

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2022

Jakub Čelko



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## MODELOVÁNÍ SYSTÉMŮ ČLOVĚK-STROJ POMOCÍ MCRUEROVÝCH MODELŮ

MCRUER MODELS FOR HUMAN-MACHINE SYSTEMS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Čelko

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondrej Mihálik

BRNO 2022

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Jakub Čelko

**ID:** 216785

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2021/22

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Modelování systémů člověk-stroj pomocí McRuerových modelů**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Seznamte se s možnostmi modelování systému člověk-stroj tvořeného lidským operátorem a volantem pomocí McRuerových modelů.
2. V prostředí MATLAB Simulink vytvořte schéma, které by sloužilo pro měření odezev lidského operátora na různé budící signály. Implementujte možnost volit dynamiku soustavy, kterou má operátor řídit, např. integrátor, dvojitý integrátor apod.
3. Zvolte vhodný budící signál pro měření lidských odezev. Pro každou soustavu přizpůsobte jeho parametry tak, aby měl adekvátní délku trvání i šířku spektra.
4. Pro vybranou soustavu změřte vliv tuhosti volantu na rychlost a kvalitu regulačního děje.
5. Zhodnoťte výsledky získané z navržených scénářů a jejich výstupy demonstруйте grafickými ukázkami.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

1. MCRUER, Duane, T. Mathematical Models of Human Pilot Behaviour. AGARD, 1974.
2. XU, Shuting et. al. Review of control models for human pilot behavior. Annual Reviews in Control, 2017.

**Termín zadání:** 7.2.2022

**Termín odevzdání:** 23.5.2022

**Vedoucí práce:** Ing. Ondrej Mihálik

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Táto práca je zameraná na modelovanie systémov človek-stroj pomocou McRuerových modelov, konkrétne systémov tvorených ľudským operátorom a volantom. Cieľom práce je navrhnúť a zmerať odozvy ľudského operátora pri regulácii rôznych typov sústav a rôznych priebehov žiadaných hodnôt. Bol vyhodnocovaný aj vplyv tuhosti volantu na rýchlosť a kvalitu regulačného deja. Výstupom práce sú matematické popisy operátora pre jednotlivé scenáre. Popisy sú vyjadrené ako operátorové prenosy s tým, že operátor je uvažovaný ako lineárny časovo invariantný systém.

## **KĽÚČOVÉ SLOVÁ**

ľudský operátor, McRuerove modely, systémy človek-stroj, tuhosť volantu, volant

## **ABSTRACT**

Bachelor's thesis is focused on modelling of the human-machine systems using McRuer models, particularly systems formed by human operator and a steering wheel. The aim of the work is to design and measure the responses of the human operator in the regulation of different types of systems and different system forcing functions. Different steering wheel stiffness was also measured to find its influence on the speed and quality of the regulation. Results of this work are mathematical descriptions of the operator for the individual scenarios. The descriptions are expressed as transfer functions, with the operator being considered as linear time-invariant system.

## **KEYWORDS**

human-machine systems, human operator, McRuer models, steering wheel, steering wheel stiffness

ČELKO, Jakub. *Modelování systémů člověk-stroj pomocí McRuerových modelů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2022, 56 s. Bakalárska práca. Vedúci práce: Ing. Ondrej Mihálik

## Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

**Meno a priezvisko autora:** Jakub Čelko  
**VUT ID autora:** 216785  
**Typ práce:** Bakalárska práca  
**Akademický rok:** 2021/22  
**Téma závěrečnéj práce:** Modelování systémů člověk-stroj pomocí McRuerových modelů

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno ..... 17. 5. 2022 .....

.....  
podpis autora\*

---

\* Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

## POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu bakalárskej práce p. Ing. Ondrejovi Mihálikovi za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci.

# Obsah

Úvod	12
<b>1 Modelovanie systémov človek-stroj</b>	<b>13</b>
1.1 Úvod do modelovania človeka	13
1.2 Modely človeka	13
1.3 McRuerove modely	14
1.4 Meranie odoziev operátora	16
<b>2 Meranie ľudských odoziev v prostredí MATLAB Simulink</b>	<b>17</b>
2.1 Zaznamenávané veličiny	17
2.2 Určenie prenosu operátora	17
2.2.1 Identifikácia dopravného oneskorenia operátora	18
2.3 Voľba dynamiky sústavy	18
2.3.1 Testované sústavy	18
<b>3 Zvolené budiace signály</b>	<b>20</b>
3.1 Pseudo Random Binary Sequence	20
3.2 Súčet sínusových signálov	22
3.2.1 Periodický signál pre systém $K_S/p$	22
3.2.2 Periodický signál pre systém $K_S/p^2$	23
<b>4 Zistené operátorové prenosy ľudského operátora pre štandardnú tuhosť volantu</b>	<b>24</b>
4.1 Odozvy na systém s prenosom $K_S$	24
4.2 Odozvy na systém s prenosom $K_S/p$	27
4.2.1 Určenie parametrov periodického budiaceho signálu	28
4.3 Odozvy na systém s prenosom $K_S/(p+1)$	30
4.4 Odozvy na systém $K_S/p$ s periodickým budiacim signálom	32
4.5 Zhrnutie zistených výsledkov	34
<b>5 Zistené operátorové prenosy ľudského operátora pre meniacu sa tuhosť volantu</b>	<b>36</b>
5.1 Odozvy na PRBS budiaci signál	36
5.1.1 Odozvy merané so štandardnou tuhosťou volantu	37
5.1.2 Odozvy merané s nulovou tuhosťou volantu	39
5.1.3 Určenie parametrov periodického budiaceho signálu	41
5.2 Odozvy na periodický budiaci signál	42
5.2.1 Odozvy merané so štandardnou tuhosťou volantu	42



5.2.2	Odozvy merané s nulovou tuhosťou volantu . . . . .	44
5.3	Zhrnutie zistených výsledkov . . . . .	46
	<b>Záver</b>	<b>49</b>
	<b>Literatúra</b>	<b>50</b>
	<b>Zoznam symbolov a skratiek</b>	<b>52</b>
	<b>Zoznam príloh</b>	<b>54</b>
	<b>A Schéma programu MATLAB Simulink</b>	<b>55</b>
	<b>B Obsah elektronickej prílohy</b>	<b>56</b>

# Zoznam obrázkov

1.1	Základná signálová schéma regulačného obvodu . . . . .	14
1.2	Signálová schéma regulačného obvodu . . . . .	15
1.3	Herný volant Logitech G920 použitý pri meraniach . . . . .	16
2.1	Indikátor regulačnej odchýlky . . . . .	17
3.1	Príklad PRBS budiaceho signálu . . . . .	21
3.2	Signál PRBS a jeho amplitúdové frekvenčné spektrum . . . . .	22
3.3	Budiacie signály získané súčtom sínusových signálov . . . . .	23
4.1	Frekvenčné charakteristiky prenosov operátora pre sústavu $K_S$ . . . .	25
4.2	Hodnoty parametrov prenosov operátora pri odozve na systém $K_S$ . .	25
4.3	Priebehy meraných veličín počas jedného merania pre sústavu $K_S$ . .	26
4.4	Hodnoty parametrov prenosov operátora pri odozve na systém $K_S/p$ .	27
4.5	Priebehy meraných veličín počas jedného merania pre sústavu $K_S/p$ .	28
4.6	Frekvenčné charakteristiky prenosov operátora pre sústavu $K_S/p$ . . .	29
4.7	Frekvenčná charakteristika prenosu riadenia a zvolené frekvencie . . .	30
4.8	Frekvenčné charakteristiky prenosov operátora pre sústavu $K_S/(p + 1)$	30
4.9	Hodnoty parametrov prenosov operátora pri odozve na systém $K_S/(p + 1)$ . . . . .	31
4.10	Priebehy meraných veličín počas jedného merania pre sústavu $K_S/(p + 1)$ . . . . .	32
4.11	Priebehy meraných veličín počas jedného merania pre sústavu $K_S/p$ .	33
4.12	Hodnoty parametrov prenosov operátora pri odozve na systém $K_S/p$ .	34
5.1	Hodnoty parametrov prenosov operátora pri odozve na systém $K_S/p^2$ s PRBS budiacim signálom a štandardnou tuhosťou volantu . . . . .	37
5.2	Frekvenčné charakteristiky operátora pre sústavu $K_S/p^2$ s PRBS bu- diacim signálom so štandardnou tuhosťou volantu . . . . .	37
5.3	Priebehy meraných veličín počas jedného merania pre sústavu $K_S/p^2$ s PRBS budiacim signálom a štandardnou tuhosťou volantu . . . . .	38
5.4	Hodnoty parametrov prenosov operátora pri odozve na systém $K_S/p^2$ s PRBS budiacim signálom a nulovou tuhosťou volantu . . . . .	39
5.5	Frekvenčné charakteristiky operátora pre sústavu $K_S/p^2$ s PRBS bu- diacim signálom s nulovou tuhosťou volantu . . . . .	39
5.6	Priebehy meraných veličín počas jedného merania pre sústavu $K_S/p^2$ s PRBS budiacim signálom a nulovou tuhosťou volantu . . . . .	40
5.7	Frekvenčná charakteristika prenosu riadenia a zvolené frekvencie . . .	41
5.8	Hodnoty parametrov prenosov operátora pri odozve na systém $K_S/p^2$ s periodickým budiacim signálom a štandardnou tuhosťou volantu . .	43

5.9	Frekvenčné charakteristiky operátora pre sústavu $K_S/p^2$ s periodickým budiacim signálom a štandardnou tuhosťou volantu . . . . .	43
5.10	Priebehy meraných veličín počas jedného merania pre sústavu $K_S/p^2$ s periodickým budiacim signálom a štandardnou tuhosťou volantu . .	44
5.11	Hodnoty parametrov prenosov operátora pri odozve na systém $K_S/p^2$ s periodickým budiacim signálom a nulovou tuhosťou volantu . . . . .	45
5.12	Frekvenčné charakteristiky operátora pre sústavu $K_S/p^2$ s periodickým budiacim signálom a nulovou tuhosťou volantu . . . . .	45
5.13	Priebehy meraných veličín počas jedného merania pre sústavu $K_S/p^2$ s periodickým budiacim signálom a nulovou tuhosťou volantu . . . . .	46
A.1	Simulačná schéma v prostredí MATLAB Simulink . . . . .	55

# Zoznam tabuliek

1.1	Zhrnutie približných prenosov človeka-operátora . . . . .	15
2.1	Testované sústavy . . . . .	19
3.1	Najmenší interval zmeny PRBS signálu . . . . .	21
4.1	Priemerné parametre prenosu operátora . . . . .	31
4.2	Porovnanie experimentálne zistených a teoretických prenosov operátora pri regulácii sústav meraných iba so štandardnou tuhosťou volantu	35
4.3	Konkrétne tvary identifikovaných prenosov operátora pri regulácii sústav meraných iba so štandardnou tuhosťou volantu . . . . .	35
5.1	Porovnanie experimentálne zistených a teoretických prenosov operátora pri regulácii sústavy $1/p^2$ . . . . .	47
5.2	Konkrétne tvary identifikovaných prenosov operátora pri regulácii sústavy $1/p^2$ . . . . .	48

# Úvod

Táto práca sa venuje oblasti riadenia a regulácie, konkrétne sa zaoberá modelovaním systémov človek-stroj, ktoré sú tvorené ľudským operátorom (regulátor) a herným volantom.

Cieľom práce je jednak zoznámiť sa s možnosťami modelovania takýchto systémov využitím McRuerových modelov, ďalej v prostredí MATLAB Simulink vytvoriť schému, ktorú bude možné použiť na zaznamenávanie odoziev ľudského operátora, pričom bude možné meniť dynamiku sústavy, ktorú operátor reguluje. Následne zvolíť vhodné budiace signály a navrhnuté experimenty otestovať a prezentovať ich výsledky.

Práca sa zaoberá identifikáciou optimálnych prenosov ľudského operátora pri regulácii rôznych typov sústav s rôznymi budiacimi signálmi. Pre jednu zvolenú sústavu je skúmaný vplyv tuhosti volantu na regulačný dej.

Bakalárska práca je členená do piatich základných kapitol. Kapitola 1 sa zaoberá spôsobmi, akým je možné modelovať človeka-operátora a uvedie, aké prostriedky boli použité pri meraniach. Druhá kapitola popisuje, akým spôsobom boli merané a vyhodnocované akčné zásahy ľudského operátora a aké boli zvolené regulované sústavy. V tretej kapitole sú popísané budiace signály, ktoré boli použité ako časové priebehy žiadanej hodnoty. Kapitola 4 prezentuje výsledky, ku ktorým sa dospelo na základe testovania navrhnutých scenárov a experimentov, kedy operátor reguluje sústavy iba so štandardnou tuhosťou volantu. V poslednej kapitole sú uvedené výsledky pri regulácii jednej zvolenej sústavy, u ktorej boli parametre operátora vyhodnocované pre dve rôzne tuhosti volantu a dva budiace signály.

# 1 Modelovanie systémov človek-stroj

V tejto kapitole bude predstavená základná teória, ktorá popisuje modelovanie systémov človek-stroj. Následne budú popísané podmienky, za akých prebiehalo získavanie dát o regulácii operátora.

## 1.1 Úvod do modelovania človeka

Človek je veľmi komplexná bytosť, ktorá dokáže regulovať celý rad rôznych systémov. Táto rôznorodosť je jednak v druhu ovládania, spôsobe akým ľudský operátor získava informácie o stavu systému a taktiež žiadaného stavu, do ktorého má operátor systém dostať. Napriek tomu sa človek dokáže na všetky tieto systémy adaptovať a upraviť svoje správanie. Z toho vyplýva, že popis ľudského operátora ako celku by bol nesmierne komplexný a preto je nutné zamerať sa na jednoduchšie konkrétne stavy. [1]

Modelovanie človeka má oproti neživým regulátorom isté špecifiká. To, čo človeka odlišuje, je jeho vlastnosť myslenia. Tú vlastnosť nemožno v regulačnom procese ignorovať alebo úplne vyradiť. Ľudské myslenie je neoddeliteľne zapojené do regulačného deja, je však problematické ho modelovať. [2]

Systémy typu človek-stroj sú založené na interakcii medzi človekom a strojom, pričom človek v takomto systéme pôsobí rôznymi akčnými zásahmi. Tieto akcie môžu byť delené do troch základných skupín: 1) Správanie založené na zručnostiach, čo je najnižšia úroveň. V prípade automobilu to môže predstavovať udržanie konštantnej rýchlosti alebo držanie vozidla v jazdnom pruhu. 2) Správanie založené na pravidlách, kedy sú rôzne úlohy asociované a vykonávané na základe určitých pravidiel. 3) Správanie založené na znalostiach, čo je najvyšší stupeň ľudského riadenia. [3][4]

## 1.2 Modely človeka

Existuje viacero rôznych prístupov, ako je možné k modelovaniu človeka pristupovať. Model človeka je väčšinou tvorený na jednu konkrétnu úlohu, ktorú operátor rieši.

Literatúra [5] zhrňa metódy, ktorými je možné modelovať pilota lietadla. Popisuje 3 základné typy, a to model založený na teórii riadenia (kam spadá aj McRuerov kvazi-lineárny model), modely založené na ľudskej psychológii a nakoniec modely založené na technológii umelej inteligencie.

Samotný operátor taktiež nemusí byť popísaný iba ako jeden blok v signálovej schéme. Takýto prístup je popísaný aj v [1], kde je operátor rozdelený na viacero blokov, ktoré vystihujú priebeh spracovania informácie - senzorický systém, jednotlivé PID zložky regulátora, určenie akčného zásahu, neuromuskulárny systém. R.A. Hess

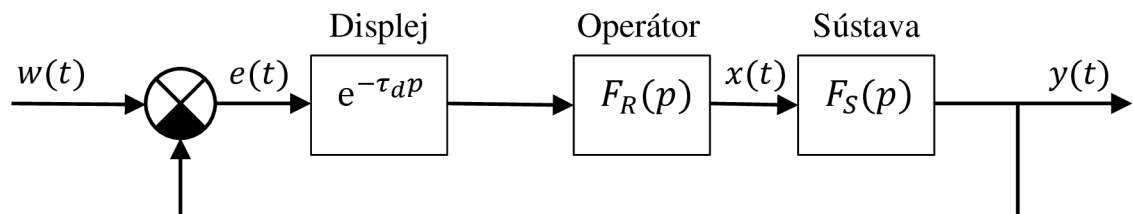
v [6] popisuje model operátora s viacerými spätnými väzbami. Popisuje taktiež, že forma koncového manipulátora je veľmi dôležitá a má vplyv na reguláciu systému.

M. Mulder v publikácii [7] popisuje možnosti zlepšenia priebehu regulačnej odchýlky pridaním tzv. *haptic feedback*. Jedná sa o väzbu z regulačnej odchýlky, ktorá silou pôsobí na volant. Táto väzba vodičovi pomáhala pri regulácii auta na klukatej ceste.

### 1.3 McRuerove modely

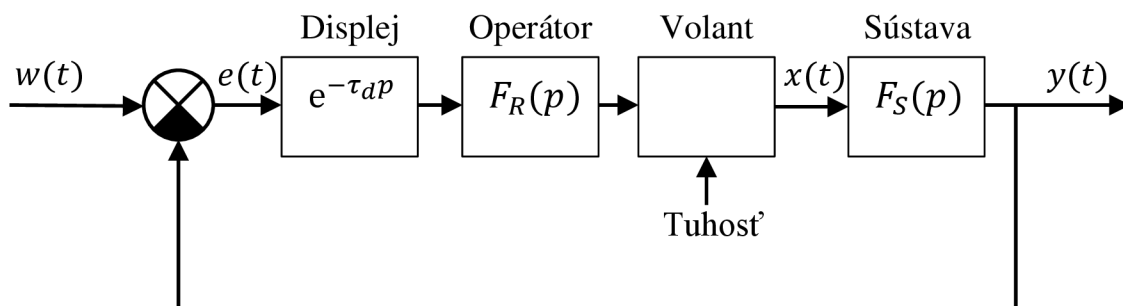
V tejto práci bude pre popis človeka uvažovaný jednoduchý model, operátor bude považovaný a popísaný ako lineárny časovo invariantný systém.

Základná schéma regulačného obvodu so spätnou väzbou, tak ako je popísaná v [1] je zobrazená na obrázku 1.1.



Obr. 1.1: Základná signálová schéma regulačného obvodu [1]

Túto schému je potrebné však mierne upraviť. Sústava je totiž v tomto prípade rozdelená na 2 časti: pred sústavou, ktorú má operátor regulovať, je ešte dynamika volantu, prostredníctvom ktorého je do simulovanej sústavy vnášaný akčný zásah. Dynamiku displeja zanedbávame. Jeho dopravné oneskorenie je rádovo desiatky milisekúnd, zatiaľ čo dopravné oneskorenie človeka je stovky milisekúnd. Nasleduje človek, ktorého prenos chceme určiť a volant, ktorý má ale tiež svoju dynamiku, ktorá sa prejaví v regulačnom obvode. V skutočnosti sa teda prenos človeka-operátora bude adaptovať aj na sústavu aj na volant. Z tohto dôvodu dosiahnuté výsledky nemusia presne odpovedať ideálnym prenosom vyplývajúcich z McRuerových modelov. Výsledná signálová schéma je zobrazená na obrázku 1.2.



Obr. 1.2: Signálová schéma regulačného obvodu

V tabuľke 1.1 je spísaný výber sústav testovaných v [1] a k nim priradený experimentálne zistený prenos operátora a odpovedajúci prenos otvorenej slučky.

Tab. 1.1: Zhrnutie približných prenosov človeka-operátora [1]

Prenos riadenej sústavy $F_S(p)$	Približný prenos operátora $F_R(p)$	Prenos otvorenej slučky $F_0(p)$
$K_S$	$\frac{K_R}{p} \cdot e^{-\tau p}$	$\frac{\omega_r}{p} \cdot e^{-\tau p}$
$\frac{K_S}{p}$	$K_R \cdot e^{-\tau p}$	
$\frac{K_S}{p(p+a)}$	$K_R(p+a) \cdot e^{-\tau p}$	
$\frac{K_S}{p^2}$	$K_R p \cdot e^{-\tau p}$	

Na základe dát z tabuľky 1.1 a poznatkov uvedených v [1] je možné princíp McRuerových modelov zjednodušene popísať tak, že človek-operátor vždy upravuje svoje vlastnosti takým spôsobom, aby v priamej vetve regulačného obvodu vznikol prenos

$$F_0(p) = \frac{K_0}{p} \cdot e^{-\tau p} \quad (1.1)$$



## 1.4 Meranie odoziev operátora

Operátor vnášal akčný zásah do sústavy pomocou volantu. Konkrétne bol použitý herný volant Logitech G920 (podrobnejšie informácie je možné získať na stránke výrobcu na odkaze [8]). Následné spracovanie akčného zásahu (priebeh natočenia volantu v čase), ako aj realizácia riadenej sústavy a indikácia odchýlky operátorovi boli realizované v prostredí MATLAB Simulink.

Pre vybranú sústavu  $F_S(p) = 1/p^2$  boli merania realizované pre 2 rôzne tuhosti volantu: s tuhosťou, ktorá bola prednastavená z výroby a úplne bez tuhosti. Pre všetky ostatné sústavy boli merania realizované iba pri prednastavenej (štandardnej) tuhosti.

V rámci tejto práce boli všetky navrhnuté kombinácie budiaceho signálu a regulovanej sústavy z dôvodu časovej náročnosti merané iba na jednej osobe, ktorá zároveň experimenty navrhla.



Obr. 1.3: Herný volant Logitech G920 použitý pri meraniach [8]

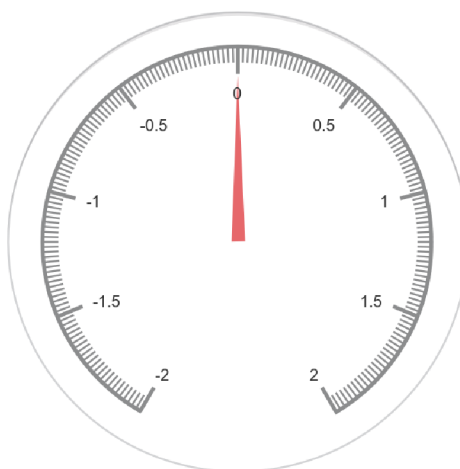
## 2 Meranie ľudských odoziev v prostredí MATLAB Simulink

Táto kapitola popisuje spôsob, akým boli zaznamenávané odozvy ľudského operátora na budiace signály. Vytvorená simulačná schéma je dostupná v prílohe A, konfiguračný skript a skript slúžiaci na uloženie zaznamenaných výsledkov je dostupný v elektronickej prílohe.

### 2.1 Zaznamenávané veličiny

V prostredí MATLAB Simulink bola vytvorená schéma, prostredníctvom ktorej bolo možné zobrazovať operátorovi regulačnú odchýlku, zaznamenávať jeho odozvu a zároveň uložiť časové priebehy dôležitých veličín. Obrázok vytvorenej schémy je v prílohe A. Zaznamenávanými veličinami boli regulačná odchýlka, akčný zásah operátora, budiaci signál a výstup regulovanej sústavy.

Regulačná odchýlka bola operátorovi zobrazovaná prostredníctvom radiálneho zobrazovača. Tento indikátor je zobrazený na obrázku 2.1.



Obr. 2.1: Indikátor zobrazujúci operátorovi regulačnú odchýlku

### 2.2 Určenie prenosu operátora

Z regulačnej odchýlky a akčného zásahu operátora je možné vypočítať prenos operátora na základe vzťahu

$$F_R(p) = \frac{X(p)}{E(p)}, \quad (2.1)$$

kde  $X(p)$  je Laplaceov obraz akčného zásahu operátora a  $E(p)$  je Laplaceov obraz regulačnej odchýlky. [9]

V rámci tejto práce boli všetky prenosy ľudského operátora určené pomocou funkcie `tfest`, ktorá zo zadaných časových priebehov vstupu a výstupu sústavy a zo zadaného počtu pólov a núl spočíta operátorový prenos sústavy. [10]

### 2.2.1 Identifikácia dopravného oneskorenia operátora

Priama identifikácia dopravného oneskorenia operátora pomocou funkcie `tfest` nebola veľmi presná a spoľahlivá. Z toho dôvodu bolo dopravné oneskorenie určované nasledujúcim spôsobom:

Po nájdení optimálneho tvaru prenosu operátora (počet pólov a počet núl v prenose) boli namerané dáta identifikované funkciou `tfest` niekoľkokrát s rôznymi dopravnými oneskoreniami. Dopravné oneskorenia sa menili s krokom 0,05 s. Následne bola vybraná tá hodnota dopravného oneskorenia, pri ktorej dosiahla funkcia `tfest` najlepšiu percentuálnu zhodu estimovaných dát s nameranými dátami.

Za účelom zrýchlenia a automatizácie procesu určovania dopravného oneskorenia operátora bol vytvorený MATLAB skript, ktorý identifikoval namerané dáta a vytvoril k nim korešpondujúci vektor hodnôt dopravného oneskorenia. Skript je dostupný v elektronickej prílohe práce.

## 2.3 Voľba dynamiky sústavy

Možnosť voľby dynamiky sústavy je zabezpečená pomocou bloku *Transfer function*, ktorý dokáže zastávať ľubovoľnú prenosovú funkciu danú ako podiel dvoch polynómov. Tieto polynómy sú simulácii predané z *Workspace* ako premenné štruktúry *Fs*, a to *Fs.num* pre čitateľ a *Fs.den* pre menovateľ prenosovej funkcie.

### 2.3.1 Testované sústavy

V rámci tejto práce bol zisťovaný prenos operátora pre 4 typy sústav. Čisté zosilnenie  $K_S$ , integrátor násobený konštantou  $K_S/p$ , dvojitý integrátor násobený konštantou  $K_S/p^2$  a zotrvačný článok s prenosom  $K_S/(Tp + 1)$ . Všeobecný prenos jednotlivých sústav aj konkrétne testované hodnoty sú prehľadne uvedené v tabuľke 2.1.

Tab. 2.1: Testované sústavy

Všeobecný zápis prenosu $F_S(p)$	Konkrétny použitý prenos $F_S(p)$
$K_S$	10
$\frac{K_S}{p}$	$\frac{5}{p}$
$\frac{K_S}{Tp + 1}$	$\frac{10}{p + 1}$
$\frac{K_S}{p^2}$	$\frac{1}{p^2}$

Zosilnenia jednotlivých sústav boli volené tak, aby pri optimálnej regulácii bola výchylka volantu primeranej veľkosti. To znamená, že systém nereagoval príliš citlivo na malé výchylky volantu, ale zároveň operátor nemusel volantom otáčať až priveľa (vo väčšine prípadov nie viac ako 2/3 otáčky volantu).

Výstup z kontroléra (volantu) bol vždy prenasobený konštantou  $-1$ . Je to z toho dôvodu, aby smer vyregulovania regulačnej odchýlky zobrazenej na indikátore bol rovnaký ako smer, ktorým má operátor otočiť volant.

## 3 Zvolené budiace signály

V tejto kapitole sú popísané jednotlivé budiace signály, ktoré boli zvolené pre meranie odoziev ľudského operátora. Pre testovanie odozvy operátora boli v rámci tejto práce zvolené nasledujúce dva budiace signály:

- Skoková zmena žiadanej hodnoty prichádzajúca (pre operátora) v zdanlivo náhodných okamihoch (*Pseudo Random Binary Sequence*)
- Signál získaný súčtom niekoľkých sínusových signálov

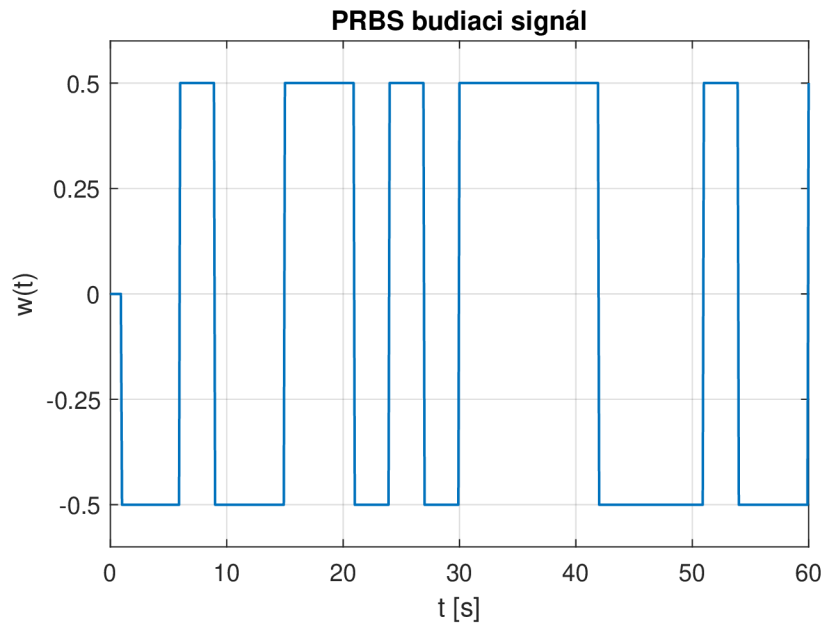
Pre všetky testované systémy bola dĺžka budiaceho signálu zvolená na 60 sekúnd. Zároveň, aby sa operátor stihol na reguláciu pripraviť, bola v každom signále prvá sekunda vždy vynulovaná a systém začínal vždy z nulovej regulačnej odchýlky.

### 3.1 Pseudo Random Binary Sequence

Pri určovaní matematického popisu operátora je potrebné, aby operátor reagoval na náhodný vstupný signál. Tento signál ale nemusí byť skutočne náhodný, stačí aby sa operátorovi ako náhodný javil. Z tohto dôvodu bol signál PRBS vybraný pre meranie ľudských odoziev. Zmeny hodnoty signálu z  $0 \rightarrow 1$  a z  $1 \rightarrow 0$  nastávajú pre operátora v náhodných okamžikoch. Operátor teda nemôže predvídať, kedy nastane zmena žiadanej hodnoty a musí reagovať až potom, ako sa na indikátore objaví regulačná odchýlka.

Aby výchylky volantu nastávali rovnomerne okolo ustálenej pozície (stav, keď je volant priamo, bez natočenia), bola zo signálu PRBS odstránená jednosmerná zložka. Zo signálu 0–1 odpočtom hodnoty 0,5 dostaneme signál, ktorý mení svoje hodnoty v rozsahu od  $-0,5$  do  $0,5$ .

Časové parametre budiaceho signálu boli pre každý testovaný systém upravené tak, aby bola regulácia pre operátora prijateľná. To znamená tak, že požadovaná hodnota sa menila dostatočne pomaly na to, aby operátor stihol systém vyregulovať (dostať sa do ustáleného stavu), ale zároveň dostatočne rýchlo na to, aby výstup systému neostával zbytočne dlho v ustálenej hodnote.



Obr. 3.1: Príklad PRBS budiaceho signálu

Signál PRBS bol jednotne pre všetky testované systémy generovaný funkciou `prbs(4,15)` v prostredí MATLAB. Pre každý systém bol ale zvolený vhodný čas *Sample time*, v tomto prípade je lepšie ho označiť ako dĺžku trvania najkratšieho pulzu. Časy pre jednotlivé systémy sú zobrazené v tabuľke 3.1, vzorový priebeh signálu je na obrázku 3.1.

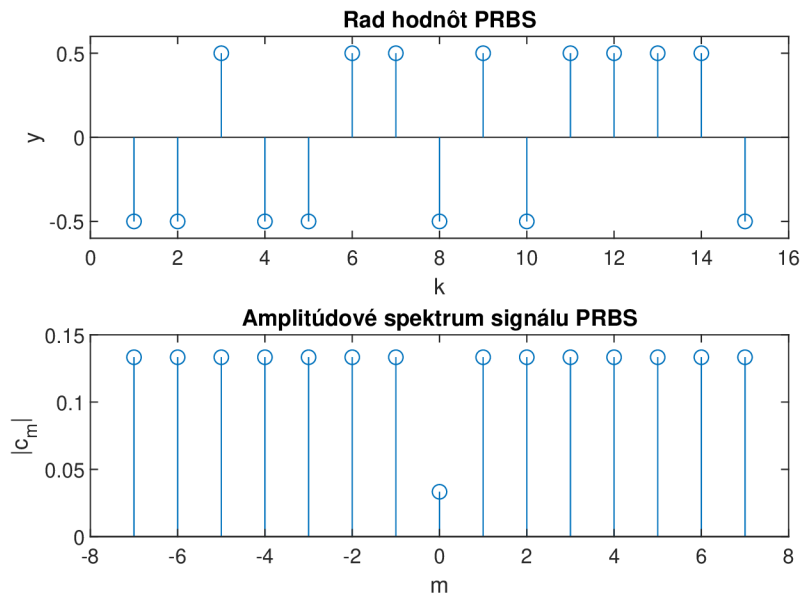
Tab. 3.1: Najmenší interval zmeny PRBS signálu

Riadená sústava $F_S(p)$	PRBS sample time [s]
$K_S$	2
$\frac{K_S}{p}$	3
$\frac{K_S}{Tp + 1}$	3
$\frac{K_S}{p^2}$	10

### Frekvenčné spektrum PRBS signálu:

Signál PRBS má zároveň aj vhodné vlastnosti vo frekvenčnej oblasti. Ak získame frekvenčné spektrum radu hodnôt získaných funkciou `prbs(4,15) - 0.5`, dostaneme spektrum, ktorého všetky frekvenčné zložky majú rovnakú hodnotu amplitúdy (okrem jednosmernej zložky, ktorú sa snažíme potlačiť). To je z hľadiska určovania

prenosu operátora veľmi dobre, pretože vypočítaný operátorový prenos by mal platiť pre všetky skúmané frekvencie.



Obr. 3.2: Signál PRBS a jeho amplitúdové frekvenčné spektrum

## 3.2 Súčet sínusových signálov

Budiaci signál získaný súčtom niekoľkých sínusových signálov bol použitý iba pri regulácii systému  $F_S(p) = K_S/p$  a  $F_S(p) = K_S/p^2$ . Frekvencie jednotlivých zložiek boli získané analýzou frekvenčných charakteristík prenosu operátora, ktorý bol získaný odozvou operátora na PRBS budiaci signál.

V tejto podkapitole sú uvedené iba základné parametre týchto signálov. Podrobný popis určenia ich parametrov je v kapitole 4.2.1 pre sústavu  $K_S/p$  a v kapitole 5.1.3 pre sústavu  $K_S/p^2$ , pretože je možné ich určiť až na základe prenosu operátora pri regulácii týchto sústav s PRBS budiacim signálom.

### 3.2.1 Periodický signál pre systém $K_S/p$

Frekvencie boli vyberané z okolia zlomu amplitúdovej charakteristiky, teda v okolí frekvencie odpovedajúcej časovej konštante v prenose operátora. Výsledný budiaci signál bol daný vzorcom:

$$w(t) = 0,2 \left[ \sin \left( t - \frac{2}{\pi} \right) + \sin \left( 2t + \frac{4}{\pi} \right) + \sin \left( 3t + \frac{3}{2\pi} \right) \right] \cdot \sigma(t-1) \quad (3.1)$$

Jednotlivé fázové posuny boli pridané z toho dôvodu, aby signál po prenasobení nulou v prvej sekunde následne začínal približne z nuly.

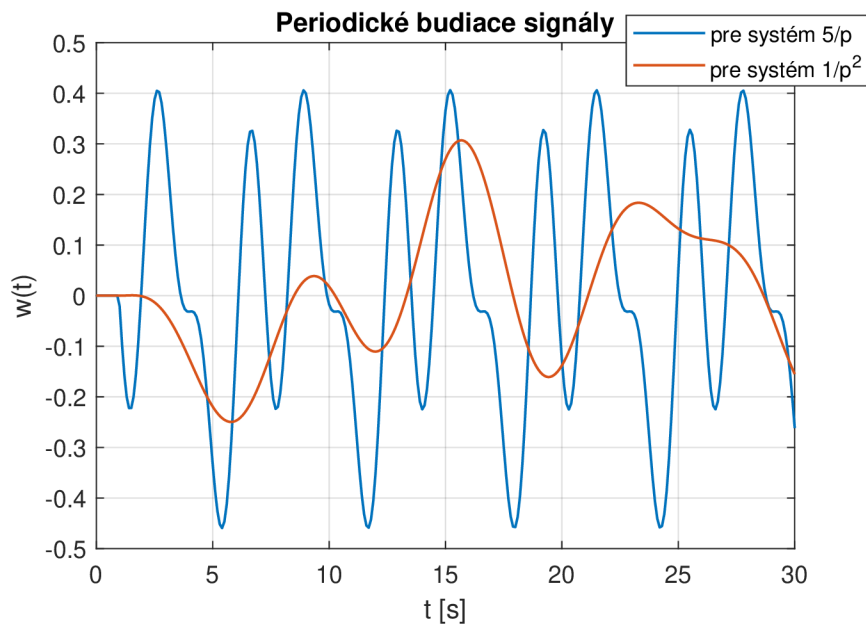
### 3.2.2 Periodický signál pre systém $K_S/p^2$

Frekvencie boli určené z frekvenčnej charakteristiky prenosu riadenia. Boli vybrané z okolia, kde frekvenčná charakteristika klesá na -3 dB. Výsledný budiaci signál bol daný vzorcom:

$$w(t) = 0,1[\sin(0,2t - 3,883) + \sin(0,5t + 1,1071) + \sin(0,75t + 2,0264) + \sin(t - 1,5801)] \cdot \sigma(t - 1) \quad (3.2)$$

Jednotlivé fázové posuny boli napočítané tak, aby po prenasobení nulou v prvej sekunde signál začínal z nuly s nulovou deriváciou. Operátor reagoval výrazne horšie, ak bol na začiatku regulácie skok v derivácii vstupného signálu.

Výsledné periodické budiace signály sú zobrazené na obrázku 3.3.



Obr. 3.3: Budiace signály získané súčtom sínusových signálov



## 4 Zistené operátorové prenosy ľudského operátora pre štandardnú tuhosť volantu

V tejto kapitole sú uvedené zistené prenosy operátora pre sústavy  $K_S$ ,  $K_S/p$  a  $K_S/(Tp + 1)$ . Sú tu uvedené všeobecné zápisy prenosov pri riadení skúmaných sústav, ich priemerné hodnoty z celkového počtu meraní, a taktiež charakteristické prvky prenosov, ktoré sú pre každé meranie zobrazené v grafoch. Pre každý prípad merania (typ regulovanej sústavy a typ budiaceho signálu) bolo spravených 10 meraní. Tieto sústavy boli merané iba so štandardnou tuhosťou volantu, ktorá bola prednastavená od výroby.

Pre každý prípad bol hľadaný čo najjednoduchší matematický popis operátora (čo najmenší počet pólov a núl), ale zároveň musel daný popis čo najlepšie simulovať akčný zásah operátora. Simulovaný akčný zásah bol generovaný funkciou *lsim* v prostredí MATLAB na základe zaznamenaného časového priebehu regulačnej odchýlky, zaznamenaného akčného zásahu a zvoleného popisu operátora [11]. Výsledok bol následne porovnaný so skutočným akčným zásahom.

Odozva na PRBS signál bola meraná pre všetky typy regulovaných sústav, odozva na signál získaný súčtom sínusových signálov bola meraná len pre regulovanú sústavu s prenosom  $K_S/p$ . Akčný zásah operátora bol vzorkovaný s periódou 0,1 s.

Operátorový prenos bol určovaný vrátane dopravného oneskorenia operátora. Dopravné oneskorenie však nebolo určované priamo funkciou *tfest* ako ostatné parametre prenosu, ale spôsobom popísaným v kapitole 2.2.1.

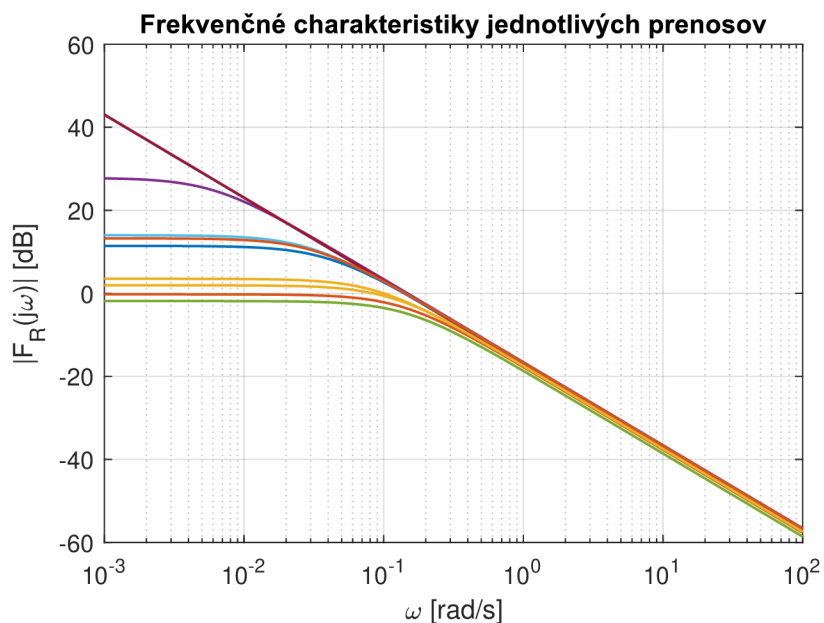
Všetky MATLAB skripty, ktoré boli vytvorené a používané k spracovaniu nameraných dát sú spoločne aj s dátami dostupné v elektronickej prílohe.

### 4.1 Odozvy na systém s prenosom $K_S$

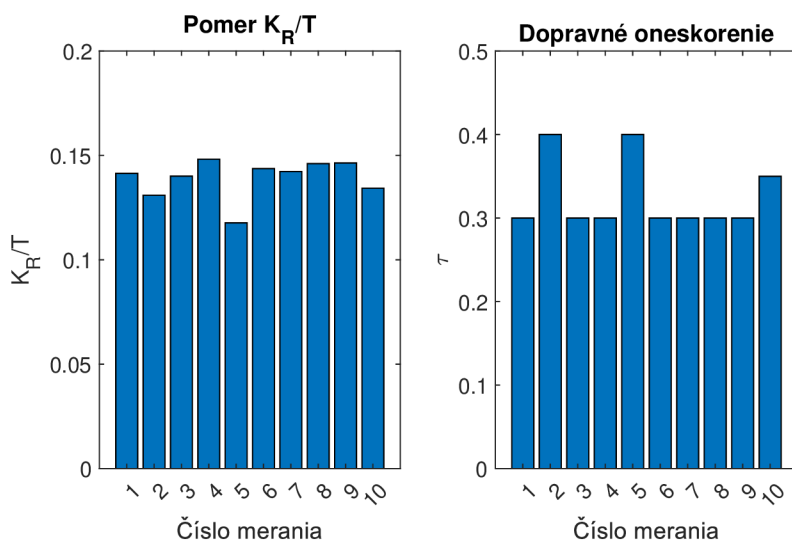
Na základe nameraných dát a experimentovaním s možnými typmi prenosov operátora nakoniec ľudského operátora najlepšie vystihol popis

$$F_R(p) = \frac{K_R}{Tp + 1} \cdot e^{-\tau p}. \quad (4.1)$$

Tento popis nezodpovedá presne očakávaniam na základe McRuerových modelov. Na základe [1] by prenos operátora mal byť  $F_R(p) = K_R/p$ . Takýto prenos ale funkcia *tfest* nepodporuje. Z tohto dôvodu bol zvolený prenos v rovnici 4.1. Navyše, skúmaním frekvenčných charakteristík vypočítaných prenosov pre každé meranie (obrázok 4.1) je možné usúdiť, že od frekvencií 0,2 rad/s vyššie sa operátor správa ako integrátor a všetky zistené prenosy sú v podstate zhodné.



Obr. 4.1: Frekvencné charakteristiky prenosov operátora pre sústavu  $K_S$



Obr. 4.2: Hodnoty parametrov prenosov operátora pri odozve na systém  $K_S$

Na základe týchto úvah nemá zmysel udávať priemerné hodnoty zosilnenia  $K_R$  a časovej konštanty  $T$ , ale namiesto toho uviesť priemer ich pomeru

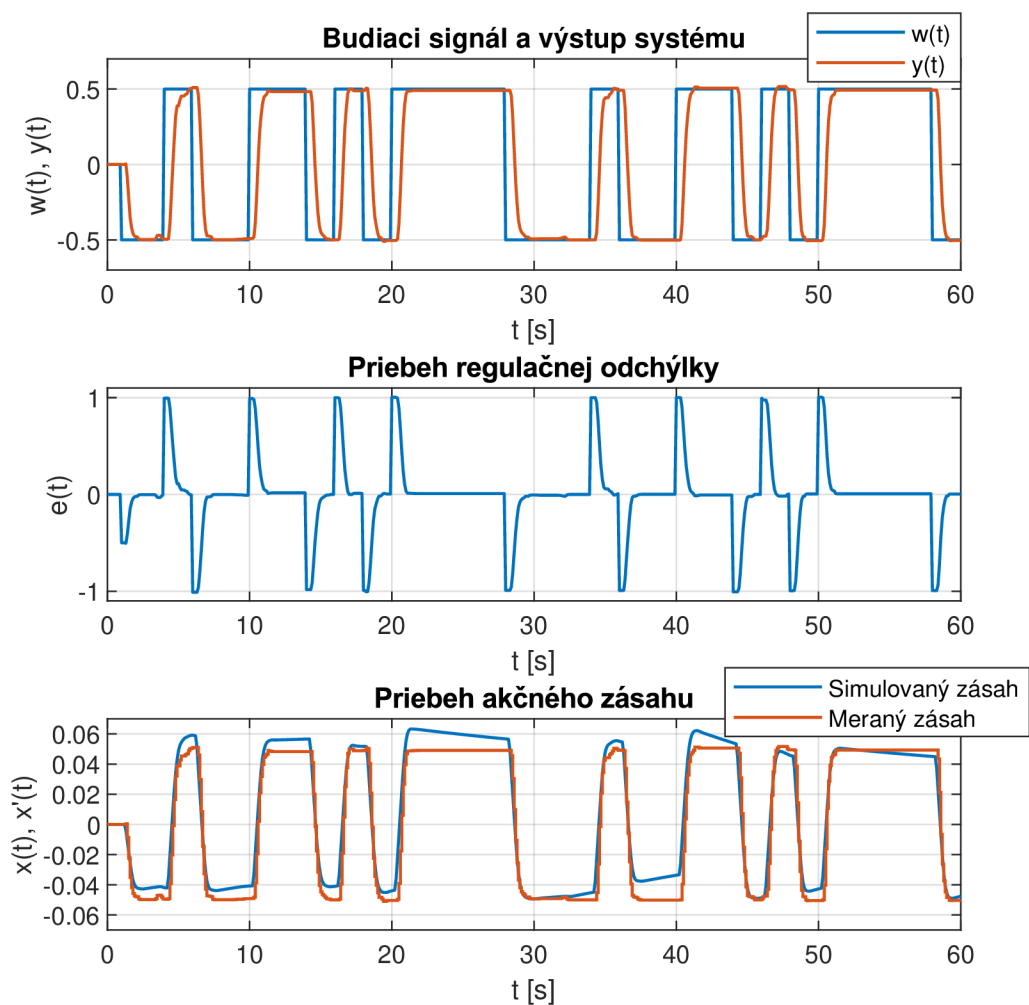
$$\overline{\left(\frac{K_R}{T}\right)} = 0,1391 \tag{4.2}$$

príčom priemerné dopravné oneskorenie operátora bolo 0,325 sekúnd. Na obrázku 4.2 sú graficky zobrazené zistené hodnoty pre každé meranie.

Z prenosu operátora uvedeného v rovnici 4.1 tak dostaneme tvar

$$F_R(p) = \frac{K_R/T}{p} \cdot e^{-\tau p} \quad (4.3)$$

Na obrázku 4.3 je vybraný jeden vzorový zaznamenaný priebeh (jedná sa o 8. meranie). V grafoch na obrázku 4.3 je zobrazená žiadaná hodnota a výstup regulovaného systému, priebeh regulačnej odchýlky a zmeraného a simulovaného akčného zásahu operátora.



Obr. 4.3: Priebehy meraných veličín počas jedného merania pre sústavu  $K_S$

Identifikované operátorové prenosy dosiahli v priemere 73,1 % zhodu s nameranými dátami.

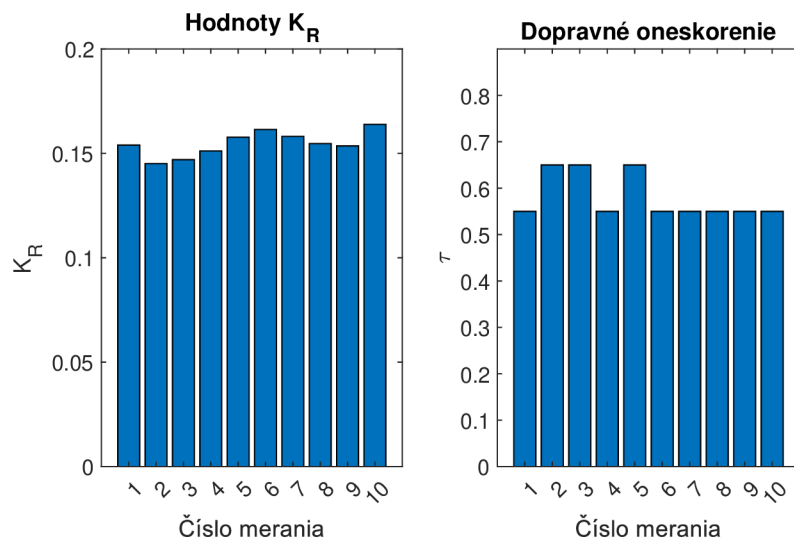
## 4.2 Odozvy na systém s prenosom $K_S/p$

Odozvu operátora pri riadení systému s prenosom  $K_S/p$  je možné popísať aj čistým zosilnením s dopravným oneskorením, aj prenosom zotrvačného článku 1. rádu tiež s dopravným oneskorením. Bol zvolený popis  $F_R = K_R \cdot e^{-\tau p}$ , pretože má menej parametrov a dáva výsledky porovnateľné so zložitejším popisom. Parametre zložitejšieho prenosu boli použité pre určenie frekvencií sínusového budiaceho signálu (následujúca podkapitola).

Na základe nameraných dát je možné určiť priemerný operátorový prenos

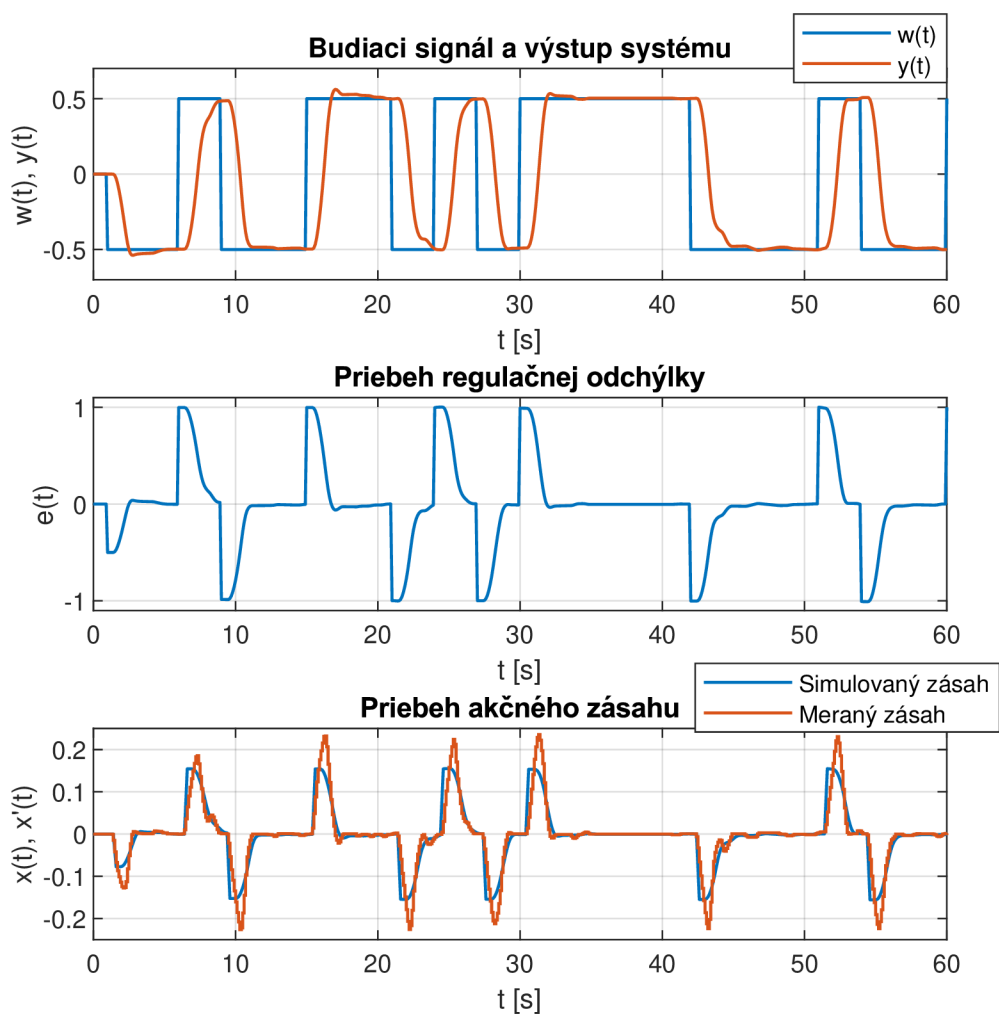
$$F_R(p) = \overline{K_R} \cdot e^{-\overline{\tau}p} = 0,1547 \cdot e^{-0,58p} \quad (4.4)$$

pričom hodnoty parametrov prenosu pre každé meranie sú zobrazené v grafoch na obrázku 4.4.



Obr. 4.4: Hodnoty parametrov prenosov operátora pri odozve na systém  $K_S/p$

Na základe určeného prenosu môžeme porovnať skutočný a simulovaný akčný zásah operátora. Tieto priebehy sú spoločne s ostatnými zaznamenanými veličinami z merania č. 8 zobrazené v grafoch na obrázku 4.5.



Obr. 4.5: Priebehy meraných veličín počas jedného merania pre sústavu  $K_S/p$

Identifikované operátorové prenosy dosiahli v priemere 64,86 % zhodu s nameranými dátami.

#### 4.2.1 Určenie parametrov periodického budiaceho signálu

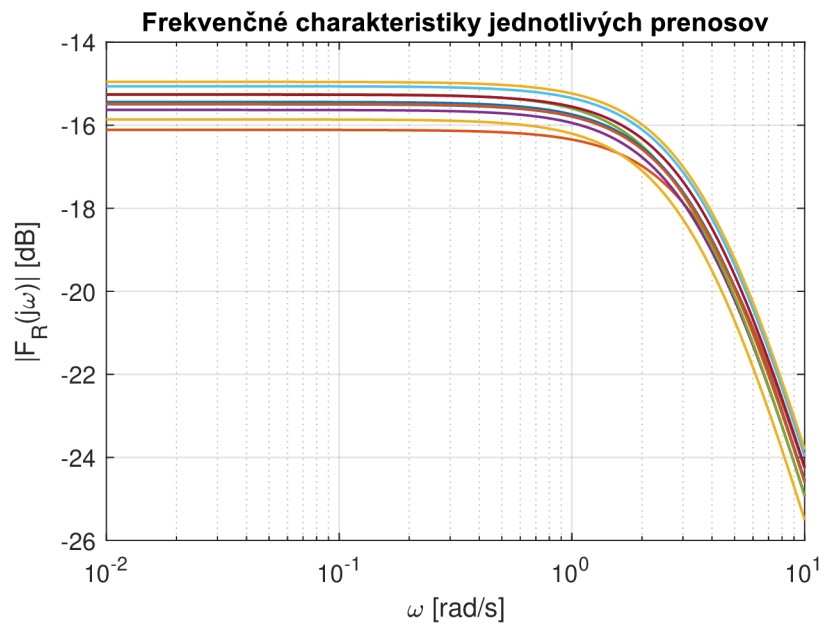
Pre určenie parametrov periodického budiaceho signálu bolo potrebné určiť, aké najvyššie frekvencie je ľudský operátor schopný prenášať. Následne budú frekvencie jednotlivých sínusových zložiek budiaceho signálu vybrané z okolia tejto medznej frekvencie operátora.

Prenosu 4.4 odpovedá amplitúdová frekvenčná charakteristika, ktorá je plochá. Nie je teda možné z nej určiť žiadnu medznú frekvenciu. Aby sme túto frekvenciu mohli určiť, bol prenos operátora identifikovaný znova s tými istými nameranými

dátami, ale pri zvolení zložitejšieho prenosu operátora. Prenos operátora bol identifikovaný v tvare

$$F_R(p) = \frac{K_R}{Tp + 1} \cdot e^{-\tau p} \quad (4.5)$$

Frekvenčné charakteristiky všetkých vypočítaných prenosov sú vykreslené na obrázku 4.6. Z ich priebehov je patrné, že charakteristiky sa lámu na frekvencii približne 2 rad/s. Frekvencie budiaceho signálu boli zvolené z blízkeho okolia, a to 1 rad/s, 2 rad/s a 3 rad/s.

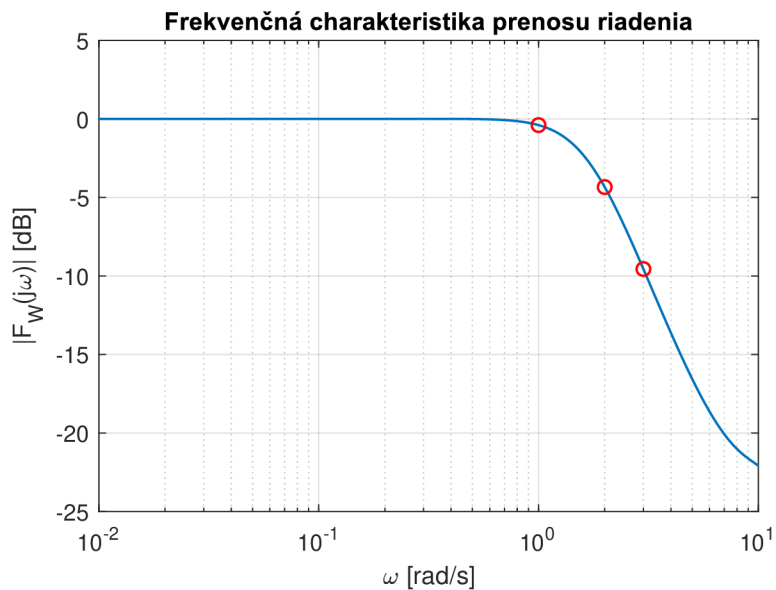


Obr. 4.6: Frekvenčné charakteristiky prenosov operátora pre sústavu  $K_S/p$

K rovnakému výsledku je možné dospieť aj skúmaním prenosu riadenia, ktorého tvar je

$$F_W(p) = \frac{K_R e^{-\tau p} \cdot 5/p}{1 + K_R e^{-\tau p} \cdot 5/p} \quad (4.6)$$

Frekvencia, pri ktorej amplitúdová charakteristika klesne na  $-3$  dB, odpovedá našej hľadanej frekvencii (čo tiež vychádza okolo 2 rad/s).

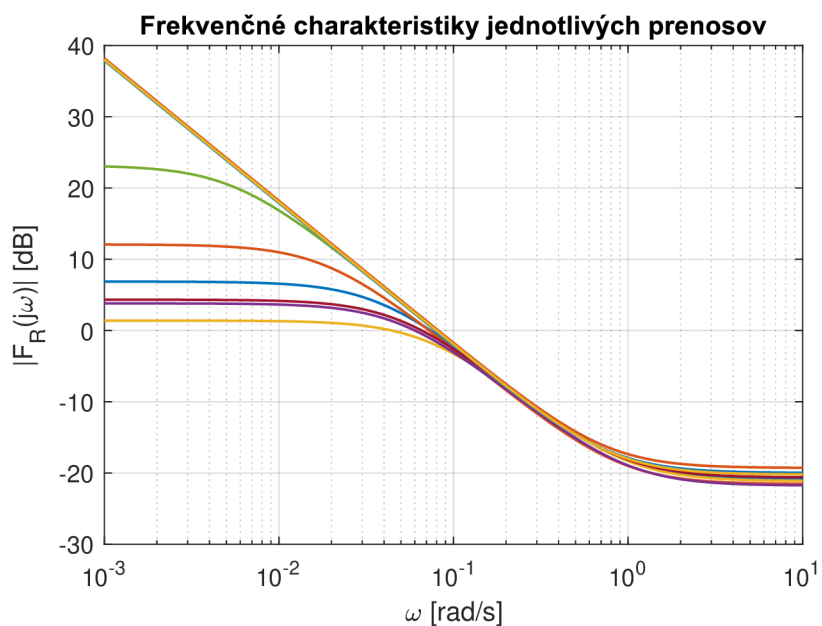


Obr. 4.7: Frekvenčná charakteristika prenosu riadenia a zvolené frekvencie

### 4.3 Odozvy na systém s prenosom $K_S/(p + 1)$

V tomto prípade po experimentoch so zložitou prenosu operátora bol zvolený nasledujúci prenos:

$$F_R(p) = \frac{K_R(T_1 p + 1)}{T_2 p + 1} \cdot e^{-\tau p} \quad (4.7)$$



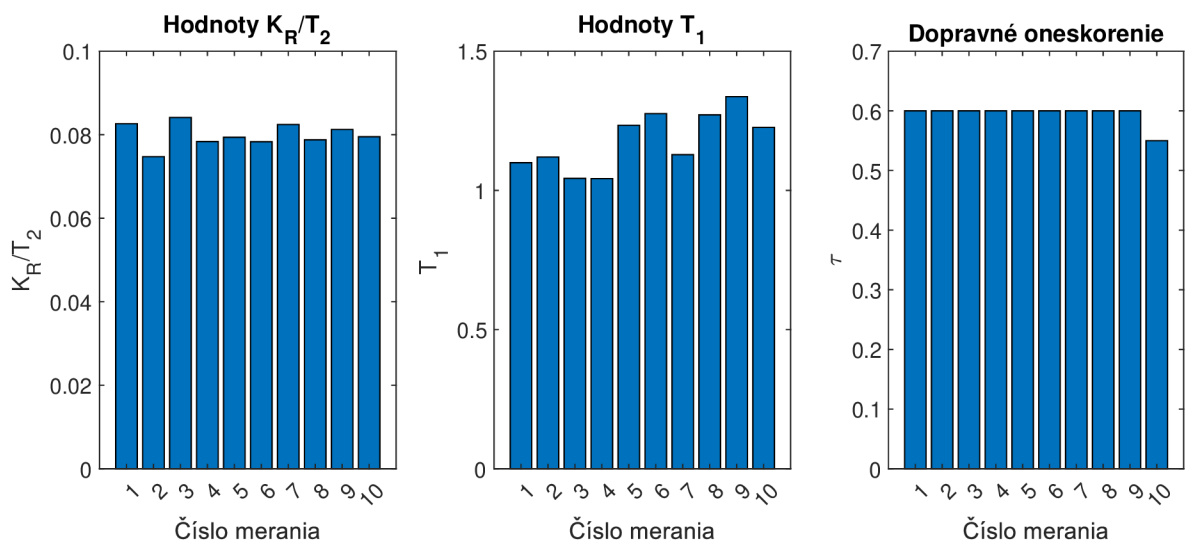
Obr. 4.8: Frekvenčné charakteristiky prenosov operátora pre sústavu  $K_S/(p + 1)$

Opäť ako v prípade odozvy na systém s prenosom  $K_S$ , v menovateli prenosu operátora by mal podľa McRuerových modelov byť čistý integrátor. To ale s použitím funkcie `tfest` nie je možné. Z frekvenčných charakteristík všetkých zistených prenosov (obrázok 4.8) je možné pozorovať rovnaké správanie ako pri odozve na systém s prenosom  $K_S$ , a to, že hodnoty  $K_R$  a  $T_2$  nadobúdajú rádoivo iné hodnoty, ale ich pomer ostáva približne rovnaký.

Z tohto dôvodu tu nebude uvedený prenos s priemernými hodnotami jednotlivých parametrov, ale priemerné hodnoty  $T_1$ , pomeru  $K_R/T_2$  a dopravného oneskorenia  $\tau$  (tabulka 4.1).

Tab. 4.1: Priemerné parametre prenosu operátora

Parameter	Priemerná hodnota
$\frac{K_R}{T_2}$	0,08
$T_1$	1,1776
$\tau$	0,595

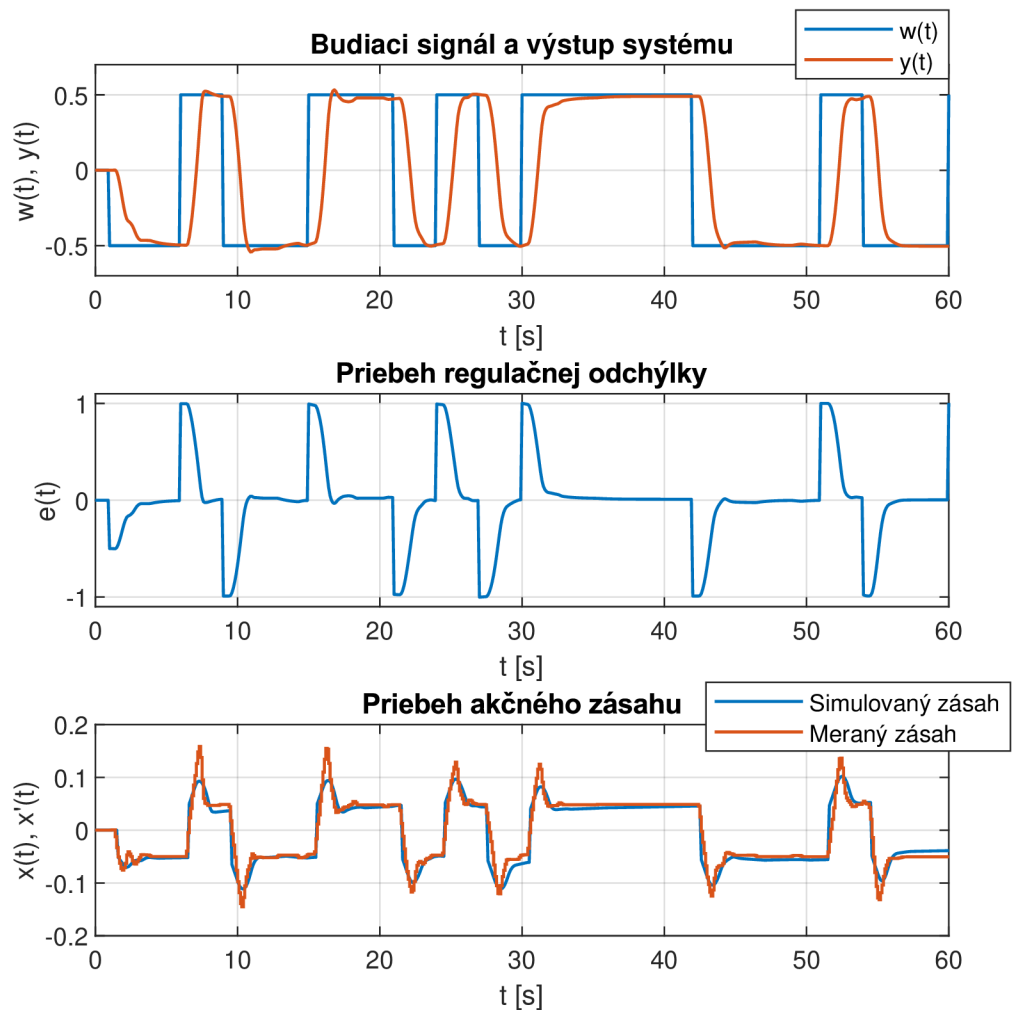


Obr. 4.9: Hodnoty parametrov prenosov operátora pri odozve na systém  $K_S/(p+1)$

Parametre prenosov operátora sú pre každé meranie zobrazené na obrázku 4.9. Na obrázku 4.10 sú následne zobrazené priebehy všetkých zaznamenávaných veličín



z piateho merania a simulovaného akčného zásahu na základe zisteného prenosu operátora.



Obr. 4.10: Priebehy meraných veličín počas jedného merania pre sústavu  $K_S/(p+1)$

Identifikované operátorové prenosy dosiahli v priemere 72,64 % zhodu s nameranými dátami.

#### 4.4 Odozvy na systém $K_S/p$ s periodickým budiacim signálom

Prenos operátora, ktorý riadi sústavu  $K_S/p$  pri periodickom budiacom signále, mal z hľadiska identifikácie optimálny tvar čistého zosilnenia

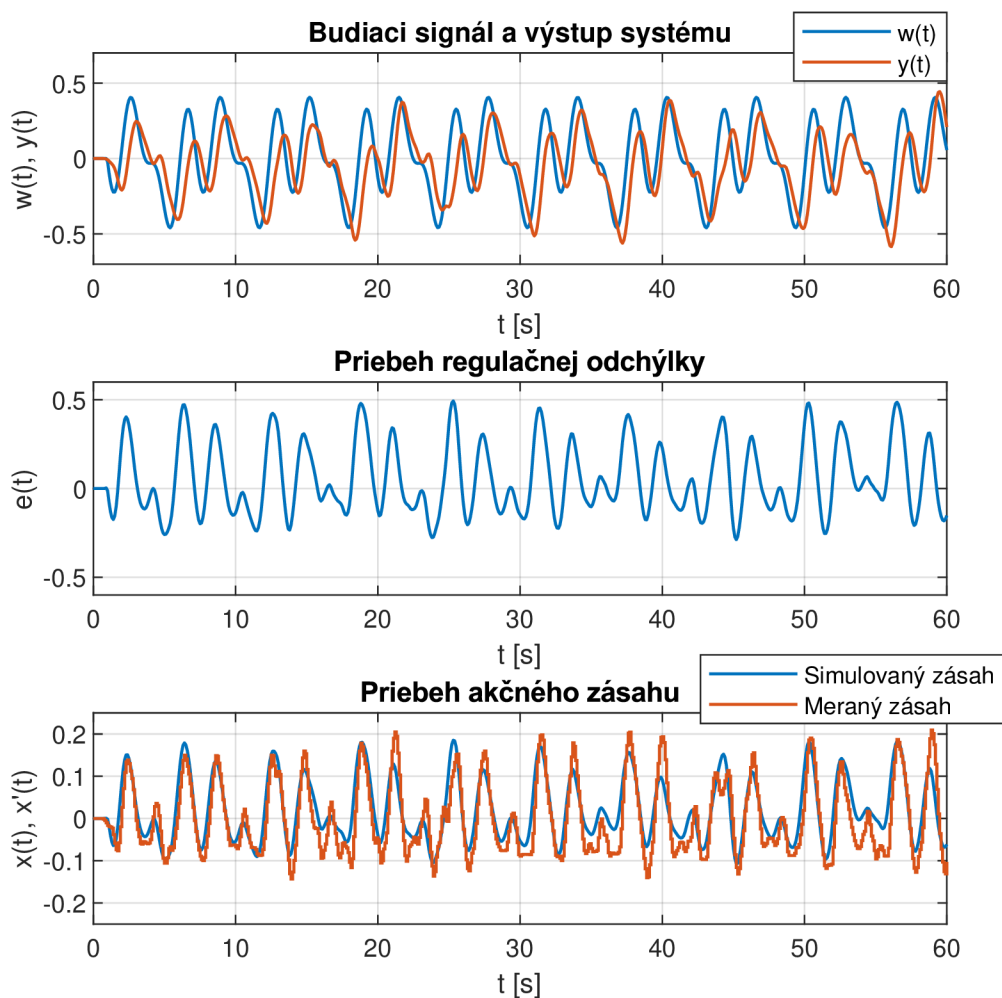
$$F_R(p) = K_R \cdot e^{-\tau p} \quad (4.8)$$

Pri použití zložitejšieho prenosu funkcia `tfest` numericky zlyhá a spočíta prenos, ktorý nameraný akčný zásah vôbec nevystihuje. Dobré výsledky začne znovu vracaf až pri zložitosti 2 pólov v prenose operátora.

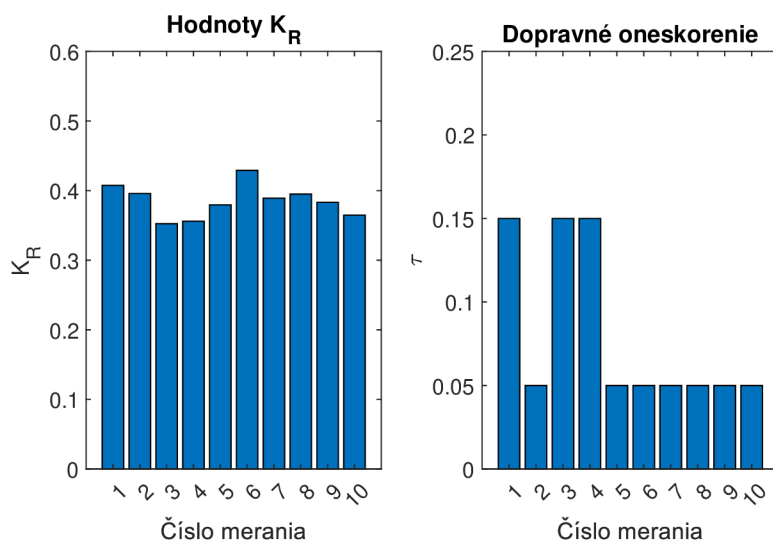
Na základe nameraných dát je možné určiť priemerné zosilnenie a priemerné časové oneskorenie v prenose operátora

$$F_R(p) = \overline{K_R} \cdot e^{-\overline{\tau} p} = 0,3853 \cdot e^{-0,08 p} \quad (4.9)$$

pričom hodnoty parametrov prenosu pre každé meranie sú zobrazené v grafoch na obrázku 4.12. Priebehy zaznamenávaných veličín a simulovaného akčného zásahu pre 5. meranie sú zobrazené v grafoch na obrázku 4.11.



Obr. 4.11: Priebehy meraných veličín počas jedného merania pre sústavu  $K_S/p$



Obr. 4.12: Hodnoty parametrov prenosov operátora pri odozve na systém  $K_S/p$

Identifikované operátorové prenosy dosiahli v priemere 51,71 % zhodu s nameranými dátami.

## 4.5 Zhrnutie zistených výsledkov

Pri uvážení faktu, že funkcia `tfest` neumožňuje, aby bol v prenose integrátor a neumožňuje vypočítať nekauzálny prenos, je možné konštatovať, že zistené prenosy odpovedajú teoretickým predpokladom McRuerových modelov popísaných v 1. kapitole.

Zaujímavým zistením je, že prenosy operátora nadobúdali rôzne hodnoty pri regulovaní rovnakej sústavy ( $K_S/p$ ) s rozdielnym budiacim signálom. Pri sínusovom budiacom signále nadobúdalo zosilnenie  $K_R$  vyššie hodnoty a časové oneskorenie  $\tau$  nižšie hodnoty ako pri PRBS budiacom signále. Mohlo by to byť spôsobené tým, že sínusový budiaci signál je periodický, po istom čase teda mohol operátor predvídať priebeh regulačnej odchýlky a tým pádom reagovať rýchlejšie a so silnejšou odozvou.

Pre porovnanie sú v tabuľke 4.2 uvedené všetky experimentálne určené prenosy operátora a teoretické prenosy operátora k danej sústave.

Tab. 4.2: Porovnanie experimentálne zistených a teoretických prenosov operátora

Sústava $F_S(p)$	Zistený $F_R(p)$	Teoretický $F_R(p)$ [1]
$K_S$	$\frac{K_R}{Tp + 1} \cdot e^{-\tau p}$	$\frac{K_R}{p} \cdot e^{-\tau p}$
$\frac{K_S}{p}$	$K_R \cdot e^{-\tau p}$	$K_R \cdot e^{-\tau p}$
$\frac{K_S}{p + 1}$	$\frac{K_R(T_1 p + 1)}{T_2 p + 1} \cdot e^{-\tau p}$	$\frac{K_R(p + 1)}{p} \cdot e^{-\tau p}$ <sup>1</sup>

V tabuľke 4.3 sú zhrnuté identifikované prenosy s konkrétnymi hodnotami jednotlivých koeficientov. Jednotlivé tvary prenosov sú prepočítané na základe úvah popísaných vyššie v tejto kapitole, preto sa presne nezhodujú s tvarom prenosu, ktorý bol identifikovaný funkciou **tfest**.

Tab. 4.3: Konkrétne tvary identifikovaných prenosov

Budiaci signál	Sústava $F_S(p)$	Zistený $F_R(p)$	Teoretický $F_R(p)$ [1]
PRBS	10	$\frac{0,1391}{p} \cdot e^{-0,325p}$	$\frac{K_R}{p} \cdot e^{-\tau p}$
	$\frac{5}{p}$	$0,1547 \cdot e^{-0,58p}$	$K_R \cdot e^{-\tau p}$
	$\frac{10}{p + 1}$	$\frac{0,08(1,1776p + 1)}{p} \cdot e^{-0,595p}$	$\frac{K_R(p + 1)}{p} \cdot e^{-\tau p}$
Periodický	$\frac{5}{p}$	$0,3853 \cdot e^{-0,08p}$	$K_R \cdot e^{-\tau p}$

<sup>1</sup>Tento prenos nie je v [1] priamo uvedený, ale je možné ho dopočítať zo známeho prenosu sústavy a požadovaného prenosu otvorenej slučky

# 5 Zistené operátorové prenosy ľudského operátora pre meniacu sa tuhosť volantu

V tejto kapitole sú uvedené identifikované prenosy ľudského operátora, pri regulácii sústavy  $K_S/p^2$ . Táto sústava bola meraná aj s PRBS budiacim signálom aj s periodickým budiacim signálom. Pre obidve možnosti budiaceho signálu boli realizované dve sady meraní, a to pre štandardnú tuhosť volantu a pre nulovú tuhosť volantu.

Pre každý prípad merania (typ budiaceho signálu a miera tuhosti volantu) bolo spravených 10 meraní, ktoré boli spracované rovnako ako merania popísané v kapitole 4. Rozdiel bol iba vo vzorkovacej perióde použitej na zaznamenanie akčného zásahu operátora. Pre merania so sústavou  $K_S/p^2$  bola zvolená perióda 0,01 s.

## 5.1 Odozvy na PRBS budiaci signál

Operátora, ktorý reguluje systém s prenosom  $F_S(p) = K_S/p^2$  s PRBS budiacim signálom vystihuje nasledovný prenos:

$$F_R(p) = \frac{K_R(T_1p + 1)}{T^2p^2 + 2\xi Tp + 1} \cdot e^{-\tau p} \quad (5.1)$$

Keďže ale funkcia `tfest` vracia prenos vo forme polynómov, je nutné previesť nasledujúcu úpravu:

$$F_R(p) = \frac{ap + b}{p^2 + cp + d} = \frac{\frac{b}{a} \left( \frac{a}{b}p + 1 \right)}{\frac{1}{a}p^2 + \frac{c}{a}p + 1} = \frac{K_R(T_1p + 1)}{T^2p^2 + 2\xi Tp + 1} \quad (5.2)$$

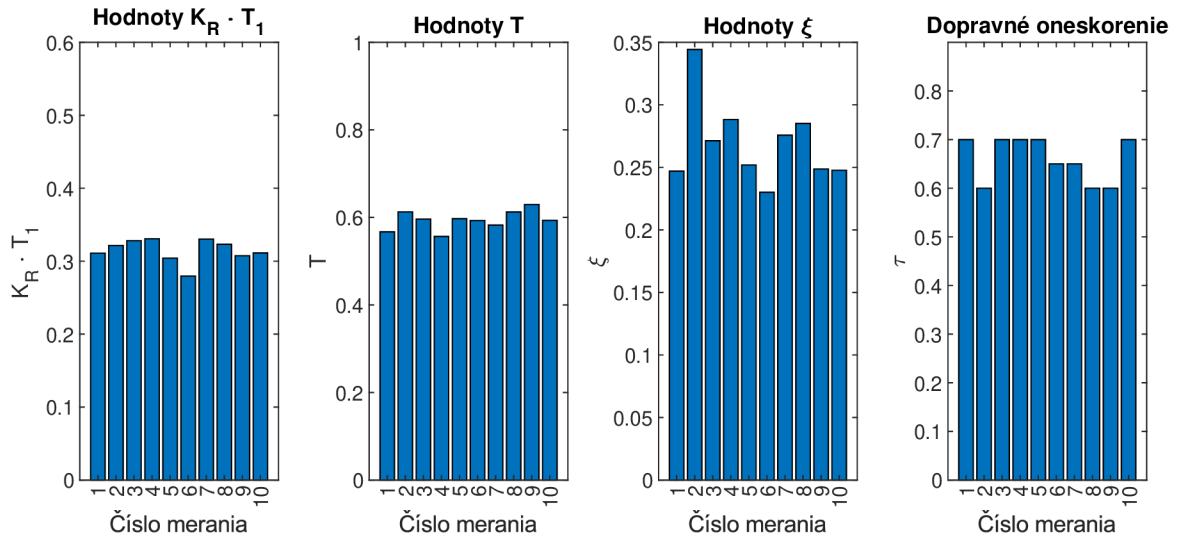
Ďalšie zvyšovanie zložitosti prenosu operátora už nevedlo k výraznejšiemu zlepšeniu aproximácie. Jednoduchší popis nedokázal akčný zásah dostatočne vystihnúť.

Na obrázku 5.2 a 5.5 sú zobrazené frekvenčné charakteristiky všetkých identifikovaných prenosov. Z grafov je zjavné, že hodnoty časovej konštanty  $T_1$  a zosilnenia  $K_R$  nadobúdajú v jednotlivých meraniach rôzne hodnoty, ale ich pre násobením sa získa približne rovnaká hodnota pre všetky merania. Táto hodnota by odpovedala ekvivalentnému zosilneniu pri zanedbaní člena  $+1$  v čitateli prenosu. Z  $K_R(T_1p + 1)$  vznikne  $K_{ekv}p$ .

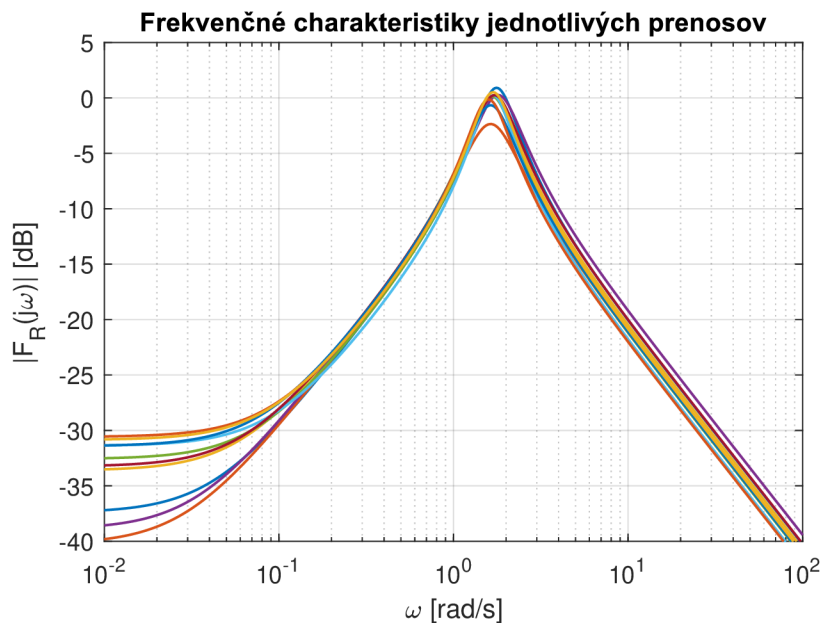
Ako vidieť aj na priebehu akčného zásahu (obrázok 5.3 a 5.6), operátor má kmitavý charakter. Preto je jeho menovateľ uvedený v štandardnom tvare pre kmitavý článok 2. rádu.

### 5.1.1 Odozvy merané so štandardnou tuhosťou volantu

Hodnoty identifikovaných parametrov pre jednotlivé merania sú zobrazené na obrázku 5.1.



Obr. 5.1: Hodnoty parametrov prenosov operátora pri odozve na systém  $K_S/p^2$  s PRBS budiacim signálom a štandardnou tuhosťou volantu

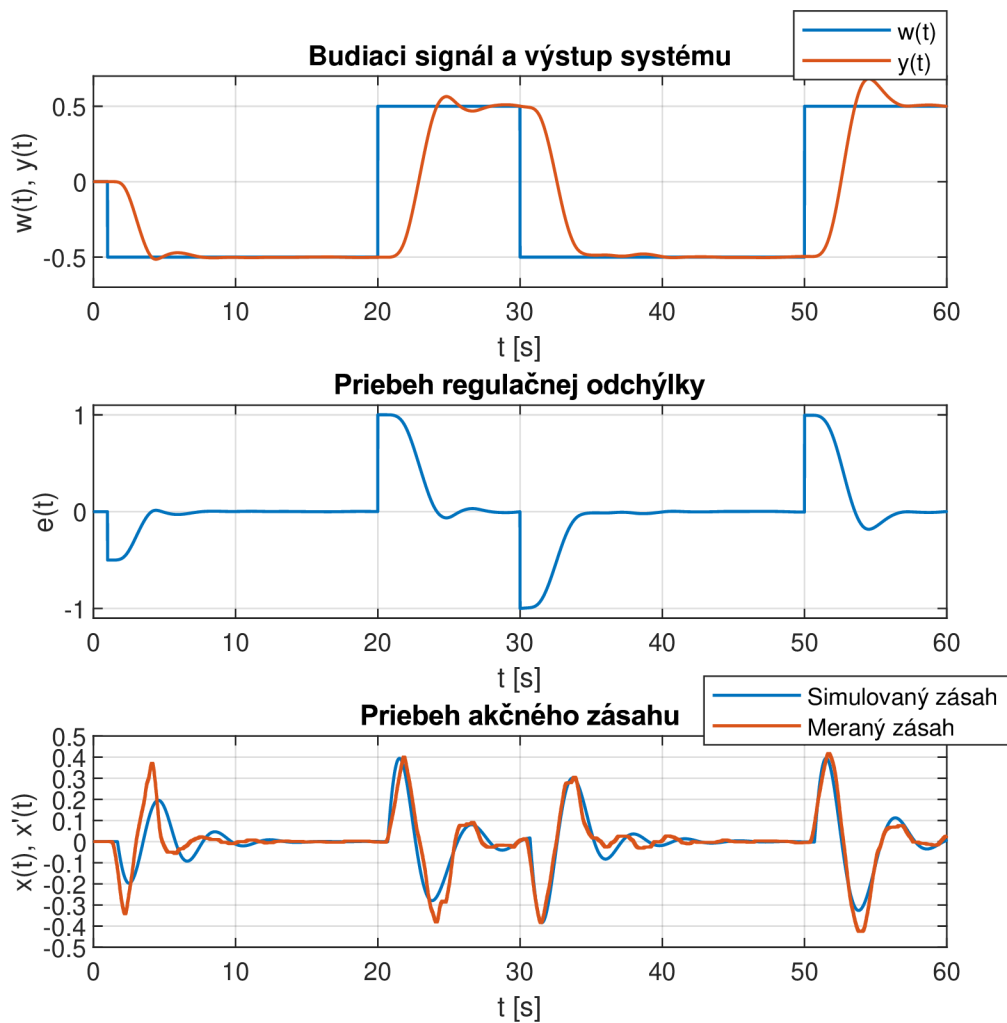


Obr. 5.2: Frekvenčné charakteristiky operátora pre sústavu  $K_S/p^2$  s PRBS budiacim signálom so štandardnou tuhosťou volantu

Z nameraných dát je možné určiť priemerné hodnoty ekvivalentného zosilnenia  $K_{\text{ekv}}$ , časovej konštanty  $T$ , koeficientu tlmenia  $\xi$  a dopravného oneskorenia  $\tau$ .

$$\overline{F_R(p)} = \frac{\overline{K_R \cdot T_1 p}}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1} \cdot e^{-\bar{\tau} p} = \frac{0,3147p}{0,5939^2 p^2 + 2 \cdot 0,269 \cdot 0,5939 p + 1} \cdot e^{-0,66p} \quad (5.3)$$

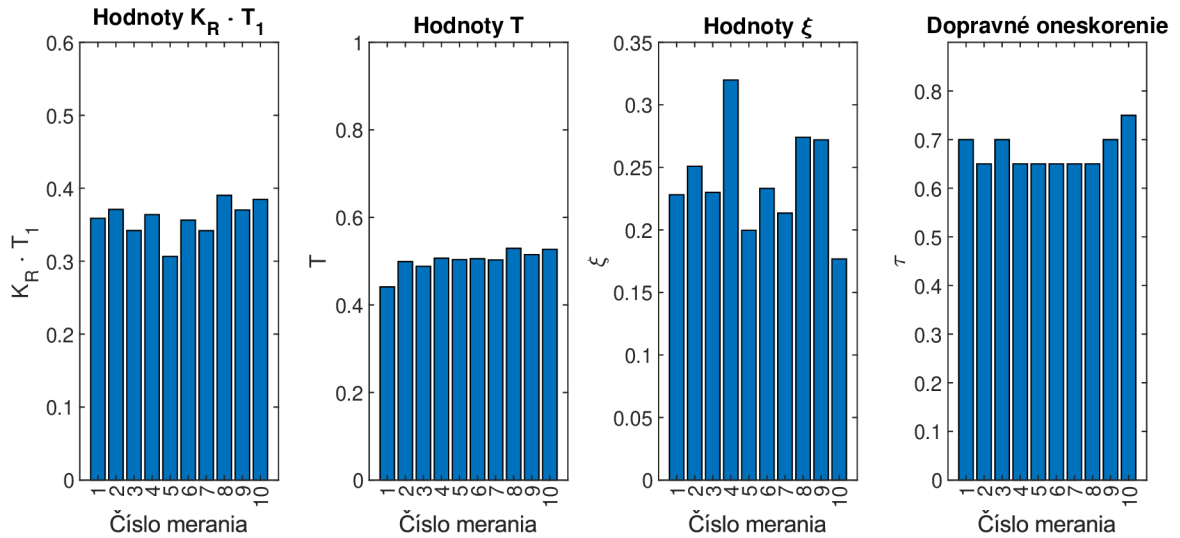
Identifikované operátorové prenosy dosiahli v priemere 61,39 % zhodu s nameranými dátami. Na obrázku 5.3 je zobrazený časový priebeh meraných veličín pre 3. meranie.



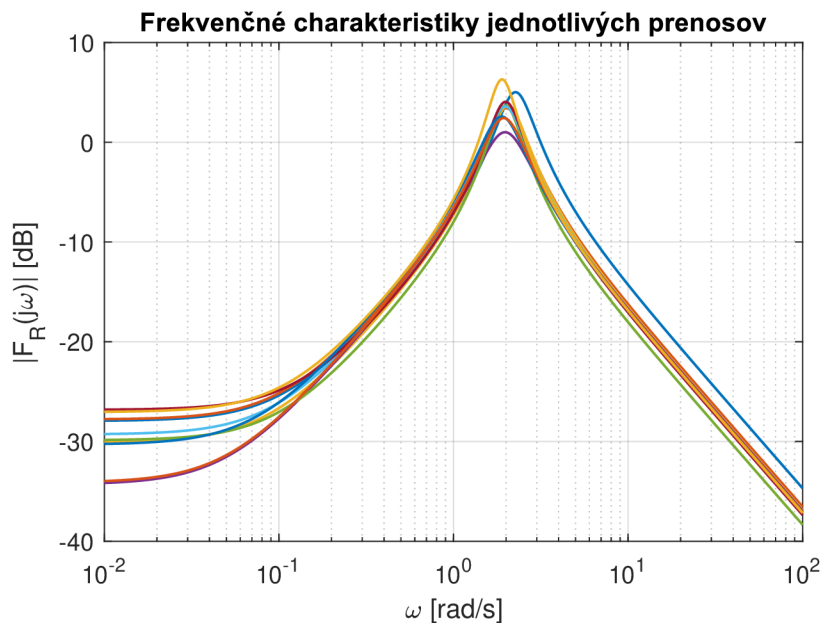
Obr. 5.3: Priebehy meraných veličín počas jedného merania pre sústavu  $K_S/p^2$  s PRBS budiacim signálom a štandardnou tuhosťou volantu

## 5.1.2 Odozvy merané s nulovou tuhosťou volantu

Hodnoty identifikovaných parametrov pre jednotlivé merania sú zobrazené na obrázku 5.4.



Obr. 5.4: Hodnoty parametrov prenosov operátora pri odozve na systém  $K_S/p^2$  s PRBS budiacim signálom a nulovou tuhosťou volantu



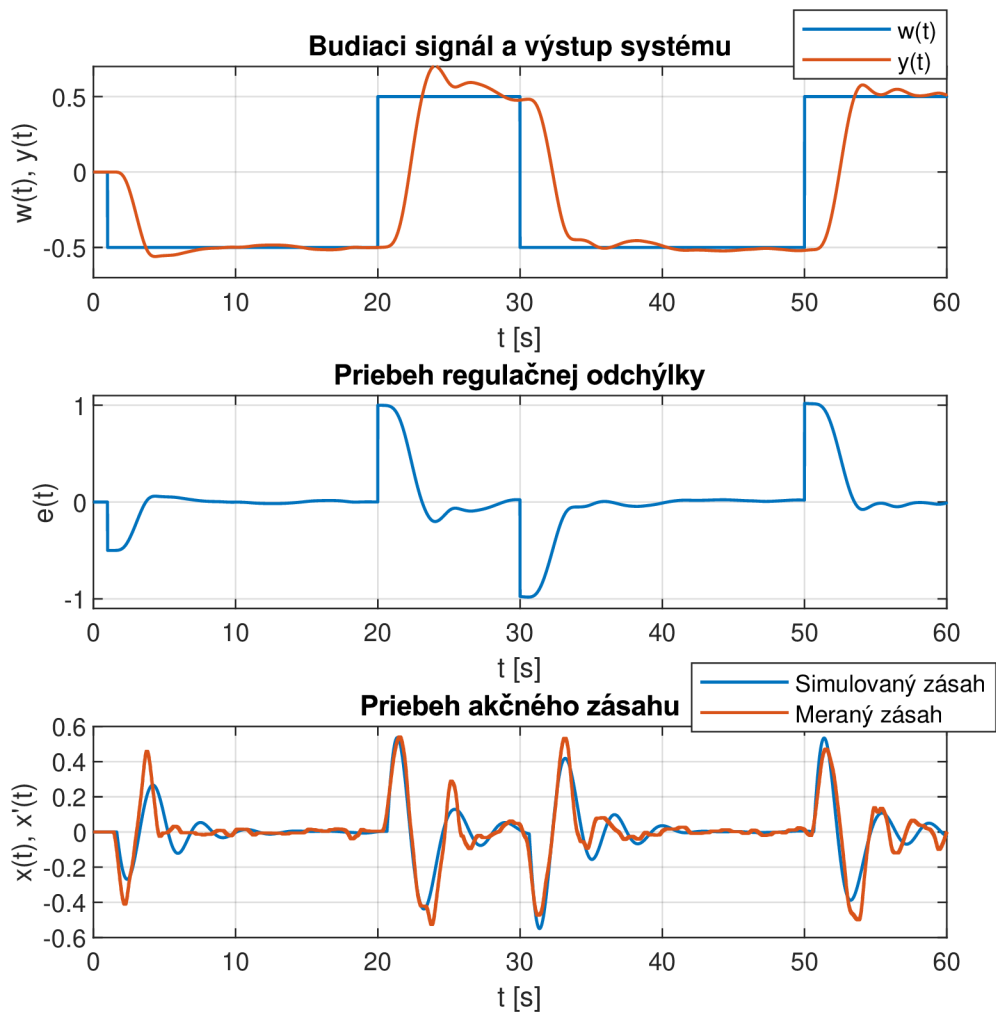
Obr. 5.5: Frekvenčné charakteristiky operátora pre sústavu  $K_S/p^2$  s PRBS budiacim signálom s nulovou tuhosťou volantu



Z nameraných dát je možné určiť priemerné hodnoty ekvivalentného zosilnenia  $K_{\text{ekv}}$ , časovej konštanty  $T$ , koeficientu tlmenia  $\xi$  a dopravného oneskorenia  $\tau$ .

$$\overline{F_R(p)} = \frac{\overline{K_R} \cdot \overline{T_1 p}}{\overline{T^2 p^2 + 2\xi \overline{T} p + 1}} \cdot e^{-\overline{\tau} p} = \frac{0,3586p}{0,5019^2 p^2 + 2 \cdot 0,2398 \cdot 0,5019 p + 1} \cdot e^{-0,675p} \quad (5.4)$$

Identifikované operátorové prenosy dosiahli v priemere 58,61 % zhodu s nameranými dátami. Na obrázku 5.6 je zobrazený časový priebeh meraných veličín pre 7. meranie.



Obr. 5.6: Priebehy meraných veličín počas jedného merania pre sústavu  $K_S/p^2$  s PRBS budiacim signálom a nulovou tuhosťou volantu

### 5.1.3 Určenie parametrov periodického budiaceho signálu

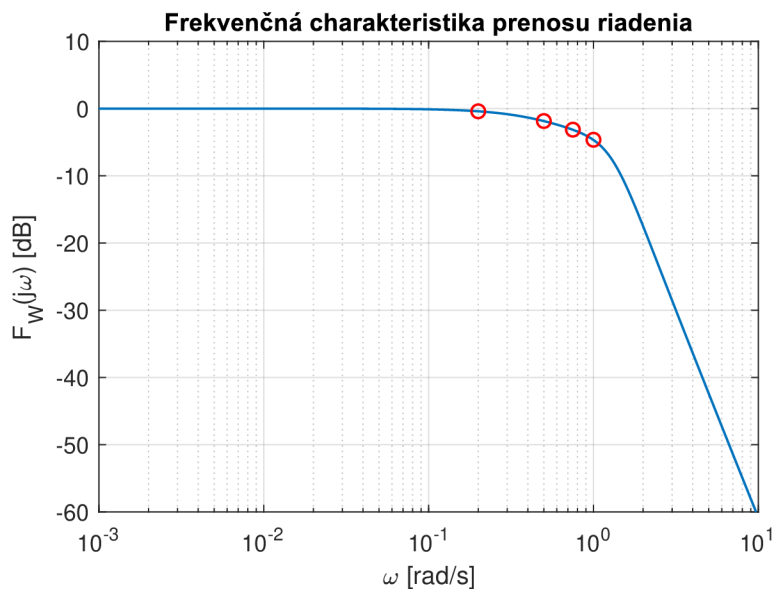
Pre určenie parametrov periodického signálu je nutné určiť najvyššie frekvencie, aké je operátor schopný prenášať. Za týmto účelom je potrebné skúmať prenos riadenia  $F_W$  a určiť, kedy nastáva zlom jeho frekvenčnej charakteristiky.

Prenos riadenia je daný rovnicou

$$F_W(p) = \frac{F_R(p)F_S(p)}{1 + F_R(p)F_S(p)} \quad (5.5)$$

pričom za  $F_R(p)$  bol dosadený priemerný tvar prenosu operátora meraný s PRBS budiacim signálom a štandardnou tuhosťou volantu pri regulácii systému  $1/p^2$  [12]. Za  $F_S(p)$  bola dosadená regulovaná sústava  $1/p^2$ .

Frekvenčná charakteristika takto vypočítaného prenosu riadenia je zobrazená na obrázku 5.7. Pri frekvencii približne 0,7 rad/s klesne amplitúdová charakteristika na  $-3$  dB. V okolí tejto frekvencie boli volené jednotlivé zložky periodického budiaceho signálu, a to 0,5 , 0,75 a 1 rad/s.



Obr. 5.7: Frekvenčná charakteristika prenosu riadenia a zvolené frekvencie

Aby bol operátor budený aj na frekvenciách bližšie k jednosmernej zložke, bola do signálu pridaná aj sínusová vlna s frekvenciou 0,2 rad/s, ktorej perióda sa do budiaceho signálu s dĺžkou 60 sekúnd vojde 2-krát.

Pretože operátor nebol schopný vyregulovať skokovú zmenu na začiatku (po vynulovaní 1. sekundy), bol signál generovaný tak, aby začínal z nuly s nulovou 1. deriváciou.

## 5.2 Odozvy na periodický budiaci signál

Operátora, ktorý reguluje systém  $1/p^2$  s periodickým budiacim signálom optimálne popisuje prenos v tvare

$$F_R(p) = \frac{K_R(T_1 p + 1)}{T_2 p + 1} \cdot e^{-\tau p} \quad (5.6)$$

Je nutné ale spomenúť, že časové konštanty vystupujúce v prenose operátora sú tu do istej miery umelo vnútené. Vyplýva to z vlastností funkcie `tfest` použitej pri identifikácii prenosov, pretože nedovoľuje identifikáciu integračného alebo derivačného člena.

Na frekvenciách, pri ktorých nastáva zlom frekvenčnej charakteristiky už nebol systém budený a preto prenos na týchto frekvenciách už identifikáciou nemohol byť presne určený. Z frekvenčných charakteristík operátora (obrázky 5.9 a 5.12) je vidno, že na frekvenciách, kde bol systém budený (0,2 až 1 rad/s) má identifikovaný prenos sklon +20 dB na dekádu a odpovedá teda teoretickým predpokladom, ktoré plynú z McRuerových modelov.

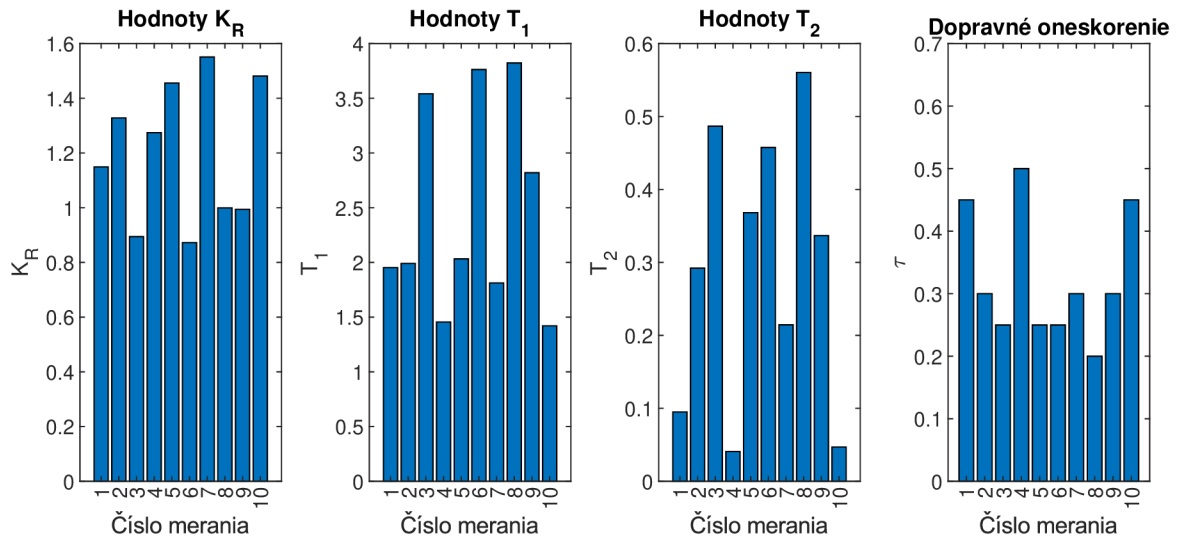
Časové konštanty vystupujúce v prenose operátora by bolo možné odstrániť deriváciou vstupného signálu (regulačnej odchýlky) a následnou identifikáciou prenosu statického zosilnenia. Výsledkom by bol prenos  $F_R(p) = K_R p \cdot e^{-\tau p}$ , opäť ale platný iba v rozsahu frekvencií, ktoré sú obsiahnuté v budiacom signále. Tento prenos by bol navyše fyzikálne nerealizovateľný a nebolo by možné generovať simulovaný akčný zásah pomocou funkcie `lsim` pre porovnanie so skutočne nameraným zásahom. Z tohto dôvodu bude prenos operátora uvažovaný v tvare rovnice 5.6.

### 5.2.1 Odozvy merané so štandardnou tuhosťou volantu

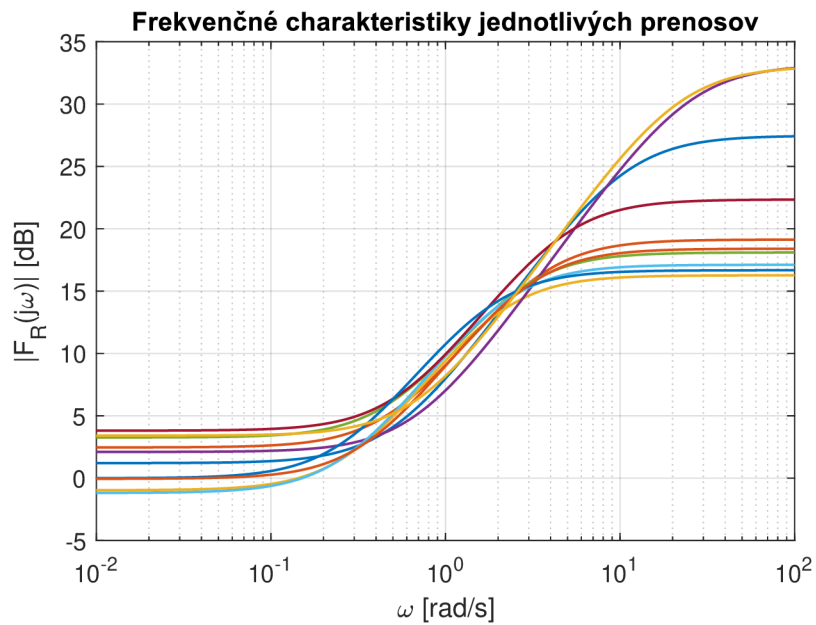
Z nameraných dát je možné určiť priemerné hodnoty jednotlivých koeficientov prenosu operátora.

$$\overline{F_R(p)} = \frac{\overline{K_R}(\overline{T_1} p + 1)}{\overline{T_2} p + 1} \cdot e^{-\overline{\tau} p} = \frac{1,1999(2,461 p + 1)}{0,2899 p + 1} \cdot e^{-0,325 p} \quad (5.7)$$

Identifikované operátorové prenosy dosiahli v priemere 68,26 % zhodu s nameranými dátami. Hodnoty identifikovaných parametrov pre jednotlivé merania sú zobrazené na obrázku 5.8 a frekvenčné charakteristiky identifikovaných prenosov sú zobrazené na obrázku 5.9.

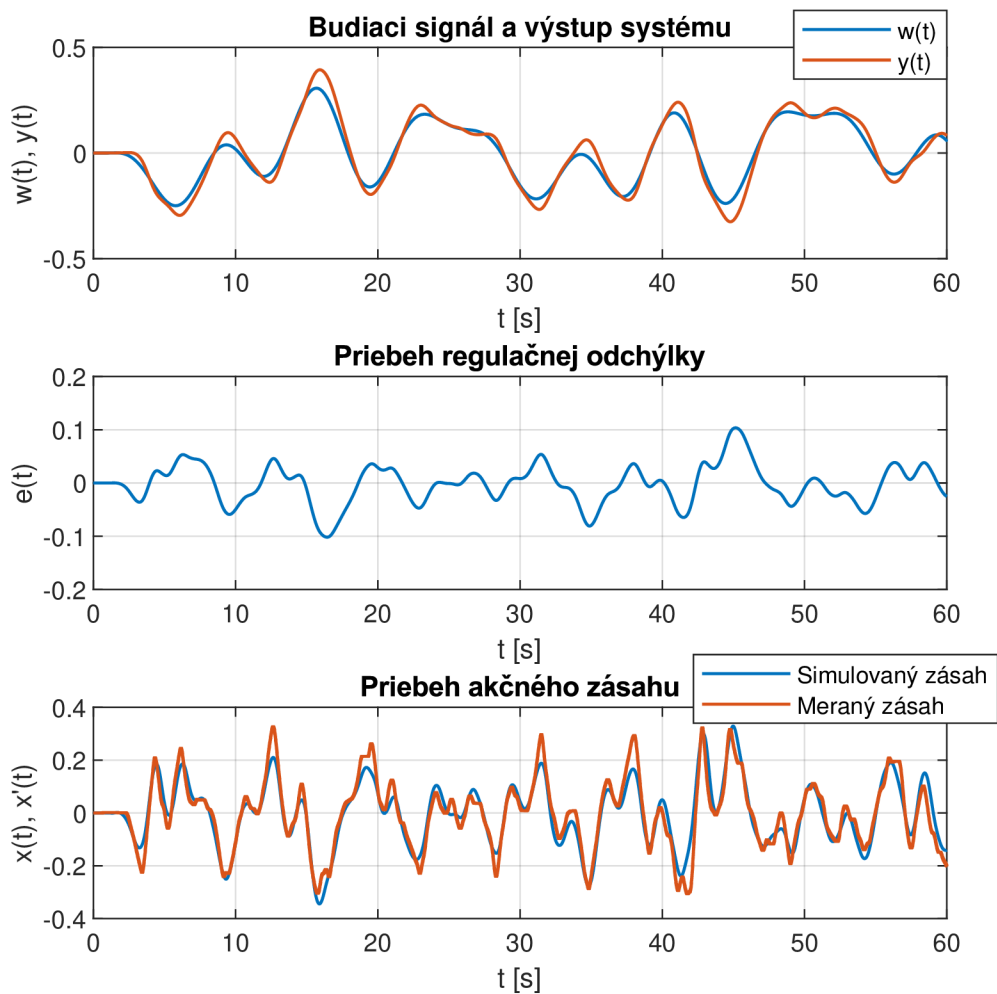


Obr. 5.8: Hodnoty parametrov prenosov operátora pri odozve na systém  $K_S/p^2$  s periodickým budiacim signálom a štandardnou tuhosťou volantu



Obr. 5.9: Frekvencné charakteristiky operátora pre sústavu  $K_S/p^2$  s periodickým budiacim signálom a štandardnou tuhosťou volantu

Na obrázku 5.10 je zobrazený časový priebeh meraných veličín pre 7. meranie.



Obr. 5.10: Priebehy meraných veličín počas jedného merania pre sústavu  $K_S/p^2$  s periodickým budiacim signálom a štandardnou tuhosťou volantu

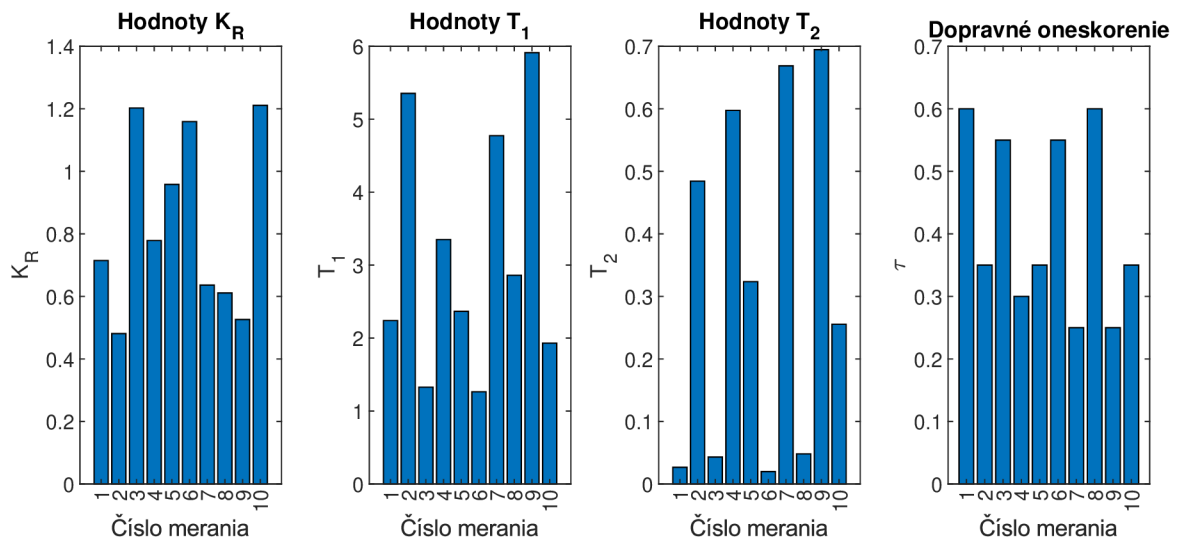
### 5.2.2 Odozvy merané s nulovou tuhosťou volantu

Z nameraných dát je možné určiť priemerné hodnoty jednotlivých koeficientov prenosu operátora.

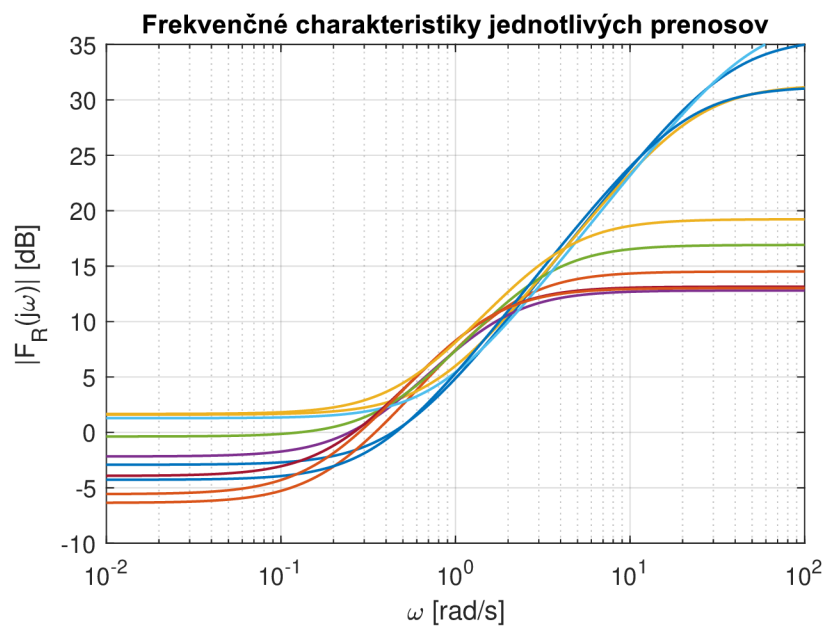
$$\overline{F_R(p)} = \frac{\overline{K_R}(\overline{T_1}p + 1)}{\overline{T_2}p + 1} \cdot e^{-\overline{\tau}p} = \frac{0,8279(3,1383p + 1)}{0,3162p + 1} \cdot e^{-0,415p} \quad (5.8)$$

Identifikované operátorové prenosy dosiahli v priemere 66,43 % zhodu s nameranými dátami. Hodnoty identifikovaných parametrov pre jednotlivé merania sú zobrazené na obrázku 5.11 a frekvenčné charakteristiky identifikovaných prenosov sú

zobrazené na obrázku 5.12.

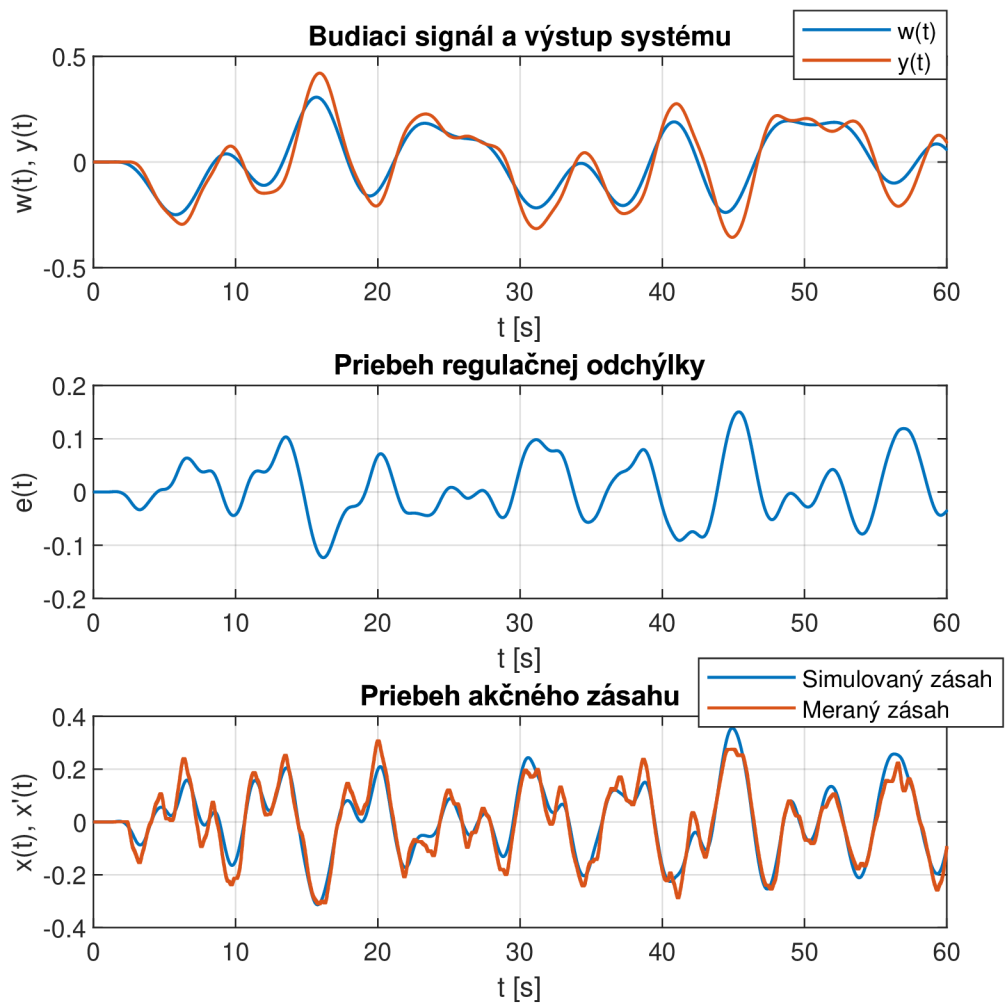


Obr. 5.11: Hodnoty parametrov prenosov operátora pri odozve na systém  $K_S/p^2$  s periodickým budiacim signálom a nulovou tuhosťou volantu



Obr. 5.12: Frekvenčné charakteristiky operátora pre sústavu  $K_S/p^2$  s periodickým budiacim signálom a nulovou tuhosťou volantu

Na obrázku 5.13 je zobrazený časový priebeh meraných veličín pre 5. meranie.



Obr. 5.13: Priebehy meraných veličín počas jedného merania pre sústavu  $K_S/p^2$  s periodickým budiacim signálom a nulovou tuhosťou volantu

### 5.3 Zhrnutie zistených výsledkov

Na základe identifikovaných prenosov a analýzou ich frekvenčných charakteristík je možné konštatovať, že výsledky odpovedajú teoretickým predpokladom, ktoré plynú z McRuerových modelov. Teoretický prenos operátora pri regulácii sústavy  $1/p^2$  je  $K_R p e^{-\tau p}$ . Takýto prenos je ale fyzikálne nerealizovateľný a preto sa k nemu môžeme iba priblížiť.

Pri PRBS budiacom signále frekvenčná charakteristika skutočne stúpa podľa teórie so sklonom +20 dB na dekádu až do určitej frekvencie. Vyššie frekvencie

ale operátor už nedokáže prenášať a preto sa aj frekvenčná charakteristika láme a odkláňa od teórie. Pri periodickom budiacom signále má frekvenčná charakteristika v oblasti, kde bol systém budený, taktiež sklon +20 dB na dekádu. Mimo tejto oblasti boli síce identifikované zlomy, ale identifikácia na týchto frekvenciách už nie je hodnoverná, pretože systém bol budený iba na frekvenciách obsiahnutých v budiacom signále.

Opäť, ako pri sústave  $5/p$  v kapitole 4, tvar prenosu operátora nie je zhodný pre rôzne budiace signály. Pri regulácii sústavy  $1/p^2$  je tento rozdiel ešte výraznejší. Optimálny prenos operátora má úplne iný tvar. V prípade PRBS budiaceho signálu má prenos operátora jednu nulu a 2 póly, ktoré tvoria kmitavý článok. Pri periodickom budiacom signále má optimálny prenos operátora jednu nulu a jeden pól.

### Vplyv tuhosti volantu na regulačný dej:

Z identifikovaných prenosov je možné usúdiť, že vplyv tuhosti volantu na reguláciu je závislý na budiacom signále. Pri regulácii s periodickým budiacim signálom a nulovou tuhosťou volantu bol zistený značný pokles zosilnenia v prenose operátora oproti meraniam so štandardnou tuhosťou volantu. Znamená to, že pri štandardnej tuhosti volantu bol regulačný dej s periodickým budiacim signálom kvalitnejší a rýchlejší.

Naproti tomu, pri meraniach s PRBS budiacim signálom boli identifikované prenosy operátora so štandardnou a nulovou tuhosťou bez výrazných zmien, prakticky by sa dali považovať za zhodné. Vplyv tuhosti volantu na regulačný dej bol pri PRBS budiacom signále zanedbateľný.

Tab. 5.1: Porovnanie experimentálne zistených a teoretických prenosov operátora

Budiaci signál	Tuhosť volantu	Zistený $F_R(p)$	Teoretický $F_R(p)[1]$
PRBS	Štandardná	$\frac{K_R(T_1 p + 1)}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1} \cdot e^{-\tau p}$	$K_R p \cdot e^{-\tau p}$
	Nulová		
Periodický	Štandardná	$\frac{K_R(T_1 p + 1)}{T_2 p + 1} \cdot e^{-\tau p}$	
	Nulová		



Tab. 5.2: Konkrétne tvary identifikovaných prenosov

Budiaci signál	Tuhosť volantu	Zistený $F_R(p)$
PRBS	Štandardná	$\frac{0,3147p}{0,5939^2p^2+2\cdot 0,269\cdot 0,5939p+1} \cdot e^{-0,66p}$
	Nulová	$\frac{0,3586p}{0,5019^2p^2+2\cdot 0,2398\cdot 0,5019p+1} \cdot e^{-0,675p}$
Periodický	Štandardná	$\frac{1,1999(2,461p+1)}{0,2899p+1} \cdot e^{-0,325p}$
	Nulová	$\frac{0,8279(3,1383p+1)}{0,3162p+1} \cdot e^{-0,415p}$

V tabuľke 5.1 sú uvedené všeobecné tvary prenosov identifikovaných pri regulácii sústavy  $1/p^2$  a v tabuľke 5.2 sú zhrnuté prenosy s konkrétnymi hodnotami jednotlivých koeficientov. Prenosy sú v tabuľke 5.2 prepočítané na základe vyššie uvedených údajov.

# Záver

V rámci tejto bakalárskej práce bola najskôr popísaná teória modelovania systémov človek-stroj pomocou McRuerových modelov. Následne bol vytvorený program v prostredí MATLAB Simulink, ktorý slúžil na zaznamenávanie akčného zásahu ľudského operátora, ktorý bol do systému vnášaný pomocou volantu. V rámci tohto programu bolo možné voliť typ regulovanej sústavy, časový priebeh žiadanej hodnoty (buď PRBS alebo signál získaný súčtom sínusových signálov) a tuhosť volantu. Nakoniec boli navrhnuté kombinácie sústavy a budiaceho signálu otestované na jednom operátorovi.

Parametre jednotlivých sústav a budiacich signálov boli optimalizované tak, aby bola regulácia pre operátora prijateľná. Teda aby regulácia nebola príliš rýchla alebo naopak príliš pomalá a aby výchylky volantu pri regulácii boli primerané ľudským schopnostiam.

Prenosy operátora boli určené pri regulácii všetkých navrhnutých sústav. Budiaci signál PRBS bol použitý pri regulácii všetkých sústav, budiaci signál získaný súčtom sínusových signálov bol použitý iba pri regulácii sústavy  $K_S/p$  a sústavy  $K_S/p^2$ . Pri regulácii sústavy  $K_S/p^2$  boli merané odozvy operátora s dvomi tuhosťami volantu.

Na základne zistených prenosov, ktoré boli určené ako optimálne z hľadiska identifikácie prenosu operátora, a na základe obmedzení plynúcich z použitia funkcie `tfest` na určenie prenosu operátora je možné konštatovať, že zistené prenosy ľudského operátora približne odpovedajú McRuerovým modelom.

Konkrétny tvar optimálneho prenosu operátora, ako aj hodnoty jednotlivých koeficientov sú ale závislé jednak na priebehu žiadanej hodnoty, ktorou bol systém budený, ako aj na zvolenej tuhosti volantu.

Pokračovaním práce môže byť určenie optimálnej tuhosti volantu, pri ktorej budú reakcie ľudského operátora najrýchlejšie. Pre spresnenie popisu operátora by mohli byť použité nelineárne modely, ktoré by zohľadňovali ďalšie vlastnosti človeka, ako napríklad necitlivosť v okolí nuly. Bolo by tiež vhodné rozšíriť merania na viac operátorov pre získanie širšieho spektra vstupných dát.

# Literatúra

- [1] MCRUER, Duane T. a Ezra S. KRENDEL. *Mathematical models of human pilot behavior* [online]. Neuilly sur Seine: North Atlantic Treaty Organization, Advisory Group for Aerospace Research and Development, 1974 [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://www.sto.nato.int/publications/AGARD/AGARD-AG-188/AGARD-AG-188.pdf>
- [2] HAVLÍKOVÁ, Marie. *Diagnostika systémů s lidským operátorem* [online]. Brno, 2009 [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=10269](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=10269). Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [3] RASMUSSEN, Jens. *Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics [online]. 1983, SMC-13(3), 257-266 [cit. 2022-05-03]. ISSN 0018-9472. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TSMC.1983.6313160>
- [4] MICHALIK, D., O. MIHALIK, M. JIRGL a P. FIEDLER. *Driver Behaviour Modeling With Vehicle Driving Simulator*. IFAC-PapersOnLine [online]. 2019, 52(27), 180-185 [cit. 2021-12-22]. ISSN 24058963. Dostupné z: [doi:10.1016/j.ifacol.2019.12.753](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.753)
- [5] XU, Shutting et. al. *Review of control models for human pilot behavior*. Annual Reviews in Control [online]. 2017 [cit. 2021-12-21]. ISSN: 1367-5788. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136757881730024X?via%3Dihub>
- [6] HESS, R.A. *Analyzing manipulator and feel system effects in aircraft flight control*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics [online]. 20(4), 923-931 [cit. 2022-05-03]. ISSN 00189472. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/21.105091>
- [7] MULDER, Mark, David A. ABBINK a Erwin R. BOER. *The effect of haptic guidance on curve negotiation behavior of young, experienced drivers*. In: 2008 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics [online]. IEEE, 2008, 2008, s. 804-809 [cit. 2022-05-03]. ISBN 978-1-4244-2383-5. ISSN 1062-922X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2008.4811377>
- [8] *Závodní volant Driving Force* [online]. © 2021 Logitech. Všechna práva vyhrazena [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: <https://www.logitechg.com/cs-cz/products/driving/driving-force-racing-wheel.html>

- [9] JURA, Pavel. *Signály a systémy: Část 2: Spojité systémy*. Brno, 2017. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [10] *Mathworks Help Center: tfest* [online]. © 1994-2021 The MathWorks [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: [https://www.mathworks.com/help/ident/ref/tfest.html?searchHighlight=tfest&s\\_tid=srchtitle\\_tfest\\_1](https://www.mathworks.com/help/ident/ref/tfest.html?searchHighlight=tfest&s_tid=srchtitle_tfest_1)
- [11] *Mathworks Help Center: lsim* [online]. © 1994-2022 The MathWorks [cit. 2022-4-30]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/control/ref/lti.lsim.html>
- [12] BLAHA, Petr a Petr VAVŘÍN. *Řízení a regulace 1: Základy regulace lineárních systémů - spojité a diskrétní*. Brno. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.

## Zoznam symbolov a skratiek

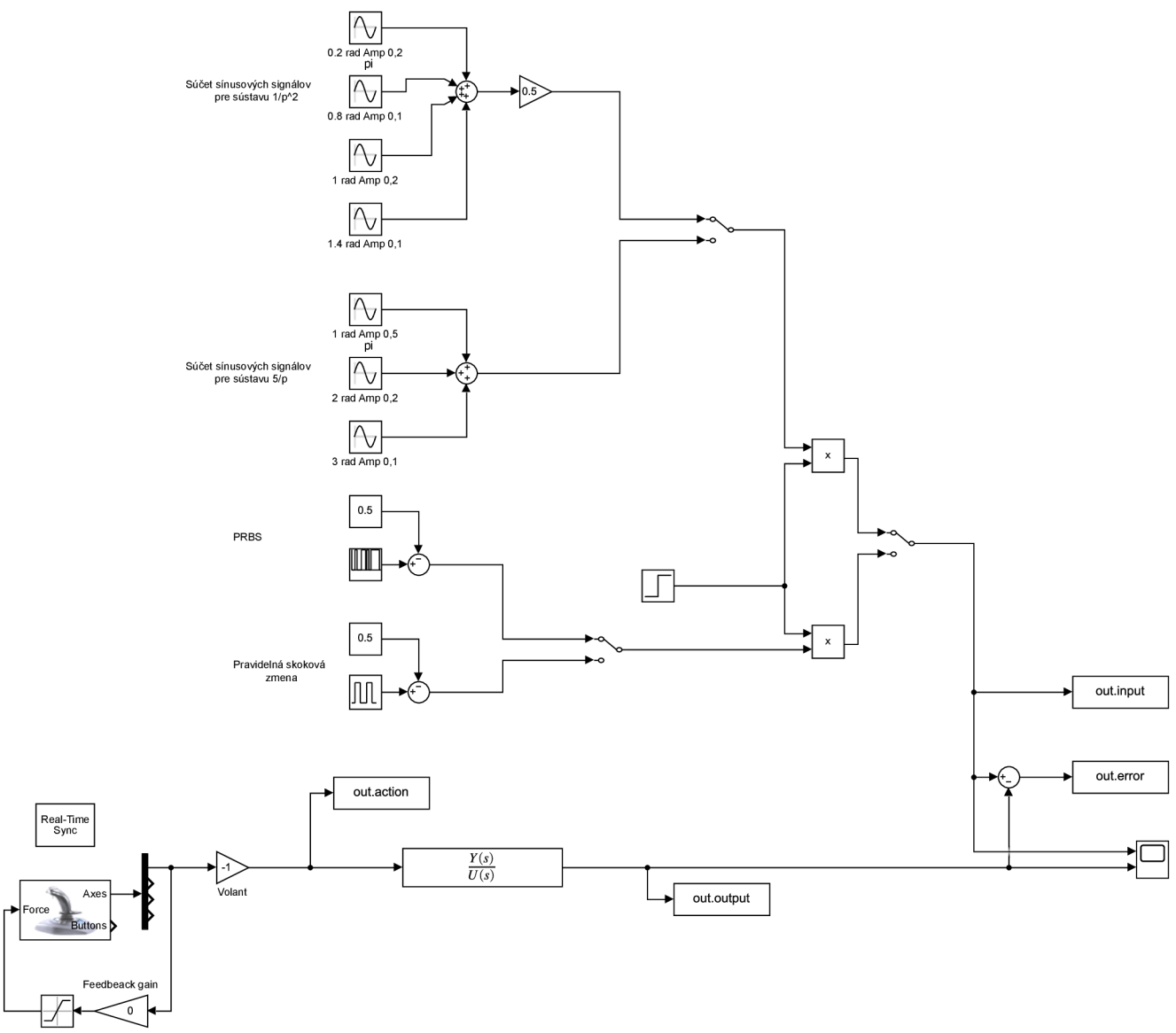
$c_m$	hodnota spektrálnej zložky
$E(p)$	Laplaceov obraz regulačnej odchýlky
$e(t)$	regulačná odchýlka v časovej oblasti
$F_0(p)$	operátorový prenos otvorenej slučky
$F_R(p)$	operátorový prenos ľudského operátora
$F_S(p)$	operátorový prenos sústavy
$F_W(p)$	operátorový prenos riadenia
$j$	imaginárna jednotka
$K_0$	zosilnenie v prenose otvorenej slučky
$K_R$	zosilnenie v prenose operátora
$K_S$	zosilnenie v prenose sústavy
$k$	číslo kroku v diskretnom signále
$m$	číslo spektrálnej zložky
<b>PRBS</b>	Pseudo random binary sequence
$p$	Laplaceov operátor
$\sigma(t)$	jednotkový skok
$\omega$	uhlová frekvencia
$\omega_r$	uhlová frekvencia rezu (frekvencia, pri ktorej platí $ F_0(j\omega)  = 1$ )
$T, T_1, T_2$	časové konštanty systému
$t$	čas
$\tau$	dopravné oneskorenie operátora
$\tau_d$	dopravné oneskorenie displeja
$w(t)$	žiadaná hodnota v časovej oblasti
$X(p)$	Laplaceov obraz akčného zásahu

$x(t)$	nameraný akčný zásah v časovej oblasti
$x'(t)$	simulovaný akčný zásah v časovej oblasti
$\xi$	koeficient tlmenia
$y(t)$	výstup systému v časovej oblasti

# Zoznam príloh

A Schéma programu MATLAB Simulink	55
B Obsah elektronickej prílohy	56

# A Schéma programu MATLAB Simulink



Obr. A.1: Simulačná schéma v prostredí MATLAB Simulink



## B Obsah elektronickej prílohy

V nasledujúcej schéme je znázornená štruktúra archívu elektronickej prílohy. Elektronickej príloha je dostupná na priloženom CD. Obsahuje všetky vytvorené programy v prostredí MATLAB a nastavby MATLAB Simulink. Sú tu dostupné všetky priebehy, ktoré boli použité pri určovaní prenosu operátora. Nachádza sa tu aj elektronickej verzia samotnej práce.

```
/.....koreňový adresár priloženého archívu
├── Matlab.....skripty a schémy vytvorené v programe MATLAB
│   ├── operator_identification.slx.....simulačná schéma v programe Simulink
│   ├── Sys_prop_estimation_single.m.....určenie parametrov pre 1 meranie
│   ├── Sys_prop_estimation.m.....určenie parametrov pre všetky merania
│   ├── Delay_vect.m.....identifikácia dopravného oneskorenia
│   ├── init_param.m.....inicializácia parametrov pre .slx súbor
│   └── save_data.m.....uloženie nameraných priebehov
├── Merane_data.....všetky zmerané priebehy
│   ├── K.....merania sústavy typu  $K_S$ 
│   ├── K-p.....merania sústavy typu  $K_S/p$ 
│   │   ├── PRBS.....merania sústavy typu  $K_S/p$  s PRBS budiacim signálom
│   │   └── sinus.....merania sústavy typu  $K_S/p$  so sínusovým budiacim signálom
│   ├── K-p+1.....merania sústavy typu  $K_S/(p+1)$ 
│   └── K-pp.....merania sústavy typu  $K_S/p^2$ 
│       ├── Tuhost.....merania so štandardnou tuhosťou volantu
│       │   ├── PRBS.....merania s PRBS budiacim signálom
│       │   └── sinus.....merania so sínusovým budiacim signálom
│       └── BezTuhosti.....merania nulovou tuhosťou volantu
│           ├── PRBS.....merania s PRBS budiacim signálom
│           └── sinus.....merania so sínusovým budiacim signálom
└── BP.pdf.....elektronickej verzia práce v .pdf formáte
```