

# PROJEKTOVÁ ZPRÁVA

## RPO

Bodové hodnocení předmětu RPO:

- Projektová zpráva: **70b**
  - Review 10b
  - Stavové řízení 20b
  - Identifikace sys. 20b
  - HIL 20b
- Ústní zkouška: **30b**

Celkem: **100b**

Jméno a Příjmení: Pavol Ženčár

Číslo studenta: 191859

Datum: 19.6.2020

## Obsah

<b>1. Review odborného článku .....</b>	<b>3</b>
1.1. Review.....	3
1.2. Kritické zhodnocení.....	5
<b>2. Stavové řízení (LQG) .....</b>	<b>6</b>
2.1. Tvorba a popis modelu .....	6
2.2. Odezva v otevřené smyčce .....	8
2.3. LQR design - řízení do nuly.....	9
2.4. LQR design - řízení do bodu – rscale.....	10
2.5. Studium chování systému .....	10
2.6. Návrh pozorovatele .....	13
2.7. Studium chování systému s pozorovatelem (simulace).....	17
2.8. Zhodnocení celé úlohy a závěr.....	19
<b>3. Identifikace systému .....</b>	<b>20</b>
<b>Analýza systému a generování I/O dat .....</b>	<b>20</b>
3.1. Tvorba a popis modelu systému.....	22
3.2. Odhad parametrů.....	22
3.3. (BONUS) Feedforward.....	27
3.4. Zhodnocení celé úlohy a závěr.....	28
<b>4. HIL .....</b>	<b>29</b>
4.1. Volba a popis řízeného systému .....	29
4.2. Model řízeného systému v Simulinku .....	30
4.3. Modely senzorů a akčních prvků .....	33
4.4. Řídící jednotka a přizpůsobení signálů .....	36
4.5. Průběhy testů .....	39
4.5.1. Správné nastavení.....	39
4.5.2. Změna parametrů .....	42
4.5.3. Závada .....	45
4.6. Zhodnocení celé úlohy a závěr.....	47

# 1. Review odborného článku

---

Název článku: Balancing and Velocity Control of a Unicycle Robot Based on the Dynamic Model

Autoři článku: Seong I. Han , Jang M. Lee

Odkaz na článek (příp. DOI): [10.1109/TIE.2014.2327562](https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2327562)

## Seznam Příloh:

- [BalancingAndVelocityControlOfUnicycle.pdf](#)

## 1.1. Review

Článek sa zabýva popisom , štúdiom dynamiky , návrhom regulátorov polohy a rýchlosti a následne experimentálnym otestovaním jednokolesového robota. Jednokolesový robot obsahuje v hornej časti rotačný disk , ktorý slúži na vyvažovanie v priečnej ose. Systém má 2 aktuátory(DC motory). Jeden poháňa koleso , ktoré je priamo v kontakte s podložkou v spodnej časti a druhý poháňa disk natočený o 90 stupnov voči kolesu v hornej časti. Tento jednokolesový robot sa dá rozložiť na dva mechanické systémy. Prvý systém je inverzné kyvadlo skladajúce sa s kolesa a tela zariadenia. Aktuátorom na kolese je možné ovplyvňovať pozdĺžny náklon(pitch) a polohu,rýchlosť celého zariadenia v pozdĺžnej osi. Druhý systém je inverzné „Reaction wheel“ kyvadlo skladajúce sa z tela zariadenia a disku. Aktuátorom na disku je možné ovplyvňovať priečny náklon(roll) zariadenia. V danom zariadení nie je možné ovplyvňovať natočenie(yaw). Toto zariadenie bolo reálne skonštruované a fotka znázorňujúca toto zariadenie je zobrazená v článku na strane 2.

Na zhotovenie dynamických rovníc sú dva možné spôsoby. V článku sú spomenuté predchádzajúce štúdie tohto problému , ktoré na zhotovenie dynamických rovníc použili prístup , kde od seba úplne oddelili 2 mechanické systémy a modelovali inverzné kyvadlo a reakčné inverzné kyvadlo úplne oddelene. Tento prístup je jednoduchší ale z dôvodu zjednodušenia je dosiahnutá menej efektívna regulácia. Autori článku modelovali systém neoddelene. Dynamické rovnice boli získané pomocou Lagrangovej rovnice 2. druhu. Boli zostavené rovnice celkovej kinetickej a potenciálnej energie a z nich boli zostavené Lagrangové rovnice. Do modelu systému bola taktiež zohľadnená dynamika DC motor a podľa rovníc DC motora sú prepočítané momenty na vstupné napätia DC motorov. Tým pádom ako vstupy modelu sú priamo napätia na DC motoroch.

Použité boli dva typy regulátorov. Na regulovanie pozdĺžneho náklonu a celkovej polohy/rýchlosti zariadenie bol použitý „non zero setpoint LQR regulátor“. Na regulovanie(stabilizáciu) priečného náklonu bol použitý „Sliding mode“ regulator.

Na zrealizovanie LQR regulátoru bolo potrebné najprv vytvoriť stavový model. Ten bol vytvorený z kompletných dynamických rovníc. Ako vstup je napätie na DC motore umiestnenom v kolese zariadenia. Stavys sú  $[\psi, \dot{\psi}, \theta, \dot{\theta}]'$ , kde  $\psi$  je uhol pozdĺžneho natočenia a  $\theta$  je uhol natočenia kolesa. Referencia  $\psi$  udáva požadovaný pozdĺžny náklon a referencia  $\theta$  udáva požadovanú polohu. Pre návrh LQR je potrebné určiť optimálne zosílenie  $K$ . Toto zosílenie je určené tak, aby minimalizovalo hodnotiacu funkciu  $J = \int_0^\infty [\tilde{x}(t)' Q \tilde{x}(t) + \tilde{u}(t)' R \tilde{u}(t)] dt$ . Kde  $Q$  a  $R$  sú vahové matice. Spätná vazba je definovaná ako  $\tilde{u}(t) = -K \tilde{x}(t)$ . Týmto spôsobom bolo vypočítané zosílenie  $K$ .

„Sliding mode“ regulator je regulator robustného nelineárneho typu. Tento regulátor využíva nespojitú kontrolnú štruktúru. Regulátor prepína medzi 2 kontrolnými štruktúrami. Prepínanie závisí na polohe regulovaného signálu. Toto spôsobí „kĺzanie“ po definovanej polohovej hranici. Trajektória regulovanej polohy konverguje k tejto hranici. Zvyčajne je na prepínanie použitá funkcia  $\text{signum}()$ , táto funkcia ale spôsobuje excesívne kmitanie okolo rovnovážnej polohy. Toto môže spôsobiť vysokofrekvenčné dynamické deje, ktoré narušia reguláciu (vid'. Strana 6, fig.6). Preto autori článku namiesto funkcie  $\text{signum}()$  použili hyperbolickú funkciu  $\tanh()$ . Toto výrazne zlepšilo efektívnosť regulátora. Blokové schema regulátora je vidieť na strane 5(fig.5). V rovniciach (28) až (38) je popísaný postup získania parametrov regulátora.

V poslednej časti článku sú popísané experimenty a výsledky (fig.6 až fig.16). Je možné vidieť rozdiel pri použití funkcie  $\text{signum}()$  a  $\tanh()$  pri regulácii priečného náklonu. Ďalej je možné vidieť výsledky regulácie pri skokovej zmene požadovanej rýchlosti celého zariadenia a taktiež pri lichobežníkovej zmene požadovanej rýchlosti celého zariadenia. Pre tento typ systému je vhodnejší lichobežníkový priebeh požadovanej rýchlosti. Pri jazde s konštantnou rýchlosťou bolo dosiahnutý maximálny priečný náklon  $\pm 3^\circ$ . Z dôvodu nerozdeleného dynamického modelu sa výrazne zlepšila regulácia rýchlosti oproti prístupu s rozdeleným dynamickým modelom.

## 1.2. Kritické zhodnocení

Dynamické rovnice boli modelované zložitejším spôsobom , čo sa osvedčilo pri funkcii regulátorov. Na reguláciu boli použité 2 typy regulátorov, LQR a „Sliding mode“ regulátor. Tieto regulátory sa preukázali za funkčné a priečny náklon je efektívne stabilizovaný a jednokolesový robot dodržiava požadovanú rýchlosť , aj keď okolo nej osciluje. Požadovaná poloha je taktiež dodržiavaná s osciláciou okolo nej. V článku je spomenuté , že priečny a pozdĺžny náklon je meraný pomocou akcelerometru a gyroskopu , ale nie je viac špecifikovaný spôsob ako sú merané veličiny presne získané. Taktiež nie je špecifikovaná presnosť týchto senzorov. Bolo by zaujímavé použiť pri meraní stavového pozorovateľa a porovnať výsledky. Zároveň by bolo zaujímavé sledovať funkčnosť regulátorov pri externej poruche (fyzické posunutie). Nahradenie funkcie `signum()` za funkciu `tanh()` pri kĺzavom regulátory sa osvedčilo ako veľmi efektívne riešenie , pri použití klasickej funkcie `signum()` dokonca regulácia nebola po určitom čase úspešná, avšak s funkciou `tanh()` bola regulácia efektívna.

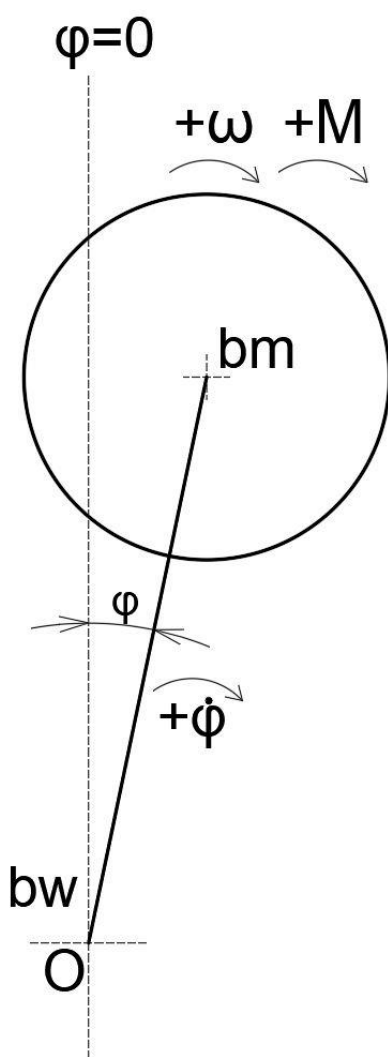
[1] [https://en.wikipedia.org/wiki/Sliding\\_mode\\_control](https://en.wikipedia.org/wiki/Sliding_mode_control)

## 2. Stavové řízení (LQG)

Název vybraného modelu: Reaction wheel pendulum

### Seznam Příloh:

- Zencar\_rpo\_2020\_LQG\_runScript\_reactionWheel.m
- Zencar\_rpo\_2020\_LQG\_simModel\_reactionWheel.slx
- Zencar\_rpo\_2020\_LQG\_odvodenieRovnic\_reactionWheel.jpg
- Zencar\_rpo\_2020\_LQG\_simulationdata\_reactionWheel.mat
  - Data for faster plotting and visualization



### 2.1. Tvorba a popis modelu

Na obrázku 1 je vidieť modelovaný systém. Stavby boli určené ako  $[x_1, x_2, x_3]' = [\varphi, \dot{\varphi}, \omega]'$ , kde  $\varphi$  je natočenie kyvadla,  $\dot{\varphi}$  je uhlová rýchlosť kyvadla a  $\omega$  je uhlová rýchlosť reakčného kolesa.

Pohybová rovnica kyvadla je :

$$I\ddot{\varphi} = k_{mgl}\sin(\varphi) - bw\dot{\varphi} - M_m, \quad (1)$$

Kde  $I$  je celkový moment zotrvačnosti sústavy voči stredú otáčania  $O$ ,  $k_{mgl}$  je gravitačná konštanta sústavy,  $bw$  je viskózne trenie v ložisku kolesa a  $M_m$  je mechanický moment pôsobiaci na reakčné koleso.

Pohybová rovnica reakčného kolesa je :

$$I_w(\ddot{\varphi} + \dot{\omega}) = M_m,$$

Kde  $I_w$  je moment zotrvačnosti reakčného kolesa voči jeho stredú otáčania.

Mechanický moment je vyjadrený ako:

$$M_m = M_e - bm\omega,$$

Kde  $M_e$  je elektrický moment a  $bm$  je koeficient viskózneho trenia motora. Elektrická časová konštanta motora bola zanedbaná.

Image 1 – Modeled system

(1) Odvodenie rovníc v prílohe

„Zencar\_rpo\_2020\_LQG\_odvodenieRovnic\_reactionWheel.jpg“

Z pohybových rovníc a určených stavov bol odvodený stavový model:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ Kmg/l & -bw/l & -bm/l \\ -Kmg/l & bw/l & -(l+lw)/(l*lw)bm \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1/l \\ (lw+l)/(l*lw) \end{bmatrix} Me$$

Tento model je linearizovaný okolo bodu  $\varphi = 0$ . Linearizovaný model bol použitý na návrh LQR a kalmanovho filtra. Nelinearizovaný model obsahuje namiesto matice A funkciu obsahujúcu výraz  $\sin(x_1)$  namiesto výrazu  $x_1$  a ten predstavuje nelineárny plant, ktorý je použitý na simuláciu reálneho systému.

Parametre a gravitačná konštanta  $Kmg/l$  a celkový moment zotrvačnosti sú definované ako :

```
bw=0.1;%viscous friction of pendulum arm joint
bm=0.05;%viscous friction of motor

rm=0.055;%half of motor diameter
mm=0.1;%mass of motor
lm=0.4;%distance from 0 to motor

rw=0.2;%half of wheel diameter
mw=0.4;%wheel mass
lw=0.4;% distance from 0 to wheel center

mb=0.1;%pendulum arm mass
lb=0.2;%distance from 0 to center of gravity of pendulum wheel arm;
rb=2*lb;%length of pendulum arm

Kmg1=(mm*lm + mw*lw + mb*lb)*g;%gravitational constant

Im=0.5*mm*rm^2;%moment of inertia of motor
Imo=Im+mm*lm^2;%moment of inertia of motor in respect to 0

Iw=mw*rw^2;%moment of inertia of wheel
Iwo=Iw+mw*lw^2;%moment of inertia of wheel in respect to 0

Ibo=1/3*mb*rb^2;%moment of inertia of pendulum arm

I=Imo+Iwo+Ibo;%total moment of inertia
```

## 2.2. Odezva v otevřené smyčce

Linearizovaný stavový model je nestabilný , čo dokazuje aj jeden kladný pól. Preto na odozvu v otvorenej smyčce a ďalšie simulácie bude použitý nelineárny systém , ktorý je stabilný. Regulácia je ale založená na linearizovanom modele , preto bude fungovať len v okolí bodu okolo ktorého bol model linearizovaný.

Odezva v otvorenej smyčce s počiatočným uhlom  $\varphi = 0.05\text{rad}$ :

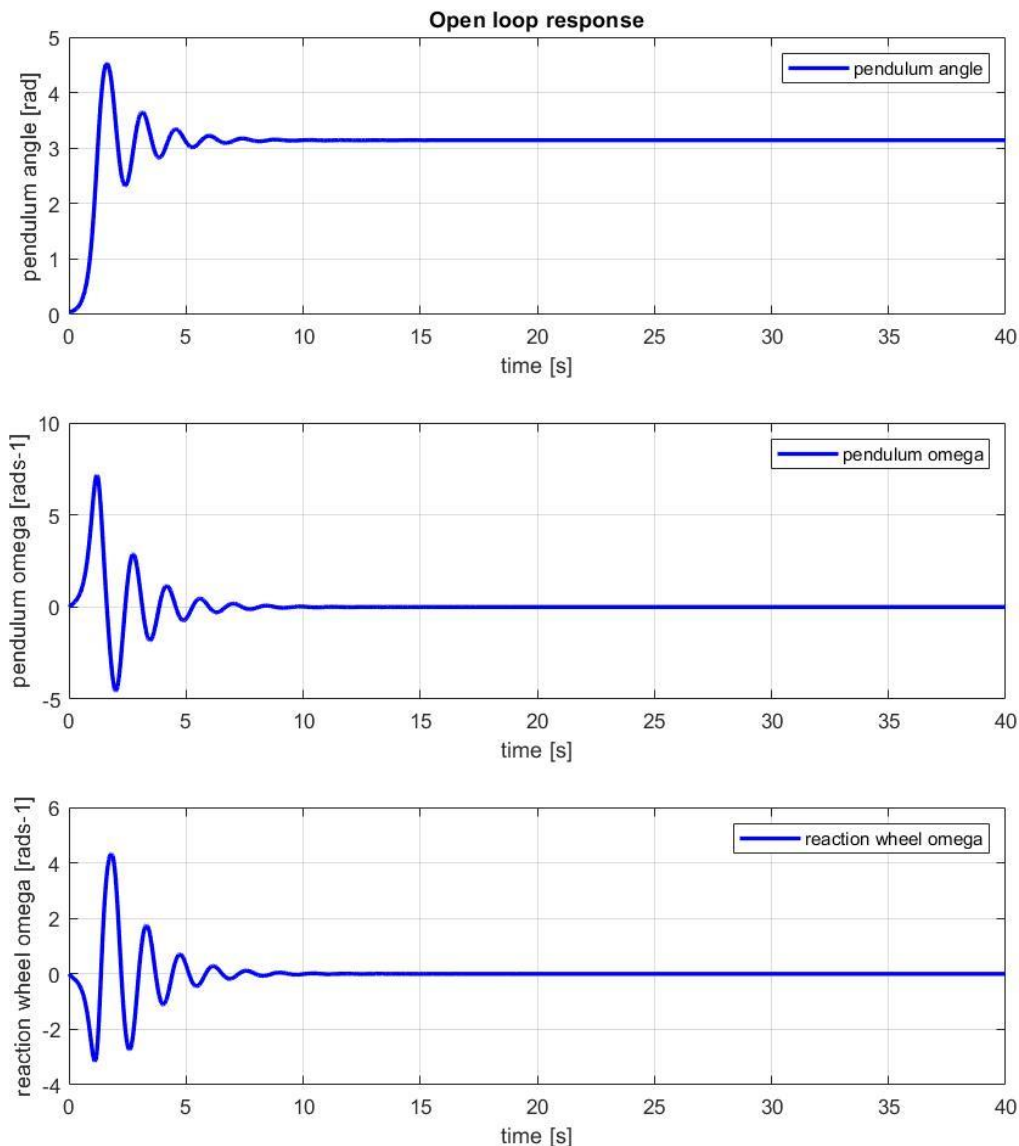


Figure 1 : Open loop response of nonlinear system



### 2.3. LQR design - řízení do nuly

LQR regulátor bol navrhnutý z linearizovaného modelu a aplikovaný na nelineárny model. Váha bola určená na uhol natočenia kyvadla.

Regulácia do nuly s počiatočného uhlu  $\varphi = -0.2\text{rad}$ . Merané všetky stavy, žiaden šum. Váhová matica  $Q=\text{diag}(50, 5\text{e-}4, 5\text{e-}4)$ .

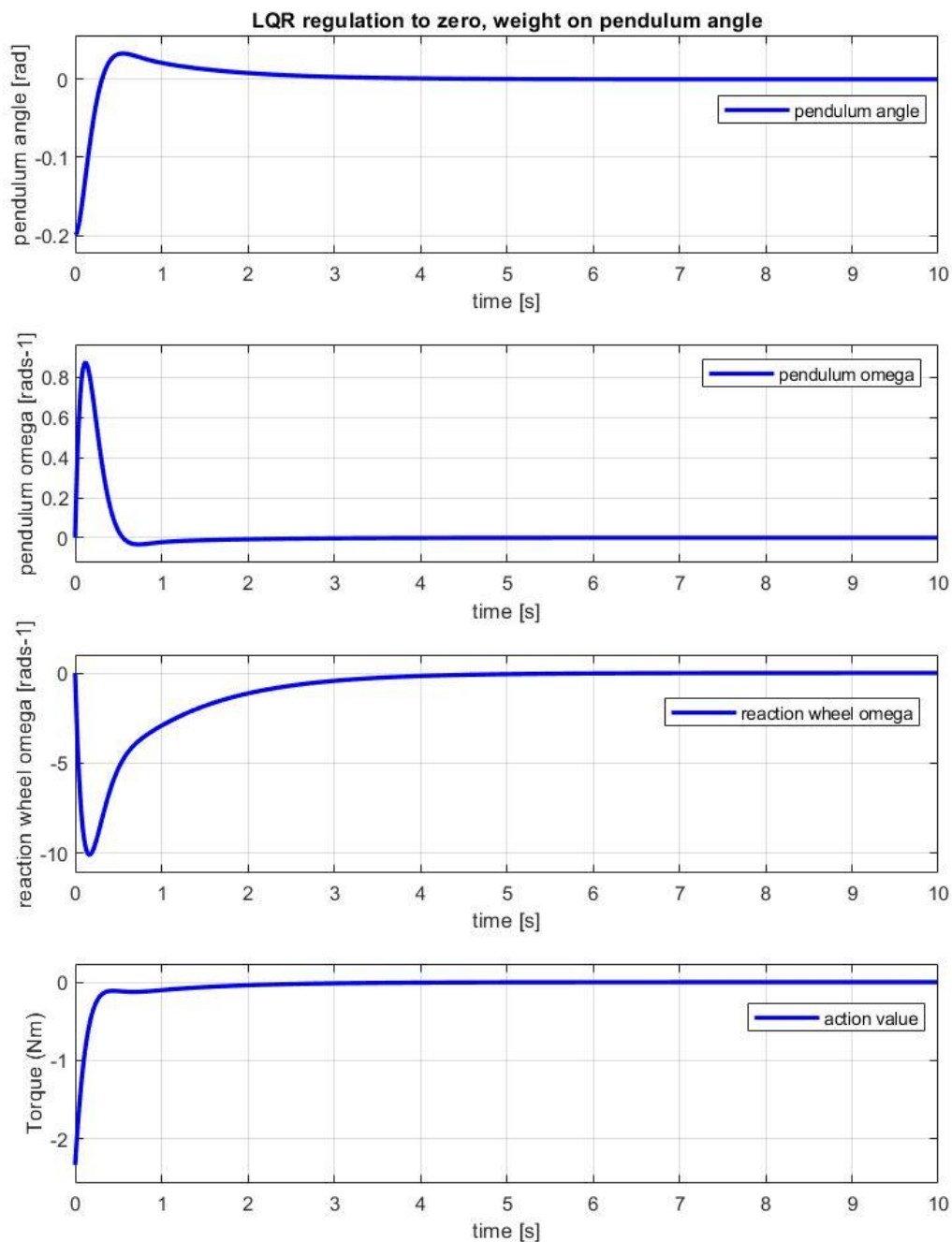


Figure 2 : Zero point LQR regulation

## 2.4. LQR design - řízení do bodu – rscale

Tento systém nie je možné regulovať do bodu. Na to aby bol udržaný konštantný kladný alebo záporný uhol je potrebné na reakčné koleso pôsobiť nenulovým konštantným efektívnym mechanickým momentom. To znamená že v takom prípade by uhlová rýchlosť reakčného kolesa konvergovala do nekonečna. Keďže na reakčné koleso pôsobí viskózne trenie závislé na uhlovej rýchlosti, elektrický moment vyprodukovaný DC motorom by taktiež konvergoval do nekonečna.

Toto dokazuje aj hodnota vypočítaného kompenzačného zosílenia  $\bar{N}$  pomocou funkcie rscale, ktoré je väčšie ako  $1e+20$ .

## 2.5. Studium chování systému

Po pridaní saturácie  $\pm 0,8\text{Nm}$  je priebeh pri regulácii s váhovou maticou  $Q = \text{diag}(50, 5e-4, 5e-4)$ :

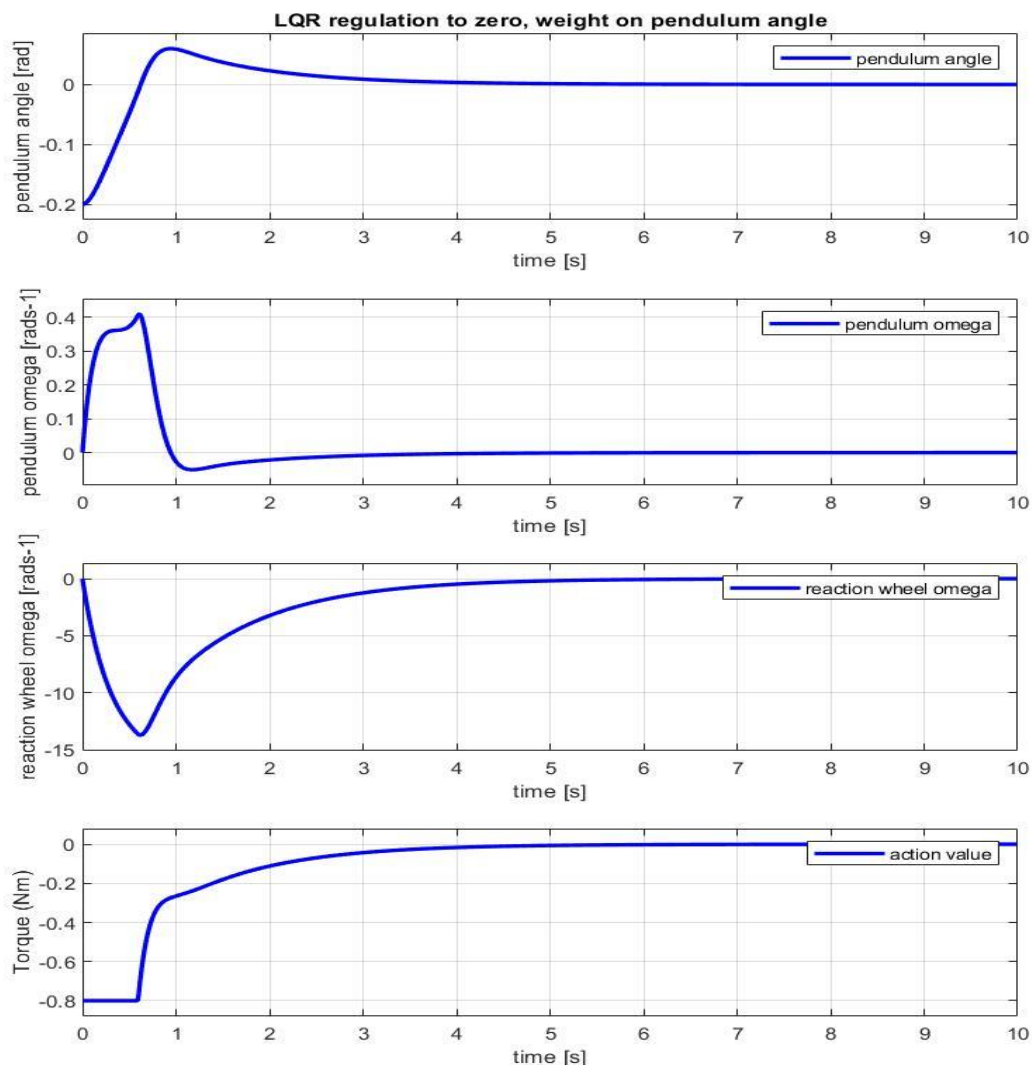


Figure 3 : zero point LQR with same weight on angle

Zmenou matice Q na hodnotu  $\text{diag}(50, 50, 5e-4)$  dosiahneme zmenu odozvy:

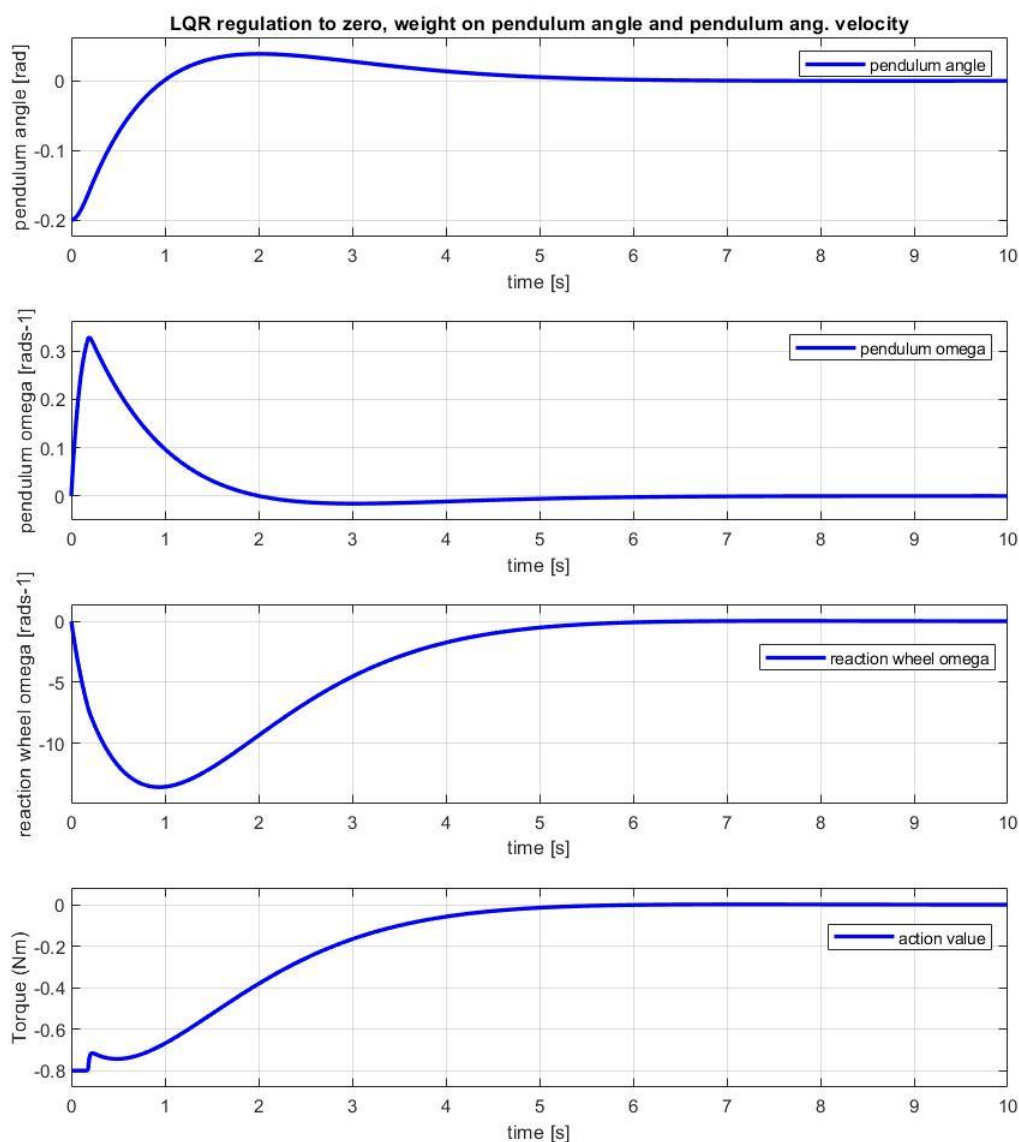


Figure 4 : zero point LQR with same weight on angle and angular velocity

Pridaním váhy na uhlové zrýchlenie kyvadla dosiahneme menší prechyt a menšie hodnoty akčnej veličiny, ale celková regulácia trvá dlhší čas, čo môže zle vplývať na rýchlejšie zmeny vonkajších faktorov.

Z týchto dôvodov bola experimentálne určená matica  $Q$  ako  $\text{diag}(50, 10, 5e-4)$ .  
Regulačná odozva vyzerá takto :

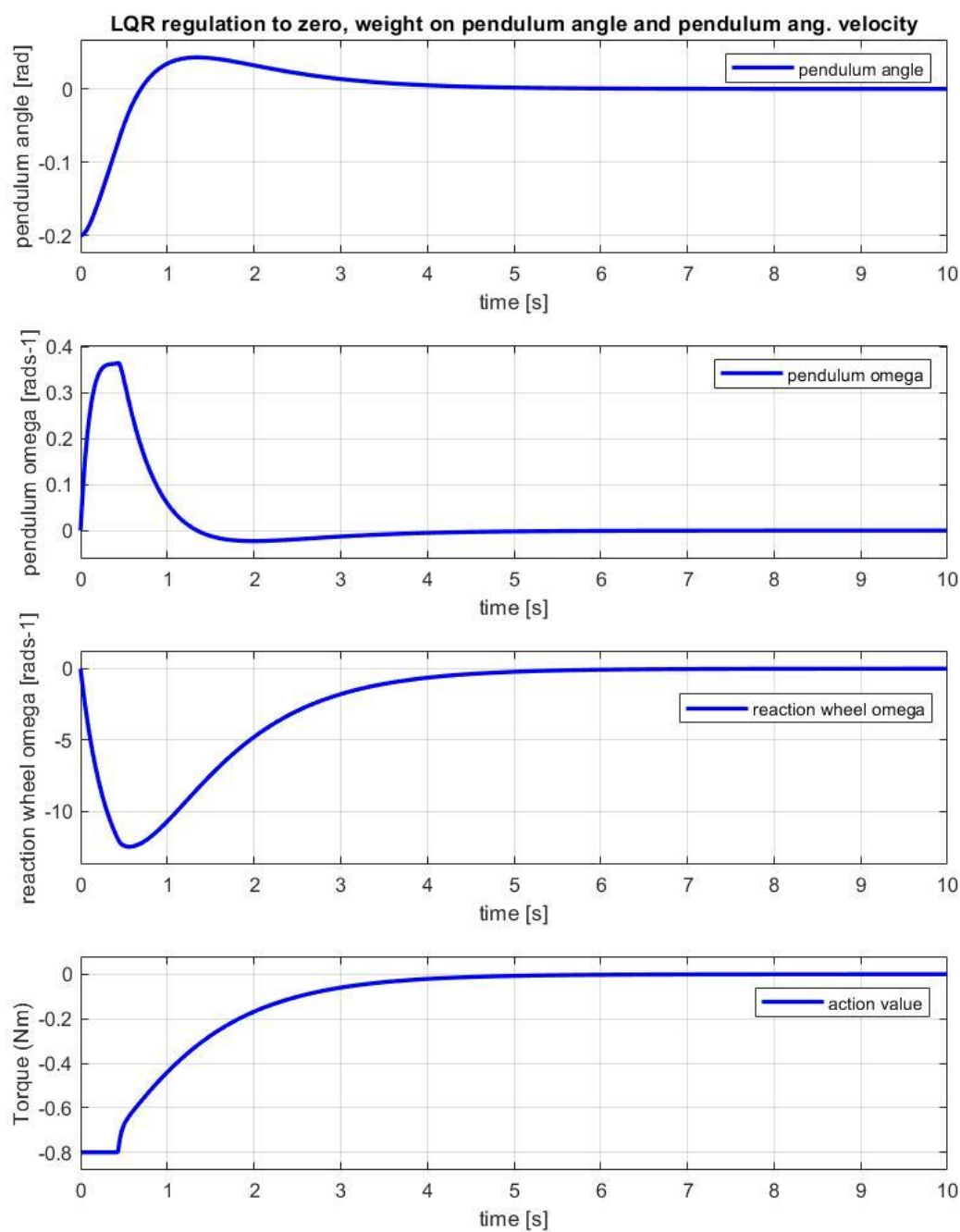


Figure 3 : zero point LQR with majority of weight on angle and some weight on angular velocity

## 2.6. Návrh pozorovatele

Doteraz boli merané všetky stavy a v meraní sa nevyskytoval žiaden šum. V realite ale by bol meraný len jeden stav a to uhol natočenia celého kyvadla. Zároveň by toto meranie obsahovalo šum. V simulácii sa meral len prvý stav a bol pridaný šum. Následne sa pomocou linearizovaného modelu navrhol kalmanov filter ako pozorovateľ.

Algoritmus kalmanovho filtra :

```
function [xhat,P] = fcn(u,yk,Ad,Bd,H,V,W,xhat,P)

    xhatk1k=Ad*xhat+Bd*u;
    Pk1k=Ad*P*Ad'+V;

    yhat=H*xhatk1k;
    ywave=yk-yhat;
    S=H*Pk1k*H' + W;
    K=P*H'*inv(S);

    xhatk1k1=xhatk1k+K*ywave;
    Pk1k1=(eye(3)-K*H)*Pk1k;

    xhat=xhatk1k1;
    P=Pk1k1;

end
```

Maticami  $V$  a  $W$  je možné ladiť kalmanov filter. Matica  $V$  bola určená ako  $\text{eye}(3)$  a bolo pozorované zmeny chovania klamanovho filtra pre rôzne hodnoty  $W$ . Reálne dáta merania boli použité s LQR regulácie do nuly. Bol pridaný šum. Počiatočný odhad  $xhat$  bol určený ako  $[0.2,0,0]'$ .

$W = 10$  :

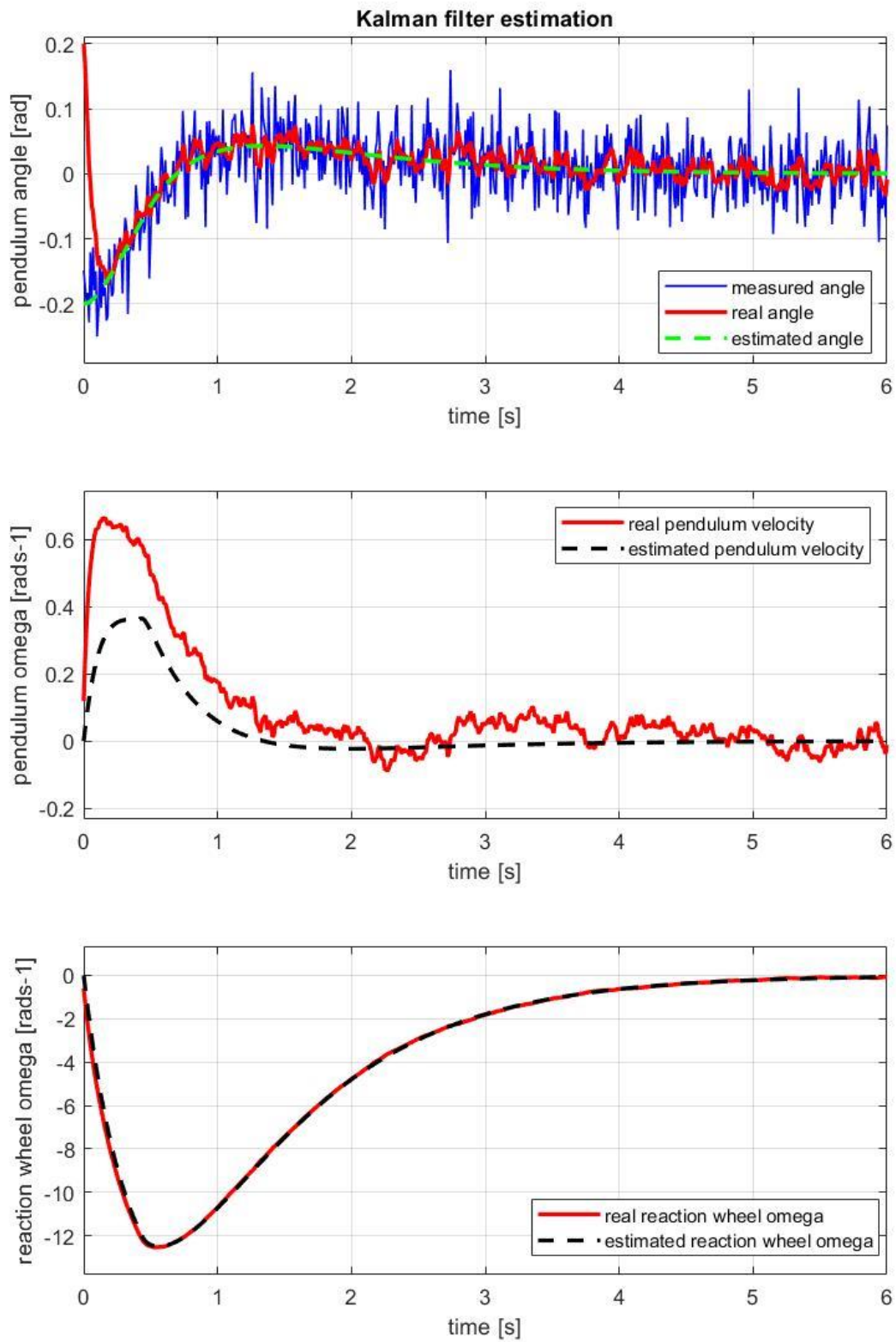


Figure 4 – Kalman filter with weight  $W = 10$



$W=50$  :

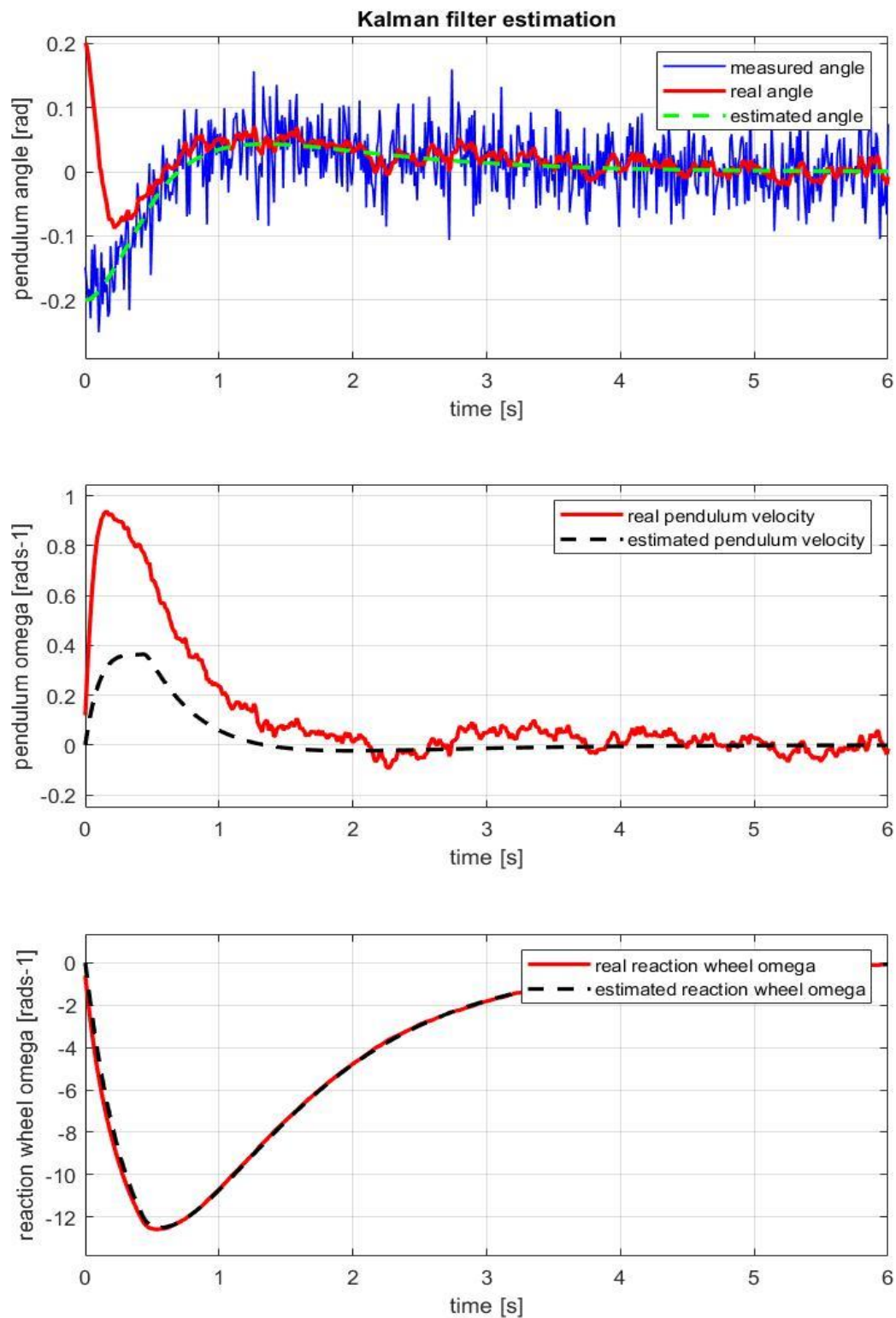


Figure 5 – Kalman filter with weight  $W = 50$

$W=100$ :

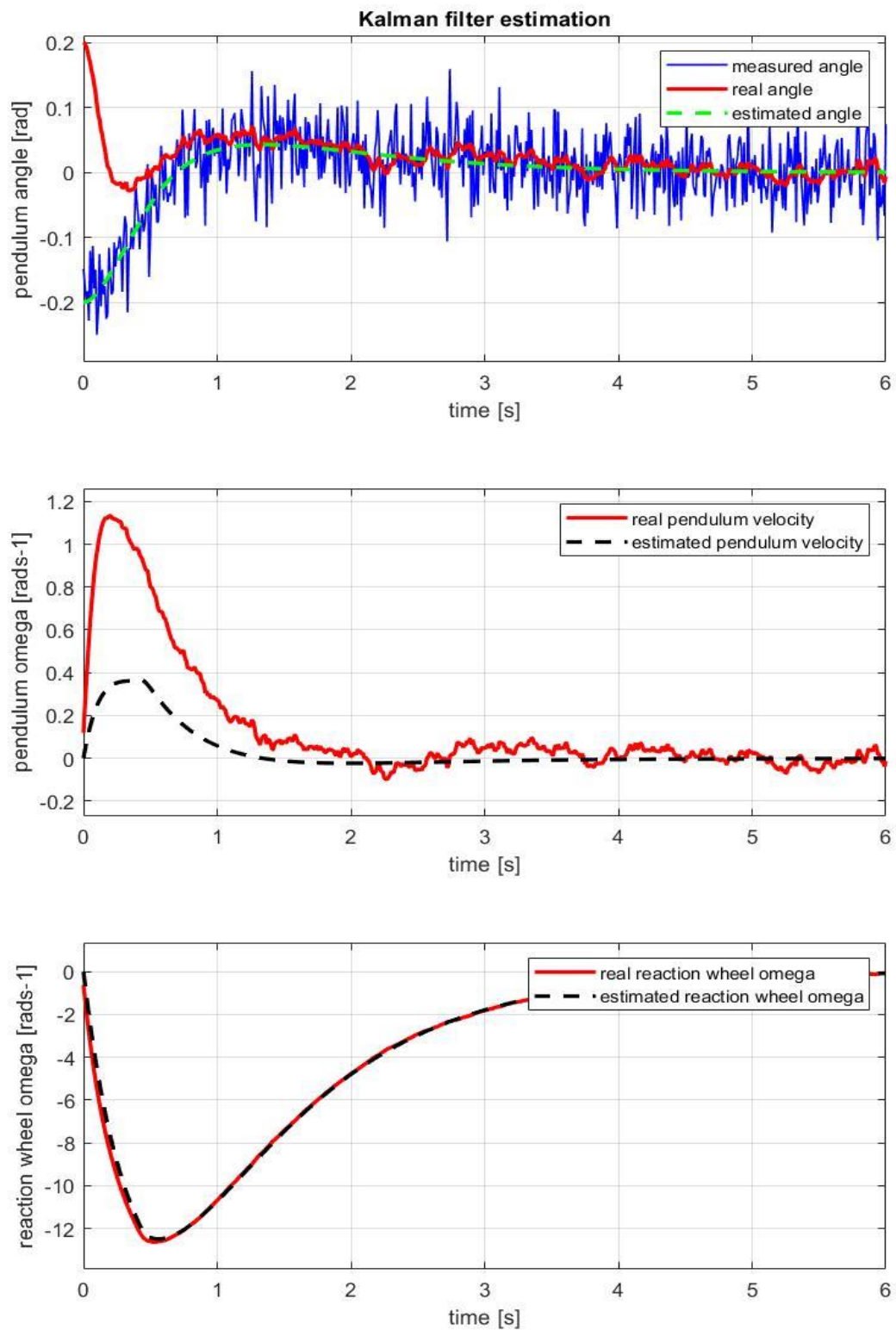


Figure 6 – Kalman filter with weight  $W = 100$



Zvyšujúcou hodnotou  $W$  sa filtrácia zašumeného signálu zlepšuje, ale zároveň pri nepresnom prvotnom odhade sa odhadovaná hodnota približuje k reálnej hodnote dlhší čas.

Kedže v reálnom systéme by v čase inicializácie kalmanovho filtra už bola k dispozícii aktuálna nameraná hodnota uhlu kyvadla, tak by sa táto hodnota použila ako počiatočný odhad a preto nie je dôležitá rýchlosť vyriešenia nesprávneho počiatočného odhadu. Z tohto dôvodu bola určená hodnota  $W = 300$ . Toto zaručuje účinnú filtráciu šumu.

## 2.7. Studium chování systému s pozorovatelem (simulace)

Na simuláciu systému boli použité hodnoty počiatočného uhlu  $-0,2\text{rad}$ , počiatočný odhad je počiatočný uhol plus šum. LQR navrhnuté podľa odseku 2.5, kalman navrhnutý podľa odseku 2.6.

V čase  $t=3\text{s}$  a  $t=5.6$  sekúnd pôsobia na telo kyvadla vonkajšie sily. V stavovom modeli nie je definovaný moment pôsobiaci na telo kyvadla a preto tieto vonkajšie sily boli namodelované ako impulzná zmena uhlovej rýchlosti tela kyvadla (čiže stavu  $x_2$ ).

V nasledujúcom grafe je vidieť priebehy stavov a akčnej veličiny:

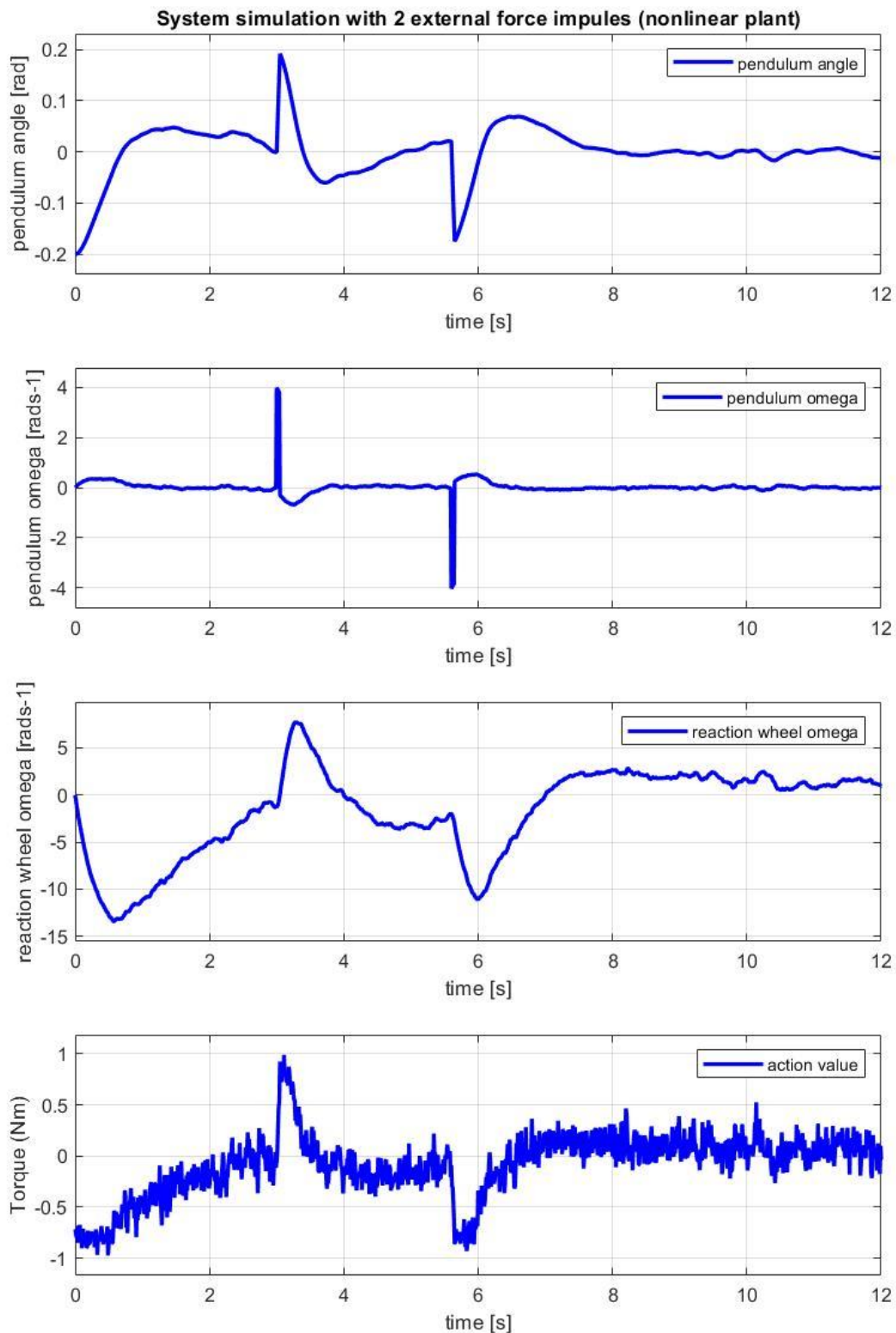


Figure 7 – System simulation with 2 external force impulses

## 2.8. Zhodnocení celé úlohy a závěr

Úlohou bolo nasimulovať model inverzného kyvadla s reakčným kolesom a následne navrhnúť LQG regulátor , ktorý sa zkladá z LQR regulátora a kalmanovho filtra. Dynamické rovnice boli zostavené z Lagrangovej rovnice 2. druhu. Z nich bol vytvorený stavový model. Tento stavový model je nelineárny a na návrh LQR a kalmanovho filtra ho bolo potrebné linearizovať. Z linearizovaného modelu bol navrhnutý LQR regulátor a následne kalmanov filter. V odseku 2.5 je možné vidieť naladenie LQR regulátora a v odseku 2.6 je možné vidieť naladenie kalmanovho filtra. V odseku 2.7 je možné vidieť simuláciu celého systému z nenulového počiatočného uhla , meraním len 1 stavu so šumom a pôsobením dvoch externých impulzných síl.

Je možné tvrdiť že tento systém bol úspešne nasimulovaný a ďalším krokom by bolo tento model porovnať a otestovať na reálnom systéme. Prvým krokom by bolo overiť správnosť odozvy v otvorenej smyčke a prípadne naladiť parametre modelu, pridať určité nonlinearity. Následne by bol otestovaný LQG regulátor

### 3. Identifikace systému

Název systému: DC motor with flywheel and spring

#### Seznam Příloh:

- Zencar\_rpo\_2020\_IDENTIFICATION\_runScript\_flywheelSpring.m
- Zencar\_rpo\_2020\_IDENTIFICATION\_simModel\_flywheelSpring.slx
  - Vámi vytvořený model systému v Simulinku + spouštěcí skript
- Zencar\_rpo\_2020\_IDENTIFICATION\_speSession\_flywheelSpring.mat
  - Simulink Parameter Estimation data (Save Session -> Save to File)
- Zencar\_rpo\_2020\_IDENTIFICATION\_feedForwardScript\_flywheelSpring.m
- Zencar\_rpo\_2020\_IDENTIFICATION\_feedForwardModel\_flywheelSpring.slx
  - (BONUS) Řízení systému s využitím dopředné kompenzace (model v Simulinku + příp. skript s parametry)
- DC\_motor\_disk3.slx
  - Protected model na „nameranie dát“

#### Analýza systému a generování I/O dat

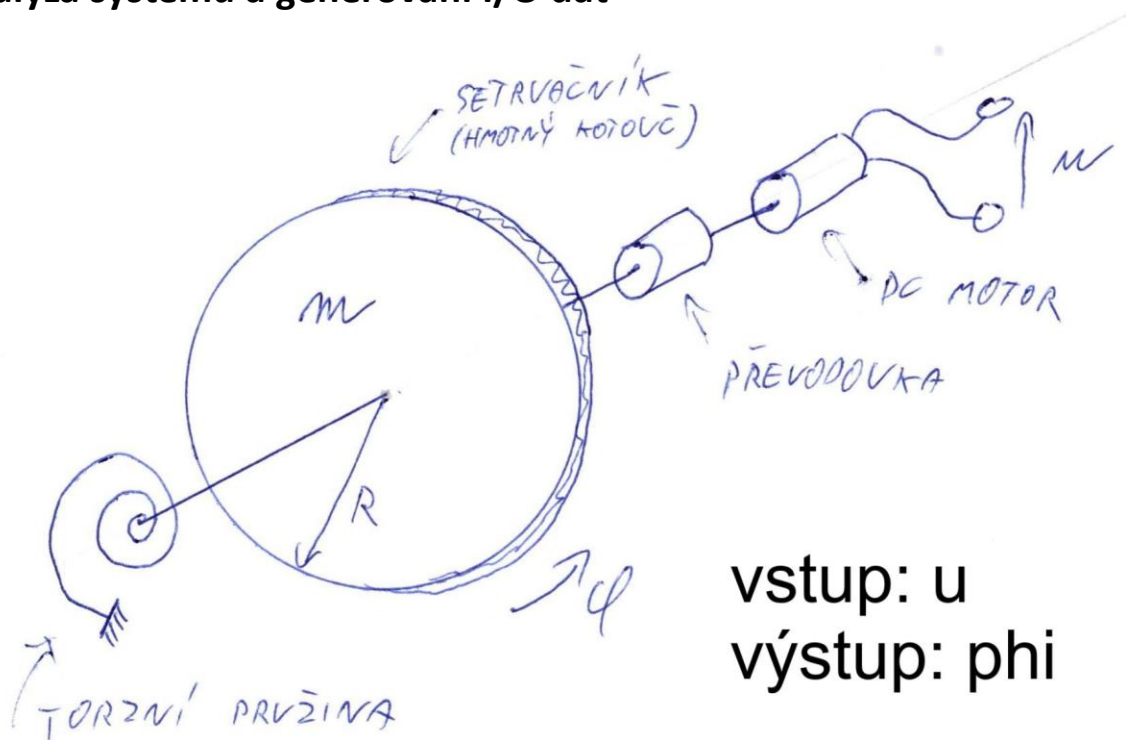


Image 1 – Systém

### Popis modelu a odhadované parametre:

Na obrázku 1 je vidieť daný systém. Systém obsahuje DC motor, prevodovku, zotrvačník a torznú pružinu. Odhadovalo sa dokopy 6 parametrov, a to  $J, b, k, R_a, L_a, c_f$  kde  $J$  je celkový moment zotrvačnosti sústavy,  $b$  je celkový koeficient viskózneho trenia,  $k$  je tuhosť pružiny,  $R_a$  je odpor vinutia DC motora,  $L_a$  je hodnota indukčnosti DC motora a  $c_f$  je konštanta DC motora. Prevodový stupeň prevodovky nebude braný ako parameter, keďže bude zahrnutý v hodnote  $c_f$ .

### Vstupy systému:

Ako vstupy systému sú napätie DC motora a signál DIS(disable), DIS signál slúži na odpojenie svoriek zdroja od DC motora. Ak je DIS aktívny, tak je sústava voľná a neprebíha žiadna rekuperácia. Ak je DIS neaktívny a na DC motor sa pripojí 0V, motor rekuperuje a tým pádom brzdí danú sústavu.

### Výstupy systému:

Výstup systému je natočenie torznej pružiny a teda celáj sústavy.

### Postup merania a odhadovania parametrov:

Model je možný rozdeliť na 2 systémy, mechanický a elektrický. Najprv bude modelovaný a odhadovaný len mechanický systém. Odhadované budú parametre  $J, b, k$ . Na správny odhad týchto parametrov je potrebné správne „namerať“ dáta tak, aby elektrická časť systému neovplyvnovala namerané dáta. To sa docieľa tak, že na DC motor sa privedie konštantné napätie a po ustálení uhlu natočenia je na signál DIS privedená logická 1. To docieľa že po aktivácii signálu DIS sa sústava bude chovať ako mechanický systém s počiatočným vychýlením  $\varphi_0$ . Túto mechanickú sústavu s 3 parametrami si nasimulujeme vlastným modelom a naladíme sa tieto parametre tak aby boli odozvy relatívne totožné.

Následne sa systém namodeluje ako celkový systém, t.j. aj mechanická časť aj elektrická časť. Známe sú parametre  $J, b, k$  (známy len pomer, vysvetlené neskôr) a odhadovať sa budú parametre  $R_a, L_a, c_f$ . Dáta nameráme tak, že v čase  $t=0$  privedieme konštantné napätie na DC motor a po ustálení privedieme na motor napätie 0V. DIS signál je logická 0. To znamená že sústava bude brzdená motorom. Odhadneme parametre tak, aby odozva simulácie bola relatívne totožná s nameranými dátami.

### 3.1. Tvorba a popis modelu systému

Na odhad parametrov budú potrebné 2 modely. Jeden , ktorý obsahuje len čisto mechanickú časť systému a druhý ktorý obsahuje mechanickú aj elektrickú časť systému. Tieto modely boli vytvorené z dynamických rovníc zotrvačníka a DC motora. Vytvorené boli stavové modely.

#### Model mechanickej časti systému:

```
%freewheel
A=[0 1 ; -k/I -b/I];
B=[0 ; 1/I];
C=[1 0];
D=[0];
```

Stavy sú uhol natočenia zotrvačníka a uhlová rýchlosť zotrvačníka.

#### Model celého systému:

```
%whole system
Asys=[0 1 0 ; -k/I -b/I cfi/I ; 0 -cfi/L -R/L];
Bsys=[0 ; 0 ; 1/L];
Csys=[1 0 0;0 0 1];
Dsys=[0;0];
```

Stavy sú uhol natočenia zotrvačníka, uhlová rýchlosť zotrvačníka, elektrický prúd tečúci motorom.

### 3.2. Odhad parametrov

#### Odhad mechanickej časti :

Model bol simulovaný s počiatočným uhlom  $\theta_{i0}$  , ktorý sa namerá spôsobom popísaním v predchádzajúcej časti. Parametre  $J, b, k$  sa menili tak , aby odozva modelu odpovedala čo najpresnejšie nameraným dátam. Táto časť identifikácie bola pomerne jednoduchá a preto sa parametre ladili „ručne“ bez parameter estimation toolboxu.

Výsledné parametre boli :

$$J=0.0467$$

$$k=0.312$$

$$b=0.03725$$

Je veľmi pravdepodobné , že tieto parametre ale nie sú správne. Dôležitý je pomer medzi nimi. Preto ak sa tieto parametre násobia rovnakou konštantou , dosiahne sa rovnaký výsledok. Pre je nutné v ďalšom postupe túto konštantu zistiť. Konštantu nazveme  $m\_ratio$ .

Nasledujúci graf zobrazuje porovnanie nameraných dát a odozvu modelu.

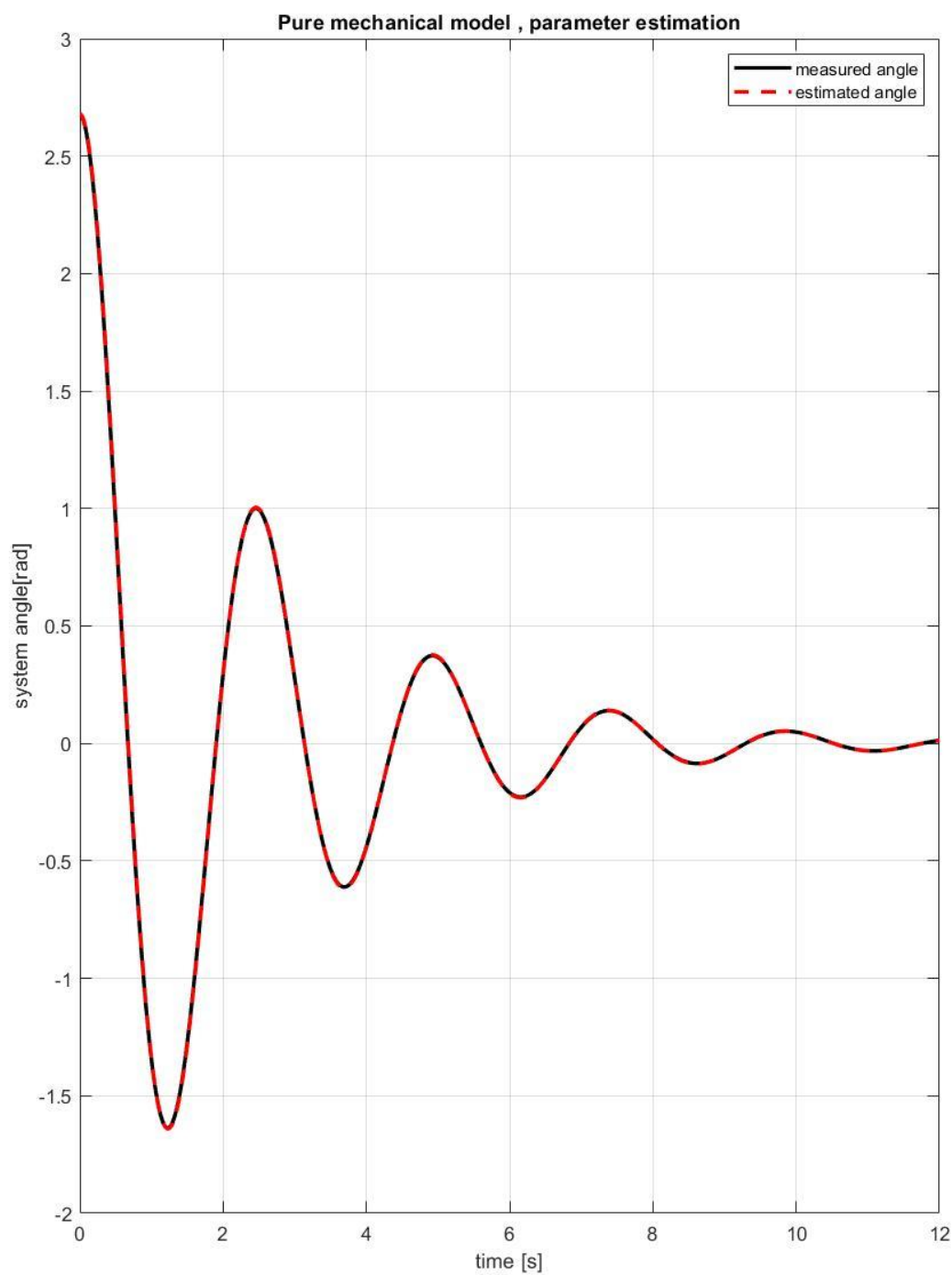


Figure 8 – Mechanical system parameter estimation

### Odhad mechanickej aj elektrickej časti:

Model a vstupy boli simulované podľa postupu popísaného v predchádzajúcom odseku. Neodhadnuté parametre nám zostali  $R_a, L_a, c_{fi}$  ale taktiež pribudol parameter  $m\_ratio$ , čiže dokopy je potreba odhadnúť 4 parametre. Z tohto dôvodu sa modifikoval model celého systému na :

```
Asys=[0 1 0;  
      -(k*m_ratio)/(I*m_ratio) -(b*m_ratio)/(I*m_ratio) cfi/(I*m_ratio);  
      0 -cfi/L -R/L];  
Bsys=[0 ; 0 ; 1/L];  
Csys=[1 0 0; 0 0 1];  
Dsys=[0; 0];
```

,kde  $k, b, J$  majú hodnoty odhadnuté v predchádzajúcej časti.

Z dynamických rovníc DC motora je známe, že v ustálenom stave prúd tečúci DC motorom je závislý len na odpore vinutia DC motoru. Preto je parametre  $R_a$  možné jednoducho estimovať/vypočítať ako  $U_{motor}/I_{motor}$  v ustálenom stave. Výsledné  $R_a = 17,11\Omega$ .

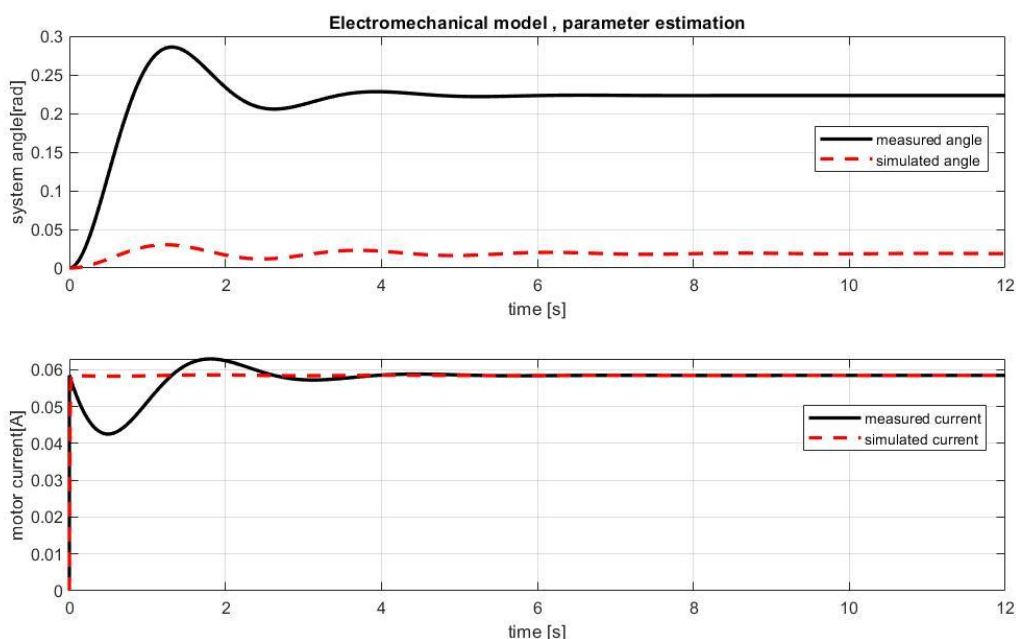


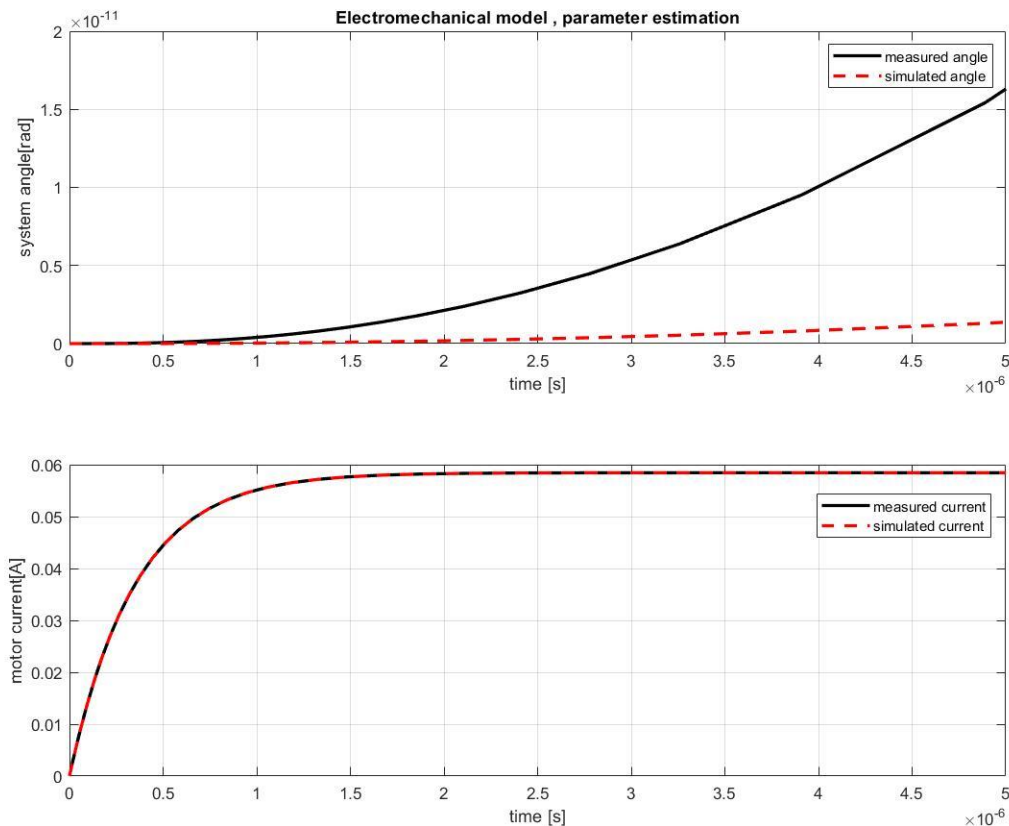
Figure 9 – Estimated  $R_a$

Z grafu je vidieť že aj pri nesprávnych ostatných parametroch, prúd motorom je pri odpore  $R_a = 17,11\Omega$  totožný z nameranými dátami v ustálenom stave.

Keď je už správne estimovaný parameter  $R_a$ , môžeme estimovať elektrickú časovú konštantu  $R_a/L_a$ . Táto časová konštanta sa prejaví pri prvotnej zmene napätia.  $R_a$  hodnota je už známa, tak sa postupne mení hodnota  $L_a$  až je prúdová odozva modelu v prvých 5e-6 sekundách rovnaká ako namerané dáta.



Po ručnom experimentálnom ladení hodnoty  $L_a$  bola určená hodnota  $L_a = 6e-6H$   
 V nasledujúcom grafe je vidieť elektrickú časovú konštantu DC motora:



**Figure 10 –  $L_a$  estimation with known  $R_a$**

Týmto sa úspešne estimovali parametre  $R_a, L_a$  a zostali už len parametre  $c_f, m\_ratio$ .  
 Tieto parametre bolo príliš zložité estimovať ručne a preto sa použil parameter estimation toolbox.

Počiatkové parametre boli :  $c_f = 0.1$  ,  $m\_ratio = 0.1$ .

Výsledné parametre boli estimované pomocou metódy simplex v 200 iteráciach:

$$c_f = 0.7633$$

$$m\_ratio = 0.6408.$$

V nasledujúcom grafe je výsledné porovnanie nameraných dát a simulovaných pri tých istých vstupoch.

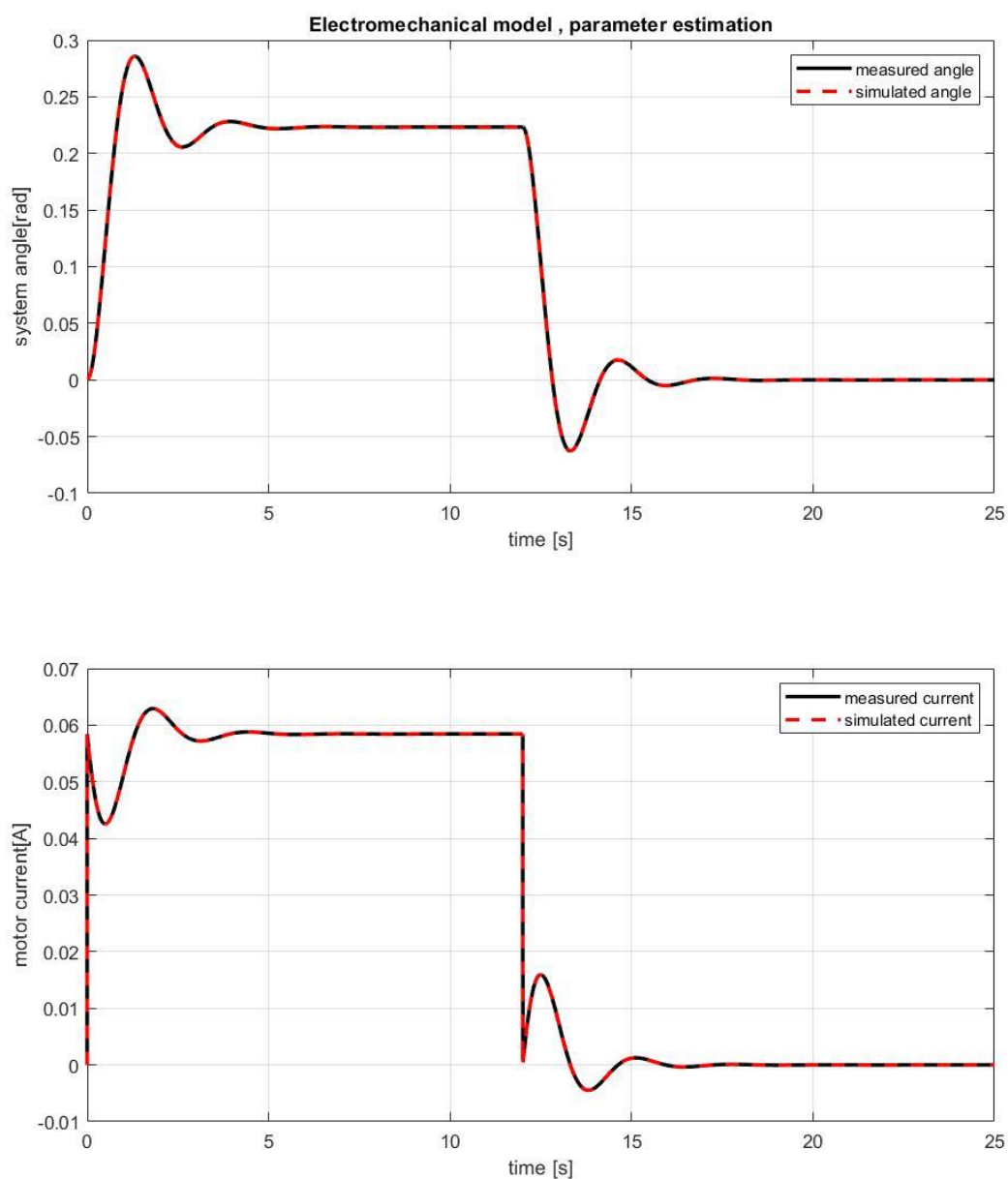


Figure 11 – Final estimation

Výsledné hodnoty parametrov teda sú :

$$J=0.0299 \text{ kg/m}^2$$

$$b=0.0239$$

$$k=0.199 \text{ N/m}$$

$$R_a=17.11 \text{ ohm}$$

$$L_a=6e-6 \text{ H}$$

$$c_{fi}=0.7633$$

### 3.3. (BONUS) Feedforward

V ustálenom stave je moment potrebný na určitú výchylku :

$$Mm = kx$$

Moment je definovaný ako :

$$Mm = cfi * i$$

kde :

$$i = U/Ra$$

Úpravou týchto rovníc dostaneme rovnicu:

$$U = k * Ra/cfi * x$$

,kde U je vstupné napätie motora , k je tuhosť pružiny , Ra je odpor vinutia DC motora , cfi je konštanta motora a x je požadované vychýlenie. Z toho vyplýva že feedforward zosílenie je :

$$k * Ra/cfi$$

Nasledujúci graf znázorňuje feedforward reguláciu do bodu  $\varphi_i=2\text{rad}$ .

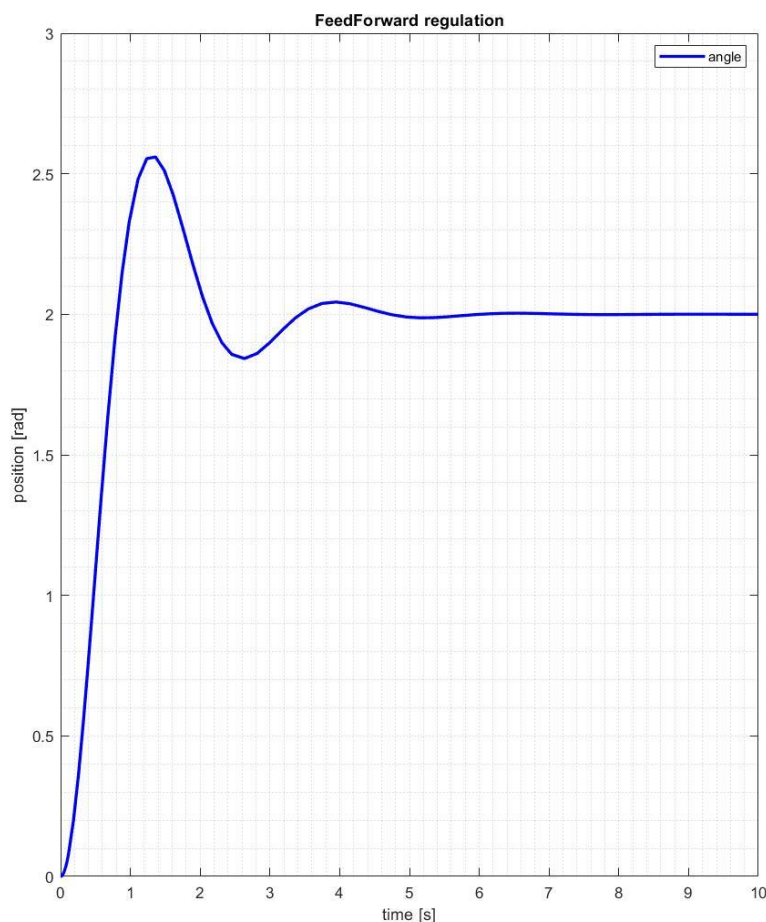


Figure 12 – Feed forward regulation to point  $\varphi_i=2$

### 3.4. Zhodnocení celé úlohy a závěr

Úlohou bolo identifikovať parametre sústavy skladajúcej sa z DC motora , prevodovky, zotrvačníka a torznej pružiny. Stanovilo sa 6 parametrov na odhad, a to  $J, k, b, R_a, L_a, c_{fi}$ . Odhad spočíval v rozdelení sústavy na mechanickú a elektrickú. Najprv boli odhadované len čisto mechanické parametre  $J, k, b$ . Volným pustením z počiatočného uhla boli namerané dáta a nasledne boli tieto parametre estimované tak aby nasimulované meranie odpovedalo nameraným dátam. Tieto parametre ale neboli úplne správne , správny bol pomer medzi nimi. Preto v ďalšom postupe pribudol parameter  $m\_ratio$ . Následne sa modeloval systém ako celok. Pomocou napätia a prúdu v ustálenom stave sa zistil odpor vinutia  $R_a$  a pomocou elektrickej časovej konštanty sa určila hodnota indukčnosti cievky  $L_a$ . Zostali len parametre  $c_{fi}$  a konštanta násobiaca mechanické parametre  $m\_ratio$ . Na odhad týchto parametrov bol použitý parameter estimation toolbox. Parametre boli zistené algoritmom simplex v priebehu 200 iterácii.

Výsledné hodnoty parametrov sú:

$$\mathbf{J=0.0299\ kg/m^2}$$

$$\mathbf{b=0.0239}$$

$$\mathbf{k=0.199\ N/m}$$

$$\mathbf{R_a=17.11\ ohm}$$

$$\mathbf{L_a=6e-6\ H}$$

$$\mathbf{c_{fi}=0.7633}$$

Následne bol navrhnutý feed forward regulátor pomocou rovnice pružiny a rovníc DC motoru. Týmto bola úspešne realizovaná identifikácia systému.

## 4. HIL

Název systému: Automatizovaný prebíjací lis.

### Seznam Příloh:

- Zencar\_rpo\_2020\_HIL\_simulinkModel\_PrebijaciStroj.slx
- Zencar\_rpo\_2020\_HIL\_paramDef\_PrebijaciStroj.m
- Zencar\_rpo\_2020\_HIL\_datasheets (Folder)

### 4.1. Volba a popis řízeného systému

Ako riadený systém sa zvolil automatizovaný prebíjací lis na náboje. Skladá sa z ručného prebíjacieho lisu, ktorý je doplnený o riadený aktuátor a senzory. Systém sa skladá z DC motora, planetárnej prevodovky, „rack and pinion“ prevodovky a samotného lisu. (napr. <https://www.youtube.com/watch?v=Yrg-dP6L2Y8>)

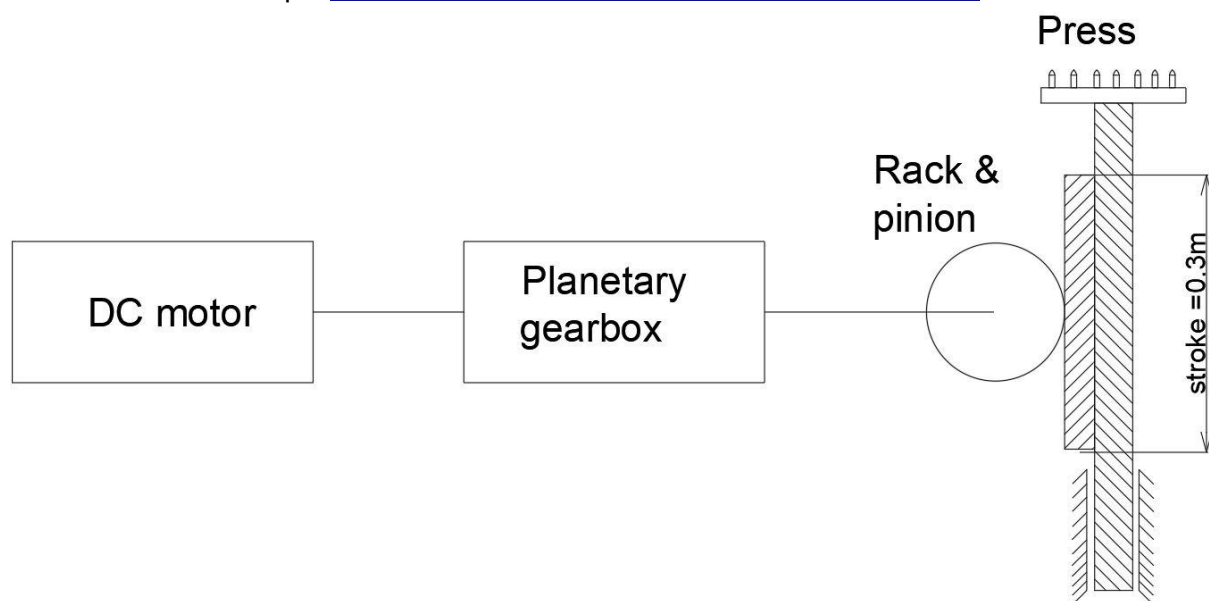


Image 2 – Block schematic of chosen system

Na obrázku 2 je možné vidieť blokové schéma vybraného modelu.

Systém je doplnený o rotačný enkóder namontovaný na výstup planetárnej prevodovky, LEM čidlo merajúce prúd tečúci motorom a lineárnym mechanickým spínačom, ktorý bude slúžiť na vynulovanie polohy a H-mústkem.

Prebíjací stroj potrebuje stály prísun zápaliek, striel a nábojníc. Túto úlohu majú na starosti oddelené stroje, ktoré nebudeme modelovať. Avšak potrebujeme vedieť či tieto stroje nie sú prázdne a preto systém bude obsahovať 2 optické senzory a 1 mechanický spínač, ktoré detekujú prítomnosť týchto 3 súčiastok pri prebíjaní.

## 4.2. Model řízeného systému v Simulinku

Daný systém je možné simulovat jako DC motor s převodovkou a zotrvačníkem, který má nelineární charakteristiku zátěžového momenta závislou na poloze a směru rychlosti lisu.

Rovnice DC motoru sú :

$$I_{red}\ddot{\varphi}_{mot} = -b_m\dot{\varphi}_{mot} + cfi \cdot i - Mz$$

$$La \cdot \frac{d}{dt}(i) = -Ra \cdot i - cfi \cdot \dot{\varphi}_{mot} + U_i$$

,kde  $I_{red}$  je redukovaný moment zotrvačnosti celej sústavy,  $b_m$  je koeficient viskózneho trenia celej sústavy,  $cfi$  je konštanta motora,  $Mz$  je zátážný moment,  $La$  je indukčnosť cievky motora,  $Ra$  je odpor vinutia motora,  $U_i$  je vstupné napätie motora. Tieto diferenciálne rovnice boli namodelované v simulinku.

Planetárna prevodovka bola modelovaná ako:

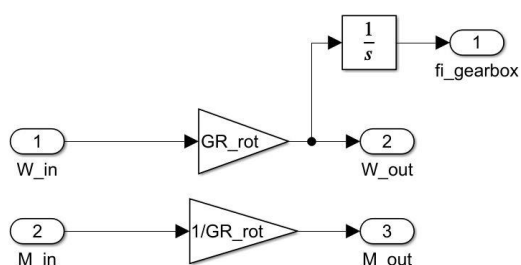


Image 3 – Planetary gearbox model

,kde  $W_{in}$  je  $\dot{\varphi}_{mot}$ ,  $M_{in}$  je  $cfi \cdot i$ ,  $GR_{rot}$  je prevodový pomer planetárnej prevodovky,  $W_{out}$  je  $\dot{\varphi}_{planet}$  (uhlová rýchlosť planetárnej prevodovky),  $fi_{gearbox}$  je  $\varphi_{planet}$  a  $M_{out}$  je  $M_{planet}$ .

“Rack and pinion” prevodovka bola modelovaná ako:

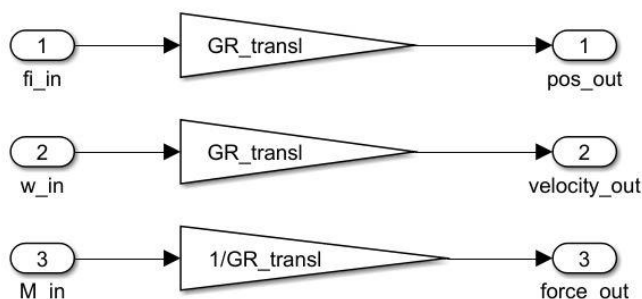


Image 4 – Rack and pinion gearbox model

, kde vstupy sú hodnoty veličín za planetárnou prevodovkou a výstupy sú priamo hodnoty veličín prebíjacieho lisu. GR\_transl je polomer ozubeného kolesa "rack and pinion" prevodovky. Počet zubov ozubeného telesa je rovnaký ako počet zubov ozubenej tyči na vzdialenosti, ktorá odpovedá obvodu ozubeného kolesa.

Zátťažná sila  $F_z$  vyprodukovaná prebíjajúcim lisom má 2 zložky. Jednu konštantnú, ktorá odpovedá tiahovej sile pôsobiacej na lis, tá má hodnotu  $F_{z1} = m_{sys}g$ , a druhá zložka závisí na polohe lisu a smere pohybu lisu. Táto sila bola určená približne "zo skúsenosti" a jej priebeh v závislosti na polohe je:

Smer pohybu lisu kladný,  $F_{z2} =$

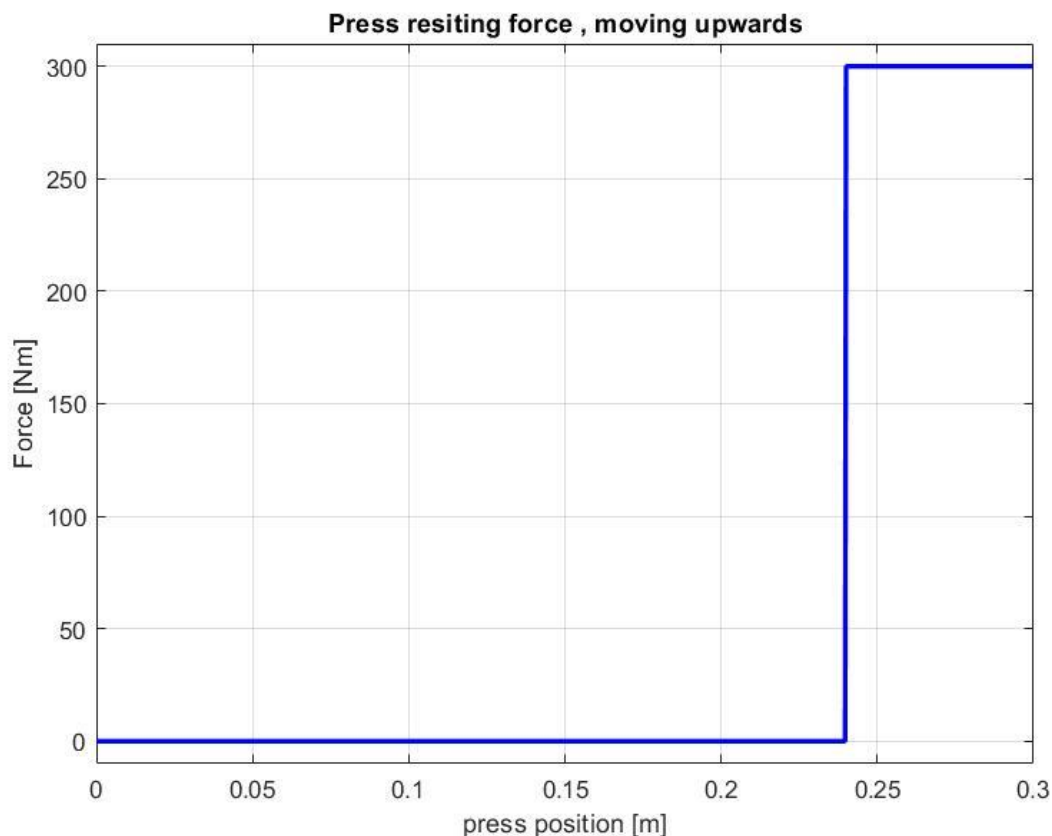


Figure 13 – Press resisting force while moving upwards

Ako je na grafe 13 vidieť, odporová sila je nenulová v hornej časti chodu lisu.

Smer pohybu lisu záporný ,  $F_{z_2} =$

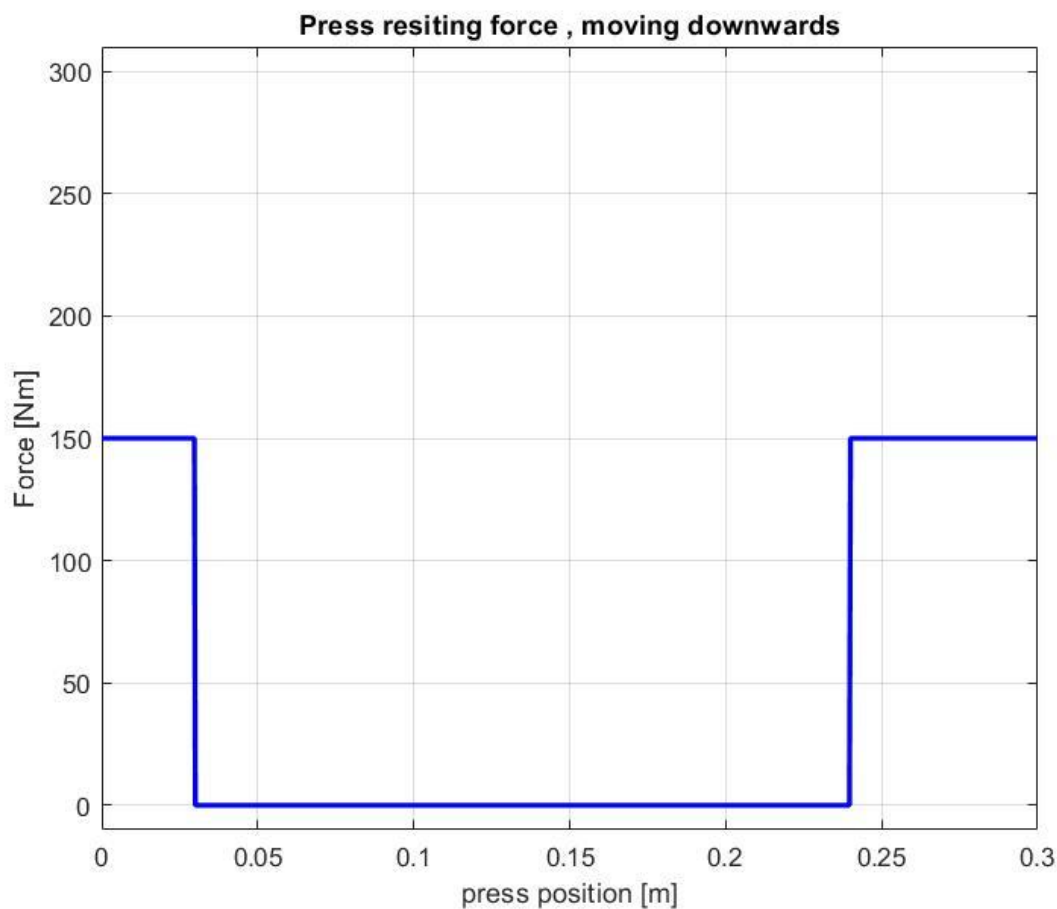


Figure 14 – Press resisting force while moving downwards

Ako je na grafe 14 vidieť , odporová sila je nenulová v hornej a spodnej časti chodu lisu. Na grafoch sú znázornené absolútne hodnoty síl. Tieto sily pôsobia vždy proti smeru rýchlosti lisu.

Tie priebehy však znázorňujú odporovné sily pôsobiace na samotný lis , preto je potreba ich prepočítať na momenty pôsobiace priamo na motor.

Výsledný záťažný moment sa spočíta ako :

$$M_z = (F_{z_1} + F_{z_2}) \cdot GR_{transl} \cdot GR_{rot}$$

,kde  $F_{z_1}, F_{z_2}$  sú složky odporovej sily pôsobiacej na lis ,  $GR_{transl}$  je priemer ozubeného kolesa "rack and pinion" prevodovky a  $GR_{rot}$  je prevodový pomer planetárnej prevodovky.



### 4.3. Modely senzorů a akčních prvků

#### DC motor:

Ako DC motor bol zvolený maxon EC-4 305013 (DCmotorDatasheet.pdf).

Namodelovaný bol podľa diferenciálnych rovníc v predchádzajúcom odseku.

#### Planetárna prevodovka:

Ako prevodovka sa použila maxon GP42 476933 (planetGearboxDatasheet.pdf) s redukciou 53:1. Menovité otáčky motora sú nad 16000 otáčok za minútu a maximálne vstupné otáčky tejto prevodovky sú menej ako 11000 otáčok za minútu. Avšak pri maximálnej rýchlosti prebiehajúceho stroja 3600 nábojov za hodinu, otáčky motora neprekročia 9500 otáčok za minútu a výstupný moment 30Nm, takže táto prevodovka je vhodná.

#### Enkoder

Ako enkoder bol zvolený dvoj kanálový enkoder maxon MILE 421987 s 2048 pulzami za 1 mechanickú otáčku(encoderDatasheet.pdf).

Encoder bol namodelovaný ako matlabovská funkcia v simulinku.

Algoritmus :

```
function [chA,chB] = fcn(fi,ppr)

%clockwise direction - channel B before channel A
%anticlockwise direction - channel A before channel B

per=2*pi/ppr;%period
hper=per/2;%half period
qper=per/4;%quarter period

%channel A
zeroedFi=fi - (floor(fi/per)*per);
chA=floor(zeroedFi/hper);

%channel B
zeroedFi=fi - (floor(fi/per)*per) - qper;
if(zeroedFi<=hper & zeroedFi>0)
    chB=1;
else
    chB=0;
end
```

Výstup encoderu:

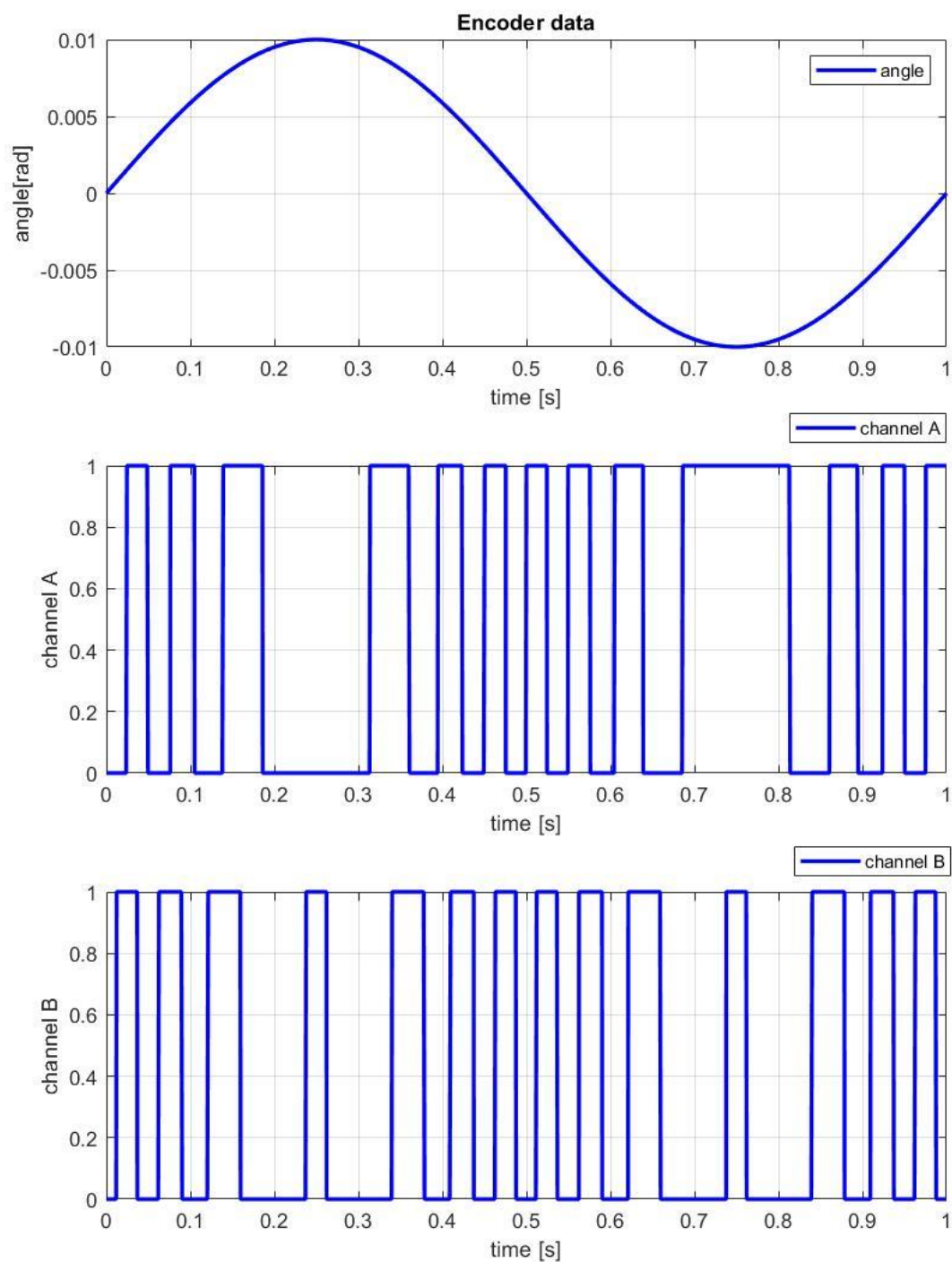
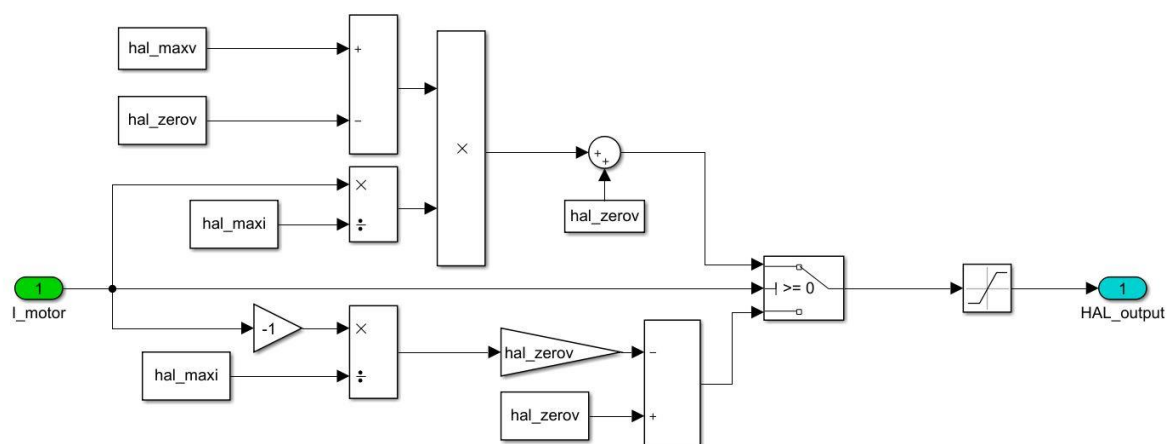


Figure 15 – Output of encoder model based on fi

## LEM čidlo:

Ako sensor prúdu bolo vybrané LEM čidlo LTS 25-NP (lemDatasheet.pdf).

Modelované bolo ako :



,kde maxv predstavuje maximálne výstupné napätie, zerov predstavuje referenčné napätie a maxi predstavuje maximálny merací prúd.

Výstupná charakteristika modelu :

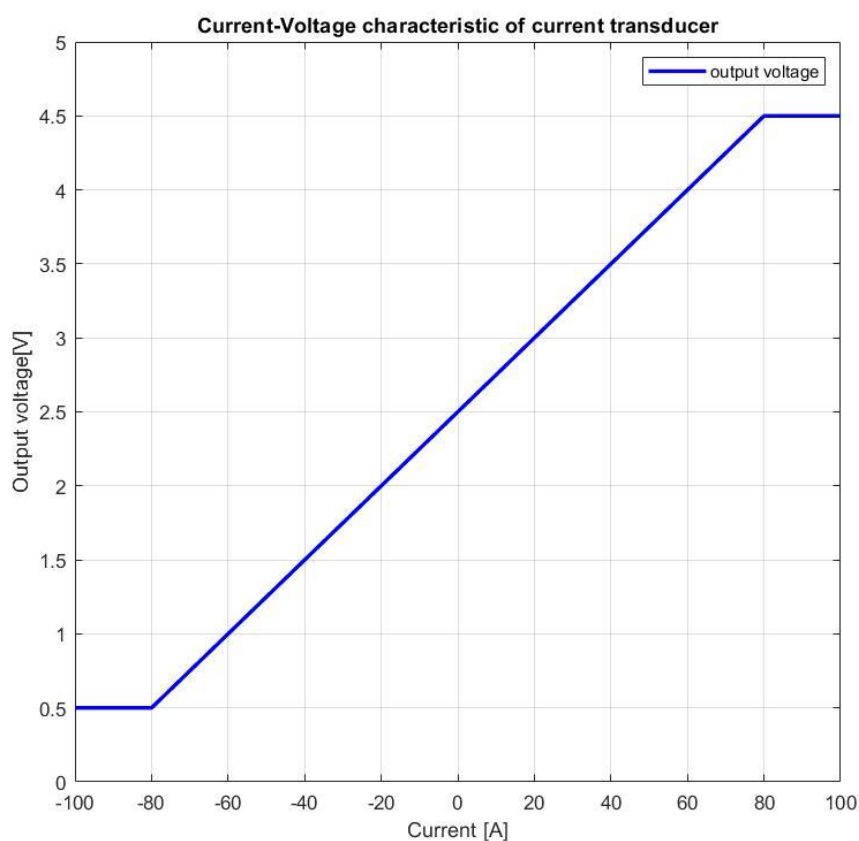


Figure 16 – Current-Voltage characteristic of current transducer

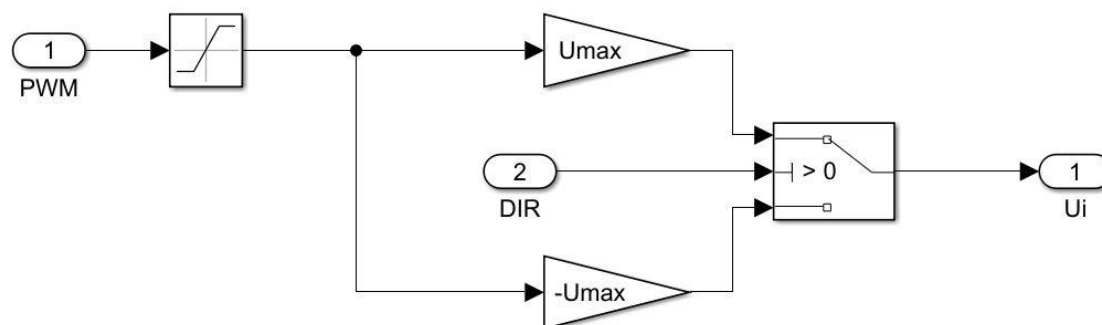
Ako je vidieť na grafe 16 , výstupná charakteristika sa zhoduje s tou , ktorá je znázornená v datasheete senzoru.

### H-bridge:

Ako h-bridge bol zvolený modul s rozsahom vstupného napätia 12-48V a s maximálnym nominálnym prúdom 100A.

(<https://www.aliexpress.com/item/32728776675.html>)

H-bridge bol modelovaný ako



### Optické senzory:

opticalSensorCatalogue.pdf

### Mechanický lineárny spínač:

napr. (<https://www.conrad.cz/mikrospinac-s-packou-zippy-df-03s-9e-z-125-v-ac-3-a-pajeci-ocka-1x-zap-zap.k1094403?icc=category-carousel-2level&icn=toprate-mikrospinac>)

Namodelovaný tak , že výstup je pri polohe menšej ako 0.075 logická 1 a inak logická 0.

## 4.4. Řídící jednotka a přizpůsobení signálů

Riadiaca jednotka (ECU) bola namodelovaná pomocu matlab funkcie, toto zaručí , že ECU pracuje v diskretnom čase a nadefinované sú vstupy a výstupy aké by boli pri reálnom ECU.

### Dekóder encódera:

Dvojkanálový má 4 možné stavy a to :

[channel A , channel B]

[0 , 0]

[1 , 1]

[1 , 0]

[0 , 1]

V algoritme vieme v ktorom stave sme boli v predchádzajúcom okamihu a vieme ktorý kanál zmenil hodnotu v aktuálnom čase. Podľa predchádzajúceho stavu a zmene určitého kanálu buď inkrementujeme alebo dekrementujeme pozíciu lisu o  $\frac{1}{4}$  elektrickej periódy. Avšak pri štarte reálneho systému nie je zaručené že lis bude v polohe 0 , preto je nutné túto polohu vynulovať na začiatku chodu systému. To bude popísane neskôr.

Algoritmus dekóderu enkódera:

```
%encoder decoding
if(enc_chAmem==1 & enc_chBmem==1)
    if(enc_chA==1 & enc_chB==0)
        dfi=2*pi/(4*enc_ppr);
    end
    if(enc_chA==0 & enc_chB==1)
        dfi=-2*pi/(4*enc_ppr);
    end
end

if(enc_chAmem==0 & enc_chBmem==0)
    if(enc_chA==0 & enc_chB==1)
        dfi=2*pi/(4*enc_ppr);
    end
    if(enc_chA==1 & enc_chB==0)
        dfi=-2*pi/(4*enc_ppr);
    end
end

if(enc_chAmem==0 & enc_chBmem==1)
    if(enc_chA==1 & enc_chB==1)
        dfi=+2*pi/(4*enc_ppr)
    end
    if(enc_chA==0 & enc_chB==0)
        dfi=-2*pi/(4*enc_ppr)
    end
end

if(enc_chAmem==1 & enc_chBmem==0)
    if(enc_chA==1 & enc_chB==1)
        dfi=-2*pi/(4*enc_ppr)
    end
    if(enc_chA==0 & enc_chB==0)
        dfi=+2*pi/(4*enc_ppr)
    end
end

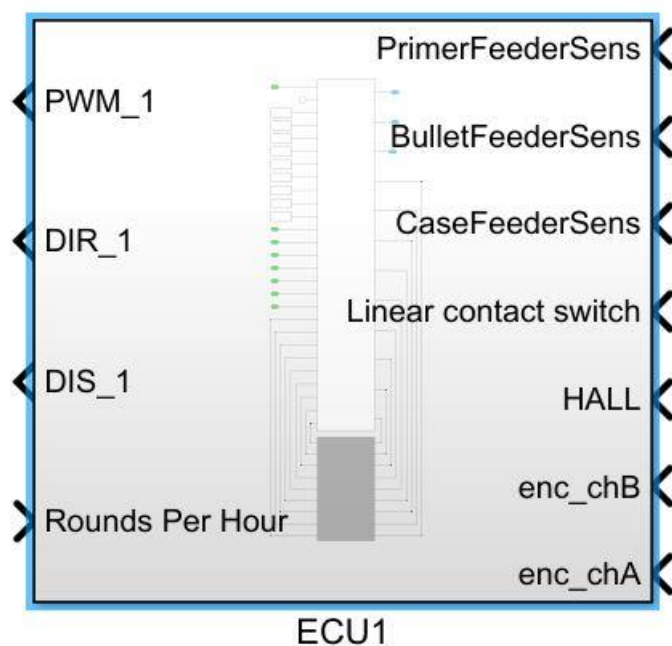
enc_chAmem=enc_chA;
enc_chBmem=enc_chB;
press_position=press_position+dfi*GR_transl;
```

### Dekódér LEM čidla:

Prúd tečúci motorom sa získa pomocou prúdovo-napät'ovej charakteristiky LEM čidla. Algoritmus LEM dekóderu.

```
%HALL decoding
if(HAL_value>=hal_zerov)
    motor_i=(HAL_value-hal_zerov)/(hal_maxv-hal_zerov)*hal_maxi;
elseif(HAL_value<hal_zerov)
    motor_i=-(hal_zerov-HAL_value)/hal_zerov*hal_maxi;
else
    motor_i=0;
end
```

### Blokový diagram ECU:



ECU má 3 výstupy a 8 vstupov.

## 4.5. Průběhy testů

### 4.5.1. Správné nastavení

#### Synchronizácia polohy

Na správnú funkčnosť systému je potrebné poznať presnú polohu lisu. Dekódovaním enkóderu vieme len inkrementovať alebo dekrementovať polohu ktorej počiatočnú hodnotu sme určili. Táto počiatočná poloha ale nemusí byť totožná s polohou lisu v čase inicializácie ECU. Preto je potrebné túto polohu vynulovať pomocou mikrosplínača. Pri inicializácii sa zistí stav mikrosplínača. Ak je logická 1, vieme že lis je nižšie ako poloha 0.075m, ak je logická 0, tak je nad tou polohou. Podľa tejto informácie buď pomaly klesáme a stúpame s lisom až sa hodnota mikrosplínača nezmení. V okamihu zmeny zapíšeme polohu lisu = 0,075m. Týmto je poloha synchronizovaná, následne pomaly s lisom klesáme až je hodnota polohy 0, to znamená že lis je v najnižšej možnej polohe.

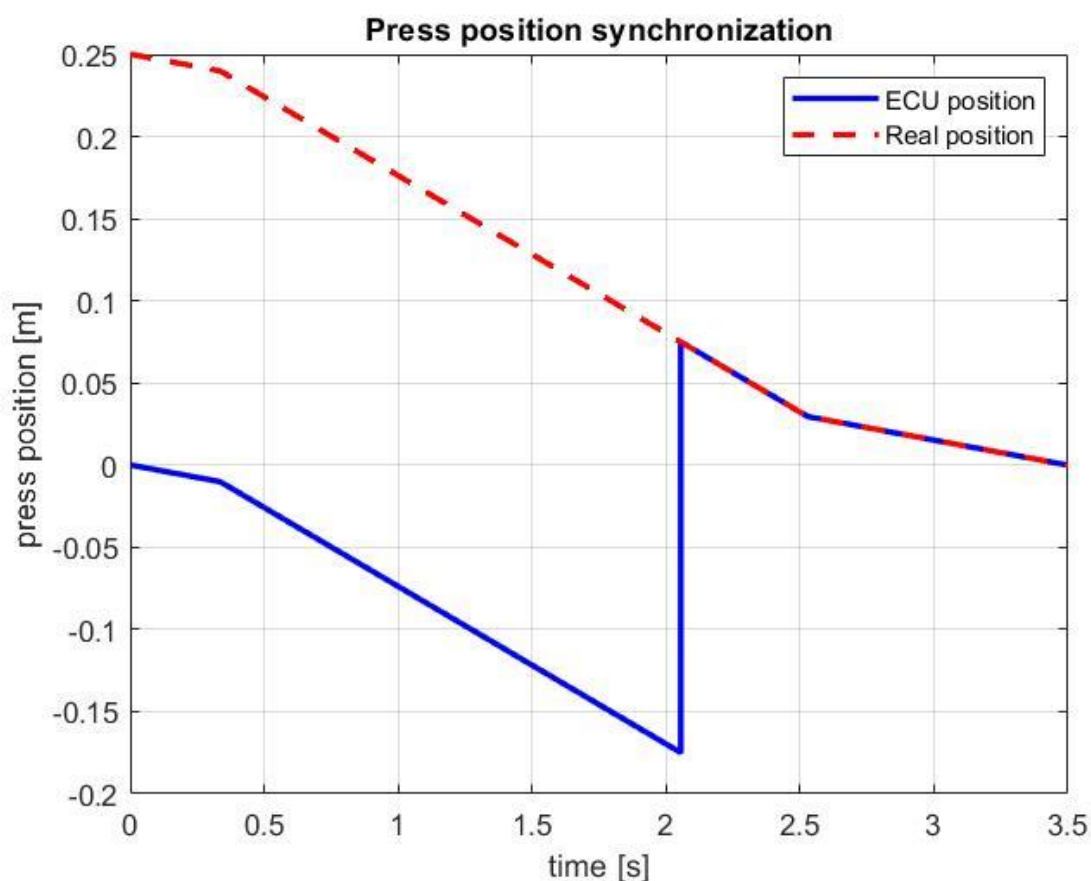


Figure 17 – Position synchronization

V grafe 17 je vidieť synchronizáciu polohy kde reálna počiatočná poloha = 0.25m a počiatočná poloha v ECU = 0m.



### Priebeh požadovanej polohy:

Ako priebeh požadovanej polohy bola zvolená sínusovka s amplitúdou 0.15(stroke /2) a posunutou tak aby minimálna hodnota sínusového signálu = 0m. Frekvencia je určená podľa nastavenia potenciometru (nebol modelovaný z dôvodu jednoduchosti). Výstup potenciometru je počet nábojov vyrobených za hodinu. Maximum tejto hodnoty je 3600.

### Regulácia polohy:

Boli vyskúšané 2 typy regulátorov. Čisto P regulátor s veľkou hodnotou P. Keďže požadovaná poloha neobsahuje žiadne skoky , tento regulátor fungoval dostatočujúco .

```
%P regulator
P=3000;
pos_error=wanted_position-press_position;
PWM_1=P*pos_error;
```

Funkčnosť regulátora pri rýchlosti 1000 nábojov za hodinu:

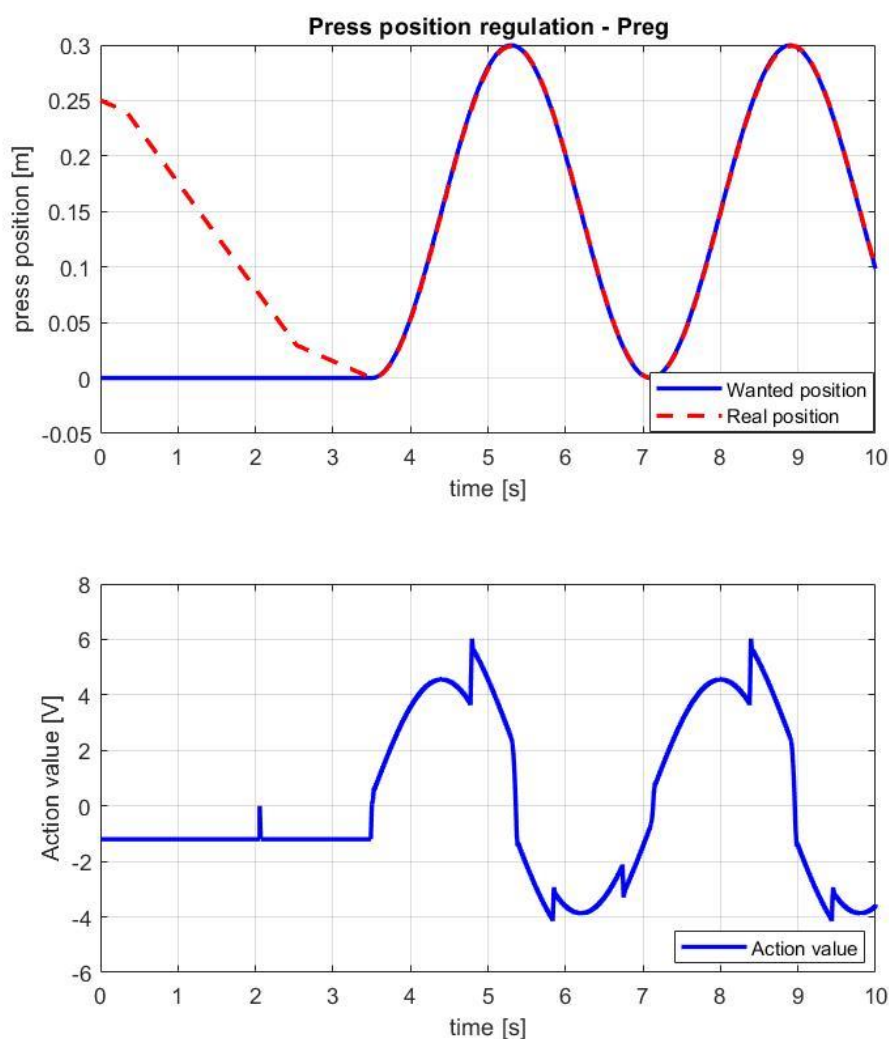


Figure 18 – Regulation with P regulator – 1000 rounds per hour



Následne bol navrhnutý LQR regulátor, pomocou stavového modelu , ktorý bol vytvorený z rovníc DC motora.

```
%DC motor state space
A=[0 1 0;0 -b/J cfi/J;0 -cfi/La -Ra/La];
B=[0;0;1/La];
C=eye(3);
D=[0;0;0];
```

Návrh regulátora:

```
Q=diag([50,5e-4,5e-4]);
R=1;
K=lqr(A,B,Q,R);
```

```
Nbar=rscale(A,B,[1 0 0],0,K);
```

Algoritmus regulátora:

```
%LQR regulator
LQR_wanted_pos = wanted_position * Nbar / GR_overall;
PWM_1= - K*[press_position/GR_overall 0 motor_i]' + LQR_wanted_pos;
```

Kedže regulujeme otáčky motora , je potrebné prepočítať hodnoty na správne hodnoty podľa prevodových pomerov.

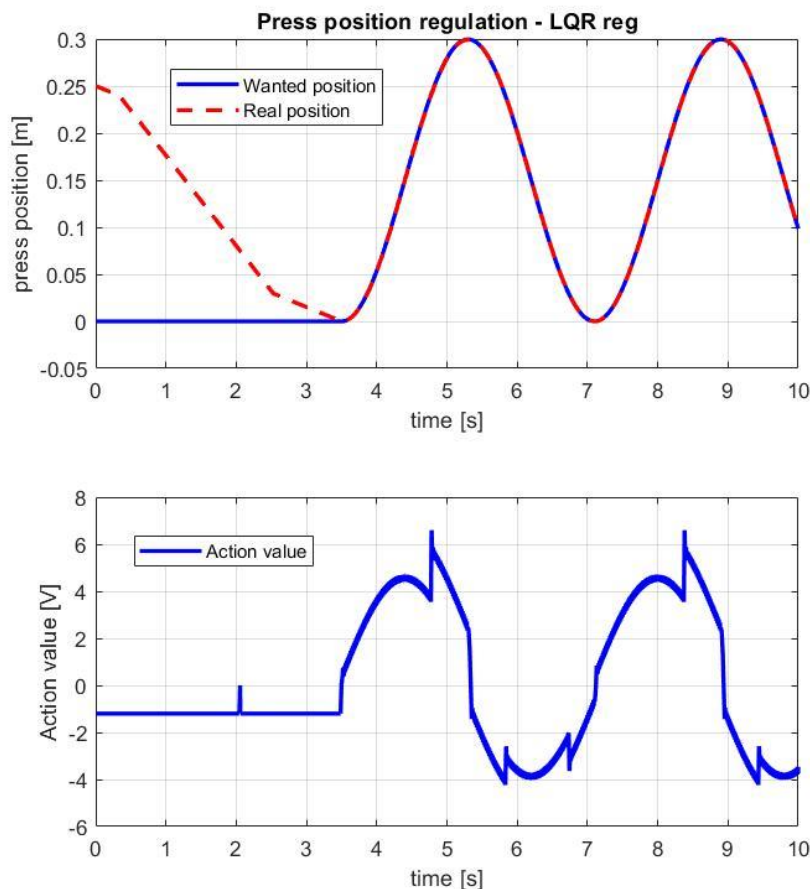


Figure 19 - Regulation with LQR regulator – 1000 rounds per hour

Ako je vidieť podľa grafov , v regulátoroch je minimálny rozdiel.

#### 4.5.2. Změna parametrů

##### Závislost regulácie na nastaveniach LQR regulátora:

Rovnaké nastavenia ako v prechádzajúcich grafoch.

$Q=[50,5e-4,1]'$  (viac váhy na nulový prúd)

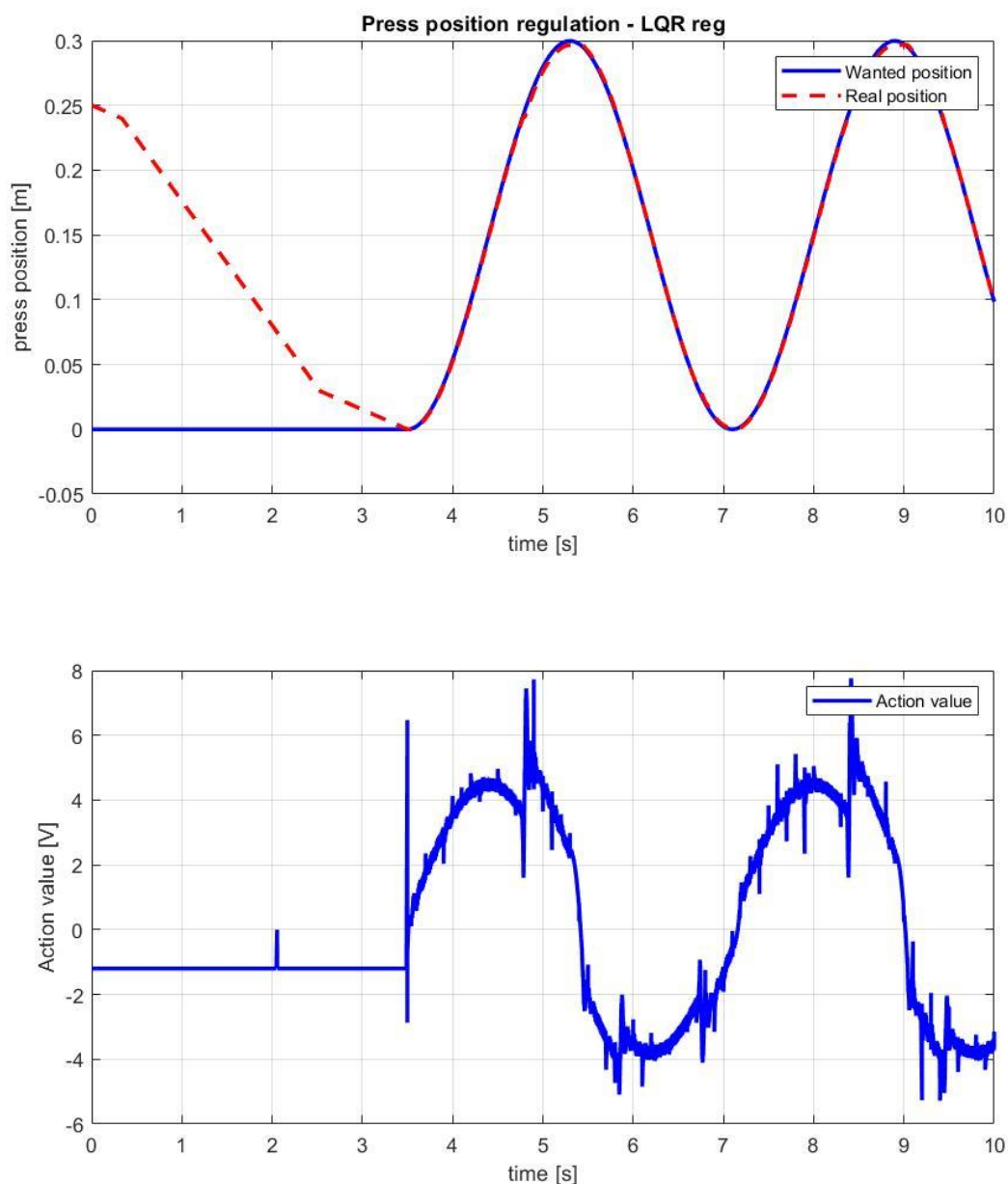
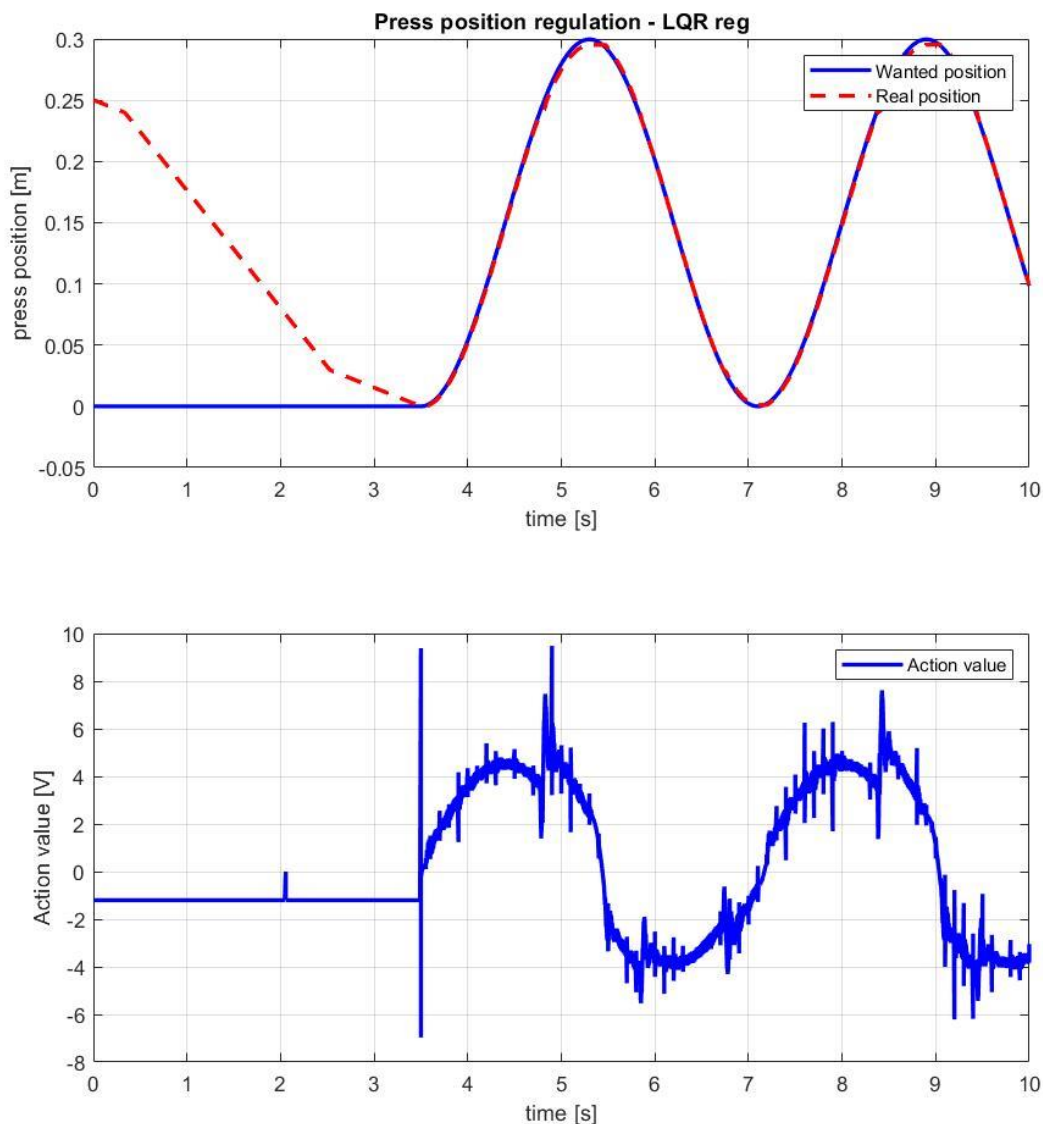


Figure 20 – LQR regulation , more weight on current

$Q=[50,5e-4,2]'$  (viac váhy na nulový prúd)



**Figure 21 - LQR regulation , more weight on current**

Ako je vidieť , pri zvyšovaní váhy na prúde (minimalizácia prúdu), aktuálna poloha začína zaostávať za požadovanou , čo môže spôsobiť problém pri vyšších rýchlostiach. Taktiež je vidno rádovo väčšiu osciláciu akčnej veličiny , toto je spôsobené šumom LEM čidla , regulátor sa snaží prúd vynulovať , avšak hodnoty prúdu sú o šum rozdielne od reálnych. Z tohoto dôvodu je výsledné nastavenie LQR regulátora bez váhy na prúde.

### Zmena rýchlosti prebývania:

Zmeniť rýchlosť prebývania je možné za behu, avšak zmena v ľubovolnej rýchlosti v ľubovolnej fáze by vyvolala skokovú zmenu požadovanej hodnoty a to by mohlo spustiť nadprúdovú ochranu. Preto sa zmena rýchlosti bude aplikovať až pri najnižšej pozícii lisu, teda fáze sínusového požadovaného priebehu =  $3/2 \cdot \pi$ .

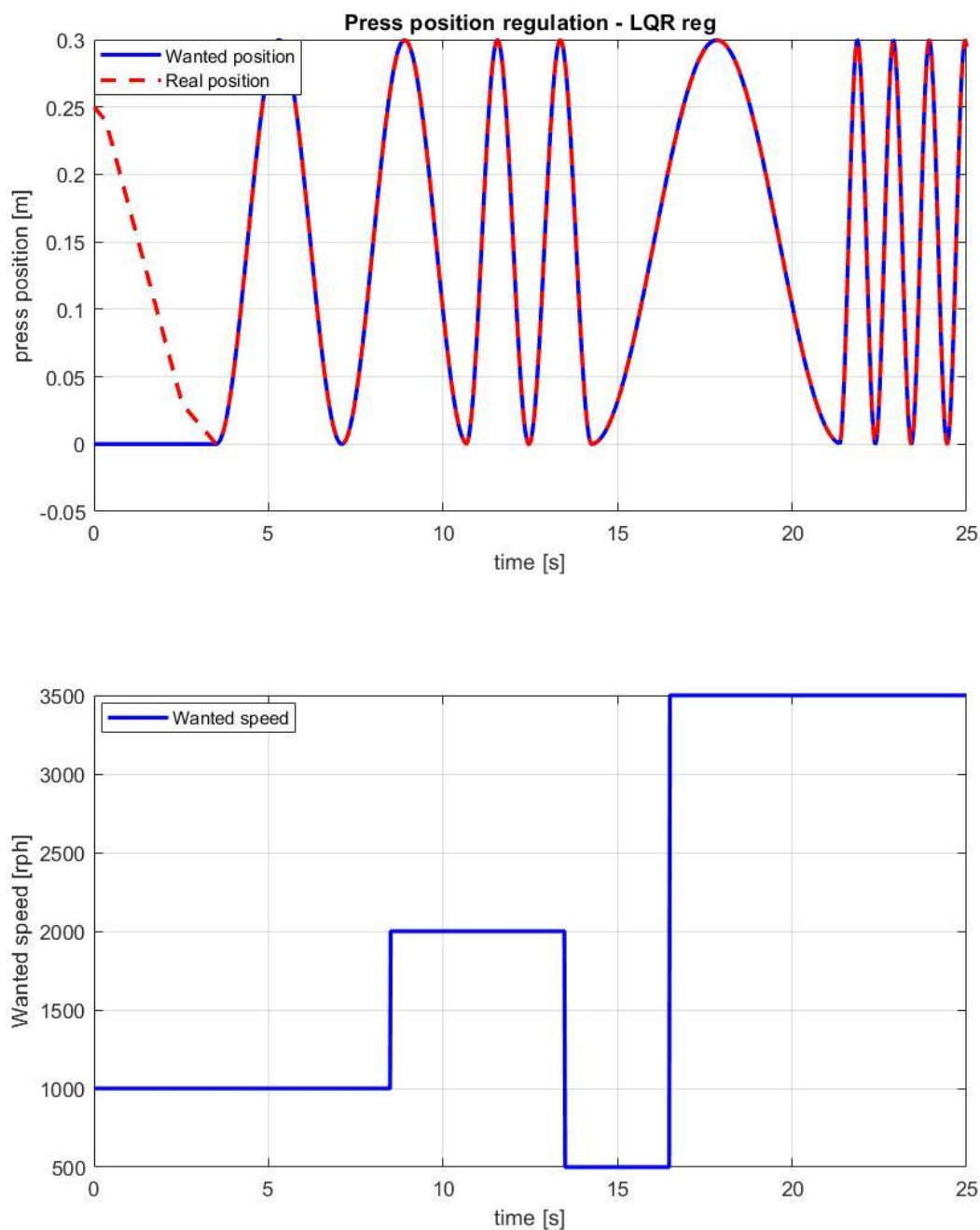


Figure 21 – Speed changing demo

### 4.5.3. Závada

V systéme môžu nastať 4 typy závad, z toho 3 majú rovnakú charakteristiku.

#### Závady podávačov.

3 rovnaké závady sú prázdne podávače striel, nábojníc a zápaliek. Táto závada sa prejaví nesprávnou hodnotou niektorého z 3 optických senzorov. Táto hodnota sa kontroluje v pozícii lisu = 0.03m. Táto poloha je určená preto, lebo konštrukčne je lis spravený tak, že v tejto polohe je možné overiť prítomnosť daných súčiastok. Ak sa táto závada detekuje, na DC motor sa privedie 0V a čaká sa kým sa táto závada odstráni doplnením všetkých podávačov. Po doplnení sa pomalým klesaním poloha dostane do 0 a automaticky sa lis znova spustí.

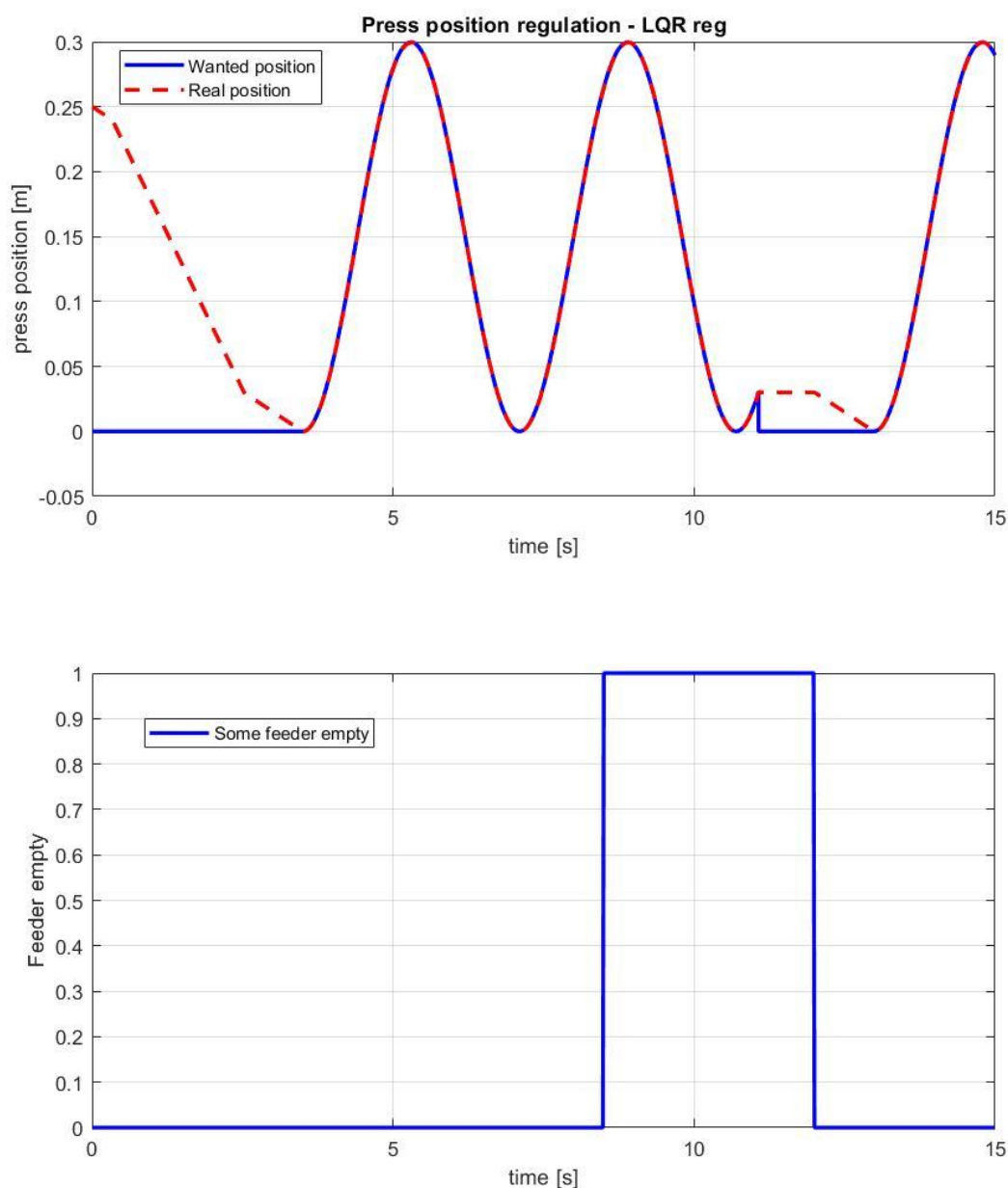


Figure 22 – Feeder empty error

### Mechanický zásek (nadprúdová ochrana):

V prípade mechanického záseku zariadenia je modelovaný v hornej časti chodu veľký odporový moment. Toto spôsobí veľký prúd tečúci motorom. V prípade tejto poruchy je lis zastavený, nastavená je poloha 0.05m pod polohou záseku (aby bolo možné reálnu závalu odstrániť) a táto poloha je udržiavaná. Po odstránení záseku je nutné reštartovať zariadenie.

V realite by bolo pridané ešte skontrolovanie nadmerného prúdu v čase regulácie do polohy 0.05m pod bodom záseku. Tým by bol detekovaný aj zaseknutie v oboch smeroch a stroj by sa úplne vypol.

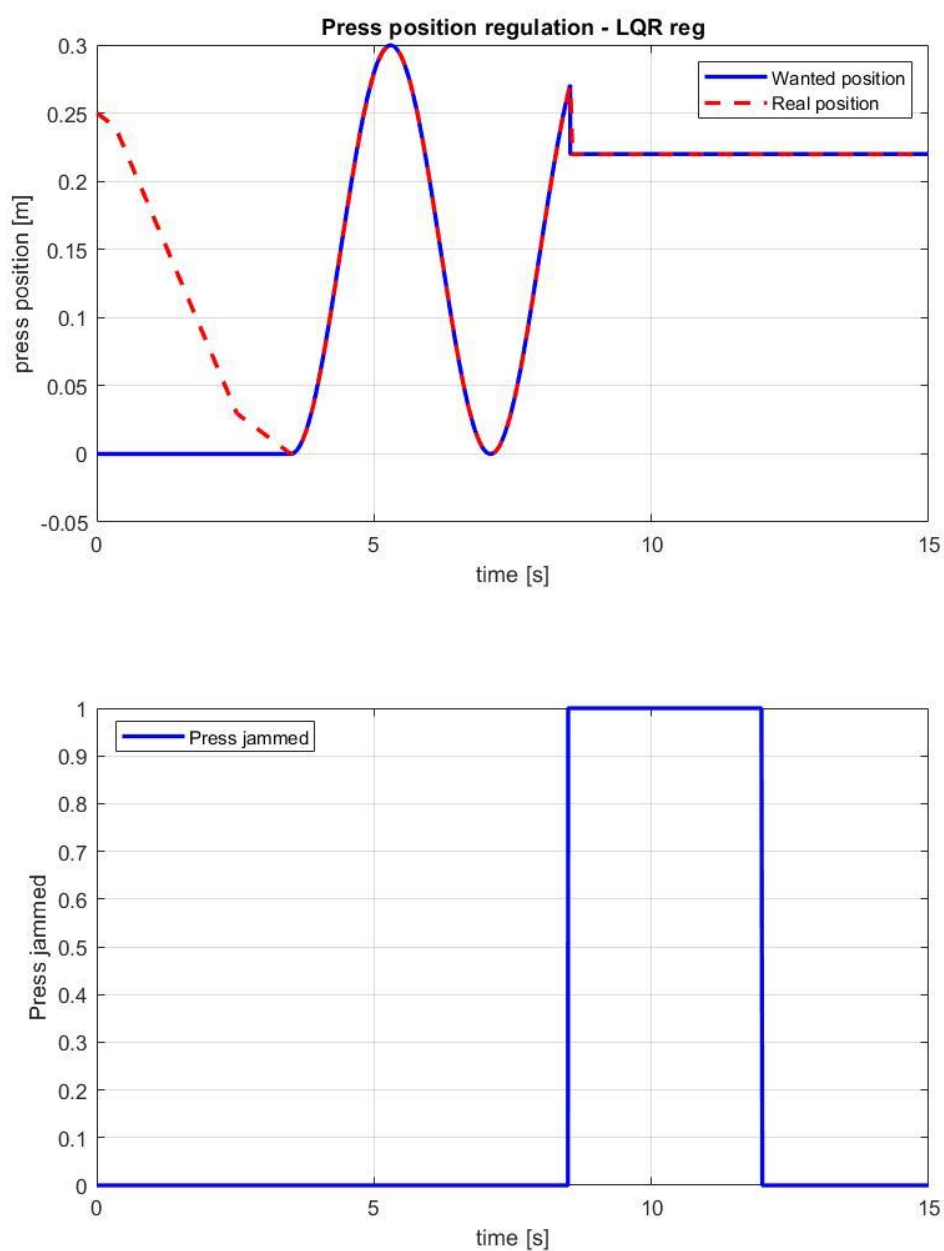


Figure 23 – Press jammed

## 4.6. Zhodnocení celé úlohy a závěr

Úlohou bolo nasimulovať regulovaný systém v simulinku a v našom prípade nasimulovať aj riadiacu jednotku systému. Zvolený bol systém automatizovaného prebíjacieho lisu nábojov. Skladá sa z ručného prebíjacieho lisu, DC motora, prevodoviek a radou senzorov. Tento systém bol namodelovaný pomocou diferenciálnych rovníc DC motora, doplnených rovnicami prevodoviek. Taktiež bola namodelovaná nelineárna charakteristika odporových síl závislá na polohe lisu a smere rýchlosti lisu. Pred začiatkom samotného prebíjania bolo potrebné synchronizovať polohu lisu s polohou v riadiacej jednotke. To sa uskutočnilo pomocou mikrospínača. Na reguláciu polohy boli otestované 2 regulátory. Regulátor s veľkou  $P$  složkou a LQR regulátor. Vybraný bol LQR regulátor s váhou na polohe lisu a žiadnou váhou na rýchlosti a prúde tečúcim motorom. Zmena rýchlosti prebíjania sa uskutoční až v minimálnej polohe lisu. Nakoniec boli otestované poruchové situácie.

Simulácia bola namodelovaná s reálnymi parametrami súčiastok. Regulácia bola úspešná a stroj pracuje bezproblémovo do rýchlosti 3600 nábojov za hodinu. Pri reálnom uskutočnení by bol zvolený iný motor, lebo pri rýchlosti väčšej ako 1000 nábojov za minútu začína efektívny prúd presahovať hodnotu nominálneho prúdu DC motora. Táto hodnota sa môže ešte zväčšiť reálnym suchým trením, väčšou hodnotou viskózneho tlmenia  $b$  alebo väčším zaťažovacím momentom.