

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V
BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
INFORMATIKY**

**Príklad aplikácie pokročilých metód
automatického riadenia**



Tímový projekt

Školiace pracovisko: Ústav robotiky a kybernetiky
Školiteľ: Ing. Marián Tárník, PhD.
Riešitelia: Bc. Michal Petkáč, Bc. Michal Kováč,
Bc. Daniel Malenka, Bc. Ondrej Durmis
Bc. Dmytro Sikomas, Bc. Lukáš Pócsik

Bratislava 2022

Obsah

Zadanie	i
Úvod	1
Riadenie projektu	2
Tím	2
Plán projektu	2
Manažment projektu	2
Záznamy zo stretnutí	3
1 Analýza nameraných dát	5
1.1 Vizualizácia nameraných dát	5
1.2 Filtrácia šumu	6
2 Identifikácia systému jednosmerného motora	7
2.1 Identifikácia statických vlastností	7
2.2 Identifikácia dynamických vlastností	9
2.3 Simulačný model systému	12
2.4 Porovnanie simulačného modelu s nameranými dátami	13
3 Voľba cieľov riadenia	15
3.1 Vyjadrenie referenčného modelu	15
3.2 Voľba pracovného bodu	16
4 Návrh riadenia	17
4.1 Návrh neadaptívneho MRC riadenia	17
4.1.1 Zákon riadenia	17
4.1.2 Podmienky zhody	18
4.1.3 Simulačný model	19
4.1.4 Simulačný experiment	20
4.2 Návrh adaptívneho riadenia	22
4.2.1 Zákon Adaptácie	22
4.2.2 Simulačný model	24
4.2.3 Simulačný experiment	26
4.3 Návrh PI regulátora	28
4.3.1 Návrh regulátora metódou poleplacement	28
4.3.2 Simulačný model	29
4.3.3 Simulačný experiment	30
4.4 Porovnanie spôsobov regulácie	31
5 Záver	32
6 Použitá literatúra	33

TÍMOVÝ PROJEKT

ZADANIE

Študijný program:

Robotika a kybernetika

Študijný odbor:

kybernetika

Vedúci projektu:

Ing. Marián Tárník, PhD.

Miesto vypracovania projektu:

Ústav robotiky a kybernetiky

Riešitelia: Bc. Michal Petkáč, Bc. Michal Kováč, Bc. Lukáš Pócsik, Bc. Daniel Malenka,
Bc. Ondrej Durmis, Bc. Dmytro Sikomas

Názov projektu: *Príklad aplikácie pokročilých metód automatického riadenia*

Špecifikácia zadania:

Projekt vytvára priestor pre aplikáciu pokročilých metód automatického riadenia predovšetkým z oblasti klasického Adaptívneho riadenia.

K dispozícii sú dve laboratórne zariadenia, ktoré budú reprezentovať riadený systém. Ide o tepelný systém ohrevajúci vzduch v sklenenej trubici a o malý jednosmerný motor s pripojeným tachodynamom. Zariadenia sa nachádzajú v laboratóriu D328 na ÚRK.

Poznámka: pre projekt sú/budú k dispozícii základné sady dát potrebných pre plnenie úloh (najmä pre potreby identifikácie systému). V prípade nemožnosti fyzického prístupu riešiteľov k zariadeniu sa predpokladá možnosť získania požadovaných dát prostredníctvom vedúceho projektu na základe špecifikácie od riešiteľských tímov.

Úlohy:

1. Navrhnuť a realizovať metódy spracovania nameraných dát (so senzorov) – kalibrácia, filtrácia šumu a podobne. Návrh vizualizácie dát.
2. Identifikácia predmetného systému – statické a dynamické vlastnosti, matematický model systému (v zmysle a rozsahu študijného programu). Vybrať, zdokumentovať a implementovať metódy identifikácie systému.
3. Vhodná voľba cieľov riadenia predmetného systému.
4. Výber, dokumentácia, návrh a implementácia metód riadenia systému vzhľadom na zvolené ciele. Predpokladá sa porovnanie uplatnenia klasického lineárneho URO (PID regulátor a podobne) a vybranej pokročilej metódy návrhu riadiaceho systému (Adaptívne riadenie).
 - a. Práca so simulovaným systémom vytvoreným na základe predchádzajúcej identifikácie (toto je hlavná časť projektu).
 - b. Práca s reálnym zariadením (priamo riešiteľmi ak to bude možné, sprostredkovane vedúcim projektu ak to bude zmysluplné).

Termín odovzdania projektu: *20.6.2022*

V Bratislave dňa 14.2.2022

prof. Ing. Jarmila Pavlovičová, PhD.
garantka študijného programu

Úvod

V tejto práci budeme popisovať aplikáciu pokročilých metód adaptívneho riadenia na reálny systém [2]. Reálny systém, ktorý budeme riadiť bude pozostávať z jednosmerného motora s pripojeným tachodynamom. Jednosmerný motor má na hriadele pripojené tachodynamo, ktorého účelom je snímanie uhlovej rýchlosťi jednosmerného motora. Na reálnom systéme budeme vykonávať merania, z ktorých identifikujeme statické a dynamické vlastnosti sústavy tak, aby sme následne mohli zostrojiť simulačný model. Na simulačnom modeli budeme navrhovať vybranú metódu adaptívneho riadenia za účelom splnenia cieľa riadenia.

Riadenie projektu

Tím

Riešenie problematiky aplikácie pokročilých metód adaptívneho riadenia na reálnom systéme ako zadanie tímového projektu vypracovávali:

- Bc. Michal Petkáč
- Bc. Michal Kováč
- Bc. Daniel Malenka
- Bc. Ondrej Durmis
- Bc. Dmytro Sikomas
- Bc. Lukáš Pócsik (Vedúci tímu)

Plán projektu

Plán projektu je postupne v priebehu letného semestra vypracovať jednotlivé body zadania, kde je kladený dôraz mať identifikovaný model z nameraných dát do konca prvej polovice semestra. Zvyšok semestra je určený na dokončenie ostatných úloh. Dokumentácia k projektu bude riešená priebežne počas vypracovávania jednotlivých bodov zadania, kde sa predpokladá mať aspoň hrubo pripravenú dokumentáciu do konca letného semestra. Plánujeme mať približne dve priebežné stretnutia so školiteľom, kde mu chceme prezentovať posun vo vypracovávaní práce a zároveň si s ním od konzultovať naše nejasnosti. Po dohode so školiteľom je odovzdanie dokumentácie do AIS naplánované na koniec mesiaca máj (31.5.) .

Manažment projektu

Manažovanie projektu sme realizovali cez platformu Microsoft Teams, kde sme si vytvorili vlastnú skupinu a naplánovali si po dohode so všetkými členmi, pravidelne sa opakujúce stretnutie v stredu od 17. do 19. hodiny pre každý týždeň. Taktiež sme si vytvorili pre prácu so zdielanými súbormi [Git-Hub tím](#) aj s verejným repozitárom, kde je možné v histórií aj späťne v čase pozerať jednotlivé pravcovné verzie súborov. Vytvorili sme si dva repozitáre, kde repozitár [TP-PlainData](#) je repozitár s poskytnutými nameranými dátami na reálnom systéme pre realizovanie identifikácie. Repozitár [Solution](#) je repozitár, ktorý obsahuje naše riešenie aj s grafmi. Vypracovávanie dokumentácie sme realizovali cez bezplatný online nástroj [Overleaf](#), kde mal každý jeden člen tímu možnosť pridať svoje dielčie riešenia a zároveň ostatní členovia tímu mali možnosť tie dielčie riešenia následne validovať.

Záznamy zo stretnutí

Záznamy z jednotlivých tímových stretnutí sme spracovali do nasledujúcej tabuľky:

Tabuľka 1: Záznamy z jednotlivých stretnutí (1. až 8. stretnutie)

Záznamy zo stretnutia		
Dátum	Stretnutie	Poznámky zo schôdze
02.03.2022	1. stretnutie	<ul style="list-style-type: none">• Vol'ba vedúceho tímu (Lukáš Pocsik)• Brainstorming k vybranej téme TP• Dokumentácia cez Overleaf• Git-Hub vytvorenie tímu• Interný deadline koniec letného semestra• Vedúci tímu vybaví stretnutie so školiteľom
09.03.2022	2. stretnutie	<ul style="list-style-type: none">• Rekapitulácia informácií od školiteľa• Brainstorming k vybranej téme TP• Prvé vykreslenie dát• Snaha získať prevodovú char.
16.03.2022	3. stretnutie	<ul style="list-style-type: none">• Identifikácia prevodovej char.• Vol'ba pracovných bodov• Určenie dynamiky prac. bodu• Identifikácia pre sústavu 1. rádu
23.03.2022	4. stretnutie	<ul style="list-style-type: none">• Dohodnúť si konzultáciu so školiteľom• Identifikácia prechodovej charakteristiky• Vol'ba pracovného bodu pre každý skok• Vykreslenie priebehov K a T závislosti od pb
30.03.2022	5. stretnutie	<ul style="list-style-type: none">• Rekapitulácia informácií od školiteľa• Simulačný model riadeného systému• Tvorba a export grafov do dokumentácie
06.04.2022	6. stretnutie	<ul style="list-style-type: none">• Identifikácia statických vlastností (Dok.)• Návrh PI regulátora (MRC)• Návrh zákona riadenia v tvare $u = \theta_1 r + \theta_2 y$
13.04.2022	7. stretnutie	<ul style="list-style-type: none">• Návrh MRAC MIT regulátora• Simulácia MRAC MIT v uvažovaných pb• Identifikácia dynamických vlastností (Dok.)
20.04.2022	8. stretnutie	<ul style="list-style-type: none">• Návrh PI riadenia v konkrétnom pb• Tvorba grafov (Dok.)• Pokračovanie v tvorbe dokumentácie

Tabuľka 2: Záznamy z jednotlivých stretnutí (9. až 13. stretnutie)

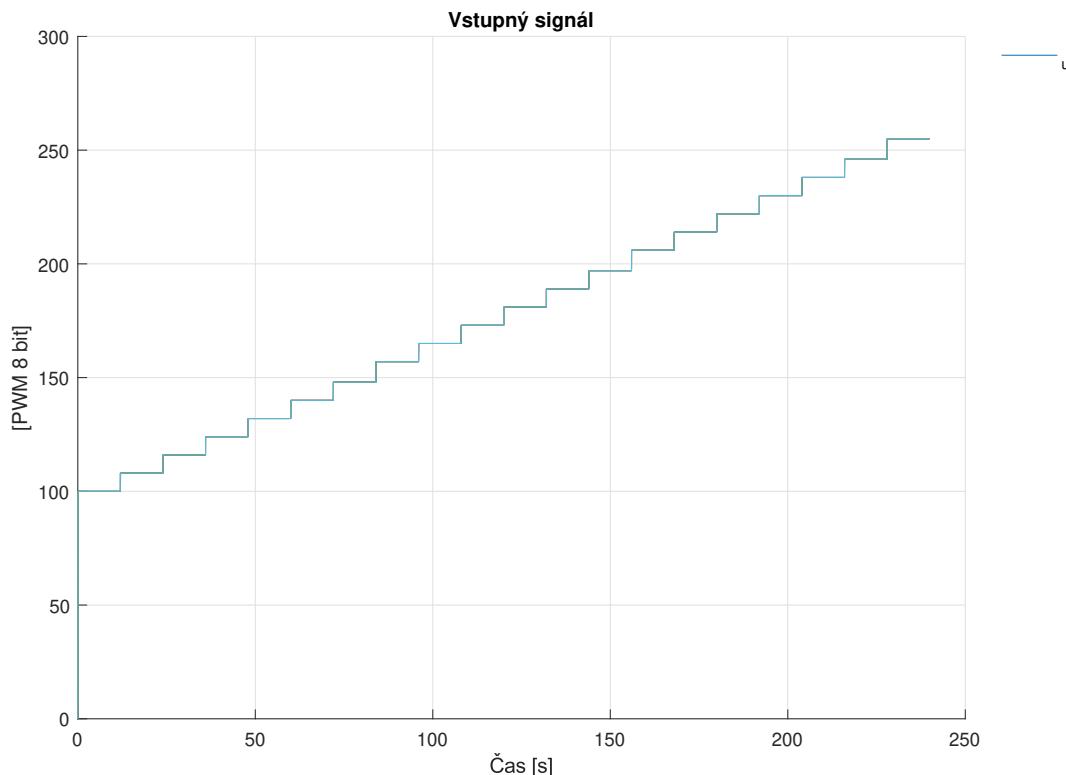
Záznamy zo stretnutia		
Dátum	Stretnutie	Poznámky zo schôdze
27.04.2022	9. stretnutie	<ul style="list-style-type: none">• Návrhu MRC a MIT MRAC riadenia (Dok.)• Dorobenie schémy (Dok.)• Tvorba grafov (Dok.)
04.05.2022	10. stretnutie	<ul style="list-style-type: none">• Implementácia PI regulátora• Ladenie parametrov regulátora MRAC MIT• Simulačný experiment na sínusovom signále
11.05.2022	11. stretnutie	<ul style="list-style-type: none">• Dokumentácia výsledkov a modelu• Vytváranie obrázkov a grafov simulácií
18.05.2022	12. stretnutie	<ul style="list-style-type: none">• Pokračovanie v tvorbe dokumentácie
25.05.2022	13. stretnutie	<ul style="list-style-type: none">• Dokončovanie dokumentácie• Tvorba prezentácie

1 Analýza nameraných dát

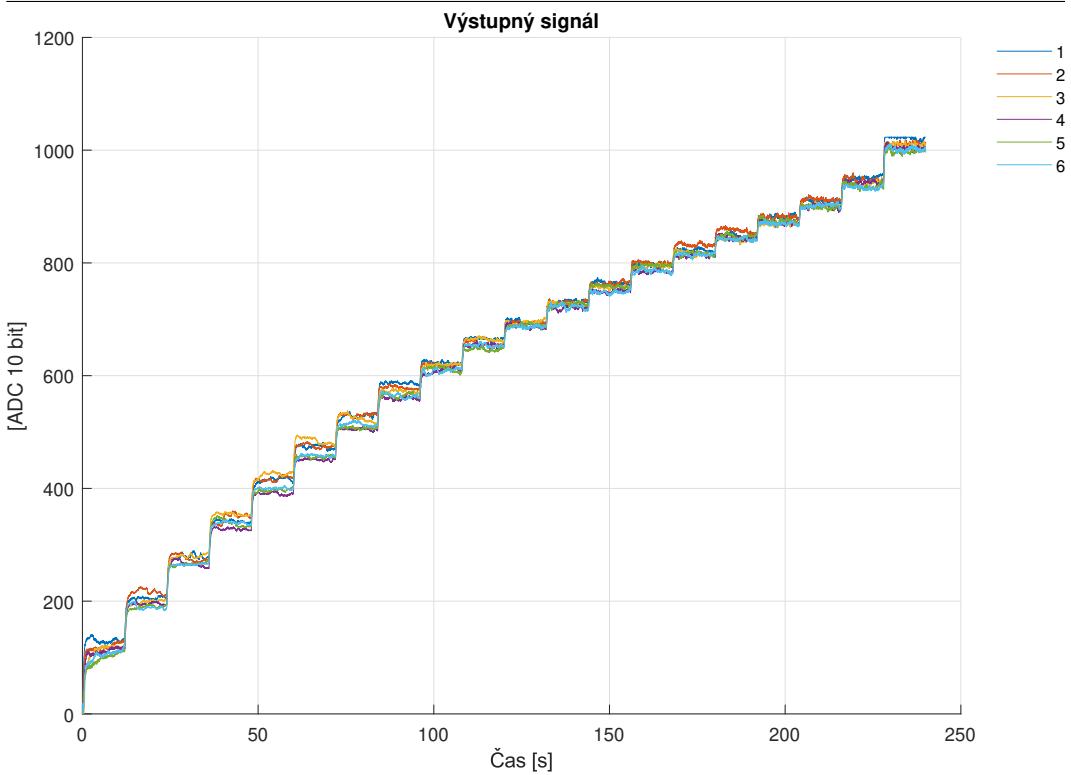
1.1 Vizualizácia nameraných dát

Predmetné laboratórne zariadenie bolo ovládané mikroprocesorom. Mikroprocesor generoval PWM signál (8 bit), ktorý bol privedený cez výkonový prvok na jednosmerný motor. Uhlovú rýchlosť motora sme získali z mikroprocesora, kde pomocou AD prevodníka meral napätie generované tachodynamom. Rozlíšenie AD prevodníka bolo 10 bitov (pre 0 - 5 V).

Namerané dátá predstavovali prechodové charakteristiky motora. Meranie prechodovej charakteristiky bolo vykonávané pripájaním vstupného signálu na motorček, ktorý bol daný PWM signálom s rozlíšením 8 bitov. Vstupné hodnoty signálu boli v rozsahu 0 až 255. Výstupný signál z tachodynamu bol meraný AD prevodníkom s rozlíšením 10 bitov. Výstupné hodnoty boli v rozsahu od 0 až 1023. Namerané dátá obsahovali viac experimentov vid'. Obr. 2.



Obr. 1: Vstupný signál merania prechodových charakteristík



Obr. 2: Namerané prechodové charakteristiky predmetného systému, pozostávajúce zo šiestich meraní

1.2 Filtrácia šumu

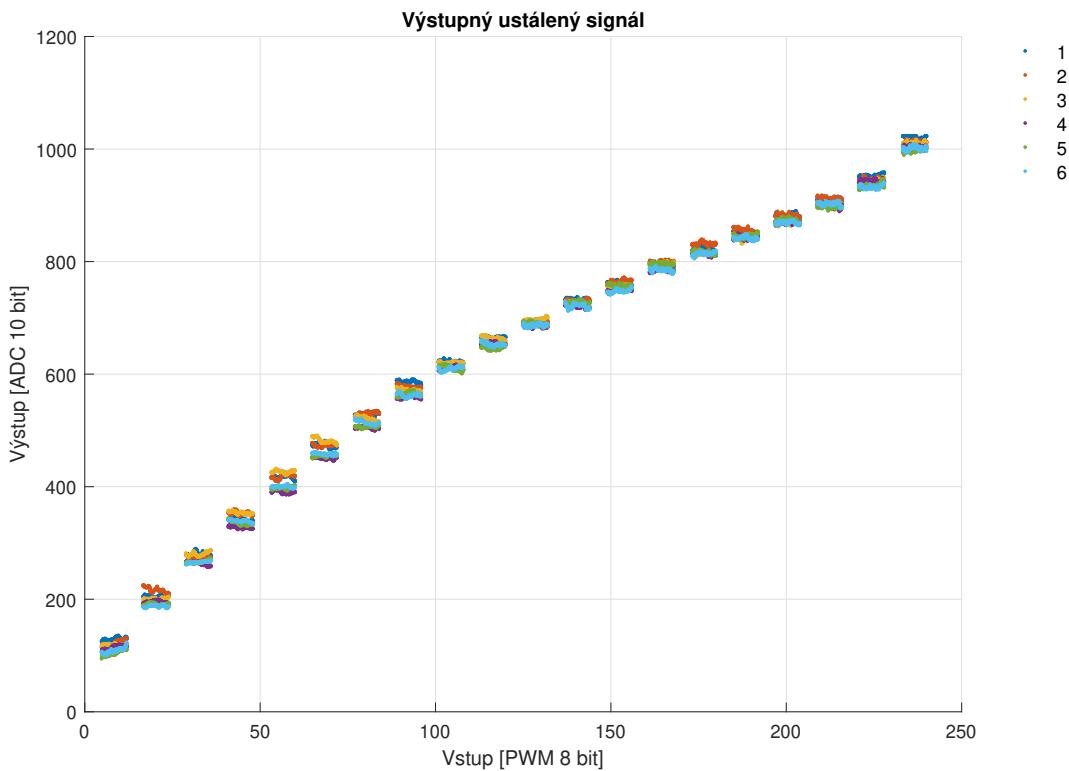
Pri práci s reálnym systémom sme uvažovali, že výstupný signál tachodynamy reprezentujúci uhlovú rýchlosť motora môže obsahovať šum. Pri následnej identifikácii systému z nameraných dát šum mohol spôsobovať problémy, preto bolo dôležité aby sme tento šum potlačili. Uvažujeme, že šum, ktorým je zaťažený nás signál je čisto náhodný, ktorý tiež nazývame ako biely šum. Biely šum je náhodná veličina, ktorej hodnoty sú v každom okamihu navzájom nezávislé a jeho stredná hodnota je rovná nule.

Namerané dáta obsahovali viacero rovnakých meraní. Rovnakými meraniami myslíme, že vstupný signál pri jednotlivých meraniach sa nemenil. Túto skutočnosť sme využili pri potlačení šumu nameraného signálu. Namerané dáta sme orezali tak, aby všetky signály začínali v hodnote a čase 0. Následne sme vypočítali aritmetický priemer pre každú vzorku nameraného signálu zo všetkých meraní. Aritmetickým priemerom sme znížili hodnotu rozptylu šumu.

2 Identifikácia systému jednosmerného motora

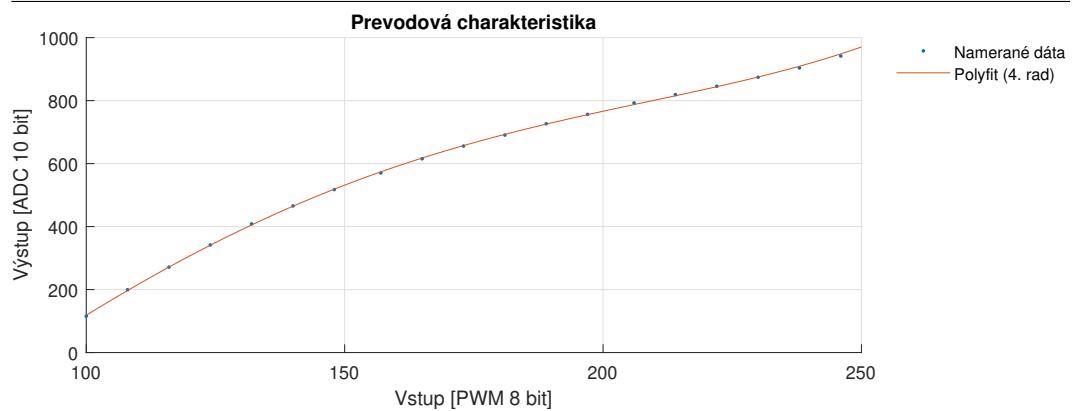
2.1 Identifikácia statických vlastností

Pred samotnou identifikáciou, sme namerané charakteristiky upravili tak, aby sme s nimi vedeli d'alej pracovať. Úprava dát zahŕňala mimo iné, posunutie nameraných dát na nulu a vyhodenie nerelevantných dát.

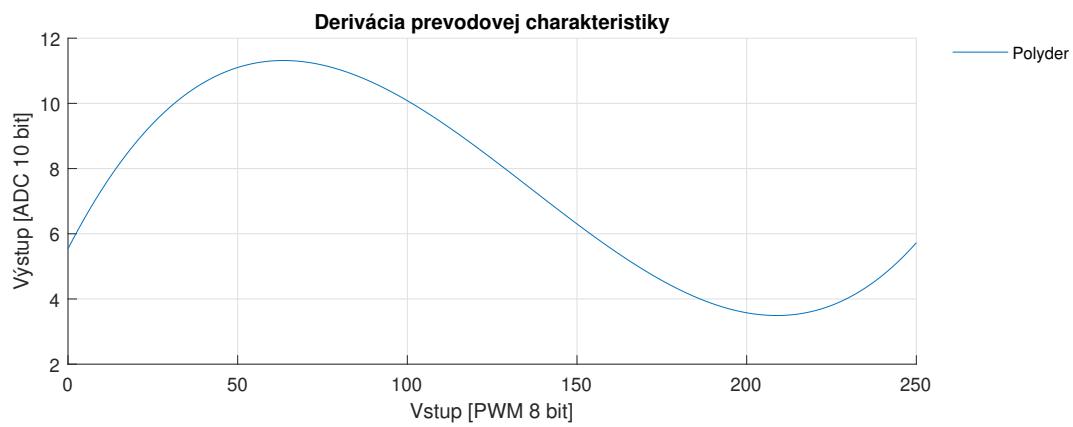


Obr. 3: Priebehy ustálených hodnôt jednotlivých meraní, pričom jednotlivé merania sú očíslované 1-6

Pre identifikáciu statických vlastností sme potrebovali získať prevodovú charakteristiku. Tú sme určovali z nameraných prechodových dejov. Pre určenie prevodovej charakteristiky sme potrebovali získať ustálené hodnoty výstupu systému pri skokových zmenách vstupného signálu. Jednotlivé prechodové charakteristiky sme orezali na priebehy ustálených hodnôt vid' Obr.3. Získali sme tak priebehy ustálených hodnôt pre všetky merania, ktoré sme následne spriemerovali v rámci jedného merania, a následne sme spriemerovali hodnoty vo všetkých meraniach pre každú prechodovú charakteristiku. Prevodovú charakteristiku sme zobrazili ako výstupné ustálené priemerné hodnoty všetkých meraní v daných prechodových dejoch ku vstupom pri jednotlivých prechodových dejoch. Body prevodovej charakteristiky sme aproximovali polynomiálnou funkciou 4. rádu. Funkcia je zobrazená na obr. 5.



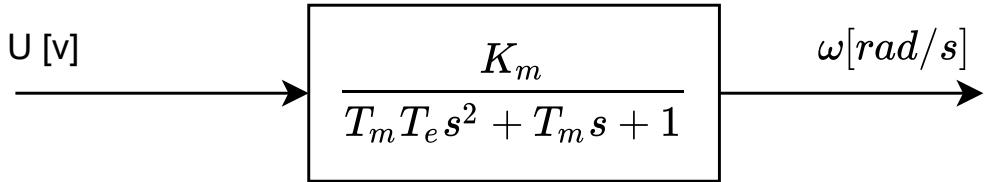
Obr. 4: Prevodová charakteristika systému a polynomiálna approximácia prevodovej charakteristiky



Obr. 5: Derivácia polynomiálnej approximácie prevodovej charakteristiky

2.2 Identifikácia dynamických vlastností

Matematický model jednosmerného motora sa vo všeobecnosti udáva ako sústava druhého rádu.



Obr. 6: Matematický model jednosmerného motora

Ako môžeme vidieť aj na obr. 6, dynamiku jednosmerného motora určujú dve časové konštanty - časová konštantá mechanická a časová konštantá elektrická. Časová konštantá elektrickej časti je rádovo nižšia ako časová konštantá mechanickej časti. Dynamické zmeny z tohto dôvodu ovplyvňuje predovšetkým časová konštantá mechanickej časti a z tohto pohľadu môžeme zanedbať vplyv elektrickej časti a uvažovať model systému prvého rádu v tvare:

$$G_s = \frac{K}{T \cdot s + 1} e^{-Ds} \quad (1)$$

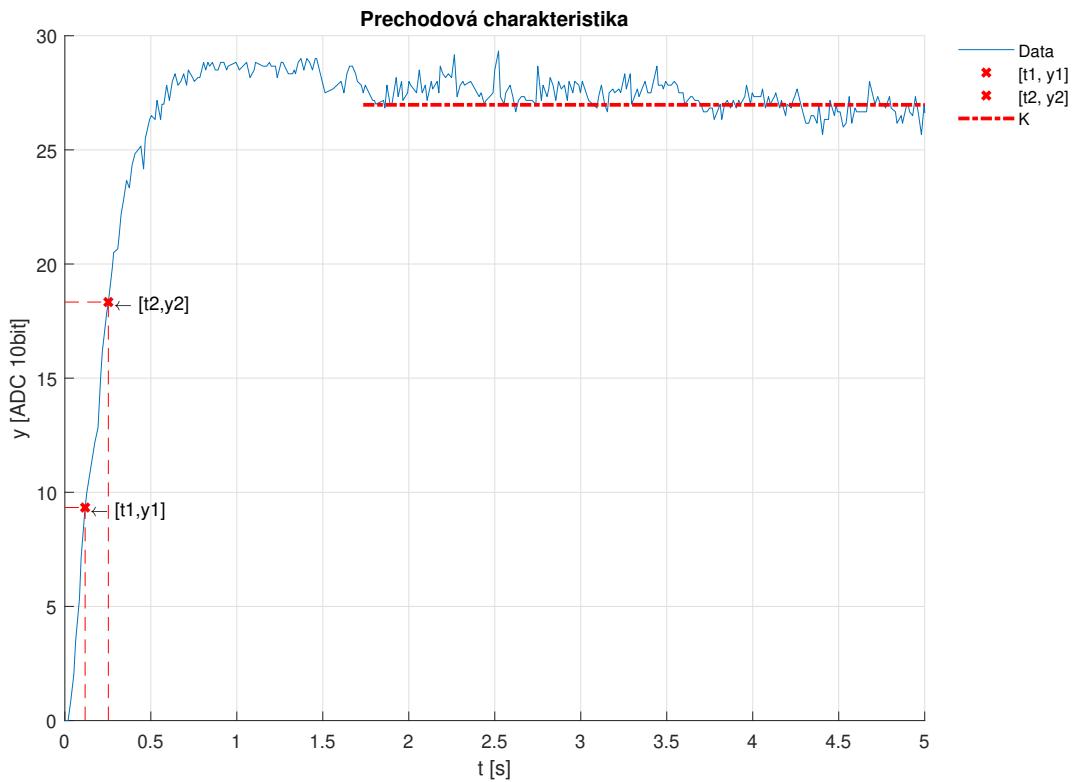
Kde K je zosilnenie a T je časová konštantá motorčeka. Keďže predmetný systém je nelineárny, v každom pracovnom bode sú tieto parametre rôzne. Uvažovali sme aj časové oneskorenie sústavy D .

Z nameraných dát sme extraholi jednotlivé prechodové deje v rôznych pracovných bodoch závislých od vstupu systému. Dynamické vlastnosti systému sme identifikovali zvlášť pre každý pracovný bod. Preto sme parametre modelu identifikovali na každej prenosovej funkcií.

Pre identifikáciu systému prvého rádu z prechodovej charakteristiky sme použili metódu časových konštant. Vychádzali sme z predpokladu, že poznáme ustálenú hodnotu priebehu $y(\infty)$ a dva body prechodovej charakteristiky $[t_1, y_1]$ a $[t_2, y_2]$. Pre zvolené body musí platiť $y_1 = 0,33 \cdot y(\infty)$ s odpovedajúcim časom $t_1 = t_{0,33}$ a $y_2 = 0,7 \cdot y(\infty)$ s časom $t_2 = t_{0,7}$. Metóda vychádza z porovnania náhradnej prechodovej charakteristiky so skutočnou prechodovou charakteristikou v bodoch $y(0)$, $y(t_{0,33})$, $y(t_{0,7})$ a $y(\infty)$. Parametre prenosovej charakteristiky sme potom určili vzťahom:

$$\begin{aligned} K &= y(\infty) \\ T &= 1,245(t_{0,7} - t_{0,33}) \\ D &= 1,498 \cdot t_{0,33} - 0,49 \cdot t_{0,7} \end{aligned} \quad (2)$$

Pre každý pracovný bod, teda pre každú prevodovú charakteristiku, sme zvolenou metódou identifikovali zosilnenie K a časovú konštantu T . Následne sme zmeny zosilnenia a časovej konštanty v rôznych pracovných bodoch approximovali polynómom. Aproximácia nám slúžila na výpočet parametrov modelu v závislosti od pracovného bodu. Zosilnenie a časovú konštantu T sme approximovali polynómom 3. rádu v tvare:



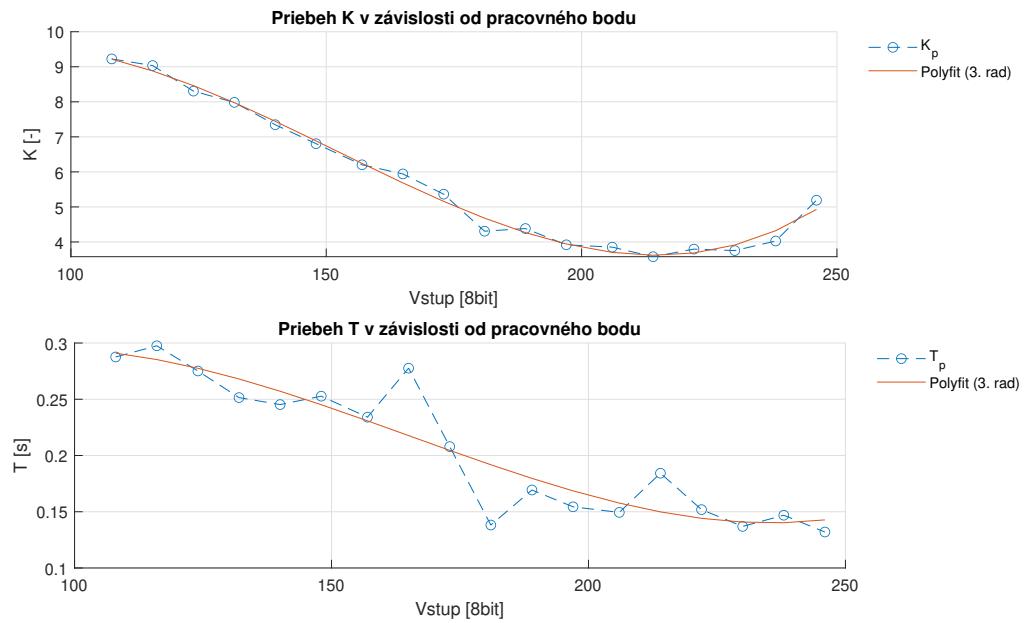
Obr. 7: Príklad identifikácie parametrov modelu z prechodovej funkcie

$$f_{k-lokal}(u) = 6.06e^{-6}u^3 - 0.0027u^2 + 0.34u - 3.90 \quad (3)$$

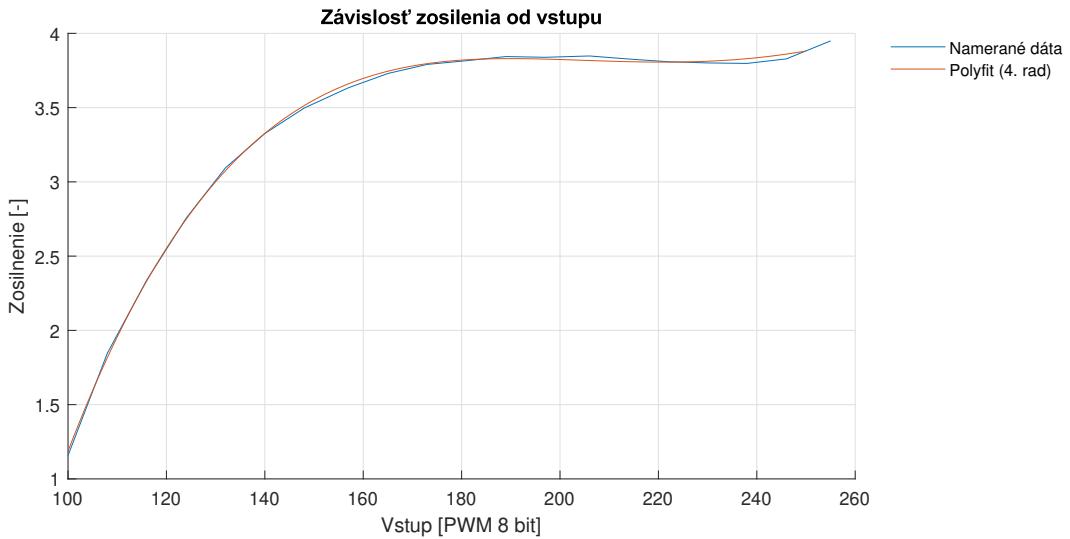
$$f_T(u) = 1.10e^{-7}u^3 - 5.48e^{-5}u^2 + 0.0074u - 0.0088 \quad (4)$$

Zmenu zosilnenia v pracovných bodoch sme identifikovali, z prevodovej charakteristiky ako závislosť zosilnenia od vstupu. Túto závislosť sme následne approximovali polynómom 4. rádu, v tvare:

$$f_{k-global}(u) = -7.74e^{-9}u^4 + 7.92e^{-6}u^3 - 0.0029u^2 + 0.46u - 23.13 \quad (5)$$



Obr. 8: Priebehy zmeny časovej konštanty T a lokálneho zosilnenia K v danom pracovnom bode



Obr. 9: Závislosť zosilnenia v pracovných bodoch od vstupu systému

2.3 Simulačný model systému

V predošej kapitole sme z nameraných dát riadeného systému určili prenosové funkcie approximujúce správanie tohto systému v jednotlivých pracovných bodoch. Ďalším krokom je vytvoriť taký model, ktorý dokáže vhodne approximovať správanie systému v celom pracovnom rozsahu.

Ked'že sme systém identifikovali ako prenosovú funkciu prvého rádu, použijeme takúto prenosovú funkciu aj pri tomto simulačnom modeli. Rozdielom však bude, že prenosová funkcia nebude mať konštantné zosilnenie a časovú konštantu, ale tieto hodnoty sa budú meniť v závislosti od pracovného bodu. Pracovný bod je určený hodnotou vstupného signálu, takže od tejto hodnoty budú závisieť parametre systému.

Aby sme vedeli meniť parametre prenosovej funkcie, použili sme spätnú Laplaceovu transformáciu na transformáciu z prenosovej funkcie na diferenciálne rovnice. Výpočet je v rovnici (6).

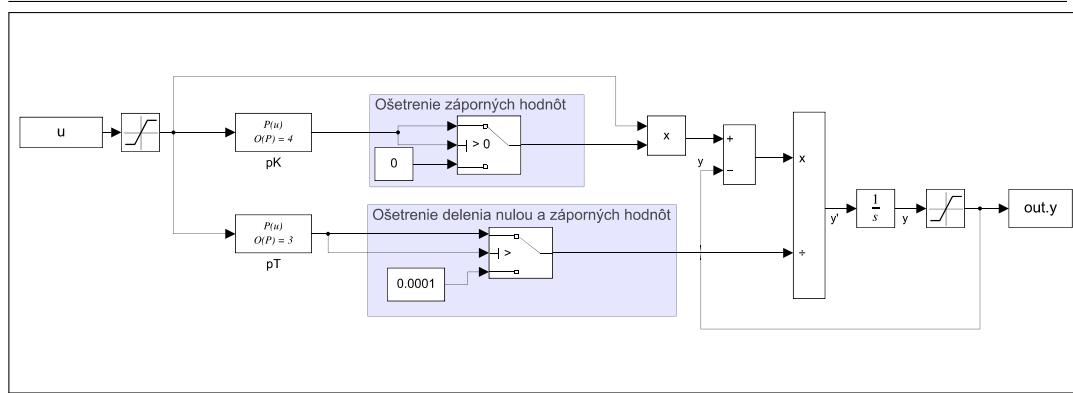
$$\begin{aligned}
 \frac{y(s)}{u(s)} &= \frac{K}{Ts + 1} \\
 y(s)(Ts + 1) &= Ku(s) \\
 T\dot{y}(t) + y(t) &= Ku(t) \\
 \dot{y}(t) &= \frac{Ku(t) - y(t)}{T}
 \end{aligned} \tag{6}$$

Hodnoty parametrov K a T v tomto prípade nie sú konštantné, ale menia sa v závislosti od pracovného bodu, ktorý je reprezentovaný veľkosťou vstupnej veličiny. Na vyhodnotenie aktuálnej hodnoty parametrov sme využili polynómy, ktoré sme získali approximáciou nameraných parametrov v jednotlivých pracovných bodoch. Na určenie aktuálneho zosilnenia sme využili polynom (5) a na určenie aktuálnej časovej konštanty polynom (3).

Laboratórne zariadenie, ktorého simulačný model zostrojujeme má svoje fyzikálne obmedzenia. Týka sa to najmä vstupnej a výstupnej veličiny. Vstupná veličina je obmedzená rozlíšením PWM výkonového prvku (8 bit) a výstupná veličina je obmedzená rozlíšením ADC prevodníka (10 bit). Pre zohľadnenie týchto skutočností sme do simulačného modelu pridali obmedzenie (saturáciu) vstupnej a výstupnej veličiny na rozsahy podľa týchto rozlíšení.

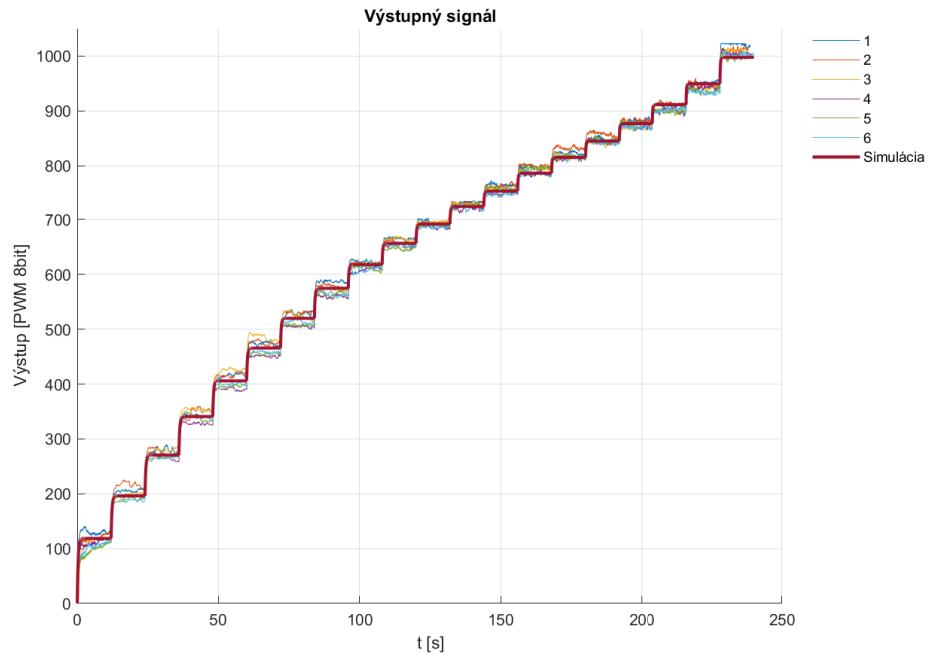
Posledným problémom, s ktorým sme sa pri simulačných experimentoch stretli je fakt, že polynómy, ktorými approximujeme hodnoty zosilnenia a časovej konštanty nadobúdajú pri nízkych hodnotách vstupného signálu záporné hodnoty. Spôsobené je to tým, že namerané údaje začínajú pri vstupnom signále na úrovni $u = 100$ a tým pádom nemáme o dynamike systému pri nižších vstupných hodnotách žiadne relevantné informácie.

Záporné zosilnenie je veľmi problematické a môže viesť k nestabilite celého systému. Časová konštantá vystupuje pri zápisе v tvare diferenciálnych rovníc ako deliteľ, čo je pri prechode nulou opäť problém. Tento problém sme vyriešili tak, že zosilnenie systému môže nadobúdať len nezáporné hodnoty. Ak je hodnota nižšia, berie sa ako nulová. Časovú konštantu sme vyriešili podobne, no jej minimálnu hodnotu sme nastavili na kladné číslo blízke nule.



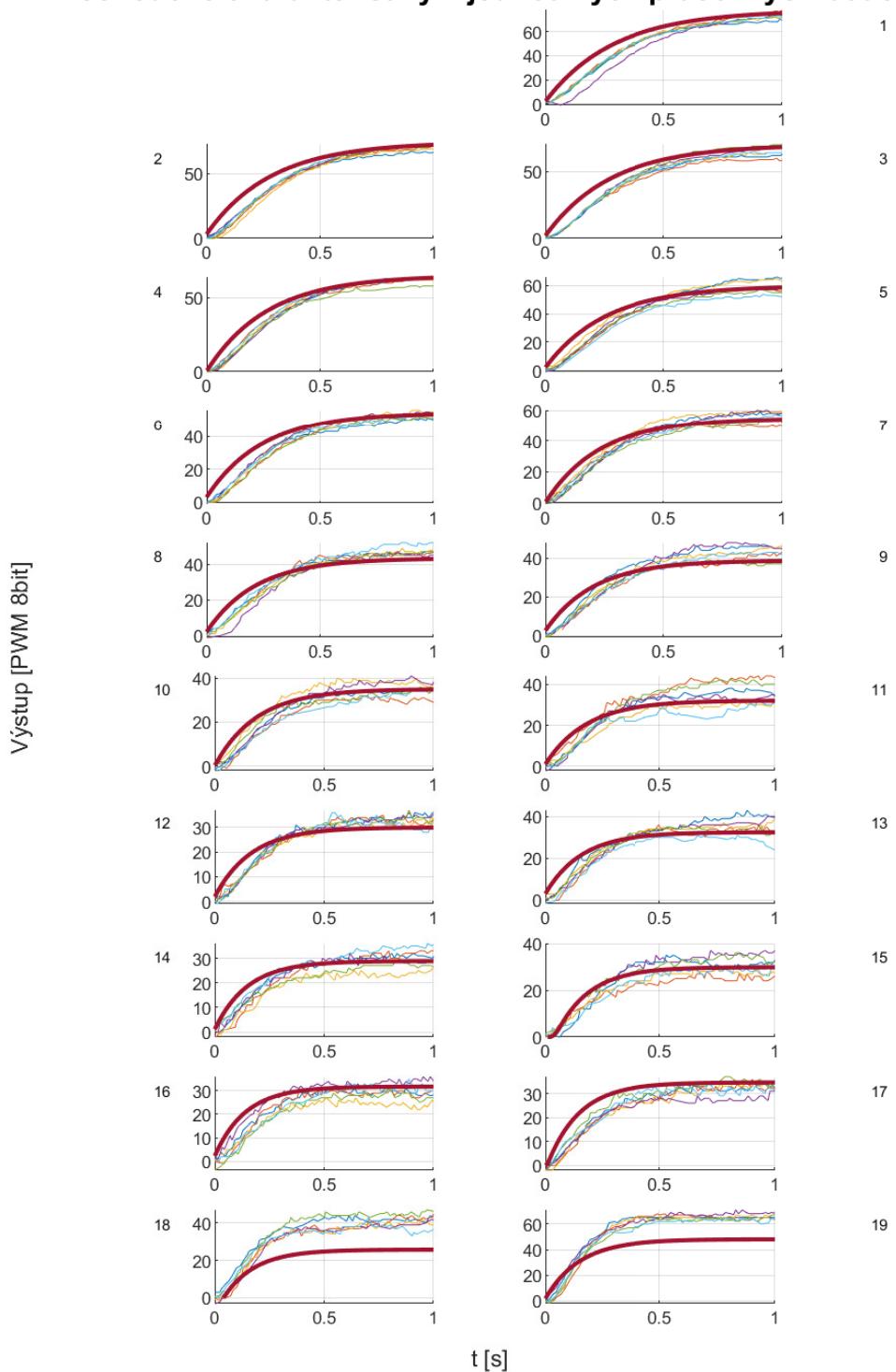
Obr. 10: Simulačný model riadeného systému

2.4 Porovnanie simulačného modelu s nameranými dátami



Obr. 11: Porovnanie výstupu identifikovaného modelu s nameranými dátami

Prechodové charakteristiky v jednotlivých pracovných bodoch



Obr. 12: Porovnanie prechodových charakteristík v jednotlivých pracovných bodoch identifikovaného modelu (červenou) systému s reálnymi nameranými dátami (farebne)

3 Voľba cieľov riadenia

Riadený systém je jednosmerný elektrický motorček. Riadenou veličinou je rýchlosť tohto motorčeka.

Hlavnou požiadavkou pri riadení je, aby tento motorček sledoval referenčný signál, teda aby v ustálenom stave bola jeho rýchlosť rovná referenčnému signálu.

Druhou našou požiadavkou je, aby tento ustálený stav nastal v rozumnom čase, teda aby dynamika prechodového deju bola v rámci reálnych možností čo najrýchlejšia. O motorčku však nemáme veľa informácií a tiež nevieme, na aký účel má byť navrhované riadenie využívané. Vo všeobecnosti však môžeme povedať, že dynamika elektromotorov je rádovo v desatinách sekúnd až v sekundách. Vidieť to môžeme aj z identifikovaných parametrov v jednotlivých pracovných bodoch, kde sa identifikovaná časová konštantă pohybuje v rozsahu hodnôt 0.15 – 0.3. Rozhodli sme sa pre hodnotu $\frac{1}{3}$.

3.1 Vyjadrenie referenčného modelu

Ked'že sa budeme zaoberať najmä adaptívnym riadením s referenčným modelom, vyjadríme tieto naše požiadavky žiadanou prenosovou funkciou. Referenčný model sme si zvolili rovnakého rádu ako riadený systém, čiže v tvare

$$\frac{y_m(s)}{r(s)} = \frac{1}{\frac{1}{3}s + 1} \quad (7)$$

Zosilnenie tohto referenčného modelu je jedna (teda výstup sleduje referenčný signál) a časová konštantă je $\frac{1}{3}$ tak, ako sme to stanovili. Pri adaptívnom riadení s referenčným modelom sa používa nasledovný tvar referenčného modelu:

$$\frac{y_m(s)}{r(s)} = \frac{b_m}{s + a_m} \quad (8)$$

Jednoduchým vynásobením čitateľa a menovateľa hodnotou 3 získame parametre a_m a b_m .

$$\begin{aligned} a_m &= 3 \\ b_m &= 3 \end{aligned} \quad (9)$$

a teda

$$\frac{y_m(s)}{r(s)} = \frac{3}{s + 3} \quad (10)$$

3.2 Voľba pracovného bodu

Od riadenia v ideálnom prípade požadujeme predpísané správanie v ľubovoľnom pracovnom bode. Pri simuláciách preto budeme využívať dva dostatočne vzdialené pracovné body, aby sme vedeli porovnať prípadné rozdiely. Zvolené pracovné body sú $u_{PB1} = 206$ a $u_{PB2} = 150$. Tieto pracovné body sme identifikovali z prevodovej charakteristiky ako vhodné pri uvažovaní pracovného okolia ± 6 . Identifikované prenosové funkcie v týchto pracovných bodoch sú v rovnici (11).

$$\begin{aligned} G_{PB1} &= \frac{3.7021}{0.1577s + 1} \\ G_{PB2} &= \frac{6.7418}{0.242s + 1} \end{aligned} \quad (11)$$

4 Návrh riadenia

Riadenej systém je opísaný prenosovou funkciou v tvare:

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{b_0}{s + a_0} \quad (12)$$

Parametre systému sa menia v závislosti od pracovného bodu, preto je pre návrh neadaptívnych regulátorov zvoliť pracovný bod, pre ktorý navrhujeme parametre riadenia. V určitom okolí pracovného bodu môžeme považovať systém za blízky lineárному. Veľkosť takéhoto okolia závisí od rýchlosť zmeny parametrov v závislosti od pracovného bodu. Čím sa parametre menia pomalšie, tým väčšie okolie môžeme považovať za lineárne a naopak, čím je zmena parametrov rýchlejšia, tým menšie okolie bude vhodné na riadenie takýmto regulátorom.

Druhou možnosťou je navrhnuť adaptívne riadenie. Toto riadenie v reálnom čase sleduje správanie sa riadeného systému (vstupy aj výstupy) a na základe nich upravuje riadenie. Vďaka takému riadeniu je možné dosiahnuť predpísané správanie sa systému v rôznych pracovných bodoch. Nevýhodou takéhoto návrhu je, že proces adaptácie nie je okamžitý a systému istý čas trvá, kym sa prispôsobí zmene pracovného bodu. Počas tohto procesu adaptácie nevie riadenie zaručiť predpísané správanie.

4.1 Návrh neadaptívneho MRC riadenia

Ako metódu návrhu neadaptívneho riadenia sme si zvolili MRC (model reference control). Podstatou takéhoto riadenia je nájsť také parametre zákona riadenia, že sa bude výstup riadeného systému zhodovať s referenčným modelom.

Prvým krokom je voľba referenčného modelu. Referenčný model sme vyjadrili v kapitole 3.1, konkrétnie v rovnici (10).

4.1.1 Zákon riadenia

Ďalším dôležitým krokom návrhu riadenia je voľba zákona riadenia. Keďže sa jedná o systém prvého rádu, postačuje proporčný zákon riadenia, teda obsahujúci len lineárnu kombináciu signálov. Zákon riadenia sme zvolili v tvare:

$$u = \Theta_1 y + \Theta_2 r \quad (13)$$

Zákon riadenia obsahuje dva voliteľné parametre, ktorými vieme ovplyvniť správanie systému.

4.1.2 Podmienky zhody

Posledným krokom návrhu MRC riadenia je určenie parametrov zákona riadenia. Tie vieme určiť riešením podmienok zhody. Podmienky zhody vzniknú porovnaním uzavretého regulačného obvodu s referenčným modelom. Najskôr teda vyjadríme uzavretý regulačný obvod dosadením rovnice zákona riadenia (13) do rovnice riadeného systému (12).

$$\begin{aligned}
 y &= \frac{b_0}{s + a_0} (\Theta_1 y + \Theta_2 r) \\
 y &= \frac{b_0 \Theta_1 y}{s + a_0} + \frac{b_0 \Theta_2 r}{s + a_0} \\
 (s + a_0 - b_0 \Theta_1) y &= b_0 \Theta_2 r \\
 y &= \frac{b_0 \Theta_2}{s + a_0 - b_0 \Theta_1} r \\
 \frac{y}{r} &= \frac{b_0 \Theta_2}{s + a_0 - b_0 \Theta_1}
 \end{aligned} \tag{14}$$

Uzavretý regulačný obvod porovnáme s referenčným modelom.

$$\frac{b_m}{s + a_m} = \frac{b_0 \Theta_2}{s + a_0 - b_0 \Theta_1} \tag{15}$$

Z tohto porovnania nám vzniknú dve rovnice - podmienky zhody.

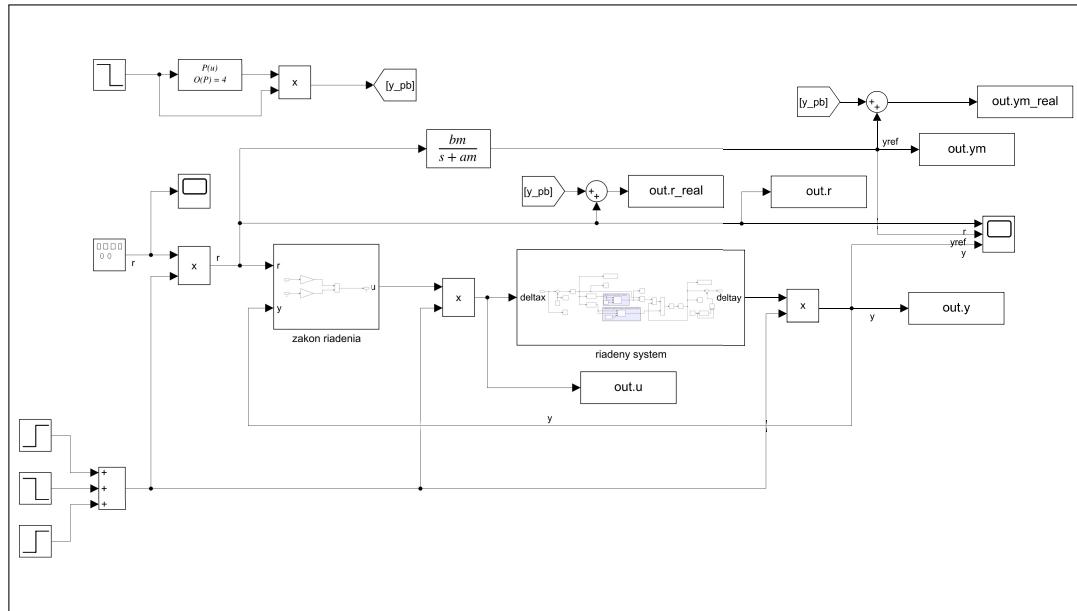
$$\begin{aligned}
 a_m &= a_0 - b_0 \Theta_1^* \\
 b_m &= b_0 \Theta_2^*
 \end{aligned} \tag{16}$$

Kde Θ_1^* a Θ_2^* predstavujú ideálne parametre zákona riadenia, pri ktorých sa bude riadený systém zhodovať s referenčným modelom. Ich hodnotu môžeme určiť riešením podmienok zhody (16).

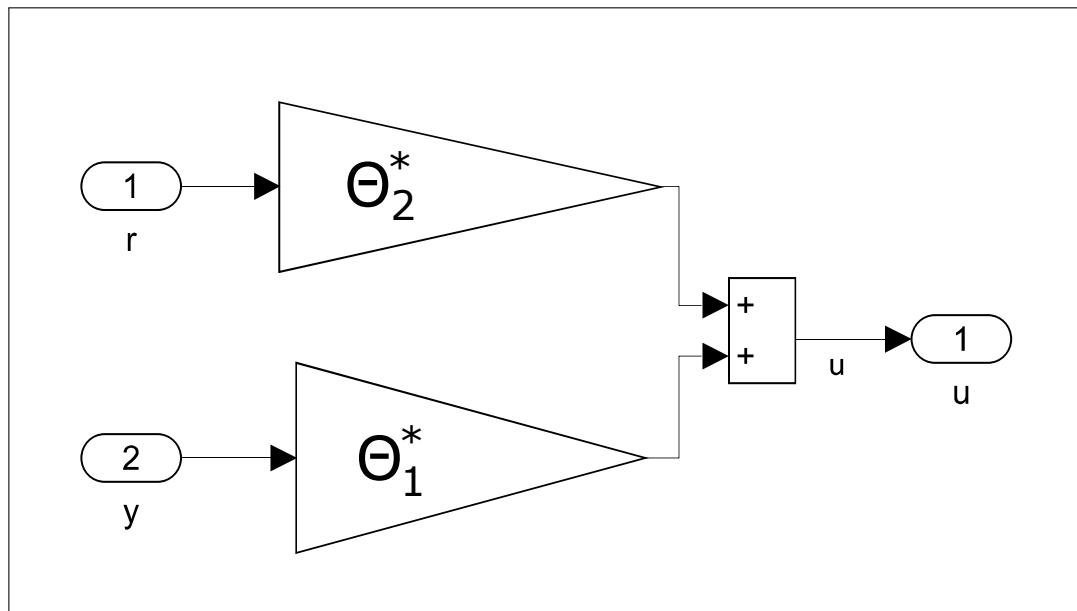
$$\begin{aligned}
 \Theta_1^* &= \frac{-a_m + a_0}{b_0} \\
 \Theta_2^* &= \frac{b_m}{b_0}
 \end{aligned} \tag{17}$$

Dosadením parametrov riadeného systému v požadovanom pracovnom bode a parametrov referenčného modelu do rovnice (17) získame parametre zákona. Týmto krokom sme ukončili návrh MRC riadenia.

4.1.3 Simulačný model

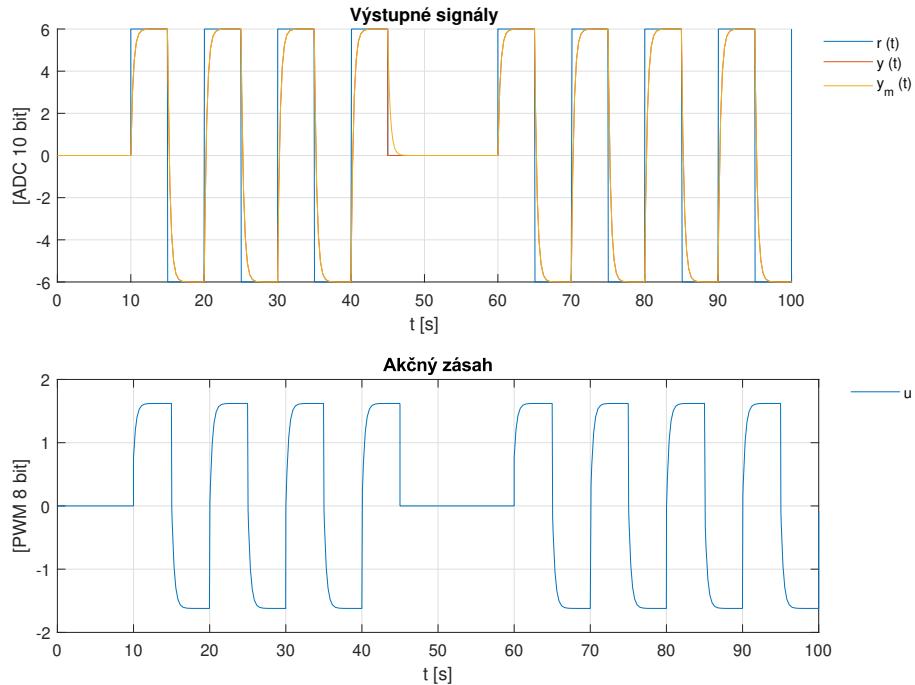


Obr. 13: Simulačné zapojenie MRC riadenia s ideálnymi parametrami zákona riadenia

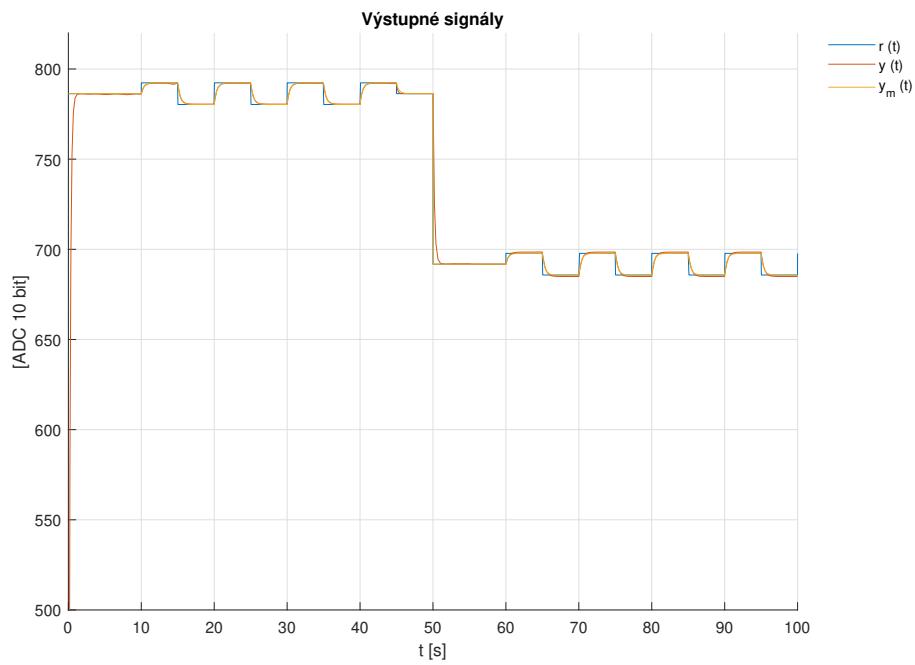


Obr. 14: Blok zákona riadenia zákona simulačnej schémy MRC systému

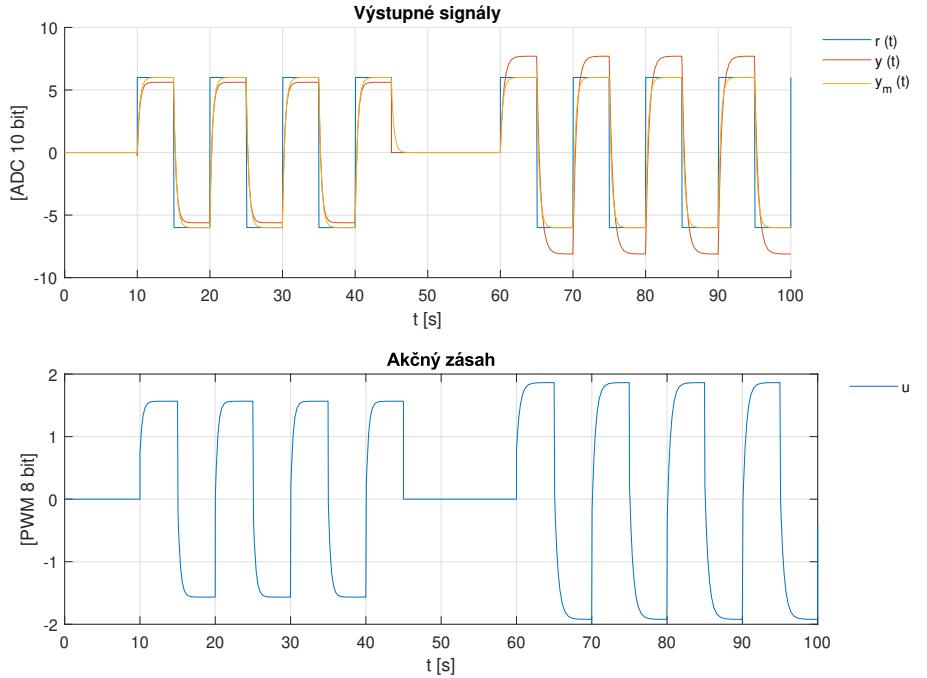
4.1.4 Simulačný experiment



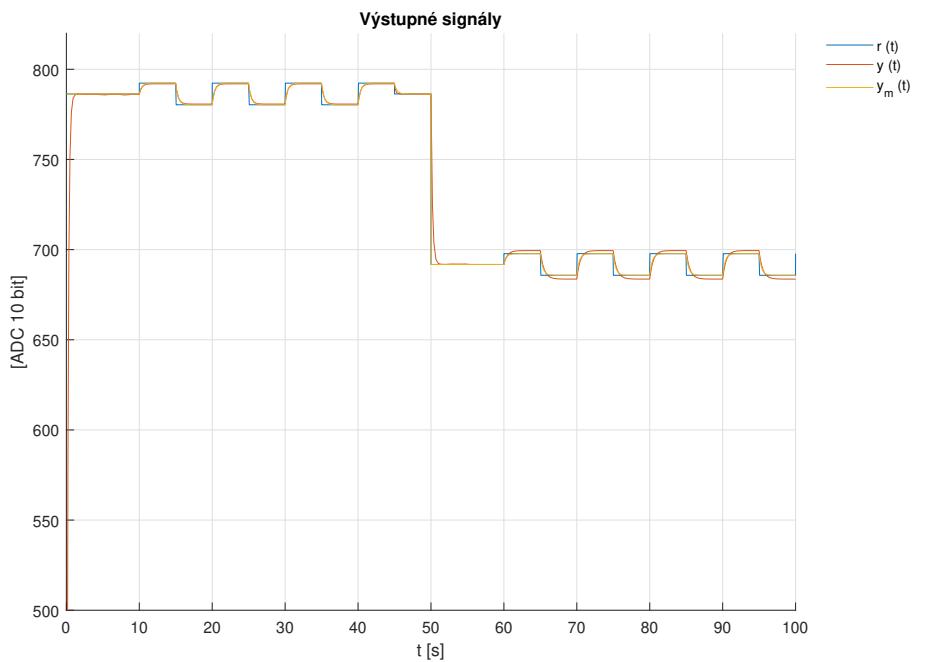
Obr. 15: Simulácia MRC regulátora s ideálnymi parametrami pre riadený systém identifikovaný ako prenosová funkcia (1. rádu) v pracovnom bode u_{PB1}



Obr. 16: Simulácia MRC regulátora s ideálnymi parametrami pre riadený systém identifikovaný ako prenosová funkcia (1. rádu) v pracovnom bode u_{PB1}



Obr. 17: Simulácia MRC regulátora s ideálnymi parametrami pre riadený systém podľa Obr. 10



Obr. 18: Simulácia MRC regulátora s ideálnymi parametrami pre riadený systém podľa Obr. 10

4.2 Návrh adaptívneho riadenia

Riadenie s adaptáciou parametrov zákona riadenia, budeme realizovať s využitím „Model Reference Adaptive Control (MRAC)“ s použitím MIT pravidla, ktorý sa taktiež označuje ako gradientný prístup [1].

4.2.1 Zákon Adaptácie

Budeme vychádzať z úvahy, že adaptačná odchýlka je s použitím ideálnych parametrov zákona riadenia nulová, kde cieľ adaptácie definujeme nasledovne:

$$e = y - y_m \quad (18)$$

kde y je výstupu z nášho riadeného systému a y_m je výstupu z referenčného modelu. Následne si definujeme účelovú funkciu pre nami hľadané parametre zákona riadenia, ktorá bude mať tvar:

$$J(\Theta) = \frac{1}{2} \cdot e^2 (\Theta, t) \quad (19)$$

Ked'že predpokladáme, že pri použití ideálnych parametrov Θ^* je nulová adaptačná odchýlka, tak potom hodnota účelová funkcia $J(\Theta)$ bude klesať, ak sa budeme približovať k jej extrému minima. Ak sa bude zmenšovať hodnota účelovej funkcie, tak potom sa bude zmenšovať aj adaptačná odchýlka e a výstup riadeného systému y sa bude približovať/zhodovať s výstupom z referenčného modelu y_m .

Teraz si už vieme vyjadriť zákon adaptácie, ktorý bude mať nasledovný tvar:

$$\dot{\Theta} = -\alpha \cdot \frac{\partial J}{\partial \Theta} \quad (20)$$

kde $\frac{\partial J}{\partial \Theta}$ je gradient J vzhľadom na parameter Θ a určuje kladný smer (hľadáme minimum, nie maximum), preto použijeme znamienko mínus a použitím voliteľného parametra α vieme ovplyvniť „krok“ pohybu. V adaptívnom riadení sa parameter α často označuje ako „adaptačné zosilnenie“.

Pristúpme k vyjadreniu gradientu J vzhľadom na parameter Θ pre našu konkrétnu účelovú funkciu, ktorý bude mať tvar:

$$\frac{\partial J}{\partial \Theta} = \frac{\partial J}{\partial \Theta} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot e^2 (\Theta, t) \right) \quad (21)$$

a teda výsledný tvar zákona adaptácie bude:

$$\dot{\Theta} = -\alpha \cdot e \cdot \frac{\partial e}{\partial \Theta} \quad (22)$$

Teraz si potrebujeme upraviť rovnicu (18) tak, že za y dosadíme vzťah URO:

$$e = y - y_m$$

$$e = \frac{b_0 \cdot \Theta_2}{s + a_0 - b_0 \cdot \Theta_1} \cdot r - y_m \quad (23)$$

$$e = b_0 \cdot \Theta_2 \cdot (s + a_0 - b_0 \cdot \Theta_1)^{-1} r - y_m \quad (24)$$

Následne môžme pristúpiť k vyjadreniu jednotlivých parciálnych derivácií pre vektor Θ zo zákona adaptácie (22).

Pre parameter Θ_1 bude mať citlivostná funkcia tvar:

$$\frac{\partial e}{\partial \Theta_1} = b_0 \cdot \Theta_2 \cdot (-1) \cdot (s + a_0 - b_0 \cdot \Theta_1)^{-2} (-1) \cdot b_0 \cdot r \quad (25)$$

$$\frac{\partial e}{\partial \Theta_1} = b_0 \cdot (s + a_0 - b_0 \cdot \Theta_1)^{-1} \cdot \left(\frac{b_0 \cdot \Theta_2}{s + a_0 - b_0 \cdot \Theta_1} \cdot r \right) \quad (26)$$

$$\frac{\partial e}{\partial \Theta_1} = \frac{b_0}{s + a_0 - b_0 \cdot \Theta_1} \cdot y \quad (27)$$

Pre parameter Θ_2 bude mať citlivostná funkcia tvar:

$$\frac{\partial e}{\partial \Theta_2} = b_0 \cdot (s + a_0 - b_0 \cdot \Theta_1) \cdot r \quad (28)$$

$$\frac{\partial e}{\partial \Theta_2} = \frac{b_0}{s + a_0 - b_0 \cdot \Theta_1} \cdot r \quad (29)$$

Nami takto získané citlivostné funkcie pre parametre Θ_1 a Θ_2 , obsahujú neznáme parametre riadeného systému (a_0 a b_0) a teda ich nevieme realizovať. Preto pristúpme k aproximácií týchto citlivostných funkcií.

Uvažujeme, že máme voliteľný parameter α , ktorý je ľubovoľné číslo a vzťah $\alpha \cdot b_0$ je tiež ľubovoľné číslo a teda potrebujeme len znamienko pre b_0 . Ďalej, polynóm $(s + a_0 - b_0 \cdot \Theta_1)$ je charakteristický polynóm URO. Ak by platilo že referenčný model sa zhoduje s URO, tak potom by pre tento charakteristický polynóm platilo $(s + a_0 - b_0 \cdot \Theta_1^*)$.

Ak uvažujeme, že URO bude blízko referenčnému modelu, tak potom ako možná aproximácia neznámeho polynómu v citlivostných funkciách, je možné použiť práve charakteristický polynóm z referenčného modelu. Následne vieme získat' nasledujúce aproximované citlivostné funkcie:

$$\frac{\partial e}{\partial \Theta_1} \approx \frac{1}{s + a_m} \cdot y \quad (30)$$

$$\frac{\partial e}{\partial \Theta_2} \approx \frac{1}{s + a_m} \cdot r \quad (31)$$

Tieto nami aproximované citlivostné funkcie, už vieme realizovať a teda je ich možné použiť pre vzťah (22).

$$\begin{aligned} \dot{\Theta} &= -\alpha \cdot e \cdot \frac{\partial e}{\partial \Theta} \\ \begin{bmatrix} \dot{\Theta}_1 \\ \dot{\Theta}_2 \end{bmatrix} &= -\alpha \cdot e \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial e}{\partial \Theta_1} \\ \frac{\partial e}{\partial \Theta_2} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (32)$$

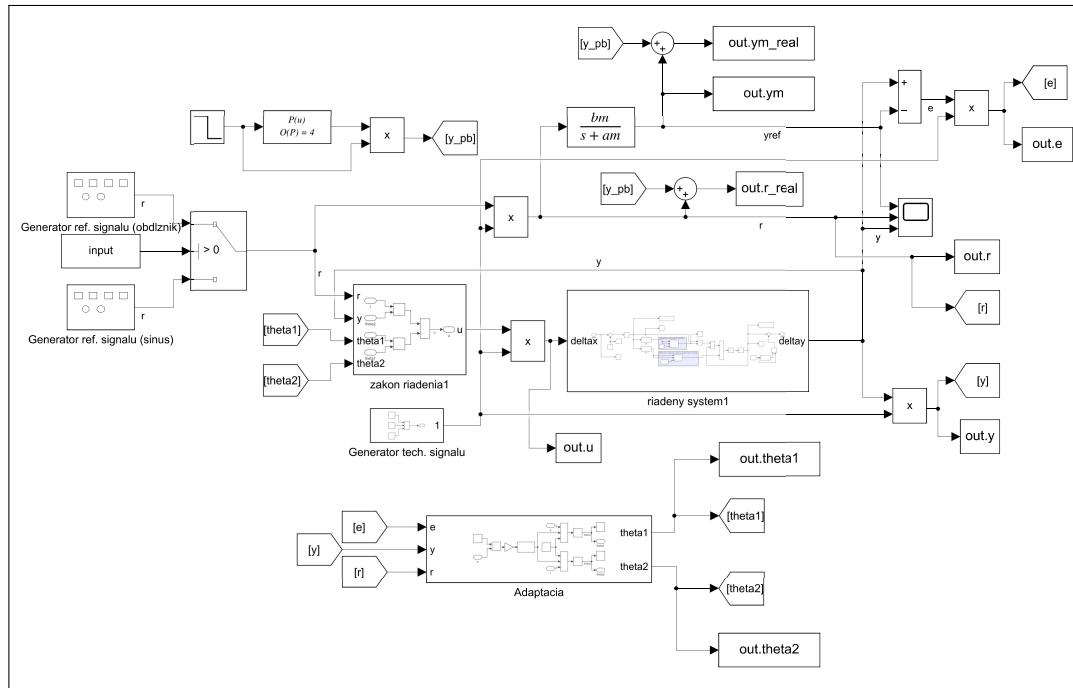
$$\begin{bmatrix} \dot{\Theta}_1 \\ \dot{\Theta}_2 \end{bmatrix} = -\alpha \cdot e \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{s + a_m} \cdot y \\ \frac{1}{s + a_m} \cdot r \end{bmatrix} \quad (33)$$

Teraz už vieme použitím vzťahu (33) zabezpečiť adaptáciu parameterov zákona riadenia, kde určením veľkosti parametra α , vieme ovplyvňovať mimo iné aj rýchlosť adaptácie.

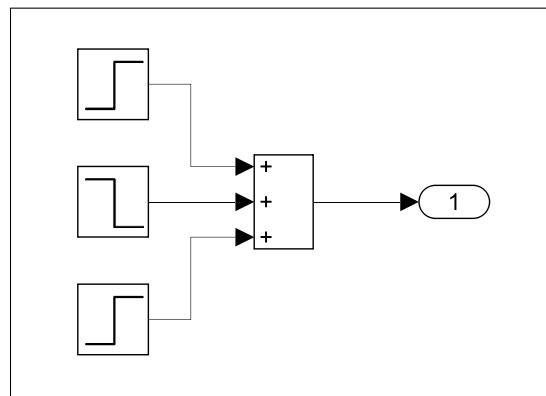
4.2.2 Simulačný model

Teraz pristúpme k realizácii simulačného modelu, kde budeme chcieť aby sa nám adaptovali parametre zo zákona riadenia (13) s použitím MRAC s aplikovaním MIT pravidla.

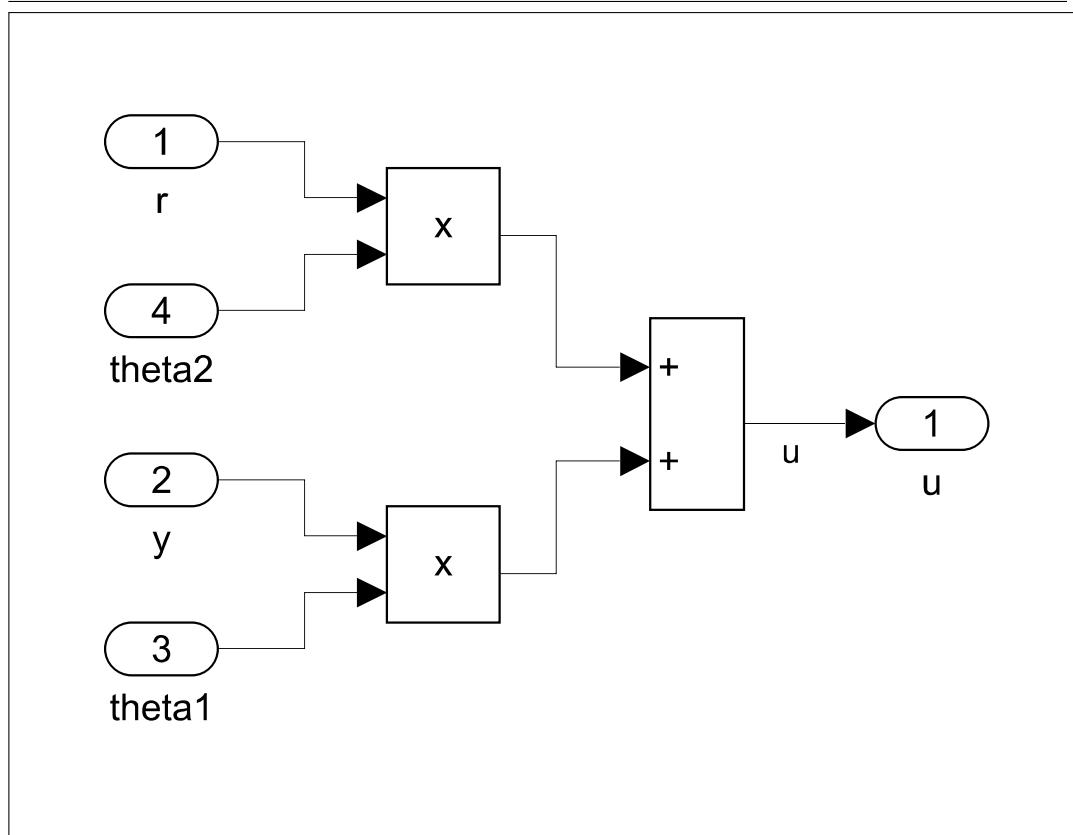
Naša realizovaná simulačná schéma v prostredí Matlab - Simulink:



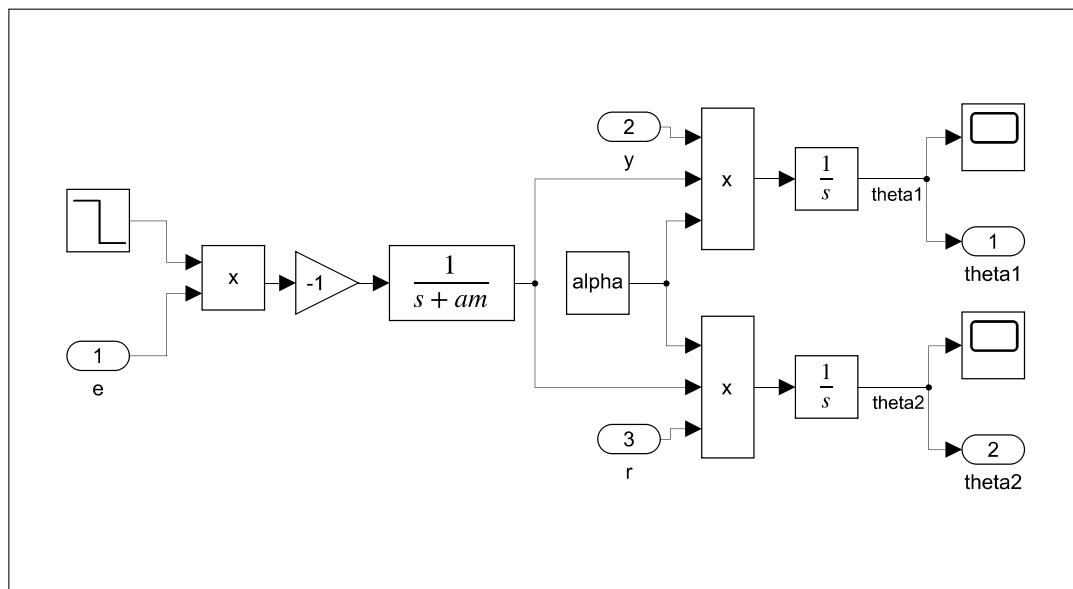
Obr. 19: Simulačná schéma modelu adaptívneho riadenia s referenčným modelem



Obr. 20: Blok generátora signálov simulačnej schémy adaptívneho modelu riadenia s referenčným modelem



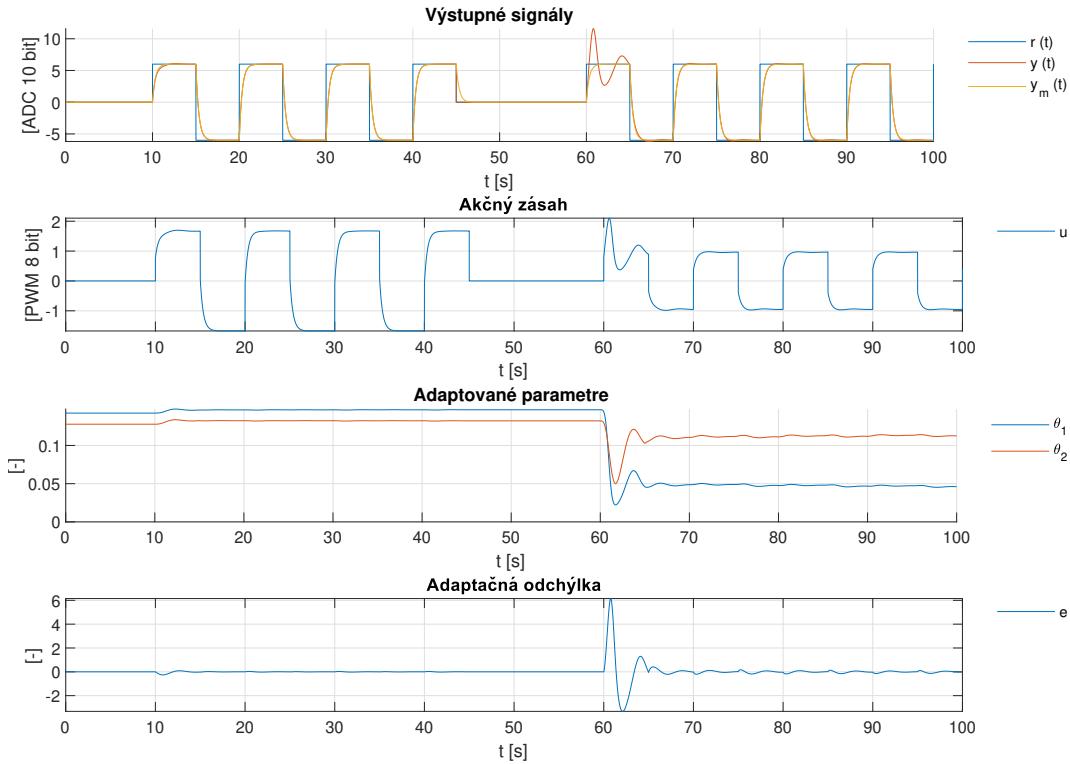
Obr. 21: Blok zákona riadenia simulačnej schémy adaptívneho modelu riadenia s referenčným modelom



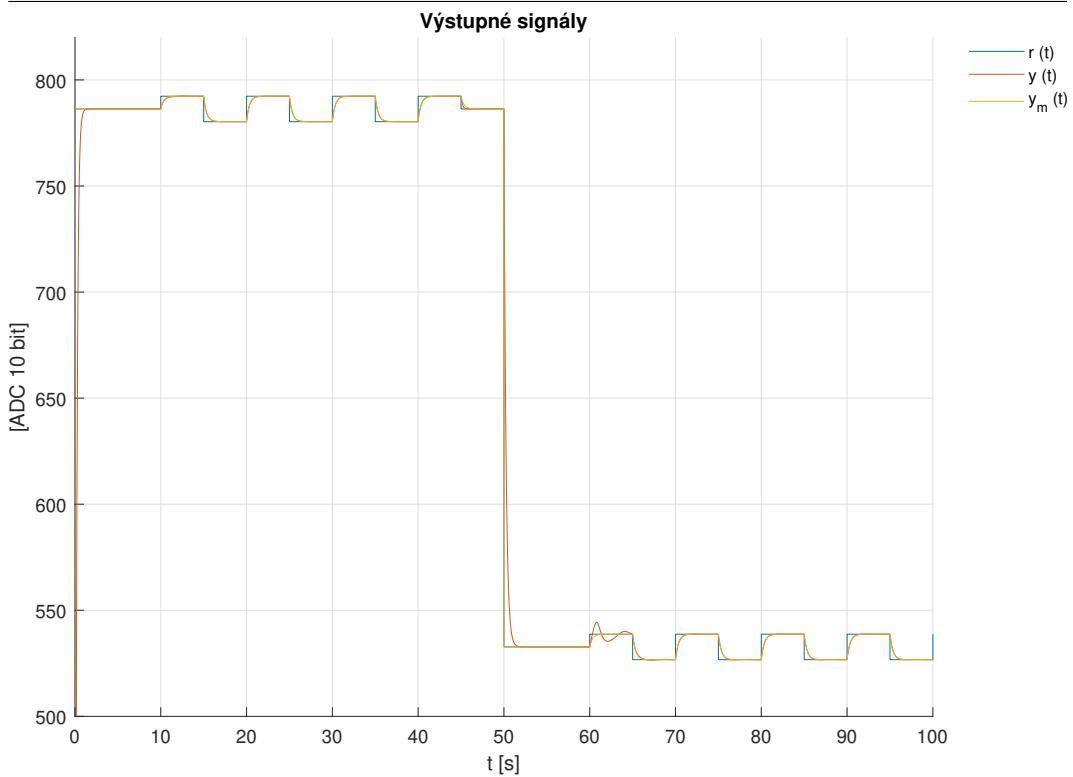
Obr. 22: Blok zákona adaptácie simulačnej schémy adaptívneho modelu riadenia s referenčným modelom

4.2.3 Simulačný experiment

Teraz pristúpme k realizácii simulačných experimentov na nami realizovanej simulačnej schéme, kde budeme chcieť pozorovať ako sa budú v čase adaptovať parametre zákona riadenia v daných pracovných bodoch (3.2).



Obr. 23: Priebeh simulácie s MRAC gradientným, kde v 50. sekunde došlo k zmene pracovného bodu z u_{PB1} na u_{PB2}



Obr. 24: Priebeh simulácie s MRAC gradientným, kde v 50. sekunde došlo k zmene pracovného bodu z u_{PB1} na u_{PB2}

Ako môžeme pozorovať na obrázkoch (23 a 24), tak výstup z referenčného modelu y_m je rovnaký s výstupom z riadeného systému y . Oba výstupy y_m a y sledujú referenčný signál r . Tiež môžeme pozorovať že s rastúcim časom zotrvaania v jednom pracovnom bode, majú tendenciu adaptované parametre zákona riadenia Θ_1 a Θ_2 sa postupne ustáliť.

4.3 Návrh PI regulátora

Aby sme výsledky porovnali s iným typom regulátora, vybrali sme si PI regulátor.

4.3.1 Návrh regulátora metódou poleplacement

Syntézu PI regulátora sme realizovali pomocou metódy rozmiestňovania pólov (*angl. pole placement*). Najprv sme si zstrojili prenosovú funkciu uzavretého regulačného obvodu podľa Obr. 25, v tvare:

$$G_{ORO} = \frac{(K_p + K_i \frac{1}{s})}{T_s + 1} K \quad (34)$$

$$G_{URO}(s) = \frac{G_{ORO}}{1 + G_{ORO}} = \frac{\left(K_p + K_i \frac{1}{s}\right) \left(\frac{K}{Ts+1}\right)}{1 + \left(K_p + K_i \frac{1}{s}\right) \left(\frac{K}{Ts+1}\right)} = \frac{K_p K s + K_i K}{Ts^2 + (K_p K + 1)s + K_i K} \quad (35)$$

Rozloženie pólov sme si zadefinovali želaným charakteristickým polynómom v tvare:

$$s^2 + 2b\omega_0 s + \omega_0^2 \quad (36)$$

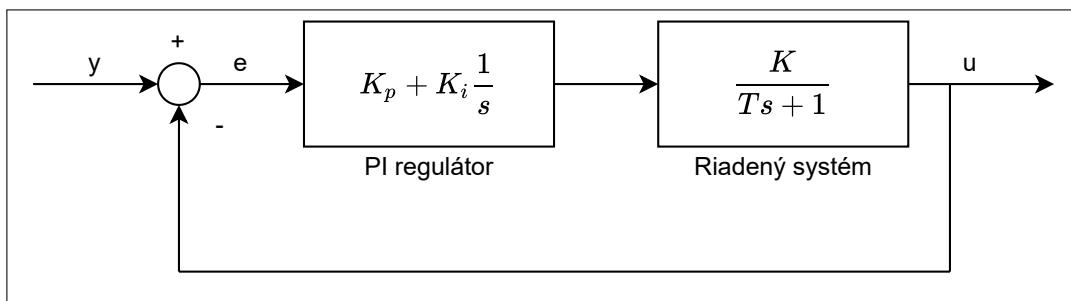
Kde ω_0 je pásmo priepustnosti systému a b je tlmenie systému. Pre výpočet neznámych parametrov PI regulátora K_i a K_p sme porovnali charakteristický polynóm z nášho uzavretého regulačného obvodu so želaným polynómom:

$$s^2 + 2b\omega_0 s + \omega_0^2 = s^2 + \frac{(K_p K + 1)}{T} s + \frac{K_i K}{T} \quad (37)$$

Porovnaním charakteristických polynómov sme získali hľadané parametre PI regulátora v tvare:

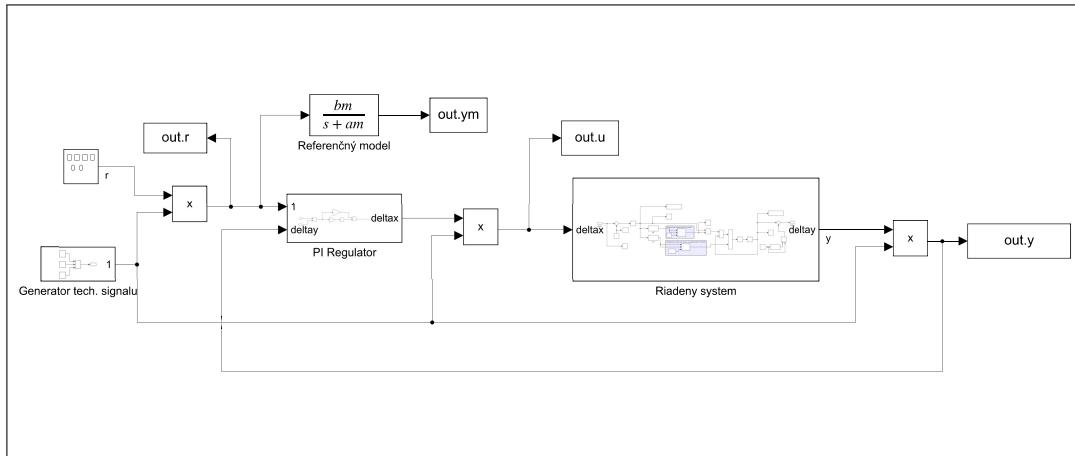
$$K_p = \frac{2b\omega_0 - 1}{K} \quad (38)$$

$$K_i = \frac{T\omega_0^2}{K} \quad (39)$$

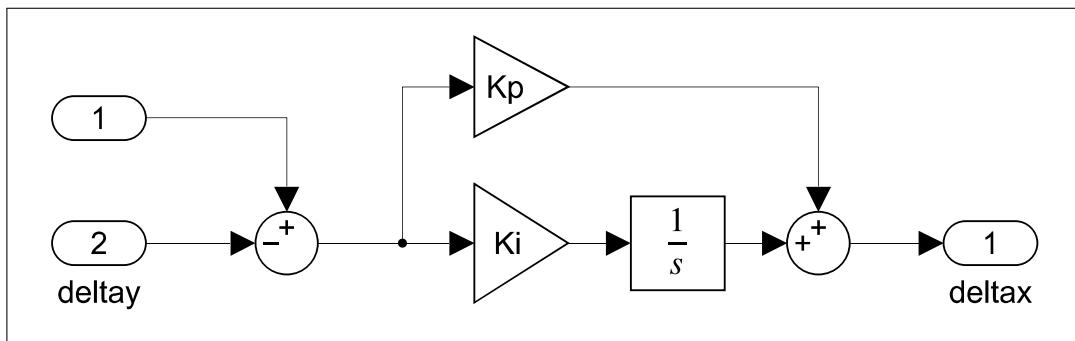


Obr. 25: Regulačné schéma identifikovaného modelu, riadeného PI regulátorom

4.3.2 Simulačný model



Obr. 26: Simulačná schéma PI regulátora pre riadenie modelu predmetného systému



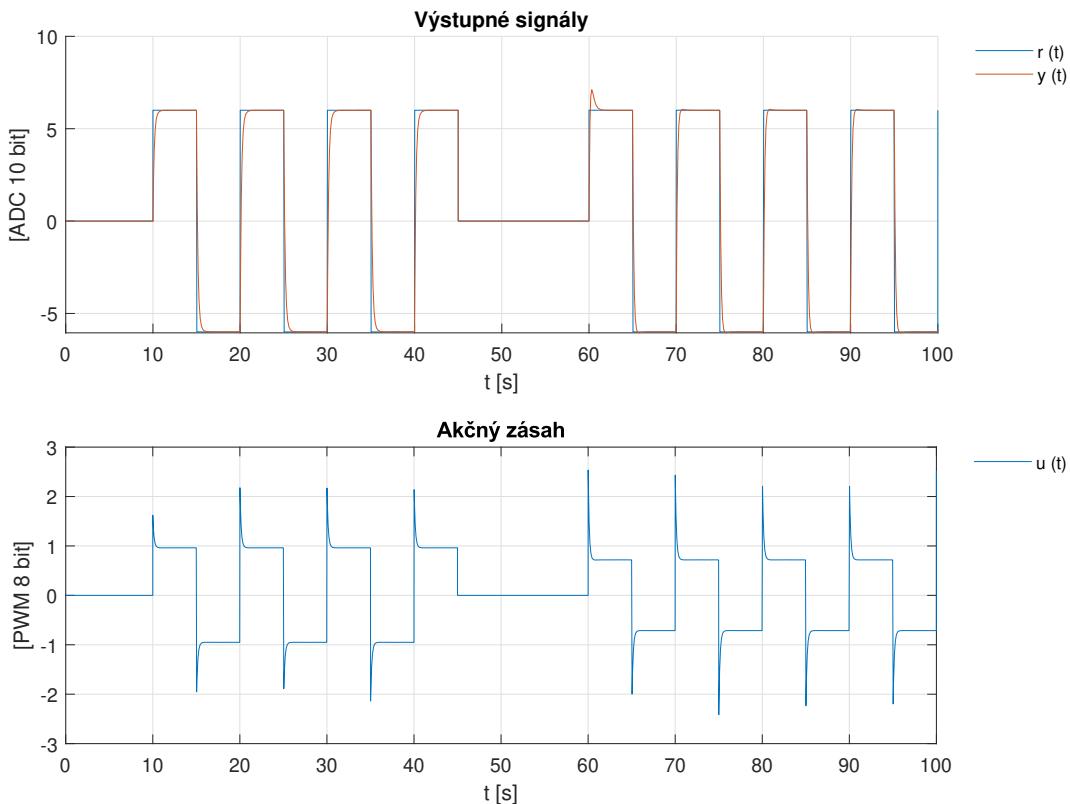
Obr. 27: Simulačná schéma PI regulátora

4.3.3 Simulačný experiment

Navrhnuté riadenie pomocou PI regulátora sme simulovali na nelineárnom modeli predmetného systému v rôznych pracovných bodoch. Pre simuláciu sme si vybrali dva pracovného body:

- Prvý pracovný bod (PB1) - $u_{pb1} = 206$, $y_{pb1} = 787.38$
- Druhý pracovný bod (PB2) - $u_{pb2} = 150$, $y_{pb2} = 531.59$

V okolí pracovných bodov sme privádzali referenčný signál, ktorý bol rovný $\delta_{PB} = 6$. Pri simuláciach v jednotlivých pracovných bodoch sme v čase 50 sekúnd znížili hodnotu pracovného bodu o 25.



Obr. 28: Simulácia PI regulátora riadenia modelu reálneho systému v pracovnom bode PB1

4.4 Porovnanie spôsobov regulácie

Prvým navrhnutým spôsobom riadenia bolo riadenie s referenčným modelom (neadaptívne-MRC). Ked' sme toto riadenie aplikovali na prenosovú funkciu, pre ktorú bolo riadenie navrhnuté, priebeh regulácie kopíroval referenčný model, ako je vidieť na obrázku 15. Problém však nastal už ked' sme regulátor pripojili na identifikovaný simulačný model motorčeka. Už vo zvolenom okolí pracovného bodu sme pozorovali regulačnú odchýlku. Pri zmene pracovného bodu bola táto odchýlka ešte výraznejšia. Priebeh je zobrazený na obrázku 17. Tento spôsob riadenia nevyhovoval ani základnému cieľu riadenia, ktorý sme si stanovili.

Druhá metóda - adaptívne riadenie s referenčným modelom (MRAC) obsahuje okrem klasickej spätnoväzobnej slučky aj slučku, ktorá porovnáva výstup z riadeného systému a z referenčného modelu a na základe priebehu týchto dvoch signálov upravuje parametre zákona riadenia. Vďaka tomuto je regulátor schopný reagovať aj na zmeny pracovného bodu, čo pozorujeme aj na simulačnom experimente. Po čase výstup regulovaného systému s veľkou presnosťou kopíruje priebeh referenčného modelu, čo je zobrazené na obrázku 23. Výstupy sa však úplne nezhodujú, čo je spôsobené zmenami parametrov systému aj vo veľmi malom okolí. Pri zmene pracovného bodu systému chvíľu trvá, kým nájde správne parametre zákona riadenia. Po istom čase však regulačný obvod svojim výstupom opäť sleduje referenčný model.

Poslednou navrhnutou metódou riadenia bolo riadenie PI regulátorom. PI (alebo vo všeobecnosti PID) regulátor sa vyznačuje pomerne jednoduchou implementáciou. Vďaka integračnej zložke je zaručená nulová trvalá regulačná odchýlka a to aj pri zmene pracovného bodu. Simulačný experiment je znázornený na obrázku 28. V akčnom zásahu sa však na rozdiel od predošlého regulátora objavujú skokové zmeny pri zmene žiadanej hodnoty. Toto nie je ideálne pre akčné členy, no veľkosti skokov sú na prijateľnej hodnote. Ďalšou nevýhodou je, že prechodový dej sa lísi v rôznych pracovných bodoch, keďže sa parametre systému nemenia.

Za vhodné považujeme adaptívne riadenie s referenčným modelom ako aj riadenie pomocou PI regulátora. Oba spôsoby riadenia splňajú základný cieľ riadenia, teda nulovú regulačnú odchýlku v ustálenom stave. Výhodou adaptívneho regulátora je, že dokáže zaistiť predpísaný prechodový dej v rôznych pracovných bodoch. Naopak, výhodou PI regulátora je jednoduchší návrh a fakt, že nepotrebuje čas na adaptáciu parametrov, kedy je kvalita regulácie podstatne horšia.

5 Záver

V prvej časti tejto práce sme sa venovali spracovaniu dát nameraných na laboratórnom zariadení. Namerané dáta sme vizualizovali, následne sme využili metódy na potlačenie šumu, ktorým sú merania zaťažené.

V ďalšej časti sme sa venovali zostrojeniu simulačného modelu reálneho systému. V prvom rade sme identifikovali statické a dynamické vlastnosti sledovaného systému. Na základe týchto vlastností sme sa snažili zostrojiť simulačný model. Model sme určili ako prenosovú funkciu prvého rádu, no keďže systém vykazuje značnú nelinearitu, simulačný model sme zostrojili tak, aby sa parametre prenosovej funkcie menili na základe pracovného bodu, čo viac zodpovedá realite. Grafickým porovnaním numerickej simulácie a nameraných údajov sme overili adekvátnosť modelu.

K zostrojenému simulačnému modelu sme navrhli viacero spôsobov riadenia. Prvým spôsobom riadenia bolo riadenie s referenčným modelom. Zvolili sme si zákon riadenia a pracovný bod, pre ktoré sme vyjadrili uzavretý regulačný regulačný obvod v tvare prenosovej funkcie. Pre získanú prenosovú funkciu sme určili a vyriešili podmienky zhody. Riadenie bolo ideálne pre prenosovú funkciu, z ktorej bolo navrhnuté, no na reálnom systéme sme pozorovali značné regulačné odchýlky.

Do riadenia s referenčným modelom sme pridali aj zákon adaptácie, čím vzniklo adaptívne riadenie s referenčným modelom. Toto riadenie bolo na rozdiel od predošlého robustné a po čase sa dokázalo vysporiadať aj so zmenami pracovného bodu.

Ako posledný spôsob riadenia sme si zvolili PI regulátor. Ten vďaka integračnej zložke dokázal odstrániť regulačné odchýlky v rôznych pracovných bodoch a dokázal stabilne regulovať riadený systém v rôznych pracovných bodoch.

6 Použitá literatúra

Literatúra

- [1] M. Tárník. AR 04 - MRAC gradientný. https://github.com/PracovnyBod/ADRIA/blob/master/doc/AR04_txt_MRAC_gradientny/AR04_txt_MRAC_gradientny.pdf, 2022.
- [2] M. Tárník. AR 98 - O motorčeku. https://github.com/PracovnyBod/ADRIA/blob/master/doc/AR98_txt_motorcek/AR98_txt_doplnek_motorcek.pdf, 2022.