružinu.

## Poděkování

Tento výzkum byl podpořen projektem č. TF02000041 Technologické agentury České republiky.

## Reference

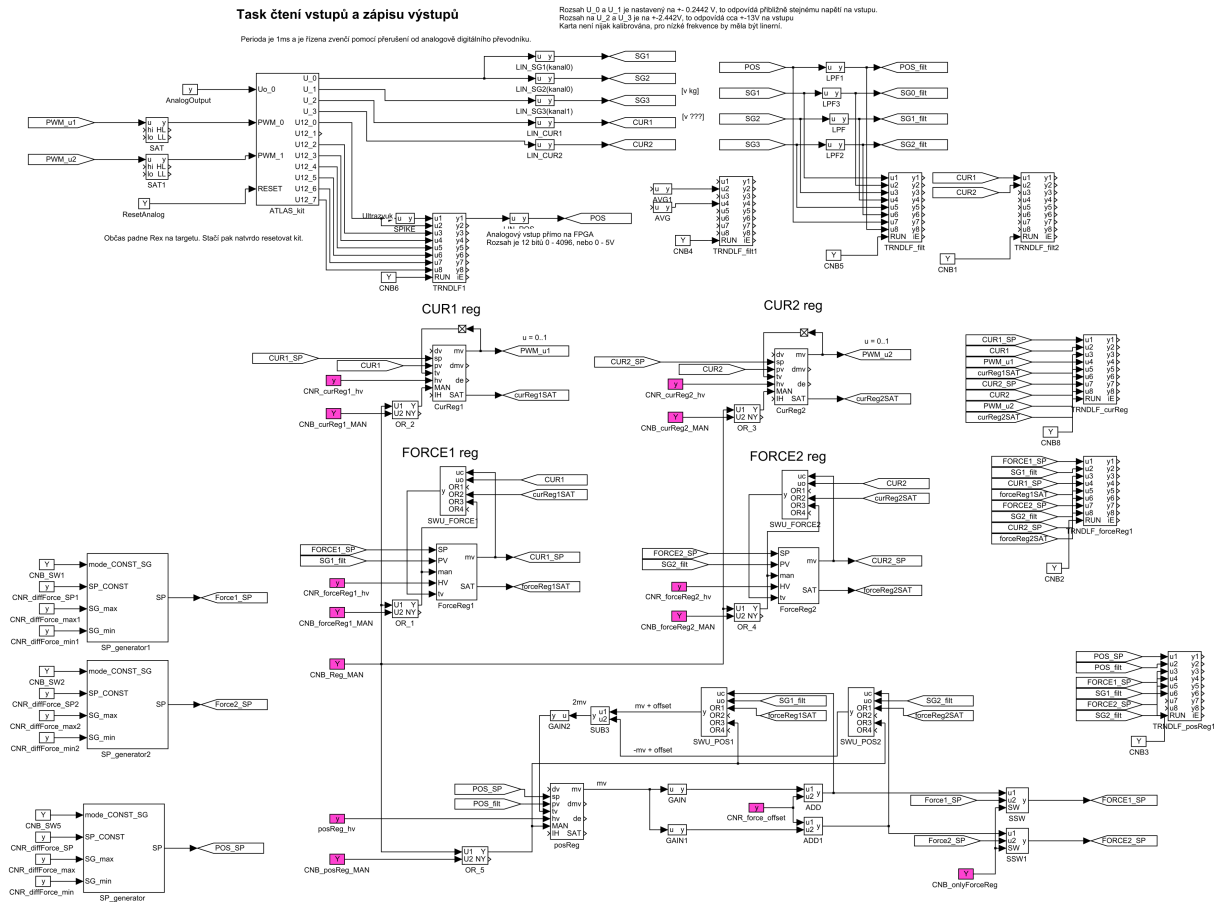
- [1] W. G. Ali Abdelaal and G. Nagib. Modeling and simulation of sma actuator wire. In *2014 9th International Conference on Computer Engineering Systems (ICCES)*, pages 401–405, Dec 2014. doi:10.1109/ICCES.2014.7030993.
- [2] Hashem Ashrafioun, Mojtaba Eshraghi, and Mohammad H. Elahinia. Position control of a three-link shape memory alloy actuated robot. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 17(5):381–392, 2006. URL: <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X06056780>, arXiv:<http://dx.doi.org/10.1177/1045389X06056780>, doi:10.1177/1045389X06056780.
- [3] Carrie A. Dickinson and John T. Wen. Feedback control using shape memory alloy actuators. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 9(4):242–250, 1998. URL: <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X9800900402>, arXiv:<http://dx.doi.org/10.1177/1045389X9800900402>, doi:10.1177/1045389X9800900402.
- [4] P. Drahoš. Nonlinear model of ni-ti wire actuator: Modeling for control purposes. In *2016 Cybernetics Informatics (K I)*, pages 1–5, Feb 2016. doi:10.1109/CYBERI.2016.7438629.
- [5] T. Evdaimon, M. Sfakiotakis, and D. P. Tsakiris. A closed-loop position control scheme for sma-actuated joints. In *22nd Mediterranean Conference on Control and Automation*, pages 1527–1532, June 2014. doi:10.1109/MED.2014.6961592.
- [6] Vahid Hassani, Tegoeh Tjahjowidodo, and Thanh Nho Do. A survey on hysteresis modeling, identification and control. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 49(1?2):209 – 233, 2014. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327014001186>, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.04.012>.
- [7] M. Al Janaideh, S. Rakheja, J. Mao, and C. Y. Su. Inverse generalized asymmetric prandtl-ishlinskii model for compensation of hysteresis nonlinearities in smart actuators. In *2009 International Conference on Networking, Sensing and Control*, pages 834–839, March 2009. doi:10.1109/ICNSC.2009.4919388.
- [8] A. Ktena, D.I. Fotiadis, P.D. Spanos, and C.V. Massalas. A preisach model identification procedure and simulation of hysteresis in ferromagnets and shape-memory alloys. *Physica B: Condensed Matter*, 306(1?4):84 – 90, 2001. Proceedings of the Third International Symposium on Hysteresis and Micromagnetics Modeling. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921452601009838>, doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0921-4526\(01\)00983-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-4526(01)00983-8).
- [9] Klaus Kuhnen. Modeling, identification and compensation of complex hysteretic nonlinearities: A modified prandtl-ishlinskii approach. *European Journal of Control*, 9(4):407 – 418, 2003. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S094735800370288X>, doi:<http://dx.doi.org/10.3166/ejc.9.407-418>.
- [10] B. Minorowicz, F. Stefanski, and D. Sedziak. Hysteresis modeling and position control of actuator with magnetic shape memory alloy. In *2016 17th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, pages 505–510, May 2016. doi:10.1109/CarpathianCC.2016.7501150.
- [11] Rexcontrols.com. Rex controls - advanced automation and control solutions, 2015. URL: <http://www.rexcontrols.com/>.
- [12] P Senthilkumar and M Umapathy. Use of load generated by a shape memory alloy for its position control with a neural network estimator. *Journal of Vibration and Control*,

- 20(11):1707–1717, 2014. URL: <http://dx.doi.org/10.1177/1077546313481000>, arXiv: <http://dx.doi.org/10.1177/1077546313481000>, doi:10.1177/1077546313481000.
- [13] Hunter Song, Eric Kubica, and Rob Gorbet. Resistance modelling of sma wire actuators. In *International Workshop, SMART MATERIALS, STRUCTURE and NDT in AEROSPACE, Conference NDT in Canada*, 2011.
- [14] M. Sreekumar, T. Nagarajan, M. Singaperumal, M. Zoppi, and R. Molfino. Design of sma actuated light weight parallel manipulator with intelligent controller. *IFAC Proceedings Volumes*, 39(15):310 – 315, 2006. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016385329>, doi:<http://dx.doi.org/10.3182/20060906-3-IT-2910.00053>.
- [15] V. A. Tabrizi and M. Moallem. Nonlinear position control of antagonistic shape memory alloy actuators. In *2007 American Control Conference*, pages 88–93, July 2007. doi:10.1109/ACC.2007.4282721.
- [16] Nguyen Trong Tai and Kyoung Kwan Ahn. A rbf neural network sliding mode controller for sma actuator. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 8(6):1296–1305, 2010. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s12555-010-0615-8>, doi:10.1007/s12555-010-0615-8.
- [17] Yee Harn Teh and Roy Featherstone. An architecture for fast and accurate control of shape memory alloy actuators. *The International Journal of Robotics Research*, 27(5):595–611, 2008. URL: <http://dx.doi.org/10.1177/0278364908090951>, arXiv:<http://dx.doi.org/10.1177/0278364908090951>, doi:10.1177/0278364908090951.
- [18] Ramiro Velázquez and E Pissaloux. Modelling and temperature control of shape memory alloys with fast electrical heating. *International Journal of Mechanics and Control*, 13(02):1–8, 2012.
- [19] Martin Švejda. Analýza trhu a dostupných robotických technologií pro průmyslovou inspekci (o). Technical report, Západočeská univerzita v Plzni, Katedra kybernetiky, 2017. URL: [http://home.zcu.cz/~msvejda/\\_publications/2017/4\\_Anal%C3%BDza%20trhu%20a%20dostupn%C3%BDch%20robotick%C3%BDch%20technologi%C3%AD%20pro%20pr%C5%AFmyslovou%20inspekci.pdf](http://home.zcu.cz/~msvejda/_publications/2017/4_Anal%C3%BDza%20trhu%20a%20dostupn%C3%BDch%20robotick%C3%BDch%20technologi%C3%AD%20pro%20pr%C5%AFmyslovou%20inspekci.pdf).
- [20] Martin Švejda. Preliminary architecture design and control algorithm of robin robot. Technical report, University of West Bohemia, Department of Cybernetics, 2017. URL: [http://home.zcu.cz/~msvejda/\\_publications/2017/3\\_conventionalCells\\_control.pdf](http://home.zcu.cz/~msvejda/_publications/2017/3_conventionalCells_control.pdf).

# Přílohy

Bloková schémata řídicích algoritmů pro předložené strategie řízení.

## Řízení polohy dvěma protichůdnými dráty

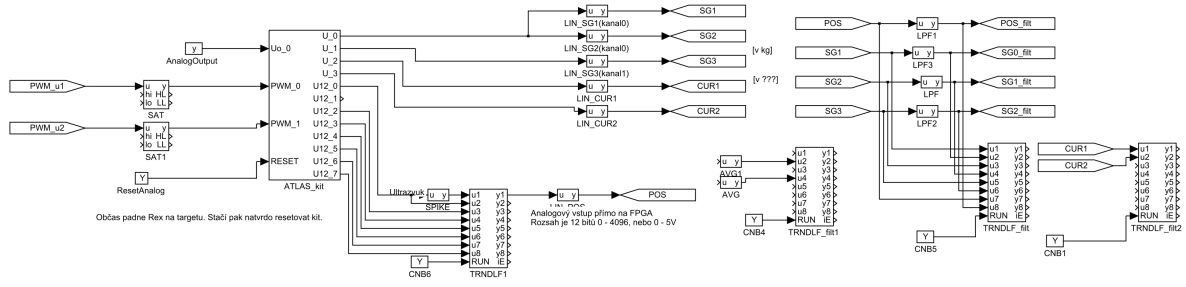


# Řízení polohy s 1 drátem a protichůdnou pružinou (plná kaskáda)

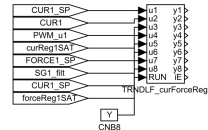
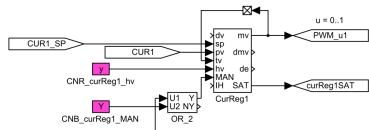
## Task čtení vstupů a zápisu výstupů

Rozsah U<sub>0</sub> a U<sub>1</sub> je nastavený na +-0.2442 V, to odpovídá přibližně stejnému napětí na vstupu.  
 Rozsah na U<sub>2</sub> a U<sub>3</sub> je na +-2.442V, to odpovídá cca +-13V na vstupu.  
 Karta není nijak kalibrována, pro nízké frekvence by měla být lineární.

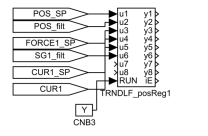
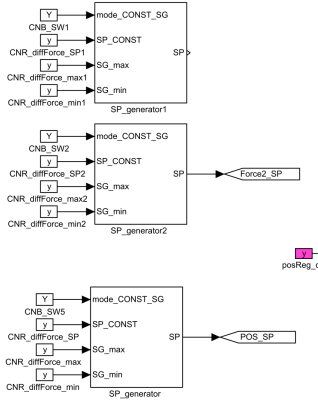
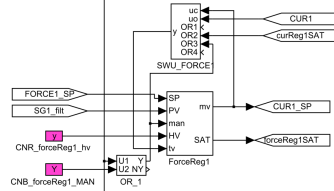
Perioda je 1ms a je řízena zvenčí pomocí přerušení od analogové digitálního převodníku.



### CUR1 reg



### FORCE1 reg



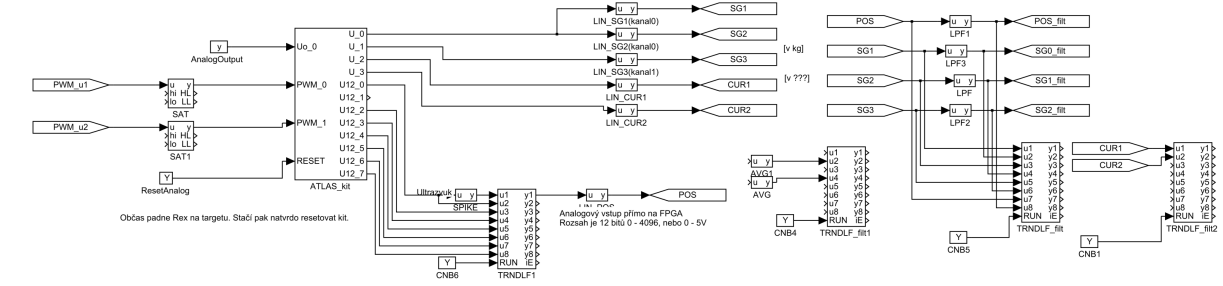


# Řízení polohy s 1 drátem a protichůdnou pružinou (redukovaná kaskáda)

## Task čtení vstupů a zápisu výstupů

Rozsah U\_0 a U\_1 je nastavený na +0.2442 V, to odpovídá přibližně stejnému napětí na vstupu.  
 Rozsah na U\_2 a U\_3 je na +2.442V, to odpovídá cca +13V na vstupu  
 Karta není nijak kalibrována, pro nízké frekvence by měla být lineární.

Perioda je 1ms a je řízena zvenčí pomocí přerušení od analogové digitálního převodníku.



## CUR1 reg

