



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

KOMPARATIVNÍ ANALÝZA DISKRÉTNÍCH REGULÁTORŮ PID

COMPARATIVE ANALYSIS OF DISCRETE PID CONTROLLERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matěj Pála

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Petr Pivoňka, CSc.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Matěj Pála

ID: 173718

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Komparativní analýza diskretních regulátorů PID

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Seznamte se s různými diskretními variantami struktur PID regulátorů [1],[2].
- 2) Naprogramujte struktury diskretních PID regulátorů s filtrací derivační složky a s potlačením překmitu typu I-PD, FF, filtrace žádané hodnoty.
- 3) Ověřte chování na zadaných simulačních a reálných modelech bez a s dopravním zpožděním (rovnice 1-5 z [3]). Parametry regulátorů určete Z-N metodou.
- 4) Získané výsledky zdokumentujte a vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] PIVOŇKA, P.: Číslicová řídicí technika, VUT Brno, skriptum, 2012
- [2] Firemní literatura B+R: PID Controllers
- [3] ÅSTRÖM, K., J., HÄGGLUND, T.: Benchmark Systems for PID Control.Proceedings IFAC Workshop, Terrassa, Spain, 2000.
- [4] PIVOŇKA, P.: Číslicová řídicí technika. Skriptum. VUT FEKT, Brno, 2012.

Termín zadání: 6. 2. 2017

Termín odevzdání: 29.5.2017

Vedoucí práce: prof. Ing. Petr Pivoňka, CSc.

Konzultant: Ing. Petr Malounek, B&R Brno



doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady



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

Bakalářská práce se zabývá analýzou a komplexním porovnáním různých struktur diskretních variant PID regulátorů související s testováním na stanovených simulačních a reálných modelech. V první teoretické části jsou popsány jednotlivé struktury diskretního PSD regulátoru. Zde je zmíněna Ziegler-Nicholsova metoda nastavování parametrů PID regulátorů a popis regulátoru používaného firmou B&R.

Druhá část práce je zaměřena na testování na stanovených modelech. Jsou zde uvedeny výsledky získané jak simulacemi, tak i testováním na reálných modelech. Porovnání výsledků za použití různých struktur diskretních variant PID regulátoru a výsledky získané testováním regulátoru firmy B&R.

Klíčová slova

Regulátor, PID, PSD, Ziegler-Nicholsova metoda, B&R PID regulátor

Abstract

Bachelor's thesis deals with an analysis and complex comparison of different structures of discrete variants of PID controllers related to testing at determined simulation and real models. In the first, theoretical, part are described different structures of discrete PSD controller. Also the Ziegler-Nichols method for determining parameters of these controllers is mentioned as the describe of B&R company used controller too.

The second part of this thesis is focused on testing at determined models. In this part, there are stated results of comparison different structures of discrete variants of PID controller also as results taken with B&R company controller.

Keywords

Controller, PID, PSD, Ziegler-Nichols method, B&R PID controller

Bibliografická citace

PÁLA, M. *Komparativní analýza diskrétních regulátorů PID*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 82 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Petr Pivoňka, CSc..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Komparativní analýza diskretních regulátorů PID jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne **26. května 2017**

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Prof. Ing. Petru Pivoňkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne **26. května 2016**

.....
podpis autora

OBSAH

1	Úvod.....	14
2	Spojité PID regulátory.....	15
3	Diskrétní PSD regulátory	16
3.1	Diskrétní PSD regulátor bez filtrace derivační složky	16
3.2	Diskrétní PSD regulátor s filtrací derivační složky.....	17
3.3	Diskrétní PSD regulátory s potlačením překmitu	18
3.3.1	Filtrace žádané hodnoty	18
3.3.2	Diskrétní S-PD regulátor.....	19
3.3.3	Dopředná vazba Feed – Forward	20
4	Regulátor firmy B&R.....	21
4.1	Regulátor MTBasicsPID	21
4.2	Model soustavy 1. řádu MTBasicsPT1	22
4.3	Model soustavy 2. řádu MTBasicsPT2	22
4.4	Model přenosu derivace 2. řádu MTBasicsDT2	23
4.5	Dopravní zpoždění - MTBasicsTimeDelay.....	23
4.6	Funkční blok harmonické analýzy MTBasicsOscillationTuning.....	24
4.7	Funkční blok aproximace přechodové charakteristiky MTBasicsStepTuning.....	25
5	Ziegler-Nicholsova metoda nastavování paramterů regulátorů.....	26
6	Testované modely soustav.....	27
7	Simulace prováděné na modelech	29
7.1	Soustava č. 1 (S1).....	30
7.2	Soustava č. 2 (S2).....	35
7.3	Soustava č. 3 (S3).....	38
7.4	Soustava č. 4 (S4).....	41
7.5	Soustava č. 5 (S5).....	44
7.6	Soustava č. 6 (S6).....	47
7.7	Soustava č. 7 (S7).....	53
7.8	Soustava č. 8 (S8).....	60
7.9	Soustava č. 9 (S9).....	63
7.10	Soustava č. 10 (S10).....	66
8	Testování na reálných modelech	69
8.1	Reálná soustava č. 1 (R1).....	70

8.2	Reálná soustava č. 2 (R2).....	76
9	Závěr.....	79
10	Literatura	81
	Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	82

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Principiální schéma reálného PID regulátoru [1]	15
Obr. 3.1: Principiální schéma PSD regulátoru [1]	16
Obr. 3.2: Principiální schéma PSD regulátoru s filtrací derivační složky [1]	17
Obr. 3.3: Principiální schéma filtru žádané hodnoty dle rovnice (3.4) [1]	18
Obr. 3.4: Principiální schéma diskrétního S-PD regulátoru [1]	19
Obr. 3.5: Principiální schéma diskrétního PSD regulátoru s dopřednou vazbou [1]	20
Obr. 4.1: Principiální schéma PID regulátoru MTBasicsPID používaného firmou B&R [2]	21
Obr. 4.2: Funkční blok - soustava 1. řádu [2]	22
Obr. 4.3: Funkční blok - soustava 2. řádu [2]	22
Obr. 4.4: Funkční blok - derivace 2. řádu [2]	23
Obr. 4.5: Funkční blok – Dopravní zpoždění [2]	23
Obr. 4.6: Příklad – Průběhy vstupu a výstupu funkčního bloku MTBasicsTimeDelay pro velikost dopravního zpoždění 5 vteřin [2]	23
Obr. 4.7: Funkční blok MTBasicOscillationTuning [2]	24
Obr. 4.8: Příklad – Průběh výstupu funkčního bloku MTBasicOscillationTuning při identifikaci systému [2]	24
Obr. 4.9: Funkční blok MTBasicsStepTuning [2]	25
Obr. 7.1: Průběhy výstupu regulované soustavy č. 1 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v Tab. 7.2	31
Obr. 7.2: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 7.2 (S1)	31
Obr. 7.3: Průběhy výstupu regulované soustavy č. 1 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v Tab. 7.3	32
Obr. 7.4: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 7.3 (S1)	33
Obr. 7.5: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 7.3 (S1)	33
Obr. 7.6: Průběhy výstupu regulované soustavy č. 2 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v Tab. 7.5	36
Obr. 7.7: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 7.5 (S2)	36
Obr. 7.8: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 7.5 (S2)	37

Obr. 7.9: Průběhy výstupu regulované soustavy č. 3 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v Tab. 7.7	39
Obr. 7.10: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 7.7 (S3).....	39
Obr. 7.11: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 7.7 (S3)	40
Obr. 7.12: Průběhy výstupu regulované soustavy č. 4 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v Tab. 7.9	42
Obr. 7.13: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 7.9 (S4).....	42
Obr. 7.14: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 7.9 (S4)	43
Obr. 7.15: Průběhy výstupu regulované soustavy č. 5 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v Tab. 7.11	45
Obr. 7.16: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 7.11 (S5).....	45
Obr. 7.17: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 7.11 (S5)	46
Obr. 7.18: Průběhy výstupu regulované soustavy č. 6 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v Tab. 7.13	48
Obr. 7.19: Detail průběhů výstupů regulované soustavy č. 6 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v Tab. 7.13 (S6).....	48
Obr. 7.20: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 7.13 (S6).....	49
Obr. 7.21: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 7.13 (S6)	49
Obr. 7.22: Průběhy výstupu regulované soustavy č. 6 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v Tab. 7.14	51
Obr. 7.23: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 7.14 (S6).....	51
Obr. 7.24: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 7.14 (S6)	52
Obr. 7.25: Průběhy výstupu regulované soustavy č. 7 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v Tab. 7.16	54
Obr. 7.26: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 7.16 (S7).....	54
Obr. 7.27: Průběh výstupu regulované soustavy č. 7 pro hodnoty parametrů regulátoru MTBasicsPID uvedených v Tab. 7.16 (S7)	55

Obr. 7.28: Průběh akčního zásahu regulátoru MTBasicsPID pro hodnoty parametrů tohoto regulátoru uvedených v Tab. 7.16 (S7)	55
Obr. 7.29: Průběhy výstupu regulované soustavy č. 7 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v Tab. 7.18	57
Obr. 7.30: Detail průběhů výstupu regulované soustavy č. 7 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v Tab. 7.18	57
Obr. 7.31: Průběhy výstupu regulované soustavy č. 7 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v Tab. 7.18	58
Obr. 7.32: Detailní průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 7.18 (S8)	58
Obr. 7.33: Průběhy výstupu regulované soustavy č. 8 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v Tab. 7.20	61
Obr. 7.34: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 7.20 (S8).....	61
Obr. 7.35: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 7.20 (S8)	62
Obr. 7.36: Průběhy výstupu regulované soustavy č. 9 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v Tab. 7.22	64
Obr. 7.37: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 7.22 (S9).....	64
Obr. 7.38: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 7.22 (S9)	65
Obr. 7.39: Průběhy výstupu regulované soustavy č. 10 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v Tab. 7.24	67
Obr. 7.40: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 7.24 (S10).....	67
Obr. 7.41: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 7.24 (S10)	68
Obr. 8.1: Průběhy výstupu reálné soustavy č. 1 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v Tab. 8.2	71
Obr. 8.2: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 8.2 (R1)	71
Obr. 8.3: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 8.2 (R2).....	72
Obr. 8.4: Průběh výstupu reálné soustavy č. 1 pro hodnoty parametrů regulátoru MTBasicsPID uvedených v Tab. 8.2	72
Obr. 8.5: Průběh akčního zásahu regulátoru MTBasicsPID pro hodnoty parametrů tohoto regulátoru uvedených v Tab. 8.2 (R1).....	73

Obr. 8.6: Průběhy výstupu reálné soustavy č. 1 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v Tab. 8.3	74
Obr. 8.7: Průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 8.3 (R1)	74
Obr. 8.8: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 8.3 (R1)	75
Obr. 8.9: Průběhy výstupu reálné soustavy č. 2 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v Tab. 8.5	77
Obr. 8.10: Průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 8.5 (R2)	77
Obr. 8.11: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v Tab. 8.5 (R2)	78

Seznam tabulek

Tab. 5.1: Nastavení parametrů regulátoru dle metody Ziegler-Nichols [3].....	26
Tab. 5.2: Nastavení regulátoru dle metody Ziegler-Nichols s úpravou pro omezení kmitavého průběhu [1].....	26
Tab. 7.1: Kritické parametry soustavy č. 1 získané pomocí Matlabu ($T_{vz} = 0,05s$)	30
Tab. 7.2: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle Tab. 5.1 a Tab. 7.1 (S1).....	30
Tab. 7.3: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle Tab. 5.2 a Tab. 7.1 (S1).....	32
Tab. 7.4: Kritické parametry soustavy č. 2 získané pomocí Matlabu ($T_{vz} = 0,05s$)	35
Tab. 7.5: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle Tab. 5.1 a Tab. 7.4 (S2).....	35
Tab. 7.6: Kritické parametry soustavy č. 3 získané pomocí Matlabu ($T_{vz} = 0,01s$)	38
Tab. 7.7: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle Tab. 5.1 a Tab. 7.6 (S3).....	38
Tab. 7.8: Kritické parametry soustavy č. 4 získané pomocí Matlabu ($T_{vz} = 0,05s$)	41
Tab. 7.9: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle Tab. 5.1 a Tab. 7.8 (S4).....	41
Tab. 7.10: Kritické parametry soustavy č. 5 získané pomocí Matlabu ($T_{vz} = 0,05s$)	44
Tab. 7.11: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle Tab. 5.1 a Tab. 7.10 (S5).....	44
Tab. 7.12: Kritické parametry soustavy č. 6 získané pomocí Matlabu ($T_{vz} = 0,01s$)	47
Tab. 7.13: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle Tab. 5.1 a Tab. 7.12 (S6).....	47
Tab. 7.14: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle Tab. 5.1 s upravenou hodnotou derivační časové konstanty (S6)	50
Tab. 7.15: Kritické parametry soustavy č. 7 získané pomocí Matlabu ($T_{vz} = 0,1s$)	53
Tab. 7.16: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle Tab. 5.1 a Tab. 7.15 (S7).....	53
Tab. 7.17: Kritické parametry soustavy č. 7 získané pomocí Matlabu ($T_{vz} = 0,01s$)	56
Tab. 7.18: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle Tab. 5.1 a Tab. 7.17 pro hodnotu periody vzorkování $T_{vz} = 0,01s$ (S7).....	56
Tab. 7.19: Kritické parametry soustavy č. 8 získané pomocí Matlabu ($T_{vz} = 0,01s$)	60
Tab. 7.20: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle Tab. 5.1 a Tab. 7.19 (S8).....	60
Tab. 7.21: Kritické parametry soustavy č. 9 získané pomocí Matlabu ($T_{vz} = 0,01s$)	63
Tab. 7.22: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle Tab. 5.1 a Tab. 7.21 (S9).....	63
Tab. 7.23: Kritické parametry soustavy č. 10 získané pomocí Matlabu ($T_{vz} = 0,05s$) ...	66
Tab. 7.24: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle Tab. 5.1 a Tab. 7.23 (S10).....	66
Tab. 8.1: Kritické parametry reálné soustavy č. 1 ($T_{vz} = 0,05s$)	70
Tab. 8.2: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle Tab. 5.1 a Tab. 8.1 (R1)	70
Tab. 8.3: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle Tab. 5.2 a Tab. 8.1 (R1)	73
Tab. 8.4: Kritické parametry reálné soustavy č. 2	76
Tab. 8.5: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle Tab. 5.1 a Tab. 8.4 (R2)	76

1 ÚVOD

V praxi je využívána regulace PID regulátory, i když v současnosti je regulace realizována diskretní formou PID regulátorů, tedy PSD regulátory realizovanými na mikroprocesorech. Existuje mnoho struktur těchto regulátorů, každá vyhovující jinému technologickému procesu.

V této bakalářské práci se chci zabývat komplexní analýzou a porovnáním různých diskretních variant PID regulátorů s diskretními variantami PID regulátorů používaných firmou B&R. Tedy porovnáním výchozích struktur diskretních variant PID regulátorů z [1] se zvolenými diskretními strukturami PID regulátorů z [2] Pro nastavení parametrů zmíněných regulátorů použiji Ziegler-Nicholovu (dále jen Z-N) metodu, která je v praxi dosti využívaná právě pro svou jednoduchost. Také podrobně analyzuji nastavení regulátorů užívané firmou B&R.

Samotné testování provedu na předem stanovených reálných a simulačních modelech, na kterých budu také ověřovat chování jednotlivých regulátorů. Zaměřím se hlavně na průběh přechodného děje při změně žádané hodnoty na vstupu regulátoru.

2 SPOJITÉ PID REGULÁTORY

Struktura spojitého PID regulátoru tak, jak je známa dnes, byla představena na počátku 20. století. Jak popisuje schéma na **Obr. 2.1** je PID regulátor tvořen proporcionální složkou, integrační a derivační složkou. [4] Odtud také pochází název tohoto regulátoru.

Regulátor je tedy popsán rovnicí (2.1), která je dána vztahem:

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.1)$$

Zde K je zesílení PID regulátoru,

T_I je integrační časová konstanta

T_D je derivační časová konstanta a

$e(t)$ je regulační odchylka, tedy rozdíl mezi požadovanou hodnotou výstupní veličiny a její skutečnou hodnotou.

$u(t)$ je výstupní veličina z regulátoru nazývána akční zásah

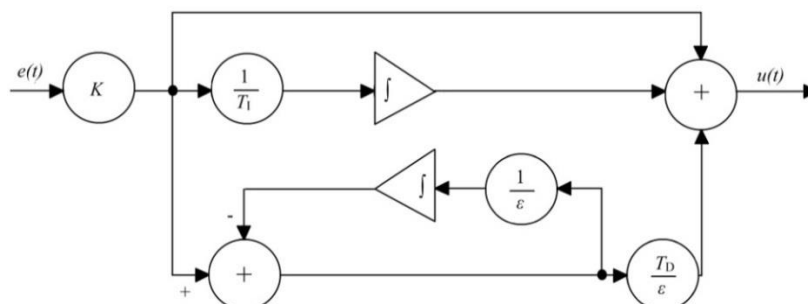
Rovnice (2.2) popisuje obraz PID regulátoru získaný použitím Laplaceovy transformace převodem z časové oblasti, resp. jeho přenosovou funkci. (ovšem za předpokladu, že počáteční podmínky jsou nulové).

$$F_R(p) = K \left(1 + \frac{1}{T_I p} + T_D p \right) \quad (2.2)$$

Realizace derivační složky v rovnici (2.2) neodpovídá realitě. Takto navržený regulátor není fyzikálně realizovatelný, proto se k derivační složce přidává tzv. realizační časová konstanta ε , kde $\varepsilon > 0$. (2.3)

$$F_R(p) = K \left(1 + \frac{1}{T_I p} + \frac{T_D p}{\varepsilon p + 1} \right) \quad (2.3)$$

Schéma reálného PID regulátoru, jak je popsán rovnicí 2.3, je zobrazeno na **Obr. 2.1**.



Obr. 2.1: Principiální schéma reálného PID regulátoru [1]

3 DISKRÉTNÍ PSD REGULÁTORY

V současné době jsou regulátory realizovány diskrétně. Součástí A/D převodníků je dnes vzorkovač a tvarovač, jež jsou nezbytné pro diskrétní řízení. Diskrétní regulátory pracují se vzorkovací periodou T_{vz} .

3.1 Diskrétní PSD regulátor bez filtrace derivační složky

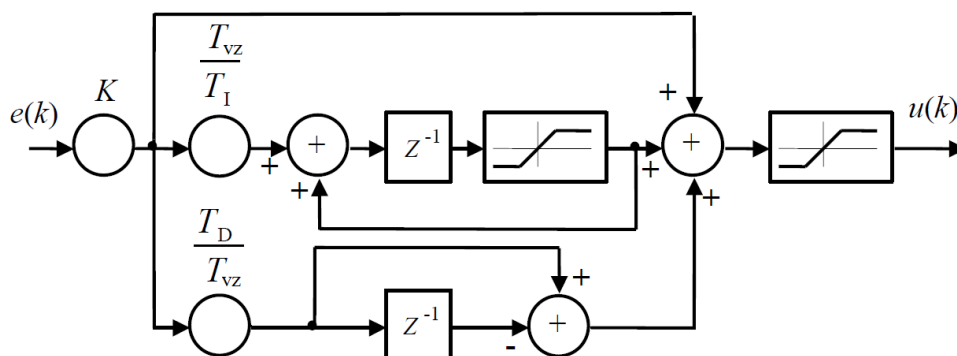
Diskrétní varianta PID regulátoru je dána diskretizací spojité verze PID regulátoru. V tomto případě je integrace nahrazena sumací a derivace diferencí. Diskretizací rovnice (2.1) dostaneme

$$u(k) = K(e(k) + \frac{T_{vz}}{T_I} \sum_{i=1}^k e(i) + \frac{T_D}{T_{vz}} (e(k) - e(k-1))) \quad (3.1)$$

Kde k je diskrétní krok. Avšak tato náhrada není optimální. Zpětnou Laplaceovou transformací a následnou z -transformací rovnice (2.2) dostaneme rovnici PSD regulátoru (S – sumace, D – difference)

$$F_R(z) = K(1 + \frac{T_{vz}}{T_I} \frac{z^{-1}}{(1-z^{-1})} + \frac{T_D}{T_{vz}} (1-z^{-1})) \quad (3.2)$$

Stavový diagram tohoto regulátoru s omezením akčních zásahů, jež jsou v praxi nezbytné, je na **Obr. 3.1**.



Obr. 3.1: Principiální schéma PSD regulátoru [1]

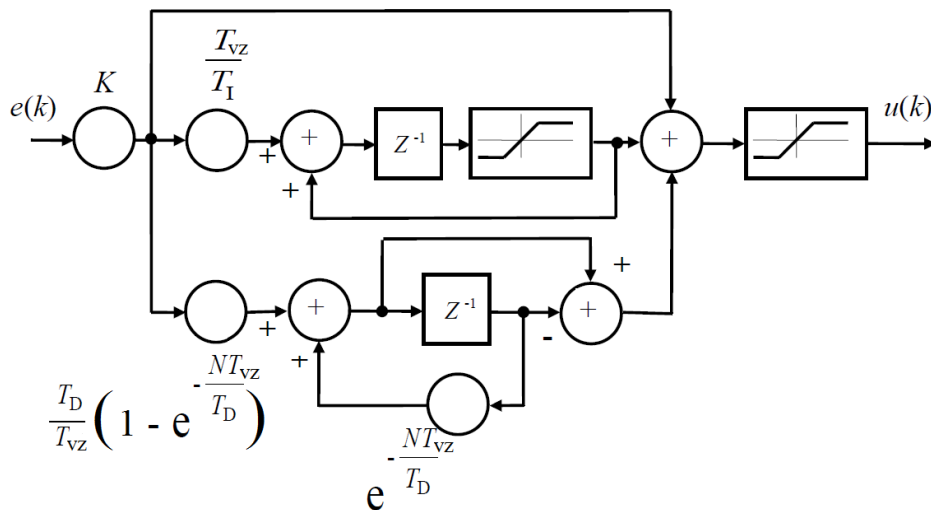
3.2 Diskrétní PSD regulátor s filtrací derivační složky

V praxi působí na regulační obvod různé poruchové signály. Jedním z nich může být šum. Ten je nežádoucí, protože derivační složka zesiluje rozdíl hodnot. V praxi by to znamenalo, že pro malé hodnoty vzorkovací periody T_{vz} by PSD regulátor bez filtrace derivační složky (1.5) řídil šum. Taktéž může za přítomnosti šumu derivační složka rozkmitávat obvod. Nejjednodušším řešením by bylo zavedení číslicového filtru na vstup regulátoru. Tím by ale byly do obvodu zaneseny další časové konstanty.

Jiným a v praxi používaným řešením je použití filtru jako součást derivační složky. Takovou náhradou pro celý rozsah period vzorkování je **Invariantní plocha derivační odezvy** [9] – rovnice (3.3). **Obr. 3.2** zobrazuje schéma PSD regulátoru s takovouto filtrací derivační složky.

$$F_D(z) = \frac{T_D}{T_{vz}} \left(1 - e^{-\frac{T_{vz}N}{T_D}} \right) \frac{1 - z^{-1}}{1 - e^{-\frac{T_{vz}N}{T_D}} z^{-1}} \quad (3.3)$$

Kde N je zesilovací činitel omezující na vyšších frekvencích. Je vhodné jej volit v rozsahu 3 až 20. Pro dosažení nejlepší filtrace se volí hodnota $N = 3$.



Obr. 3.2: Principiální schéma PSD regulátoru s filtrací derivační složky [1]

3.3 Diskrétní PSD regulátory s potlačením překmitu

V některých případech může být průběh regulované veličiny kmitavý. Úpravou vnitřní struktury regulátoru lze zamezit překmitu, avšak za cenu delší doby přechodného děje. Pro potlačení překmitu se používají tři základní struktury PSD regulátoru, jež jsou popsány dále.

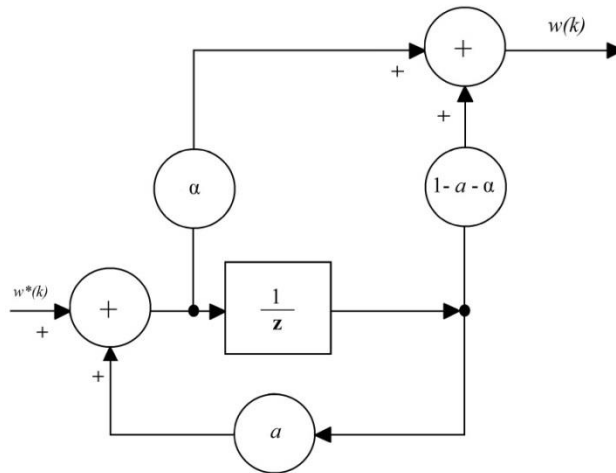
3.3.1 Filtrace žádané hodnoty

Jedním z možných zamezení překmitu při náběhu žádané hodnoty je použití filtru (3.4). Jedná se o kombinaci setrvačného a derivačního členu se setrvačným členem. Konstanta T_1 bývá volena $T_1 = T_I + T_D$. Parametr α se volí v rozmezí $<0,1$).

$$F_W(z) = Z \left\{ L^{-1} \left\{ \frac{\alpha T_1 s + 1}{T_1 s + 1} \right\} \right\} = \frac{\alpha + (1 - \alpha)z^{-1}}{1 - \alpha z^{-1}} = \frac{W(z)}{W^*(z)} \quad (3.4)$$

kde
$$a = e^{-\frac{T_{vz}}{T_1}}$$

Na **Obr. 3.3** je zobrazeno schéma tohoto filtru.



Obr. 3.3: Principiální schéma filtru žádané hodnoty dle rovnice (3.4) [1]

3.3.2 Diskrétní S-PD regulátor

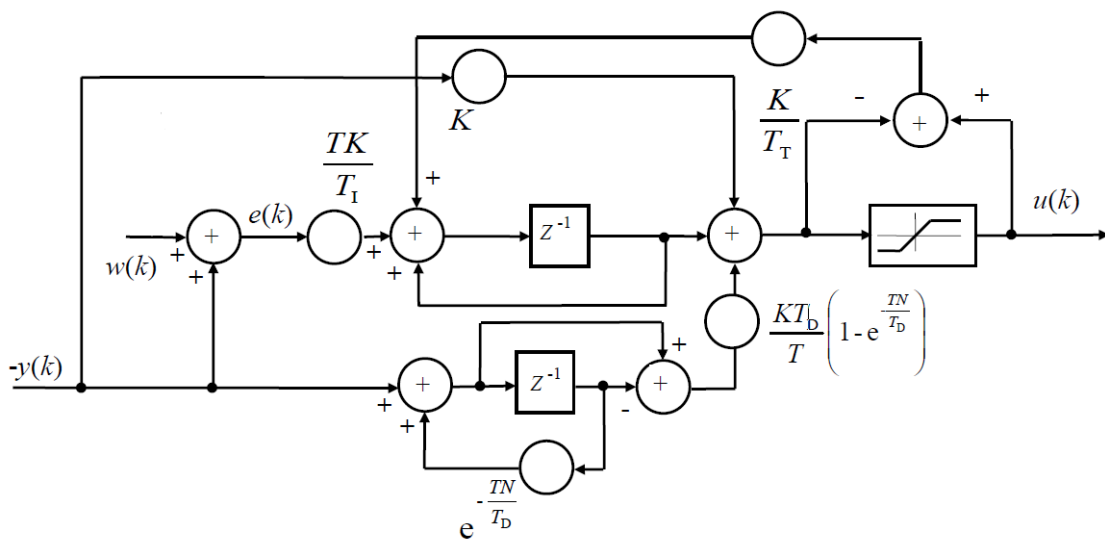
S-PD regulátor je variantou PSD regulátoru, má pouze pozměněnou vnitřní strukturu. Regulační odchylka e vstupuje pouze do sumační části. Do proporcionální a diferenční části vstupuje přímo záporně vzatá zpětná vazba z procesu, viz (3.5).

$$U(z) = K (-Y(z) + \frac{T_{vz} z^{-1}}{T_I (1 - z^{-1})} E(z) - \frac{T_D}{T_{vz}} \left(1 - e^{-\frac{T_{vz} N}{T_D}}\right) \frac{1 - z^{-1}}{1 - e^{-\frac{T_{vz} N}{T_D}} z^{-1}} Y(z)$$
 (3.5)

kde

$$E(z) = W(z) - Y(z)$$

U tohoto regulátoru je realizováno tzv. dynamické omezení přebuzení integrační složky.



Obr. 3.4: Principiální schéma diskrétního S-PD regulátoru [1]

Jednou z možností potlačení překmitu je také PS-D regulátor. Jeho struktura je téměř identická s S-PD regulátorem s tím rozdílem, že v případě PS-D regulátoru vstupuje regulační odchylka e i do proporcionální složky.

Oba zmíněné regulátory vycházejí z regulátoru nazývaného „Beta“ PSD regulátor [1]. Kde lze přepínat mezi těmito dvěma strukturami právě pomocí parametru „ β “.

3.3.3 Dopředná vazba Feed – Forward

Tato struktura PSD regulátoru je obdobou S-PD regulátoru. Jak popisuje **Obr. 3.5**, je kromě PSD regulátoru s filtrací derivační složky, do regulační smyčky zaveden ještě další regulátor. Ten obsahuje pouze P a D složky, do kterých vstupuje žádaná hodnota. Před vstupem do procesu je od výstupu již zmíněného klasického PSD regulátoru odečten výstup uvedených P a D složek. V případě regulátoru pro žádanou hodnotu je proporcionální složka řízena parametrem β . Pro $\beta = 1$ odpovídá Feed-Forward struktura S-PD regulátoru.

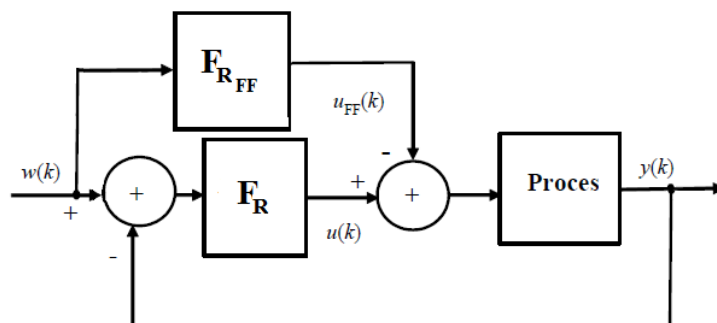
$$F_R(z) = K \left(E(z) + \frac{T_{vz} z^{-1}}{T_I (1 - z^{-1})} E(z) + \frac{T_D}{T_{vz}} \left(1 - e^{-\frac{-T_{vz} N}{T_D}} \right) \frac{1 - z^{-1}}{1 - e^{-\frac{-T_{vz} N}{T_D}} z^{-1}} E(z) \right) \quad (3.6)$$

kde

$$E(z) = W(z) - Y(z)$$

Pro regulátor žádané hodnoty platí rovnice (3.7).

$$F_{RFF}(z) = K \left(\beta W(z) + \frac{T_D}{T_{vz}} \left(1 - e^{-\frac{-T_{vz} N}{T_D}} \right) \frac{1 - z^{-1}}{1 - e^{-\frac{-T_{vz} N}{T_D}} z^{-1}} W(z) \right) \quad (3.7)$$



Obr. 3.5: Principiální schéma diskrétního PSD regulátoru s dopřednou vazbou [1]

4 REGULÁTOR FIRMY B&R

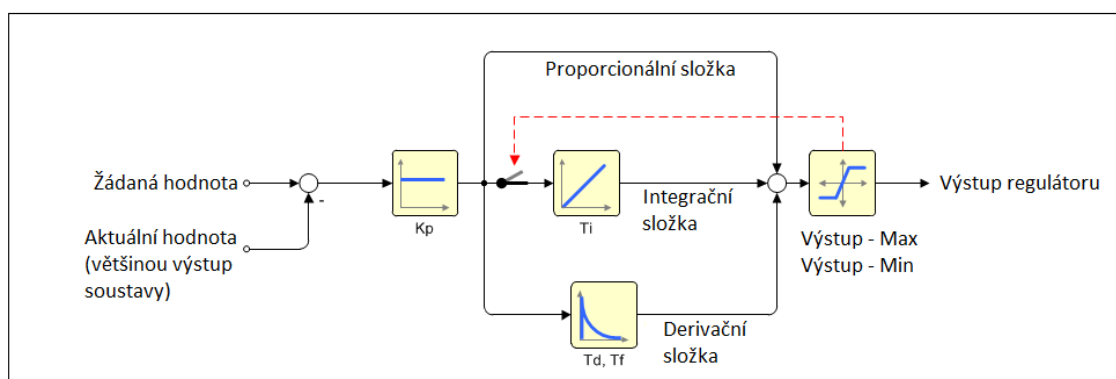
Firma B&R používá k nastavování regulátorů vývojové prostředí Automation Studio (dále jen AS). V jednotlivých knihovnách jsou umístěny funkční bloky realizující regulátory, modely soustav a i funkce pro identifikaci reálných soustav. Dále jsou uvedeny jednotlivé funkční bloky z knihovny MTBasics a popis jejich funkcí. Podrobný popis vstupu a výstupu těchto funkčních bloků je uveden v **příloze 1**.

4.1 Regulátor MTBasicsPID

Jedná se o PID regulátor, ten je v PLC vzorkován, pracuje tedy v podstatě jako PSD regulátor se vzorkovací periodou odpovídající jednomu cyklu programu vytvořeného a spouštěného v AS. Je však nastavován jako klasický spojitý PID regulátor, který lze popsat rovnicí (4.1). Ta odpovídá rovnici (2.3).

$$F_R(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} + \frac{T_d p}{T_f p + 1} \right) \quad (4.1)$$

Jak lze vidět z **Obr. 4.1**, je omezení přebuzení integrační složky realizováno tzv. „staticky“. Při překročení maximální (*Výstup – Max*) nebo minimální (*Výstup – Min*) nastavené výstupní hodnoty regulátoru je vypnuta integrační složka. Také regulační odchylka je počítána uvnitř tohoto regulátoru.



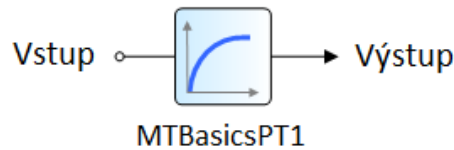
Obr. 4.1: Principiální schéma PID regulátoru MTBasicsPID používaného firmou B&R [2]

Samotné schéma funkčního bloku tohoto regulátoru s popisem je umístěno na **Obr. P1.5** v **příloze 1**.

4.2 Model soustavy 1. řádu MTBasicsPT1

V AS používá B&R i modely soustav. V tomto případě se jedná o model soustavy 1. řádu., jehož přenosová funkce je

$$F_S(p) = \frac{K}{(T_1p + 1)} \quad (4.2)$$

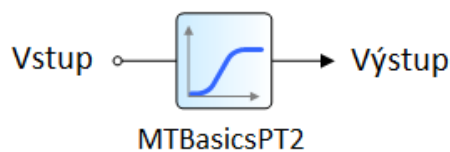


Obr. 4.2: Funkční blok - soustava 1. řádu [2]

4.3 Model soustavy 2. řádu MTBasicsPT2

Podobně jako systém 1. řádu je v knihovně AS obsažen i model soustavy druhého řádu.

$$F_S(p) = \frac{K}{(T_1p + 1)(T_2p + 1)} \quad (4.3)$$

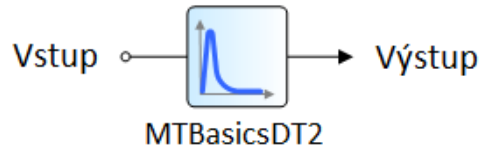


Obr. 4.3: Funkční blok - soustava 2. řádu [2]

4.4 Model přenosu derivace 2. řádu MTBasicsDT2

Tento funkční blok modeluje systém s přenosem:

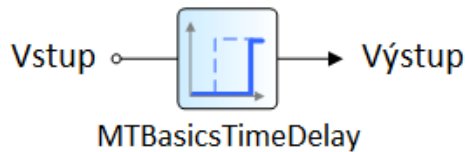
$$F_S(p) = \frac{Kp}{(T_1p + 1)(T_2p + 1)} \quad (4.4)$$



Obr. 4.4: Funkční blok - derivace 2. řádu [2]

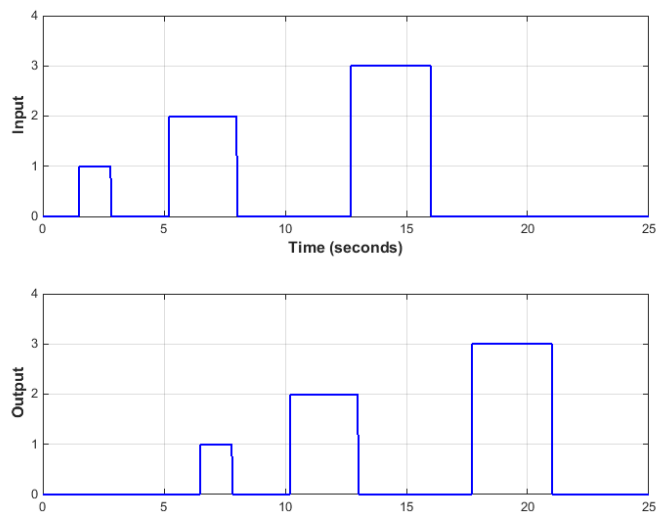
4.5 Dopravní zpoždění - MTBasicsTimeDelay

Tento funkční blok, taktéž z knihovny MTBasics, slouží k simulaci dopravního zpoždění a zařazuje buď před anebo za soustavu.



Obr. 4.5: Funkční blok – Dopravní zpoždění [2]

Na Obr. 4.6 je zobrazen příklad průběhu vstupu a výstupu funkčního bloku MTBasicsTimeDelay pro dopravní zpoždění 5 vteřin.

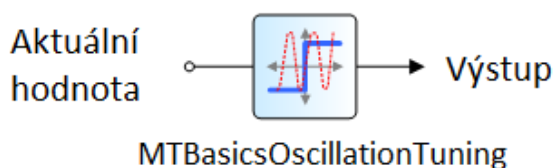


Obr. 4.6: Příklad – Průběhy vstupu a výstupu funkčního bloku MTBasicsTimeDelay pro velikost dopravního zpoždění 5 vteřin [2]

4.6 Funkční blok harmonické analýzy

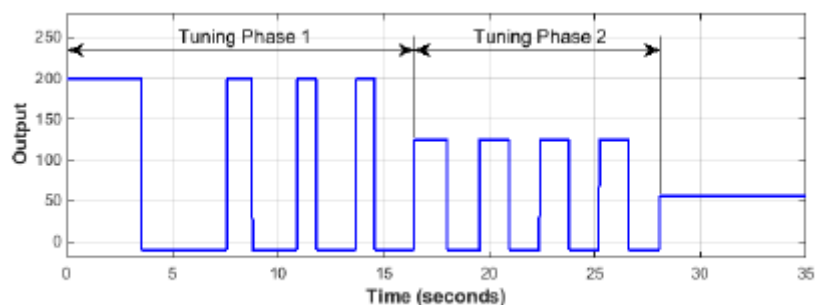
MTBasicsOscillationTuning

Tento funkční blok na základě rozkmitání zvolené soustavy pomocí relé bez hystereze zjišťuje periodu netlumených kmitů vyvolaných požitím tohoto relé. Následně pomocí druhé Z-N metody navrhne parametry PID regulátoru. Tedy, proporcionální zesílení K_p , integrační časovou konstantu T_i , derivační časovou konstantu T_d a časovou konstantu filtru derivační složky T_f . To jsou parametry PID regulátoru z rovnice (4.1).



Obr. 4.7: Funkční blok MTBasicOscillationTuning [2]

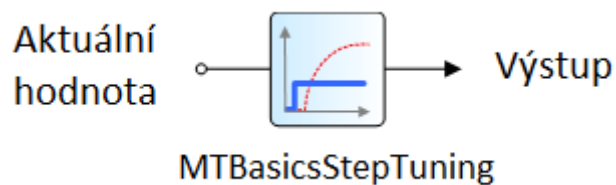
Funkční blok MTBasicsOscillationTuning provádí analýzu systému ve dvou fázích, jak ukázáno na příkladu na **Obr. 4.8**. V první části analýzy (Tuning Phase 1) je systém rozkmitáván přiváděním maximální a minimální možné hodnoty na výstup bloku. V druhé fázi (Tuning Phase 2) je automaticky snížena hodnota výstupu tohoto bloku.



Obr. 4.8: Příklad – Průběh výstupu funkčního bloku MTBasicOscillationTuning při identifikaci systému [2]

4.7 Funkční blok aproximace přechodové charakteristiky MTBasicsStepTuning

Jak napovídá název, tento funkční blok určí parametry regulátoru (rovnice 4.1) na základě aproximace přechodové charakteristiky identifikovaného systému. A to přivedením jednotkového skoku na vstup identifikovaného systému. Tento blok se, stejně jako funkční blok MTBasicsOscillationTuning, zapojuje do uzavřené smyčky před soustavu.



Obr. 4.9: Funkční blok MTBasicsStepTuning [2]

Výstupem obou identifikačních bloků (viz **příloha 1**) je také kvalita provedené identifikace v procentech. Ta vyjadřuje, s jakou přesností jsou určeny parametry regulátoru, neboli s jakou přesností lze těmto hodnotám věřit a považovat je za správné.

5 ZIEGLER-NICHOLSOVA METODA NASTAVOVÁNÍ PARAMETERŮ REGULÁTORŮ

Roku 1942 J. G. Ziegler a N. B. Nichols zveřejnili metody nastavování parametrů regulátorů (dále jen Z-N). Druhá z těchto metod, v praxi často používaná, předpokládá uvedení regulovaného systému na mez stability. Na mezi stability systém kmitá netlumenými kmity. Následně je měřena perioda těchto kmitů nazývaná T_{krit} a také zesílení K_{krit} při kterém tyto kmity vznikly. Metoda Z-N je v praxi dosti využívána právě pro svou jednoduchost. V **Tab. 5.1** [4] jsou uvedeny parametry pro návrh regulátorů touto metodou. Takto navržené regulátory většinou regulují žádanou hodnotu s třemi až čtyřmi viditelnými překmity.

Tab. 5.1: Nastavení parametrů regulátoru dle metody Ziegler-Nichols [3]

Typ Regulátoru	K	T_I	T_D
PID	$0,6K_{krit}$	$0,5T_{krit}$	$0,125T_{krit}$
PI	$0,45K_{krit}$	$0,83T_{krit}$	
P	$0,5K_{krit}$		

V praxi je dnes často potřeba zajistit málo kmitavý přechodný děj, případně přechodný děj bez překmitu. V **Tab. 5.2** jsou uvedeny experimentálně zjištěné hodnoty pro nastavení parametrů regulátorů s omezením překmitu. [1] Tímto způsobem lze zajistit přechodný děj se dvěma viditelnými překmity.

Tab. 5.2: Nastavení regulátoru dle metody Ziegler-Nichols s úpravou pro omezení kmitavého průběhu [1]

Typ Regulátoru	K	T_I	T_D
PID	$0,3K_{krit}$	T_{krit}	$0,125T_{krit}$
PI	$0,2K_{krit}$	T_{krit}	
P	$0,25K_{krit}$		

V některých případech z technologických nebo bezpečnostních důvodů není možno přivést systém na mez stability. Další možné principy zjištění parametrů systému jsou uvedeny v [4].

6 TESTOVANÉ MODELY SOUSTAV

Pro účely testování parametrů PID regulátorů vydali K.J. Aström a T. Häglund soupis systémů, s nimiž se lze v praxi setkat [3]. Jedná se o systémy, na nichž se provádí testování (benchmark). V této práci se zaměřím na 9 z těchto systémů.

- Systémy s vícenásobnými póly

Soustava č. 1 (**S1**)

$$F_1(p) = \frac{1}{(p+1)^3}$$

Soustava č. 2 (**S2**)

$$F_2(p) = \frac{1}{(p+1)^4}$$

- Systém čtvrtého řádu

Soustava č. 3 (**S3**)

$$F_3(p) = \frac{1}{(p+1)(0,5p+1)(0,5^2p+1)(0,5^3p+1)}$$

- Fázově neminimální systémy třetího řádu

Soustava č. 4 (**S4**)

$$F_4(p) = \frac{1-0,1p}{(p+1)^3}$$

Soustava č. 5 (**S5**)

$$F_5(p) = \frac{1-0,2p}{(p+1)^3}$$

➤ Systémy prvního řádu s dopravním zpožděním
Soustava č. 6 (**S6**)

$$F_6(p) = \frac{1}{(1 + 0,5p)} e^{-p}$$

Soustava č. 7 (**S7**)

$$F_7(p) = \frac{1}{(1 + 2p)} e^{-p}$$

➤ Systémy druhého řádu s dopravním zpožděním
Soustava č. 8 (**S8**)

$$F_8(p) = \frac{1}{(1 + 0,5p)^2} e^{-p}$$

Soustava č. 9 (**S9**)

$$F_9(p) = \frac{1}{(1 + 2p)^2} e^{-p}$$

Soustava č. 10 (**S10**)

$$F_{10}(p) = \frac{2}{(10p + 1)(p + 1)^2}$$

7 SIMULACE PROVÁDĚNÉ NA MODELECH

Simulace na modelech zmíněných v kapitole 6 byly prováděny pomocí programu Matlab a jeho nadstavby Simulink. Ve vývojovém prostředí Automation Studio (V4.1.9.44) byly prováděny simulace za použití regulátoru MTBasicsPID zmíněném v kapitole 4. V tomto případě byly jednotlivé modely soustav realizovány kaskádním (sériovým), případně paralelním zapojením funkčních bloků uvedených v **kapitole 4**. Parametry všech regulátorů byly navrženy dle Z-N metody – **Tab. 5.1**, případně dle Z-N metody s úpravou pro omezení kmitání (**Tab. 5.2**). Kritické parametry jednotlivých soustav byly zjištěny v Matlabu pomocí funkce margin (u každé soustavy bylo započítáno dopravní zpoždění o velikosti poloviny periody vzorkování).

Zobrazeny jsou vždy 2 nebo 3 grafy pro danou soustavu. Tedy graf s průběhem výstupu regulované soustavy, graf s průběhem akčních zásahů regulátorů a případně graf s detailnějším pohledem na průběh akčních zásahů při změně žádané hodnoty. U každé soustavy je uvedena tabulka s hodnotami nastavení parametrů regulátorů a je zde také zmíněno, v jakém čase a kam působí porucha.

Jednotlivé průběhy na následujících obrázcích jsou označeny zkratkou pro daný regulátor.

Značení:

PSD	PSD regulátor (popsán rovnicí (3.2))
PSD FDS	PSD regulátor s filtrací derivační složky (rovnice (3.2), kde derivační složka je realizována dle rovnice (3.3))
PSD – FF	PSD regulátor s dopřednou vazbou (rovnice (3.6) a (3.7))
S-PD	S-PD regulátor (popsán rovnicí (3.5))
PSD FZH	PSD regulátor s filtrem žádané hodnoty, který popisuje rovnice (3.4)
MTBasicsPID	MTBasicsPID regulátor (dle rovnice (4.1))

V **příloze č. 2** jsou zobrazeny tabulky s nastavením hodnot parametrů regulátorů a výsledné průběhy simulací, jak je tomu v této kapitole, pro nastavení zmíněných parametrů dle B&R. Tedy za použití funkčních bloků MTBasicsStepTuning a MTBasicsOscillationTuning

Pozn.: V mnoha případech, v grafech výstupů regulovaných soustav, zakrývá legenda průběh poruchy. Jakmile však porucha začne působit, působí až do konce přechodného děje, byť její průběh není kompletně zobrazen.

7.1 Soustava č. 1 (S1)

Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,05$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na poslední člen $\frac{1}{(p+1)}$ soustavy v čase $t = 20$ s.

$$F_1(p) = \frac{1}{(p + 1)^3}$$

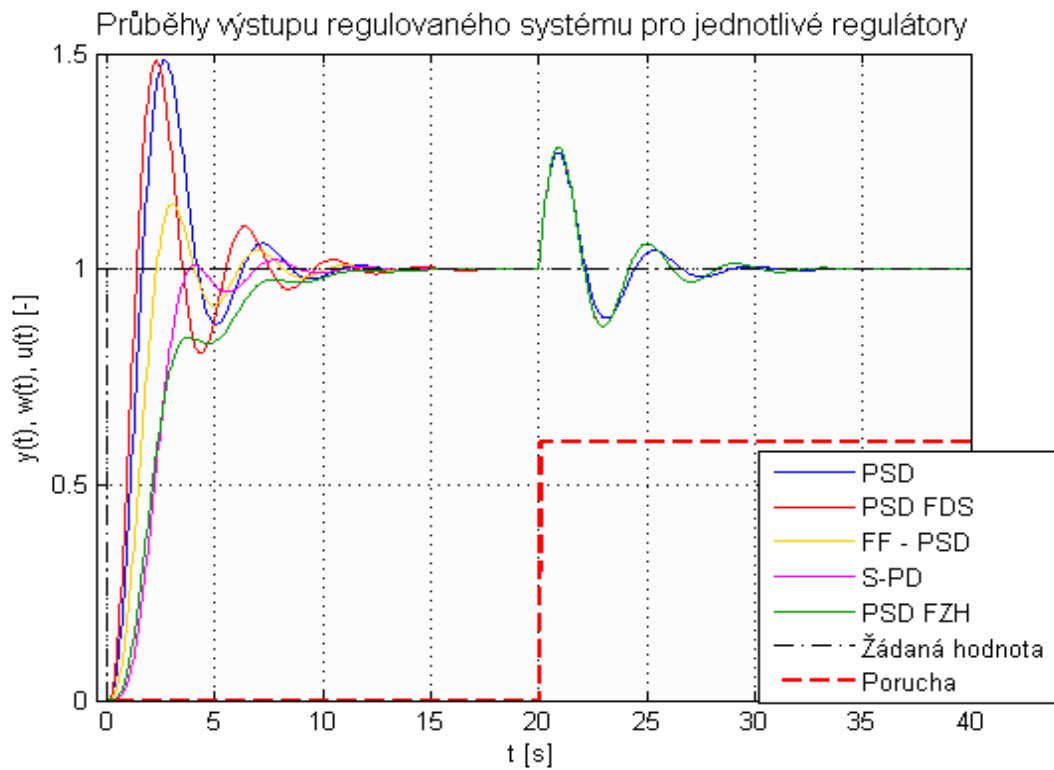
Tab. 7.1: Kritické parametry soustavy č. 1 získané pomocí Matlabu ($T_{vz} = 0,05$ s)

Kritické zesílení	$K_{krit} [-]$	7,4482
Kritická perioda	$T_{krit} [s]$	3,7457

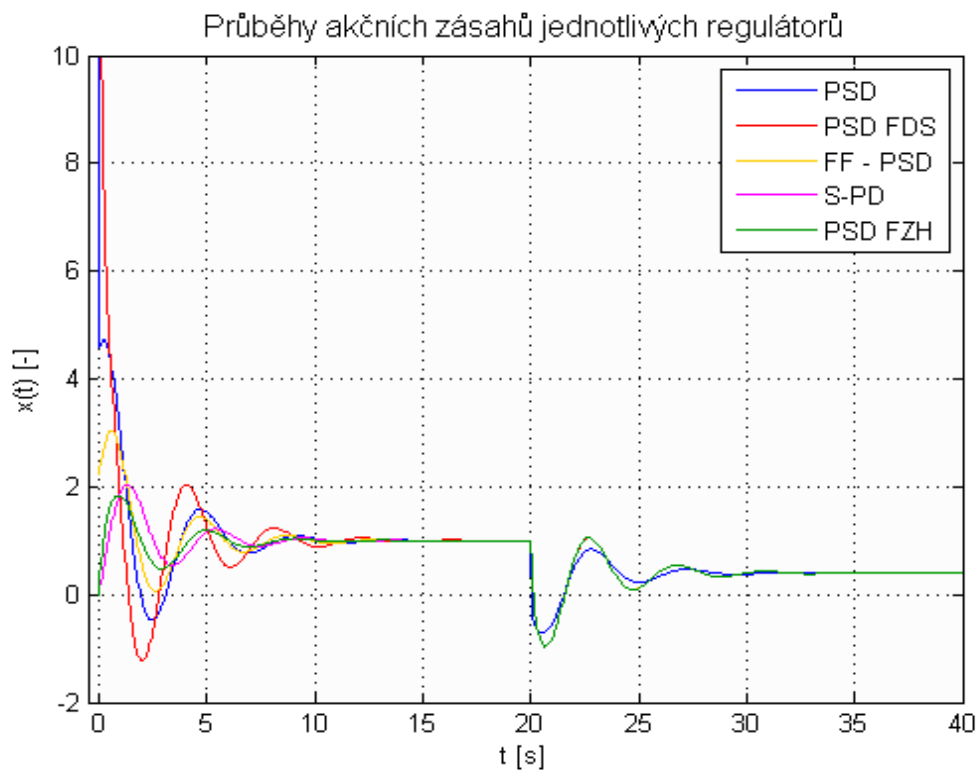
Tab. 7.2: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle **Tab. 5.1** a **Tab. 7.1 (S1)**

Perioda vzorkování	$T_{vz} [s]$	0,05	Zesilovací činitel filtru derivační složky	N [-]	3
Zesílení regulátoru	$K[-]$	4,4689	Filtr žádané hodnoty	$\alpha [-]$	0,0
Integrační časová konstanta	$T_I [s]$	1,8728		$T_I [s]$	2,341
Derivační časová konstanta	$T_D [s]$	0,4682	AntiW (S-PD)	$T_T [s]$	2,341
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	$T_f [s]$	0,04682	Feed Forward	$\beta [-]$	0,5

Na **Obr. 7.1** jsou zobrazeny průběhy výstupu soustavy za použití všech regulátorů mimo regulátor používaný firmou B&R a to regulátor MTBasicsPID. Výstup regulované soustavy pro regulátor MTBasicsPID je zobrazen samostatně na **Obr. P3.7** v **příloze 3** Totéž platí pro zobrazení akčních zásahů (**Obr. 7.2, P3.8**).



Obr. 7.1: Průběhy výstupu regulované soustavy č. 1 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v **Tab. 7.2**



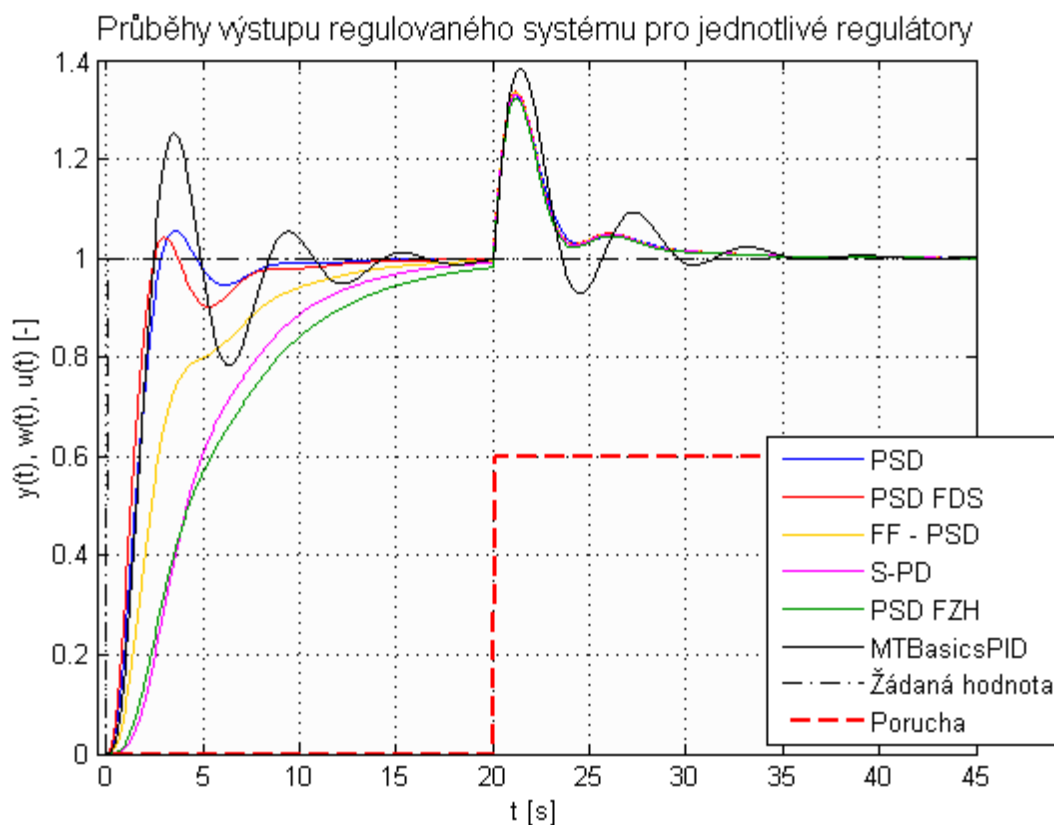
Obr. 7.2: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 7.2 (S1)**

Jak lze vidět na **Obr. P3.7** a **Obr. P3.8** v příloze 3, regulátor MTBasicsPID rozkmitá soustavu. Tento jev je pravděpodobně způsoben velkou hodnotou zesílení v kombinaci s malou hodnotou integrační časovou konstantou regulátoru.

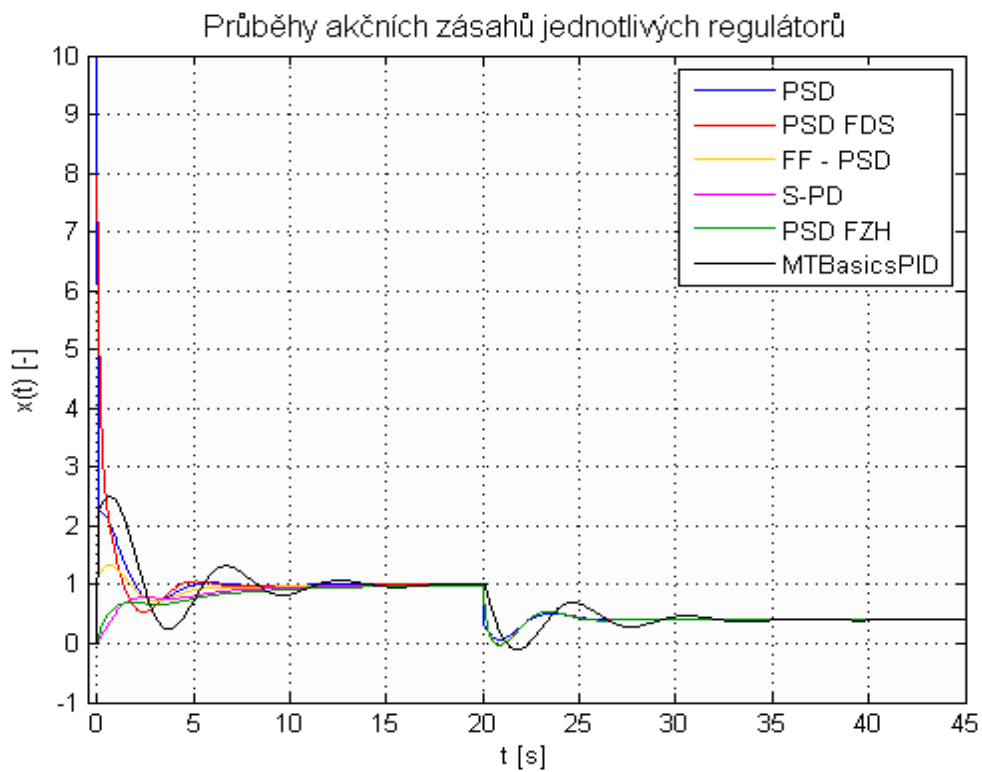
Proto byly parametry regulátoru nastaveny také dle Z-N metody s úpravou pro omezení kmitání. Jednotlivé hodnoty parametrů jsou uvedeny v **Tab. 7.3** a výsledné průběhy jsou zobrazeny na **Obr. 7.3**, **7.4** a **7.5**.

Tab. 7.3: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle **Tab. 5.2** a **Tab. 7.1** (S1)

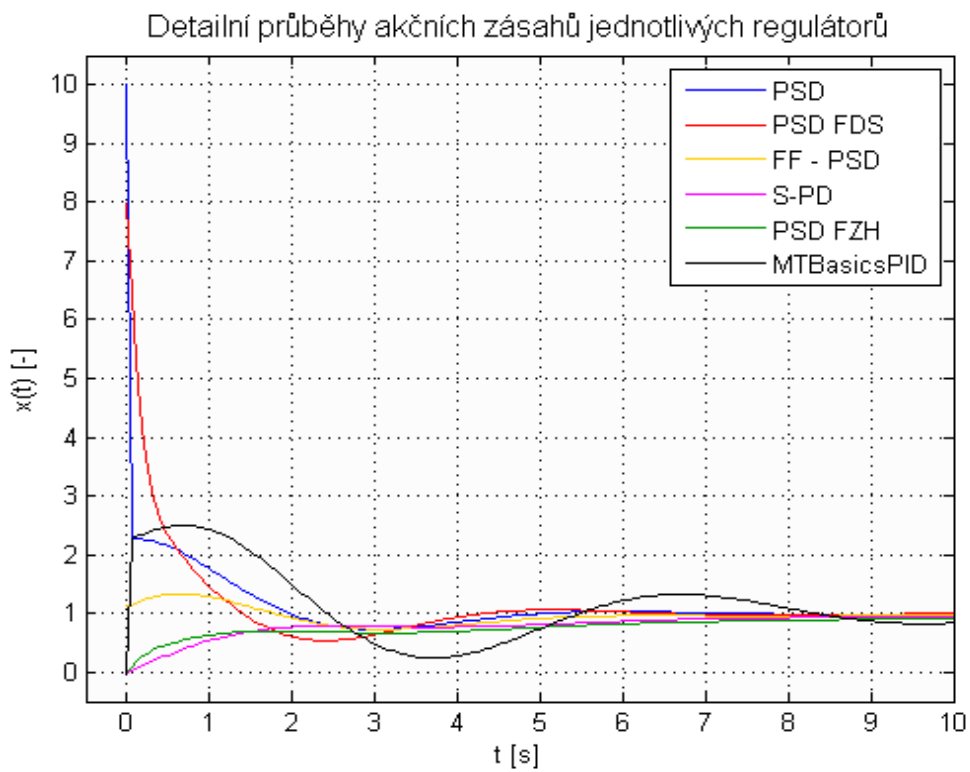
Perioda vzorkování	T_{vz} [s]	0,05	Zesilovací činitel filtru derivační složky	N [-]	3
Zesílení regulátoru	K [-]	2,2345	Filtr žádané hodnoty	α [-]	0,0
Integrační časová konstanta	T_I [s]	3,7457		T_I [s]	4,2139
Derivační časová konstanta	T_D [s]	0,4682	AntiW (S-PD)	T_T [s]	4,2139
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	T_f [s]	0,04682	Feed Forward	β [-]	0,5



Obr. 7.3: Průběhy výstupu regulované soustavy č. 1 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v **Tab. 7.3**



Obr. 7.4: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 7.3 (S1)**



Obr. 7.5: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 7.3 (S1)**

Na **Obr. 7.1** je ukázáno, že největší překmit (okolo 50%) mají PSD regulátor a PSD regulátor s filtrací derivační složky. Regulátory s potlačením překmitu, popsány v **podkapitole 3.3**, tento překmit částečně minimalizují

Na základě porovnání průběhů, při použití MTBasicsPID regulátoru, na **Obr. P3.7** a **Obr. 7.3**, lze konstatovat, že nižší hodnotou zesílení a prodloužením integrační časové konstanty lze docílit snad i „požadovaného“ přechodného děje. Na první pohled je však patrné, že průběh výstupu regulované soustavy č. 1 za použití tohoto regulátoru na **Obr. 7.3** (hodnoty parametrů dle **Tab. 7.3**), je dosti kmitavý oproti ostatním použitým regulátorům. PSD regulátor a PSD regulátor s filtrací derivační složky vykazují mírný překmit okolo 5%. U MTBasicsPID regulátoru je velikost prvního překmitu okolo 25%. To je v rozporu s tím, co je od použitého nastavení hodnot parametrů regulátorů vyžadováno, tedy omezení kmitavého průběhu přechodného děje. Proto je nutno brát v úvahu také velikost periody vzorkování. Zmenšením velikosti periody vzorkování na hodnotu $T_{vz} = 0,01s$ lze dosáhnout regulátorem MTBasicsPID požadovaného přechodného děje, jak je ukázáno na **Obr. P3.4** a na **Obr. P3.1** (původní Z-N nastavení) v **příloze 4**.

Dle očekávání regulátory pro potlačení překmitu eliminují překmit. (**Obr. 7.3**) Ale PSD regulátor s filtrem žádané hodnoty v tomto případě při působení poruchy ještě nedosáhl žádané hodnoty. Tento jev by se dal odstranit buď zmenšením hodnoty integrační časové konstanty, nebo úpravou parametru α již zmíněného filtru.

Průběhy výstupu regulované soustavy na **Obr. P2.1** v **příloze 2** (nastavení dle B&R) jsou dosti podobné průběhům získaným nastavením hodnot parametrů regulátorů Z-N metodou s úpravou pro omezení kmitání. V tomto případě je doba ustálení všech regulátorů mnohem kratší, což dáno hlavně menší hodnotou integrační časové konstanty. Podobně je tomu tak i u reakce na poruchu.

7.2 Soustava č. 2 (S2)

Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,05$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na poslední člen $\frac{1}{(p+1)}$ soustavy v čase $t = 25$ s.

$$F_2(p) = \frac{1}{(p + 1)^4}$$

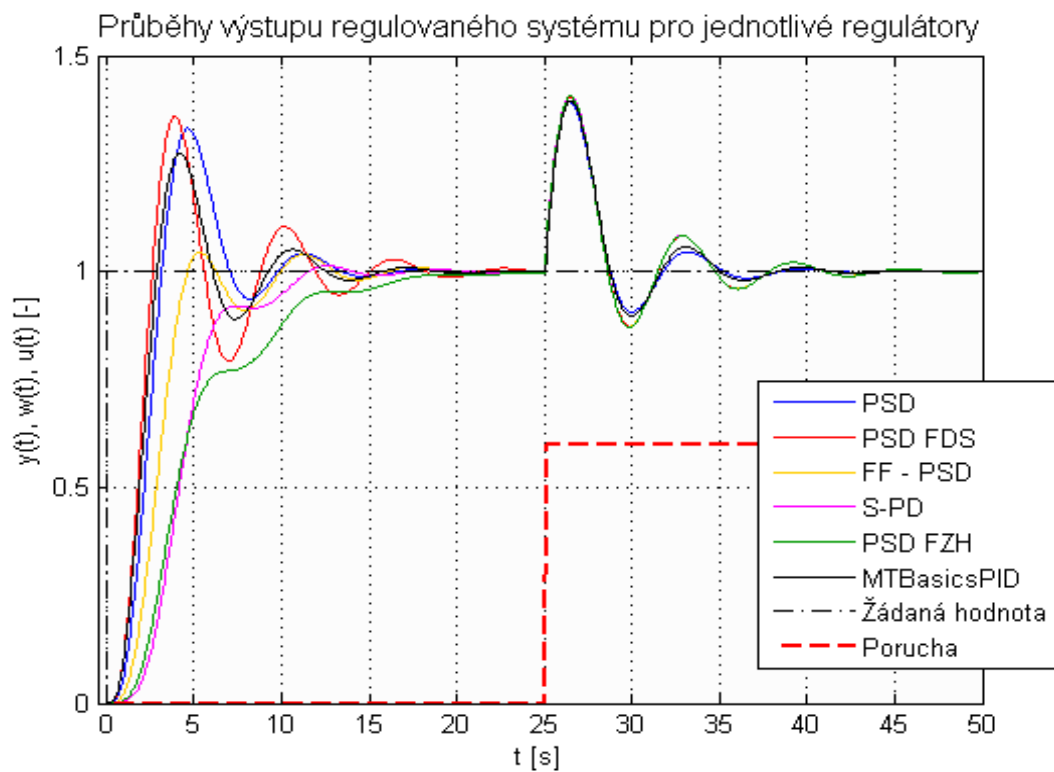
Tab. 7.4: Kritické parametry soustavy č. 2 získané pomocí Matlabu ($T_{vz} = 0,05$ s)

Kritické zesílení	$K_{krit} [-]$	3,9030
Kritická perioda	$T_{krit} [s]$	6,3612

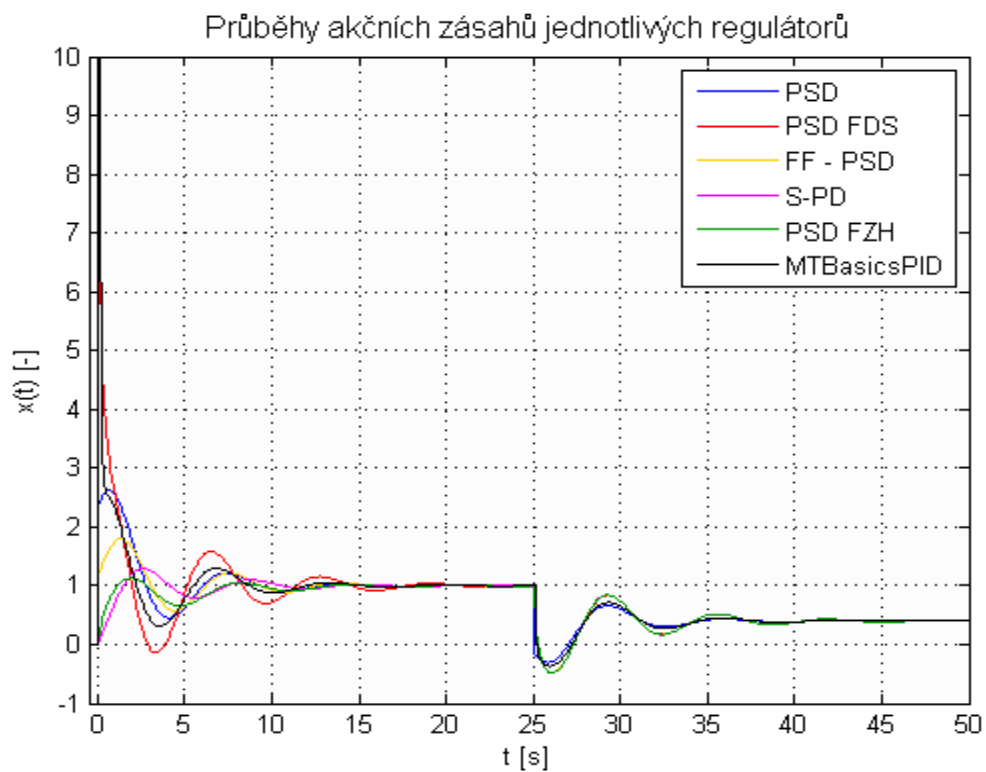
Tab. 7.5: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle **Tab. 5.1** a **Tab. 7.4 (S2)**

Perioda vzorkování	$T_{vz} [s]$	0,05
Zesílení regulátoru	$K[-]$	2,3418
Integrační časová konstanta	$T_I [s]$	3,1806
Derivační časová konstanta	$T_D [s]$	0,7952
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	$T_f [s]$	0,07952

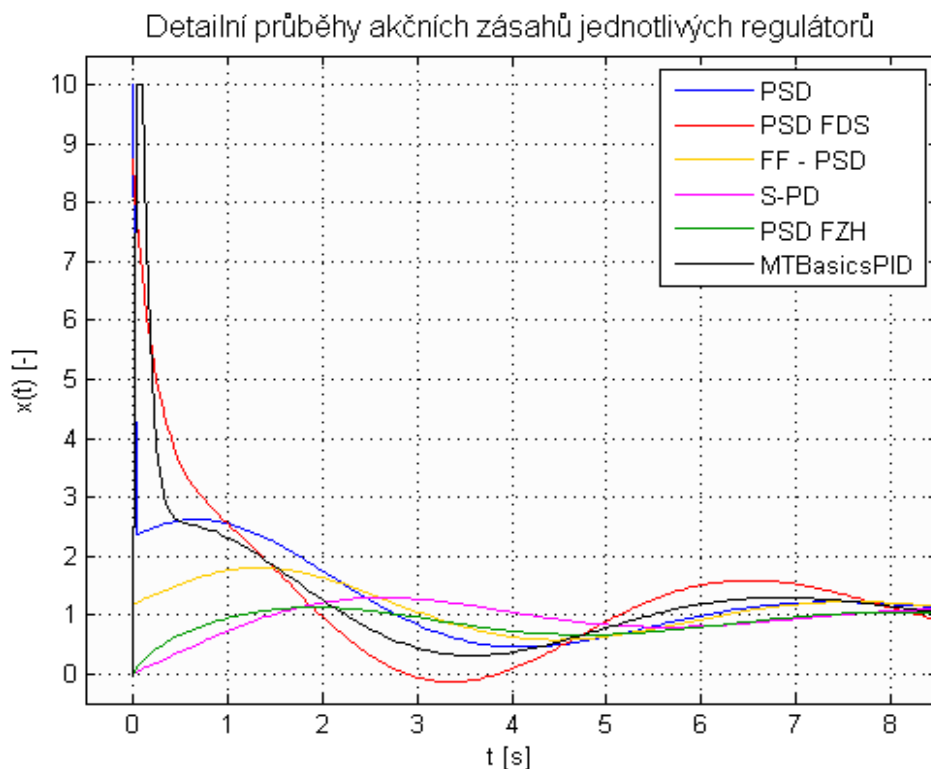
Zesilovací činitel filtru derivační složky	$N [-]$	3
Filtr žádané hodnoty	$\alpha [-]$	0,0
	$T_1 [s]$	3,9758
AntiW (S-PD)	$T_T [s]$	3,9758
Feed Forward	$\beta [-]$	0,5



Obr. 7.6: Průběhy výstupu regulované soustavy č. 2 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v **Tab. 7.5**



Obr. 7.7: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 7.5 (S2)**



Obr. 7.8: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 7.5 (S2)**

Soustava č. 2 má oproti soustavě č. 1 delší přechodný děj (čtvrtý řád, je pomalejší). Velikost prvního překmitu pro PSD regulátor je oproti soustavě č. 1 menší (asi 30%), jak je ukázáno na **Obr. 7.6** (nastavení dle Z-N). MTBasicsPID regulátor, resp. velikost prvního překmitu při náběhu žádané hodnoty je nižší než pro PSD regulátor a PSD regulátor s filtrací derivační složky. Průběh akčního zásahu pro MTBasicsPID regulátor je méně kmitavý než pro PSD regulátor s filtrací derivační složky. (**Obr. 7.7, 7.8**).

Menší hodnoty velikosti prvního překmitu při náběhu žádané hodnoty jsou u všech tří zmíněných regulátorů patrné při použití nastavení hodnot parametrů regulátorů dle B&R (oproti Z-N nastavení) – **příloha 2: Obr. P2.4**. Také průběh výstupu regulované soustavy pro S-PD regulátor a PSD regulátor s filtrem žádané hodnoty jsou plynulejší. (dáno hlavně menší hodnotou zesílení oproti Z-N nastavení). Reakce na poruchu je v obou případech dosti podobná, pouze u B&R nastavení je zmíněná porucha rychleji vyregulována (cca 22 s oproti 24 s).

7.3 Soustava č. 3 (S3)

Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,01$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na poslední dva členy soustavy $\frac{1}{(0,5^2p+1)(0,5^3p+1)}$ soustavy v čase $t = 10$ s.

$$F_3(p) = \frac{1}{(p+1)(0,5p+1)(0,5^2p+1)(0,5^3p+1)}$$

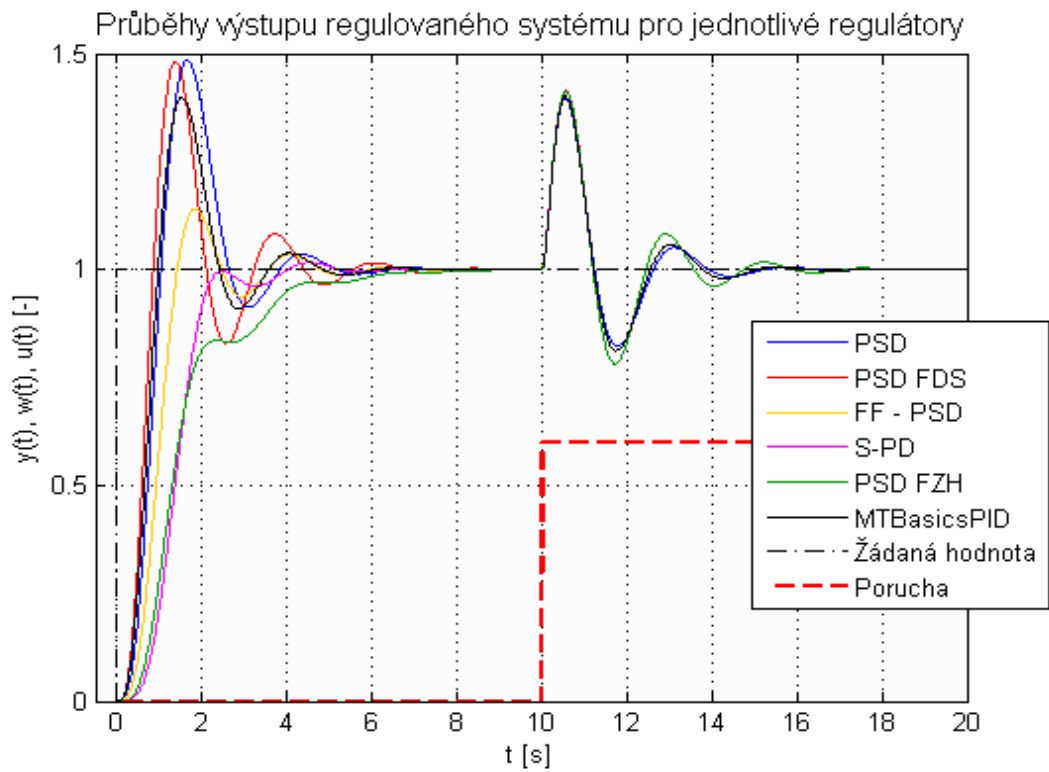
Tab. 7.6: Kritické parametry soustavy č. 3 získané pomocí Matlabu ($T_{vz} = 0,01$ s)

Kritické zesílení	$K_{krit} [-]$	6,6309
Kritická perioda	$T_{krit} [s]$	2,4141

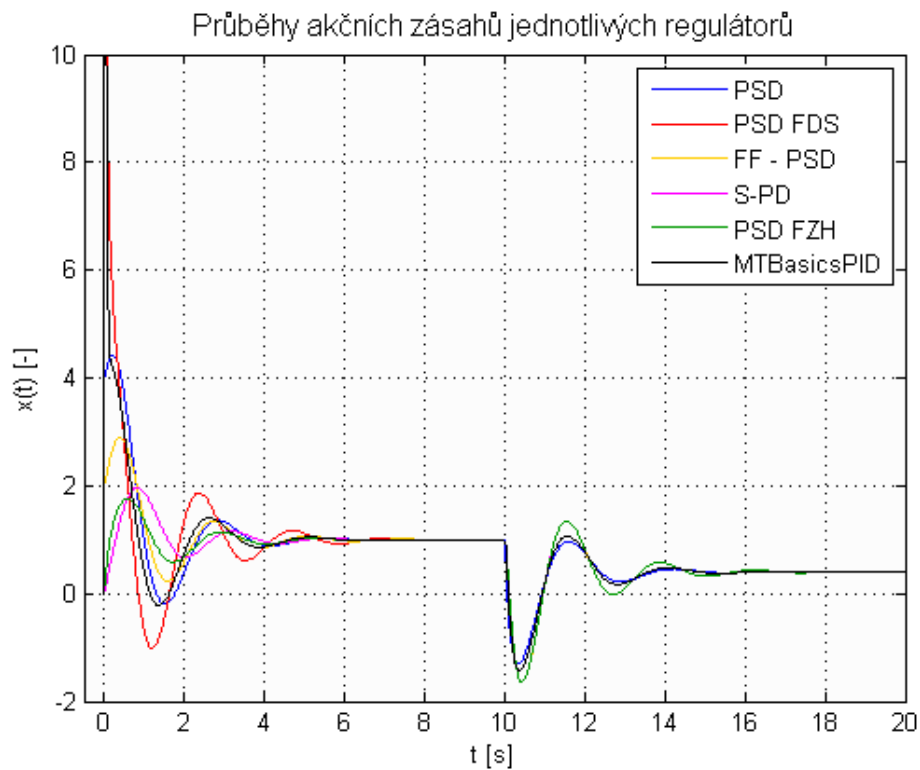
Tab. 7.7: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle **Tab. 5.1** a **Tab. 7.6 (S3)**

Perioda vzorkování	$T_{vz} [s]$	0,01
Zesílení regulátoru	$K[-]$	3,9785
Integrační časová konstanta	$T_i [s]$	1,1207
Derivační časová konstanta	$T_D [s]$	0,2802
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	$T_f [s]$	0,02802

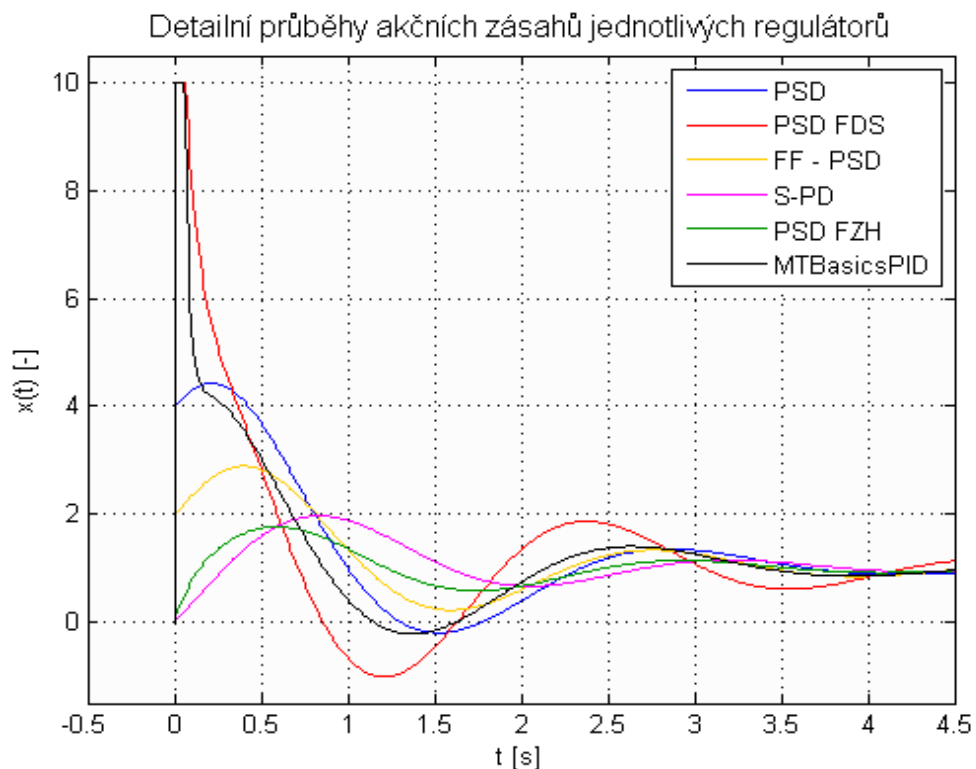
Zesilovací činitel filtru derivační složky	$N [-]$	3
Filtr žádané hodnoty	$\alpha [-]$	0,0
	$T_i [s]$	1,4008
AntiW (S-PD)	$T_T [s]$	1,4008
Feed Forward	$\beta [-]$	0,5



Obr. 7.9: Průběhy výstupu regulované soustavy č. 3 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v **Tab. 7.7**



Obr. 7.10: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 7.7 (S3)**



Obr. 7.11: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 7.7 (S3)**

Protože má soustava č. 3 velice malé časové konstanty je velmi rychlá, to se projevuje délkou přechodného děje, je-li porovnána s ostatními testovanými soustavami.

Na **Obr. 7.9**, je ukázáno, že velikost prvního překmitu při změně žádané hodnoty a to hlavně pro PSD regulátor, PSD regulátor s filtrací derivační složky a MTBasicsPID regulátor je zhruba 50% žádané hodnoty Tento překmit (ovšem s menší velikostí) je přítomen i pro PSD regulátor s Feed-Forward strukturou. Oproti tomu dle B&R (MTBasicsStepTuning) nastavení hodnot parametrů regulátorů (**Příloha 2 – Tab. P2.3**) je zmíněný překmit do značné míry eliminován, jak je zobrazeno na **Obr. P2.7**. Také průběhy získané použitím ostatních regulátorů pro omezení překmitu mají plynulejší průběh. Reakce na poruchu je pro nastavení dle B&R „lepší“, neboť nemá tak kmitavý průběh jako reakce na poruchu na **Obr. 7.9**.

7.4 Soustava č. 4 (S4)

Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,05$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na člen $\frac{1}{(p+1)}$ soustavy v čase $t = 20$ s.

$$F_4(p) = \frac{1 - 0,1p}{(p + 1)^3}$$

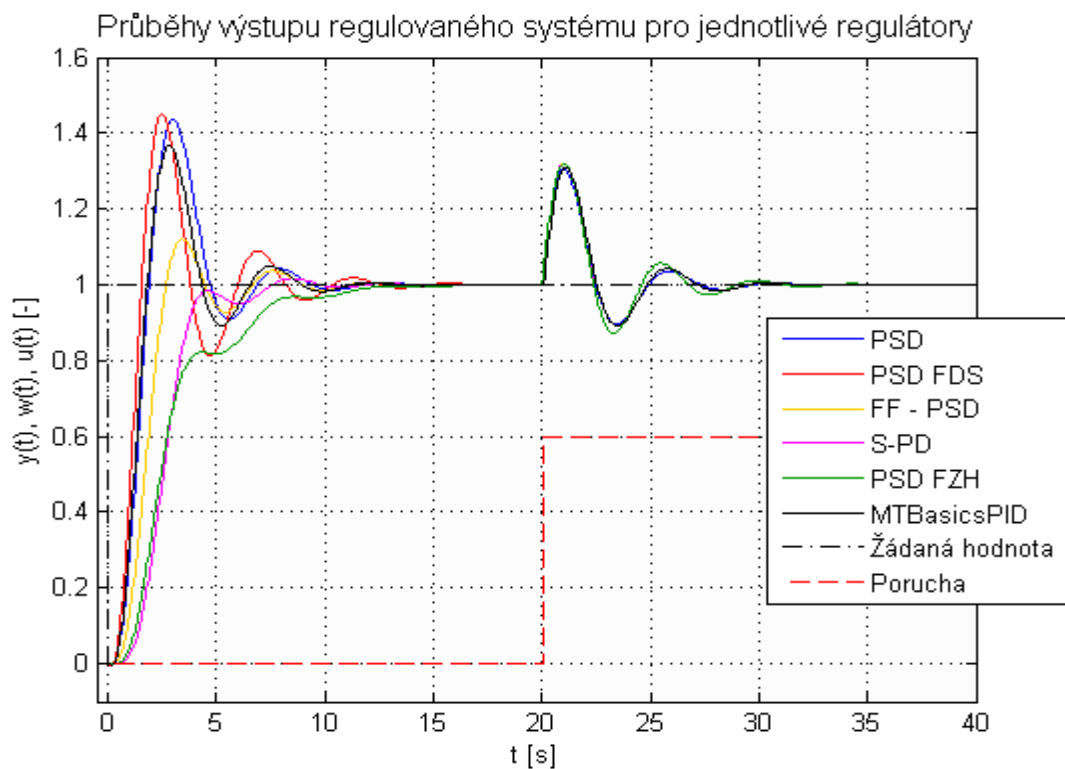
Tab. 7.8: Kritické parametry soustavy č. 4 získané pomocí Matlabu ($T_{vz} = 0,05$ s)

Kritické zesílení	$K_{krit} [-]$	5,8502
Kritická perioda	$T_{krit} [s]$	4,1693

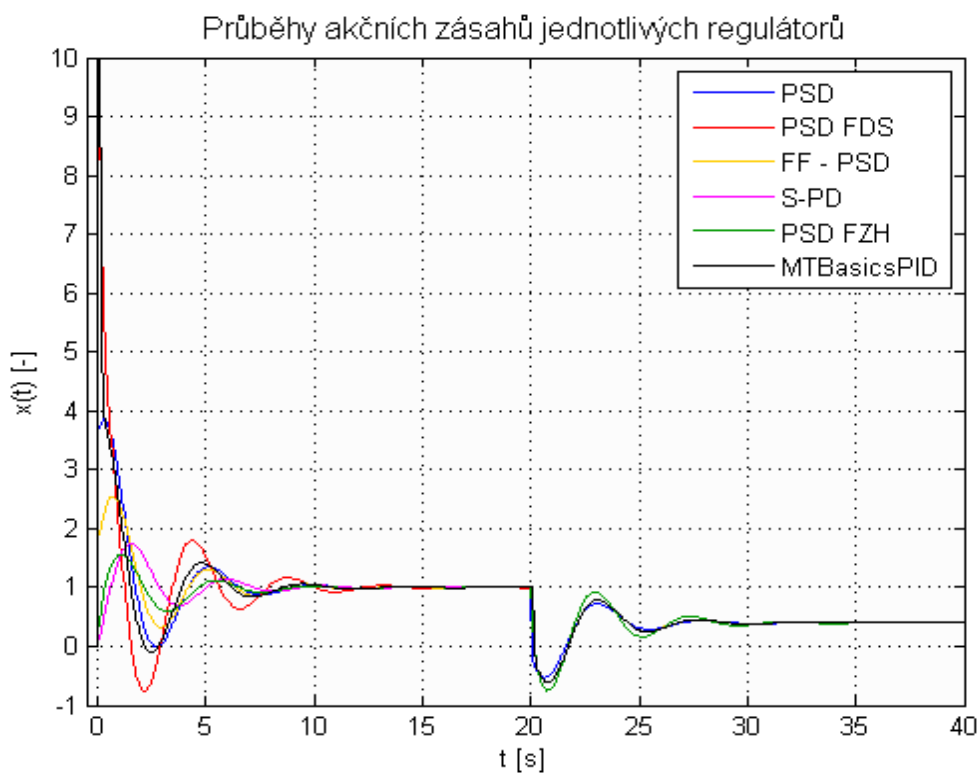
Tab. 7.9: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle **Tab. 5.1** a **Tab. 7.8 (S4)**

Perioda vzorkování	$T_{vz} [s]$	0,05
Zesílení regulátoru	$K[-]$	3,5101
Integrační časová konstanta	$T_I [s]$	2,0846
Derivační časová konstanta	$T_D [s]$	0,5212
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	$T_f [s]$	0,5212

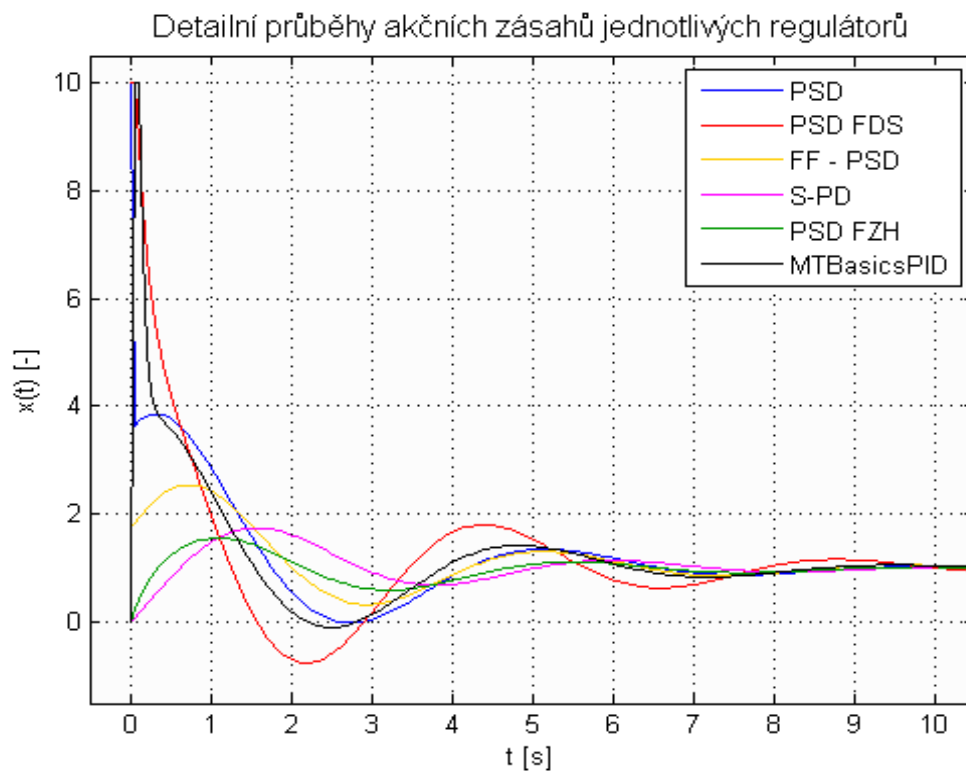
Zesilovací činitel filtru derivační složky	$N [-]$	3
Filtr žádané hodnoty	$\alpha [-]$	0,0
	$T_I [s]$	2,6058
AntiW (S-PD)	$T_T [s]$	2,6058
Feed Forward	$\beta [-]$	0,5



Obr. 7.12: Průběhy výstupu regulované soustavy č. 4 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v **Tab. 7.9**



Obr. 7.13: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 7.9 (S4)**



Obr. 7.14: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 7.9 (S4)**

7.5 Soustava č. 5 (S5)

Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,05$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na člen $\frac{1}{(p+1)}$ soustavy v čase $t = 20$ s.

$$F_5(p) = \frac{1 - 0,2p}{(p + 1)^3}$$

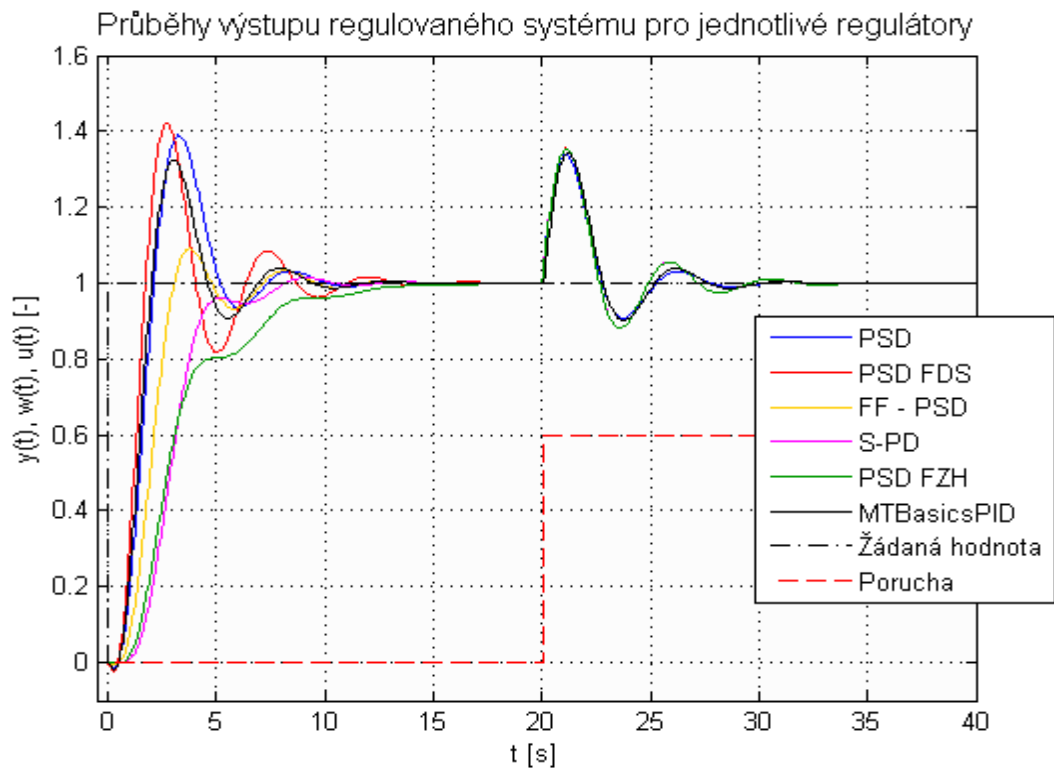
Tab. 7.10: Kritické parametry soustavy č. 5 získané pomocí Matlabu ($T_{vz} = 0,05$ s)

Kritické zesílení	$K_{krit} [-]$	4,8065
Kritická perioda	$T_{krit} [s]$	4,5355

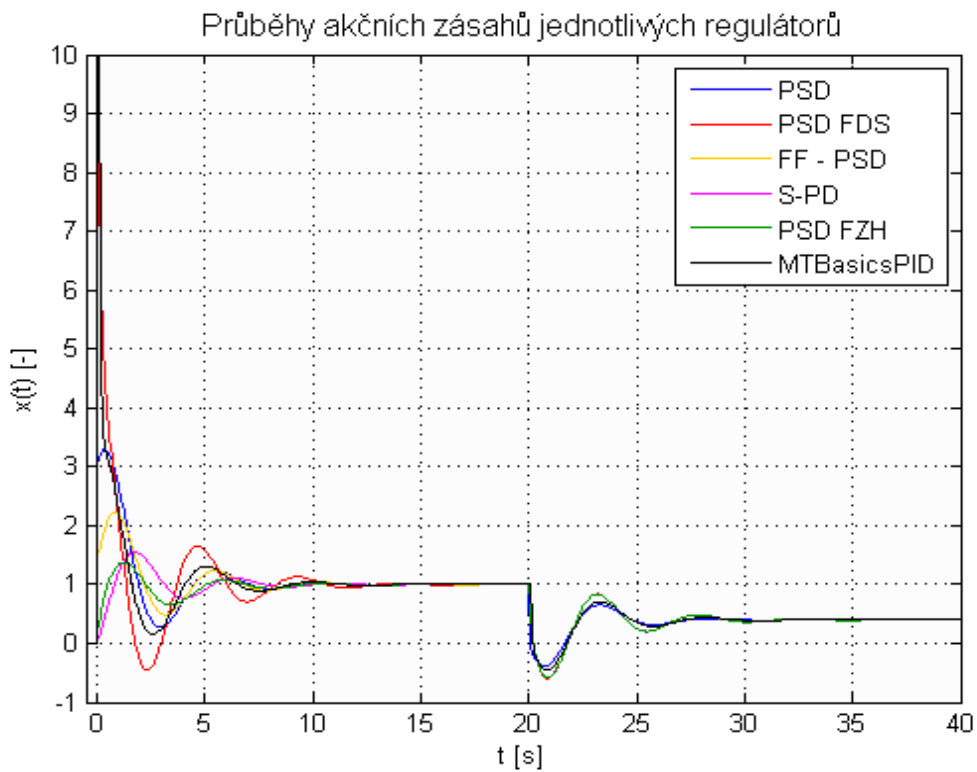
Tab. 7.11: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle **Tab. 5.1** a **Tab. 7.10 (S5)**

Perioda vzorkování	$T_{vz} [s]$	0,05
Zesílení regulátoru	$K[-]$	2,8839
Integrační časová konstanta	$T_I [s]$	2,2677
Derivační časová konstanta	$T_D [s]$	0,5669
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	$T_f [s]$	0,05669

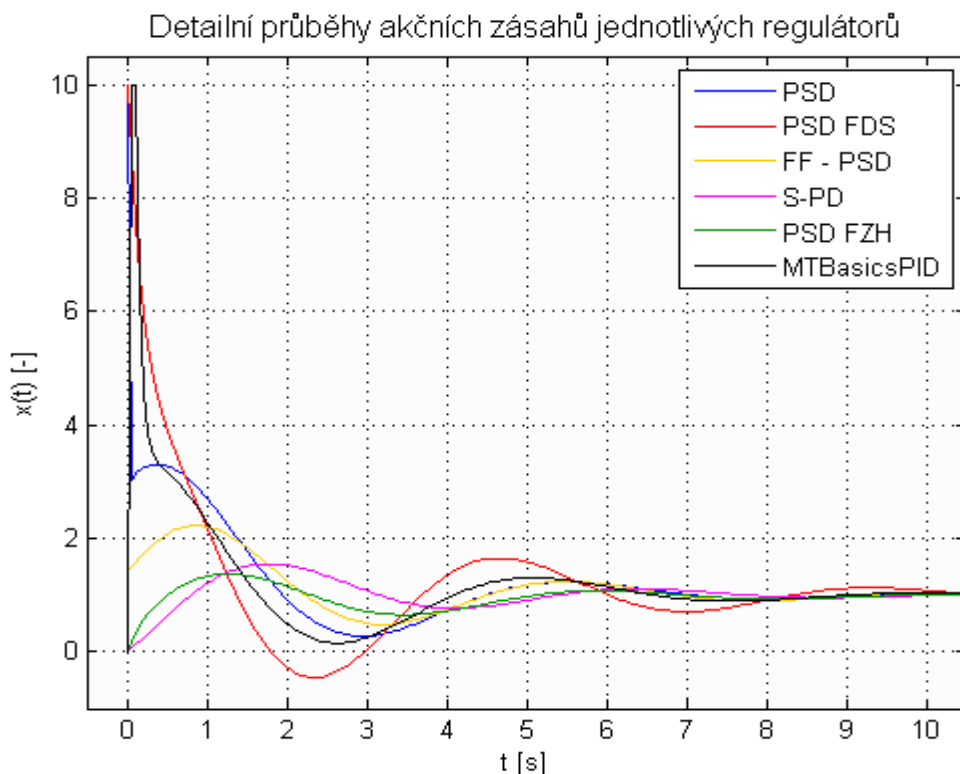
Zesilovací činitel filtru derivační složky	$N [-]$	3
Filtr žádané hodnoty	$\alpha [-]$	0,0
	$T_I [s]$	2,8347
AntiW (S-PD)	$T_T [s]$	2,8347
Feed Forward	$\beta [-]$	0,5



Obr. 7.15: Průběhy výstupu regulované soustavy č. 5 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v **Tab. 7.11**



Obr. 7.16: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 7.11 (S5)**



Obr. 7.17: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 7.11 (S5)**

Dle očekávání, pro obě soustavy s neminimální fází (také soustava č. 4), v průbězích na **Obr. 7.12** a **Obr. 7.15** přítomen podkmit při náběhu žádané hodnoty. Ten je výraznější u soustavy č. 5, což je dáno velikostí nestabilní nuly v přenosu soustavy. I tak jsou si výsledné průběhy pro obě soustavy dosti podobné. V případě soustavy č. 4 je pouze velikost překmitu při reakci na poruchu menší.

Oproti soustavě č. 1 mají obě zmíněné soustavy menší hodnotu kritického zesílení a větší velikost kritické periody. Proto regulátor MTBasicsPID při tomto nastavení již nerozkmitává soustavu.

Podobně jako u předešlých testovaných soustav lze použitím nastavením dle B&R dosáhnout „lepšího“ (méně kmitavého) průběhu přechodného děje, jak je ukázáno na **Obr. P2.10** a **Obr. P2.13** v příloze 2. Pouze reakce na poruchu je nepatrně rozdílná. Velikost překmitu při reakci na poruchu je asi o 2% větší, než je tomu pro nastavení hodnot parametrů regulátorů dle Z-N metody.

7.6 Soustava č. 6 (S6)

Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,01$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na vstup soustavy v čase $t = 20$ s.

$$F_6(p) = \frac{1}{(1 + 0,5p)} e^{-p}$$

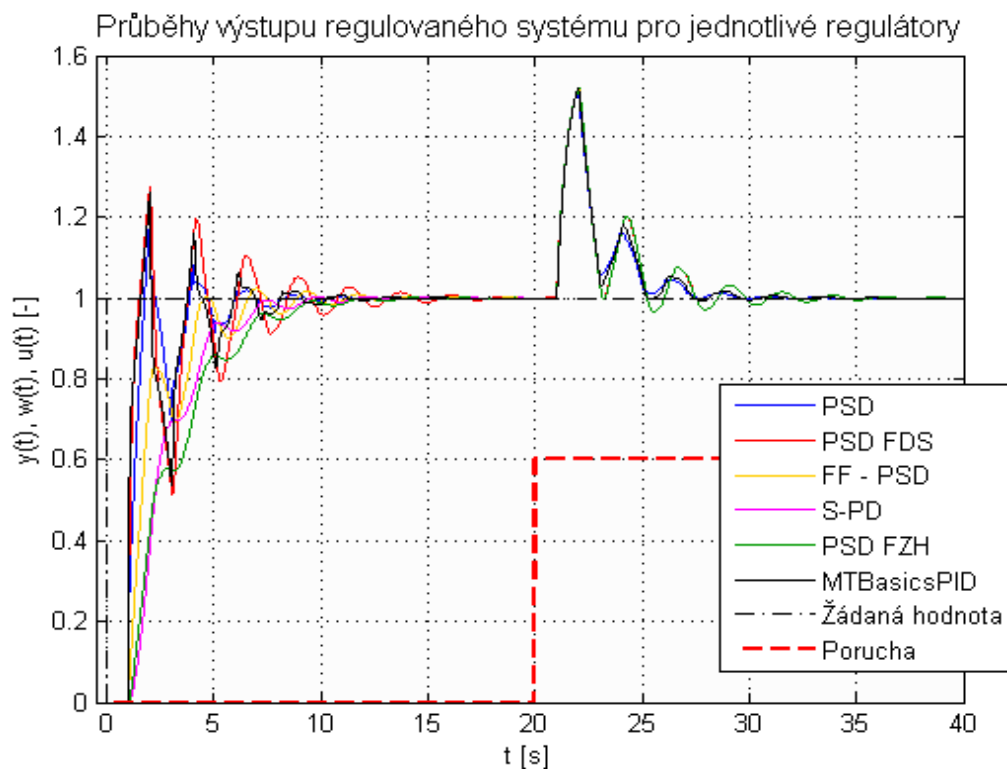
Tab. 7.12: Kritické parametry soustavy č. 6 získané pomocí Matlabu ($T_{vz} = 0,01$ s)

Kritické zesílení	$K_{krit} [-]$	1,5163
Kritická perioda	$T_{krit} [s]$	2,7563

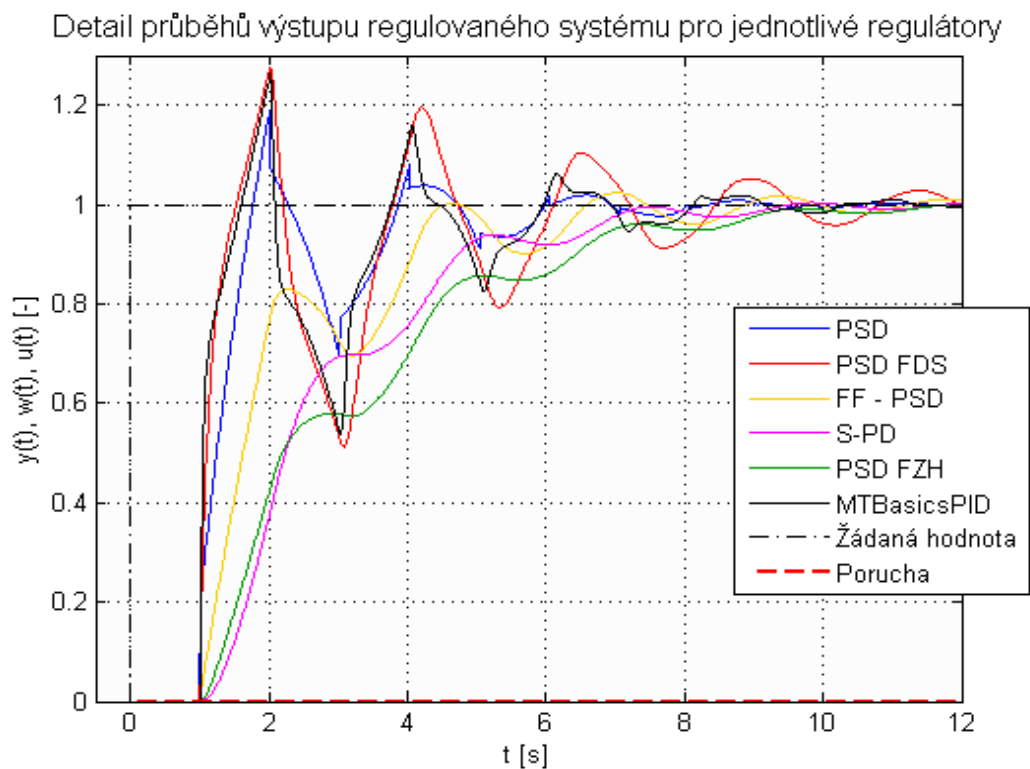
Tab. 7.13: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle **Tab. 5.1** a **Tab. 7.12 (S6)**

Perioda vzorkování	$T_{vz} [s]$	0,01
Zesílení regulátoru	$K[-]$	0,9098
Integrační časová konstanta	$T_I [s]$	1,3782
Derivační časová konstanta	$T_D [s]$	0,3445
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	$T_f [s]$	0,03445

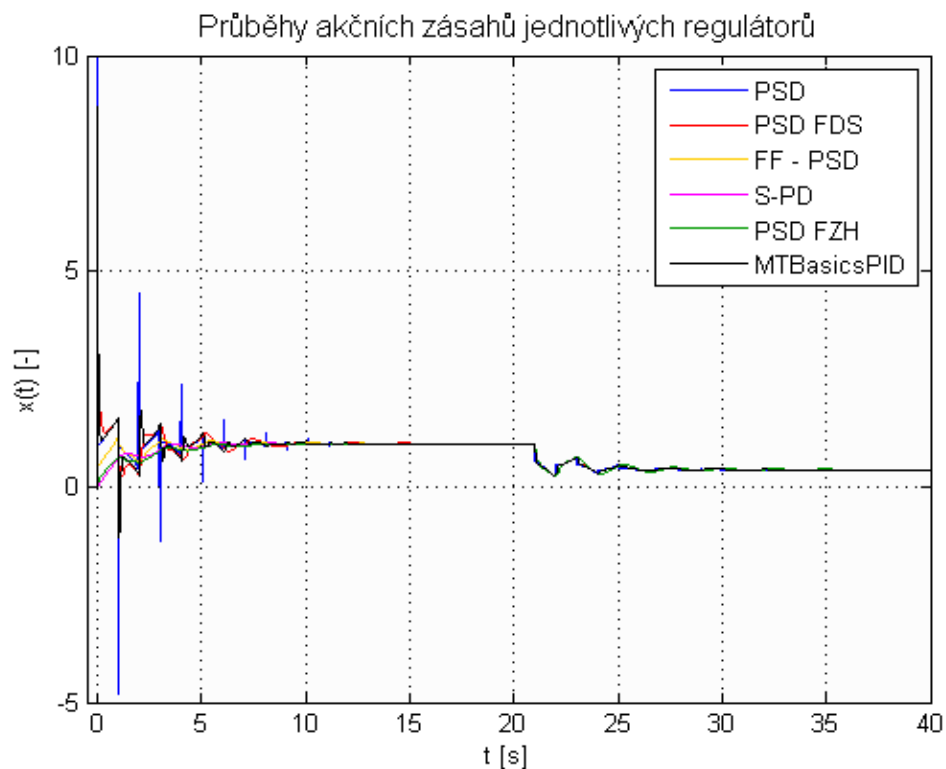
Zesilovací činitel filtru derivační složky	$N [-]$	3
Filtr žádané hodnoty	$\alpha [-]$	0,0
	$T_I [s]$	1,7227
AntiW (S-PD)	$T_T [s]$	1,7227
Feed Forward	$\beta [-]$	0,5



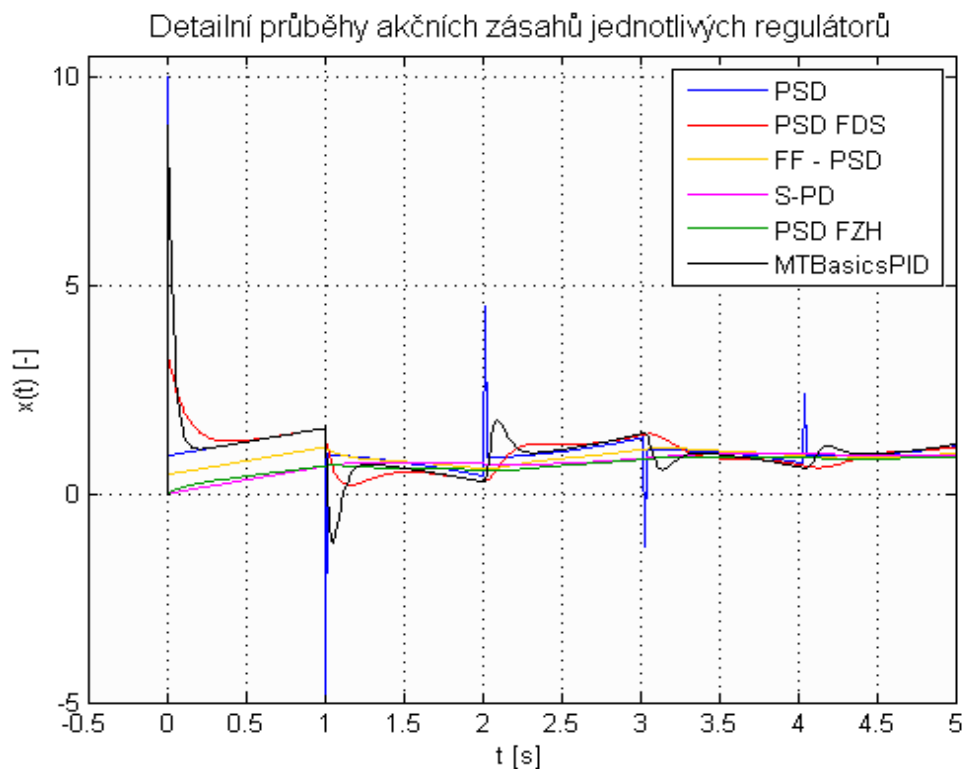
Obr. 7.18: Průběhy výstupu regulované soustavy č. 6 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v **Tab. 7.13**



Obr. 7.19: Detail průběhů výstupů regulované soustavy č. 6 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v **Tab. 7.13 (S6)**



Obr. 7.20: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 7.13 (S6)**



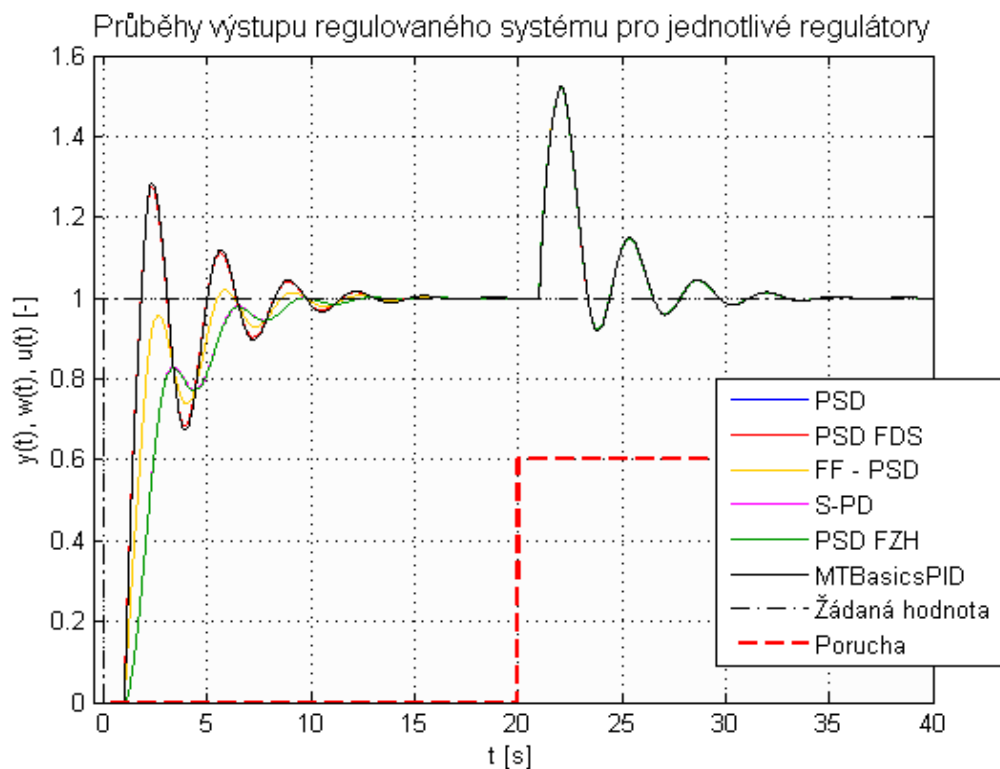
Obr. 7.21: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 7.13 (S6)**

Jak lze vidět na **Obr. 7.18**, je přechodný děj dosti kmitavý. Při bližším pohledu (**Obr. 7.19**) je patrné, že průběh přechodného děje má „pilovitý“ charakter. Zvláště u průběhů PSD regulátoru, PSD regulátoru s filtrací derivační složky a MTBasicsPID regulátoru. Zmíněný průběh přechodného děje má s největší pravděpodobností za následek velikost dopravního zpoždění, která je relativně velká oproti malé časové konstantě testované soustavy.

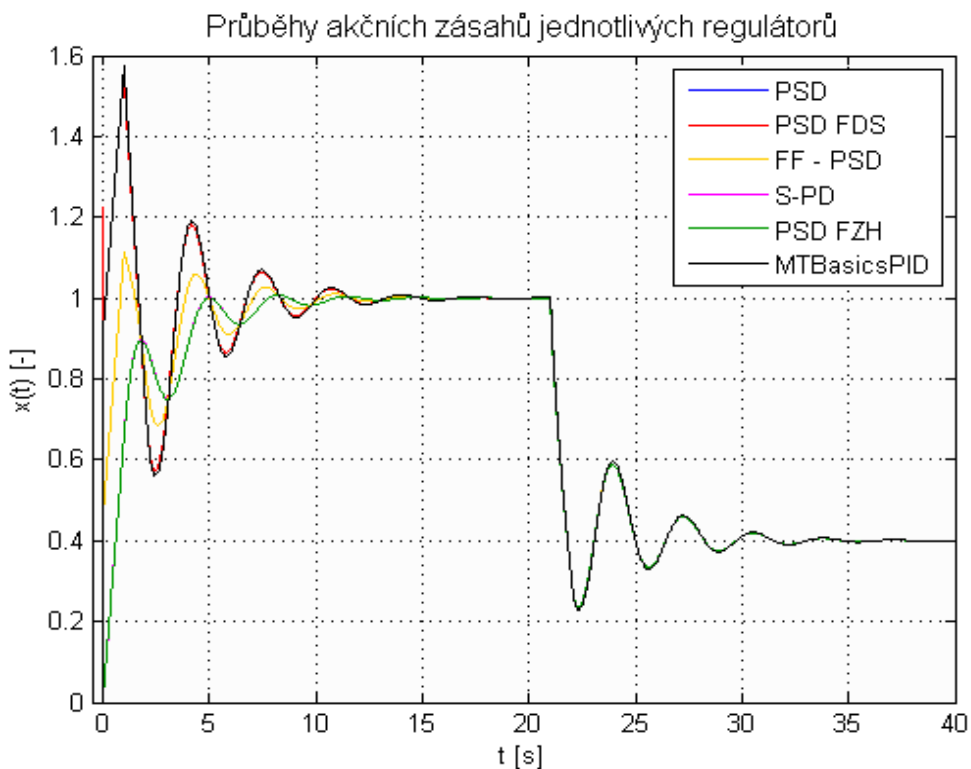
Velký vliv zde má derivační složka, která způsobuje ostré změny v průběhu přechodného děje, jak potvrzují průběhy akčních zásahů na **Obr. 7.20** a **Obr. 7.21**. Na těchto průbězích lze jasně vidět, že každou vteřinu (vliv dopravního zpoždění) je v průběhu akčního zásahu již zmíněných regulátorů přítomen záskmit. V případě PSD regulátoru se dá hovořit o impulsu (nevyfiltrovaná derivační složka). Z tohoto důvodu bylo otestováno nastavení parametrů regulátorů pro malou hodnotu derivační časové konstanty. Tedy aby se zmenšil vliv derivační složky regulátoru.

Tab. 7.14: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle **Tab. 5.1** s upravenou hodnotou derivační časové konstanty (**S6**)

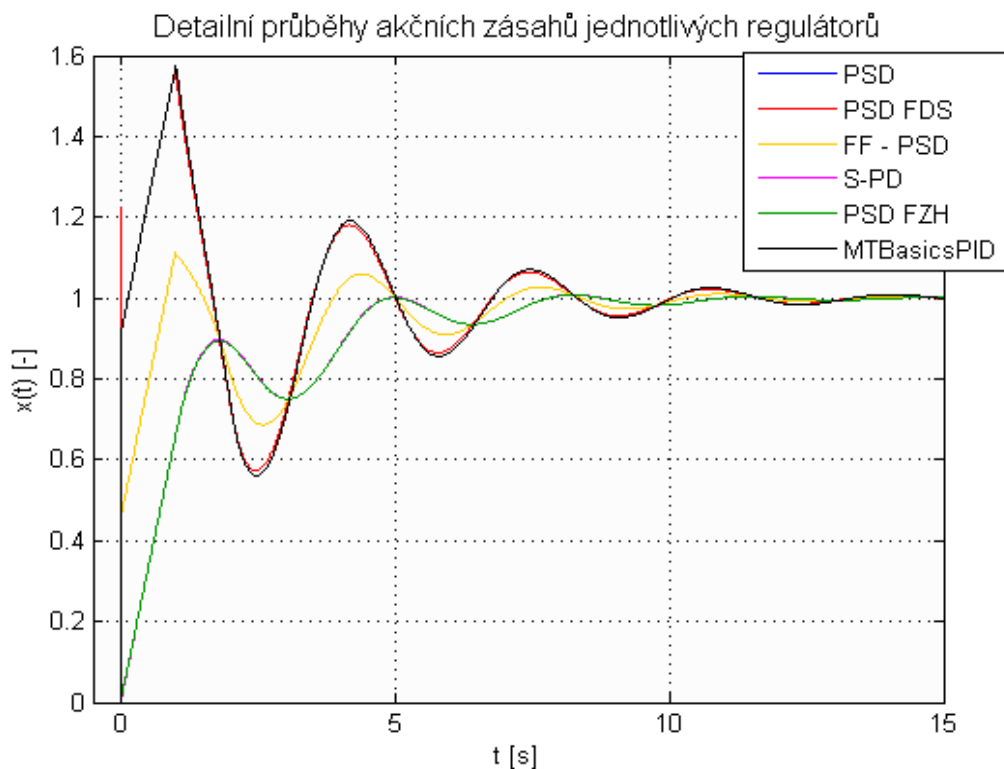
Perioda vzorkování	T_{vz} [s]	0,01	Zesilovací činitel filtru derivační složky	N [-]	3
Zesílení regulátoru	K [-]	0,9098	Filtr žádané hodnoty	α [-]	0,0
Integrační časová konstanta	T_i [s]	1,3782		T_1 [s]	1,3816
Derivační časová konstanta	T_D [s]	$3,445 \cdot 10^{-3}$	AntiW (S-PD)	T_T [s]	1,3816
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	T_f [s]	$3,445 \cdot 10^{-4}$	Feed Forward	β [-]	0,5



Obr. 7.22: Průběhy výstupu regulované soustavy č. 6 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v **Tab. 7.14**



Obr. 7.23: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 7.14 (S6)**



Obr. 7.24: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 7.14 (S6)**

Obr. 7.22 zobrazuje průběhy získané pro zmenšenou hodnotu derivační časové konstanty a to stokrát (viz **Tab. 7.14**). Tyto průběhy již nemají takový charakter, jak je tomu na **Obr. 7.18**. Při pohledu na průběhy akčních zásahů (**Obr. 7.23, 7.24**) je patrné, že zmenšením hodnoty derivační časové konstanty došlo k omezení vlivu derivační složky na celkový akční zásah regulátoru. To se projevilo nejen snížením velikosti akčního zásahu, ale také jeho totožným průběhem v případě několika regulátorů.

Vzhledem k tomu že filtr derivační složky u PSD regulátoru s filtrací derivační složky, stejně jako u MTBasicsPID regulátoru nemá v tomto případě „co filtrovat“, jsou tyto průběhy téměř totožné s průběhem „klasického“ PSD regulátoru bez filtrace derivační složky (**Obr. 7.22**). Přítomné kmitání lze odstranit zmenšením hodnoty zesílení regulátoru. Taktéž regulátory pro potlačení překmitu mají v tomto případě téměř totožný průběh. To platí pro S-PD regulátor a PSD regulátor s filtrem žádané hodnoty.

Totožných průběhů (téměř - rozdíl v setinách), jež jsou výše diskutovány, bylo také dosaženo použitím nastavení hodnot parametrů regulátorů dle B&R. Konkrétně pomocí funkčního bloku harmonické analýzy MTBasicsOscillationTuning. Zmíněné průběhy jsou uvedeny v **příloze 2** na **Obr. P2.16 – P2.21**, stejně jako **Tab. P2.6** a **Tab. P2.7**, ve kterých jsou zmíněné hodnoty parametrů regulátorů uvedeny.

7.7 Soustava č. 7 (S7)

Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,1$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na vstup soustavy v čase $t = 18$ s.

$$F_7(p) = \frac{1}{(1 + 2p)} e^{-p}$$

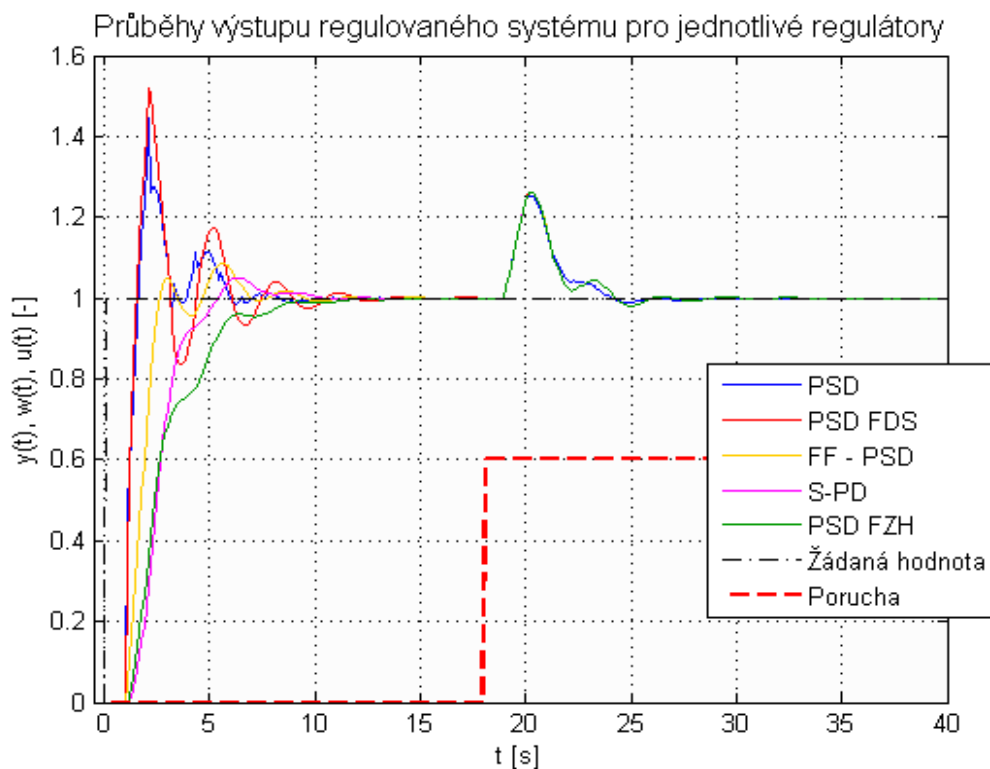
Tab. 7.15: Kritické parametry soustavy č. 7 získané pomocí Matlabu ($T_{vz} = 0,1$ s)

Kritické zesílení	$K_{krit} [-]$	3,6586
Kritická perioda	$T_{krit} [s]$	3,5707

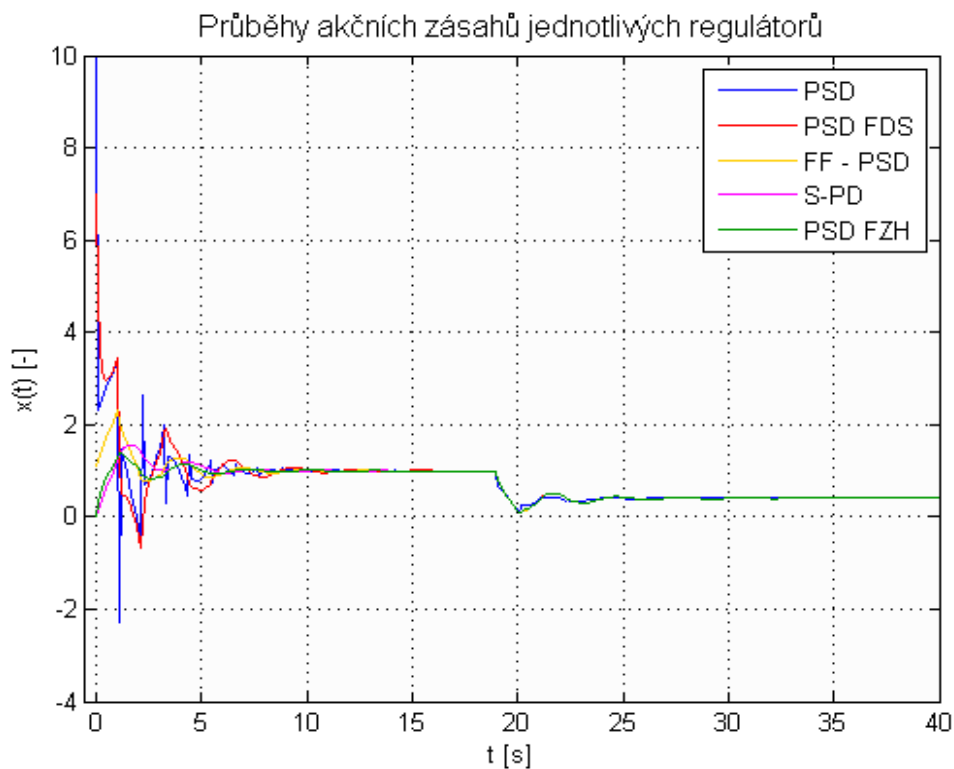
Tab. 7.16: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle **Tab. 5.1** a **Tab. 7.15** (S7)

Perioda vzorkování	$T_{vz} [s]$	0,1
Zesílení regulátoru	$K[-]$	2,1952
Integrační časová konstanta	$T_I [s]$	1,7853
Derivační časová konstanta	$T_D [s]$	0,4463
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	$T_f [s]$	0,04463

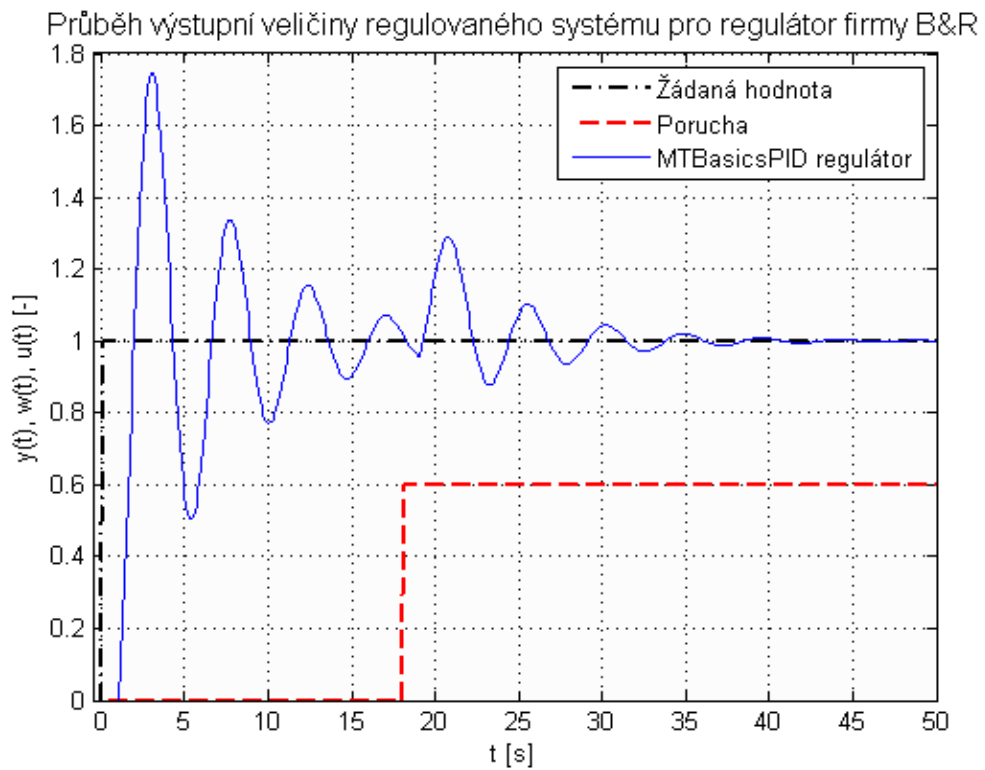
Zesilovací činitel filtru derivační složky	$N [-]$	3
Filtr žádané hodnoty	$\alpha [-]$	0,0
	$T_1 [s]$	2,2317
AntiW (S-PD)	$T_T [s]$	2,2317
Feed Forward	$\beta [-]$	0,5



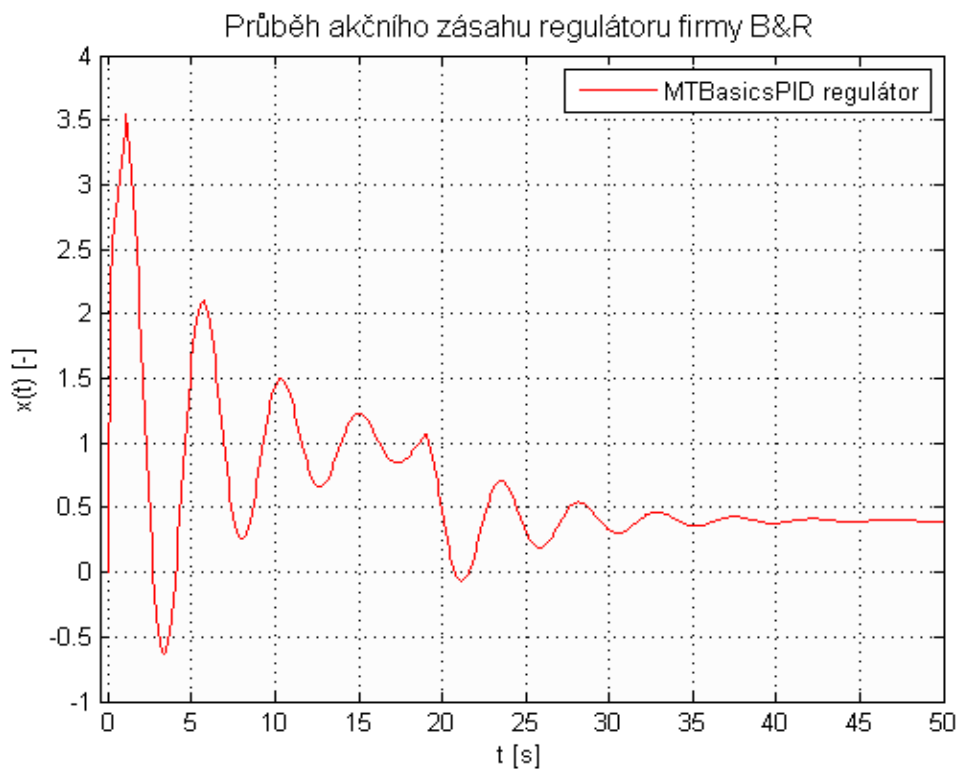
Obr. 7.25: Průběhy výstupu regulované soustavy č. 7 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v **Tab. 7.16**



Obr. 7.26: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 7.16 (S7)**



Obr. 7.27: Průběh výstupu regulované soustavy č. 7 pro hodnoty parametrů regulátoru MTBasicsPID uvedených v **Tab. 7.16 (S7)**



Obr. 7.28: Průběh akčního zásahu regulátoru MTBasicsPID pro hodnoty parametrů tohoto regulátoru uvedených v **Tab. 7.16 (S7)**

Podobně jako v případě soustavy č. 1 MTBasicsPID regulátor rozkmitává soustavu (**Obr. 7.27**). V tomto případě se však jedná o tlumené kmity. Již při prvním pohledu na průběh přechodného děje, resp. na průběh akčního zásah regulátoru (**Obr. 7.28**) je patrné, že byla nevhodně zvolena perioda vzorkování. Proto byla velikost periody vzorkování zmenšena na hodnotu $T_{vz} = 0,01s$.

Vliv může také mít velikost zesílení regulátoru. Nižší hodnota zesílení nerozkmitává testovanou soustavu takovým způsobem, jak je uvedeno na **Obr. 7.27**. Jasným důkazem je průběh výstupu testované soustavy na **Obr. P2.22** v **příloze 2**. Tento průběh přechodného děje při použití MTBasicsPID regulátoru lze označit za optimální. Jsou viditelné 3 překmity v souladu Z-N metodou, byť byla hodnota zesílení regulátoru upravena.

Tab. 7.17: Kritické parametry soustavy č. 7 získané pomocí Matlabu ($T_{vz} = 0,01s$)

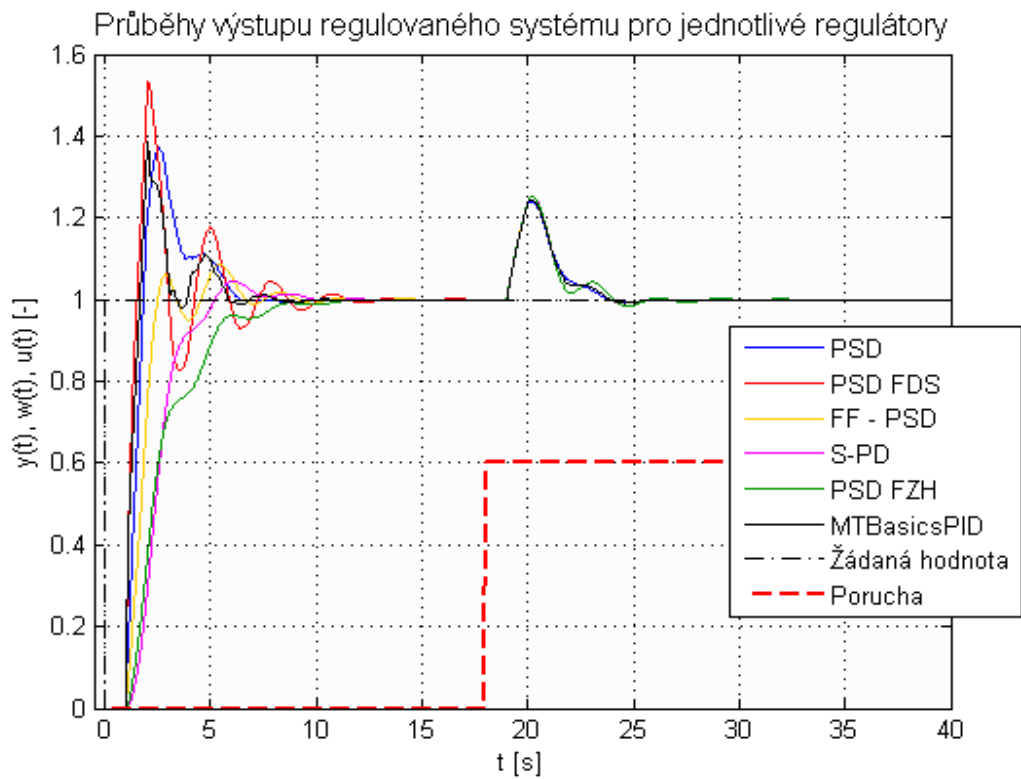
Kritické zesílení	$K_{krit} [-]$	3,7914
Kritická perioda	$T_{krit} [s]$	3,4361

Tab. 7.18: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle **Tab. 5.1** a **Tab. 7.17** pro hodnotu periody vzorkování $T_{vz} = 0,01s$ (**S7**)

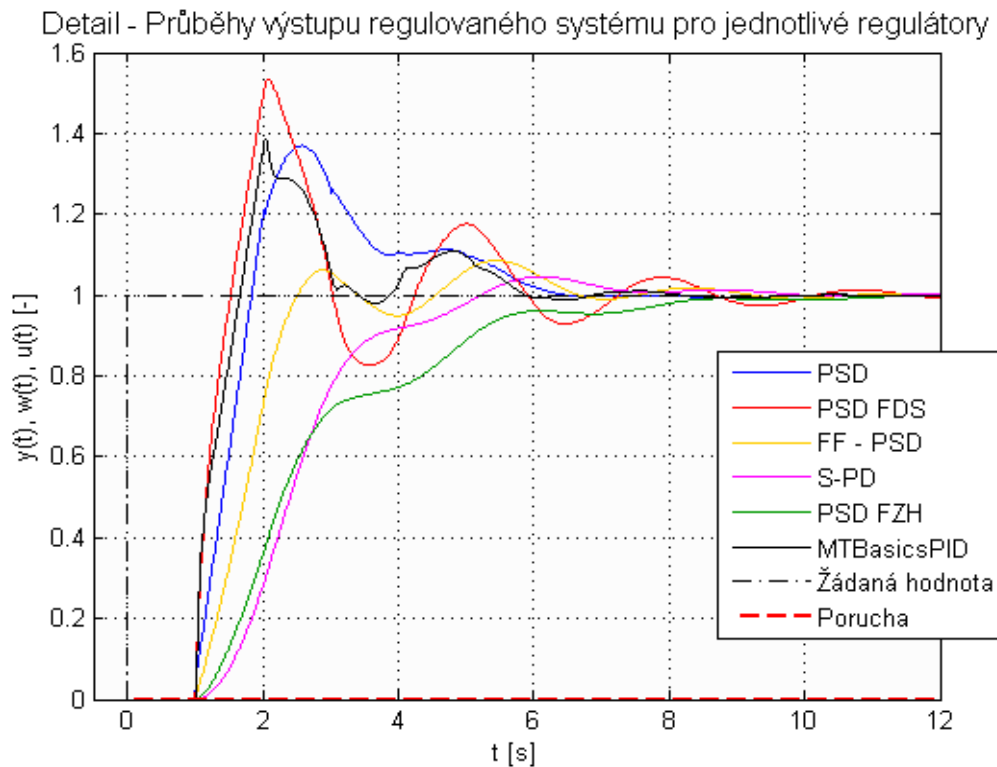
Perioda vzorkování	$T_{vz} [s]$	0,01
Zesílení regulátoru	$K[-]$	2,2748
Integrační časová konstanta	$T_I [s]$	1,7181
Derivační časová konstanta	$T_D [s]$	0,4295
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	$T_f [s]$	0,04295

Zesilovací činitel filtru derivační složky	$N [-]$	3
Filtr žádané hodnoty	$\alpha [-]$	0,0
	$T_1 [s]$	2,1746
AntiW (S-PD)	$T_T [s]$	2,1746
Feed Forward	$\beta [-]$	0,5

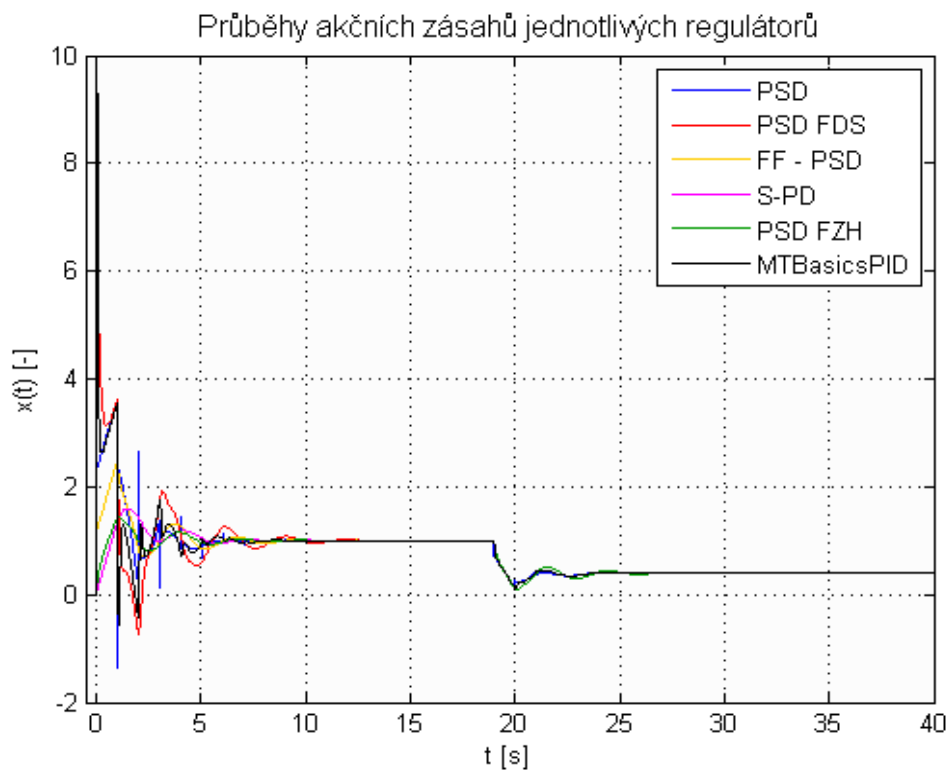
Hodnoty parametry regulátorů pro periodu vzorkování $T_{vz} = 0,01s$ (**Tab. 7.18**) se jen nepatrně liší od hodnot parametrů regulátorů navržených pro nastavenou velikost periody vzorkování $T_{vz} = 0,1s$ (**Tab. 7.16**).



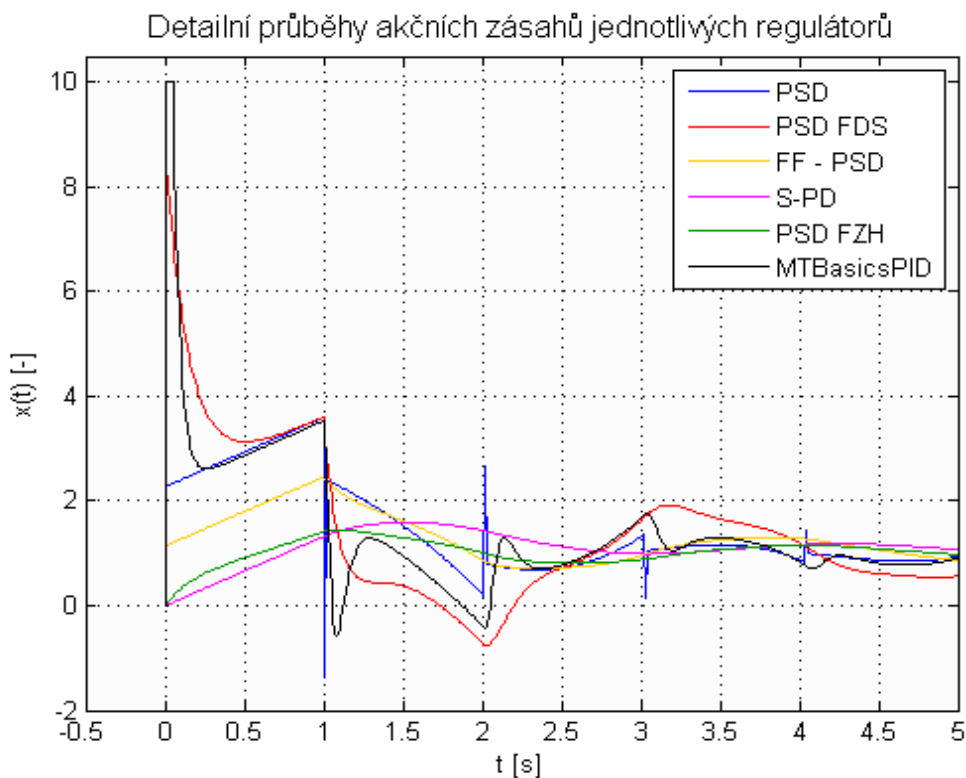
Obr. 7.29: Průběhy výstupu regulované soustavy č. 7 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v **Tab. 7.18**



Obr. 7.30: Detail průběhů výstupu regulované soustavy č. 7 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v **Tab. 7.18**



Obr. 7.31: Průběhy výstupu regulované soustavy č. 7 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v **Tab. 7.18**



Obr. 7.32: Detailní průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 7.18 (S8)**

Podobně jako hodnoty parametrů v **Tab. 7.16** a **Tab. 7.18** se od sebe minimálně liší průběhy výstupu regulované soustavy a akčních zásahů pro prvních 5 regulátorů. Zmenšením velikosti periody vzorkování ale bylo dosaženo požadovaného přechodného děje a akčního zásahu pro regulátor MTBasicsPID.

Charakter průběhu výstupu regulované soustavy je obdobný průběhu na **Obr. 7.18**. Podrobně to lze vidět na detailním zobrazení akčních zásahů regulátorů (**Obr. 7.32**), kde jsou opět každou vteřinu přítomny zákmity. V tomto případě stačí pouze zmenšit velikost derivační časové konstanty zhruba o polovinu, případně zmenšit velikost zesílení.

Pro nastavení hodnot parametrů regulátorů pomocí funkčního bloku harmonické analýzy MTBasicsOscillationTuning je překmit při reakci na skokovou změnu žádané hodnoty menší asi o 20% (oproti Z-N nastavení) jak pro PSD regulátor, PSD regulátor s filtrací derivační složky, tak i pro MTBasicsPID regulátor (**příloha 2: Obr. P2.25**). Z regulátorů určených pro potlačení překmitu, vykazuje útlum zmíněného překmitu regulátor s Feed-Forward strukturou, u kterého je pro nastavení dle B&R dosaženo méně kmitavého přechodného děje. To je dáno hlavně velikostí zesílení regulátorů, která je přibližně o 26% menší, než je tomu dle nastavení hodnot parametrů regulátorů v **Tab. 7.18**.

7.8 Soustava č. 8 (S8)

Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,01$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na člen $\frac{1}{(0,5p+1)}$ soustavy v čase $t = 20$ s.

$$F_8(p) = \frac{1}{(1 + 0,5p)^2} e^{-p}$$

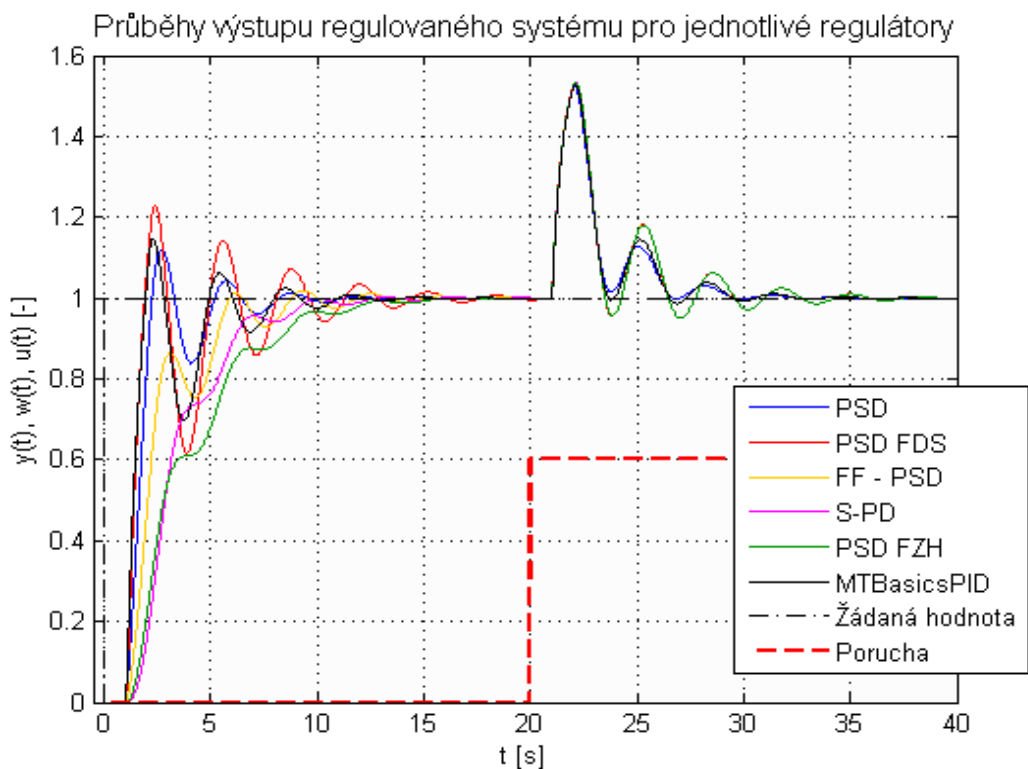
Tab. 7.19: Kritické parametry soustavy č. 8 získané pomocí Matlabu ($T_{vz} = 0,01$ s)

Kritické zesílení	$K_{krit} [-]$	1,7355
Kritická perioda	$T_{krit} [s]$	3,6632

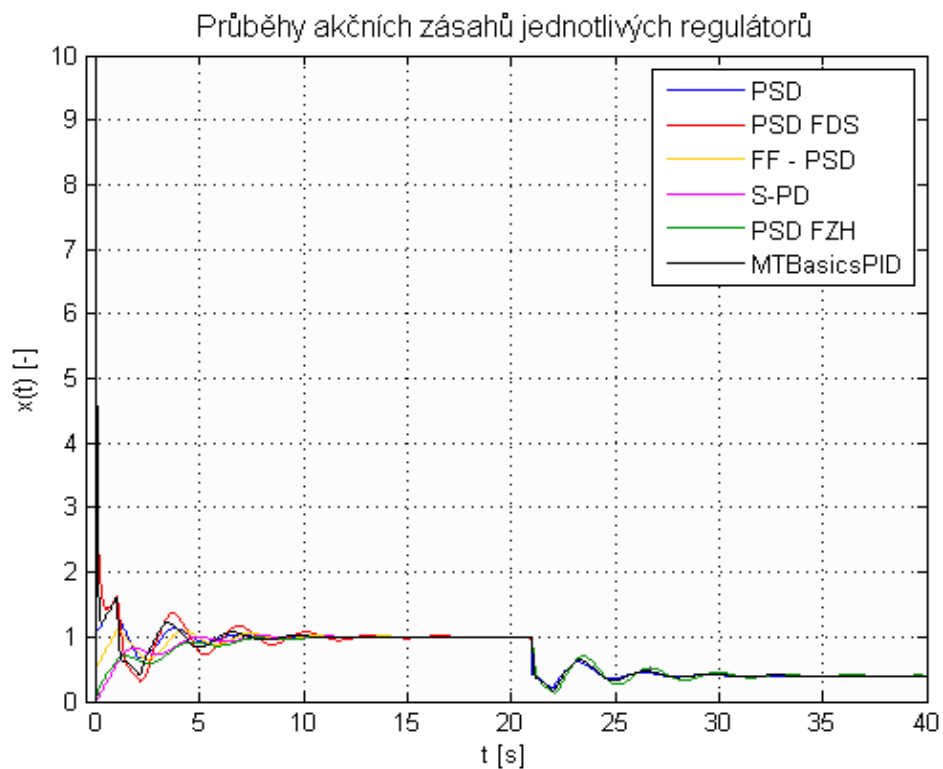
Tab. 7.20: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle **Tab. 5.1** a **Tab. 7.19** (S8)

Perioda vzorkování	$T_{vz} [s]$	0,01
Zesílení regulátoru	$K[-]$	1,0413
Integrační časová konstanta	$T_I [s]$	1,8316
Derivační časová konstanta	$T_D [s]$	0,4579
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	$T_f [s]$	0,04579

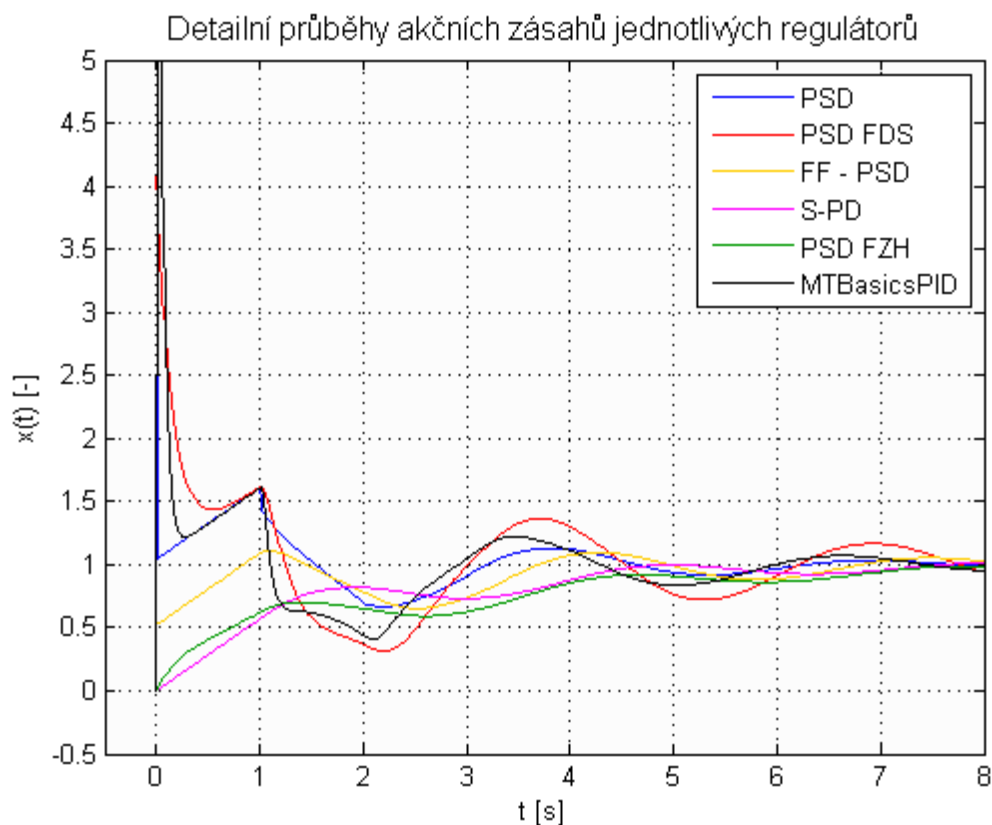
Zesilovací činitel filtru derivační složky	$N [-]$	3
Filtr žádané hodnoty	$\alpha [-]$	0,0
	$T_I [s]$	2,2859
AntiW (S-PD)	$T_T [s]$	2,2859
Feed Forward	$\beta [-]$	0,5



Obr. 7.33: Průběhy výstupu regulované soustavy č. 8 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v **Tab. 7.20**



Obr. 7.34: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 7.20 (S8)**



Obr. 7.35: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 7.20 (S8)**

Oproti soustavě č. 6 je tato soustava 2. řádu, tudíž vliv derivační složky v kombinaci s dopravním zpožděním není tak velký jako v případě již zmíněné soustavy č. 6. Avšak průběhy na **Obr. 7.33** mají přese vše kmitavý charakter (malé časové konstanty v soustavě).

Obdobně je tomu tak i pro nastavení hodnot parametrů regulátorů dle B&R. (viz **příloha 2 – Obr. P2.28**). Zde by, podobně jako u předešlých soustav, pomohlo zmenšení velikosti derivační složky (v tomto případě dosti nepatrně) a také zmenšení velikosti zesílení k dosažení přechodného děje bez překmitu.

7.9 Soustava č. 9 (S9)

Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,01$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na člen $\frac{1}{(2p+1)}$ soustavy v čase $t = 30$ s.

$$F_9(p) = \frac{1}{(1 + 2p)^2} e^{-p}$$

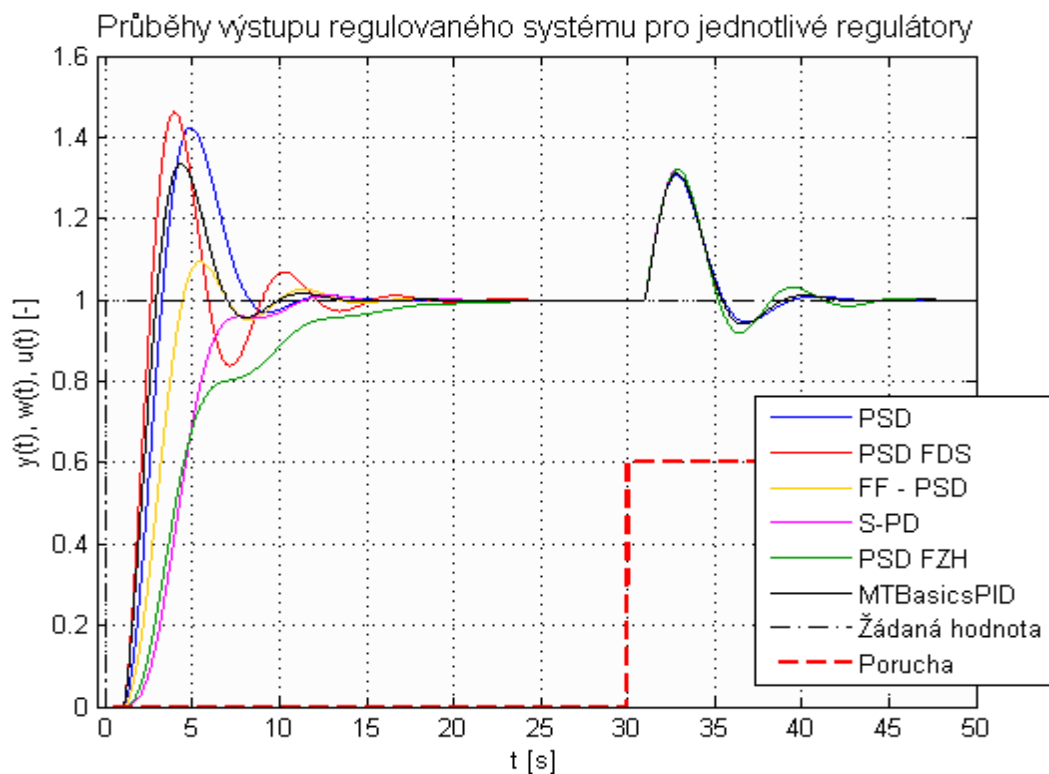
Tab. 7.21: Kritické parametry soustavy č. 9 získané pomocí Matlabu ($T_{vz} = 0,01$ s)

Kritické zesílení	$K_{krit} [-]$	4,6680
Kritická perioda	$T_{krit} [s]$	6,5613

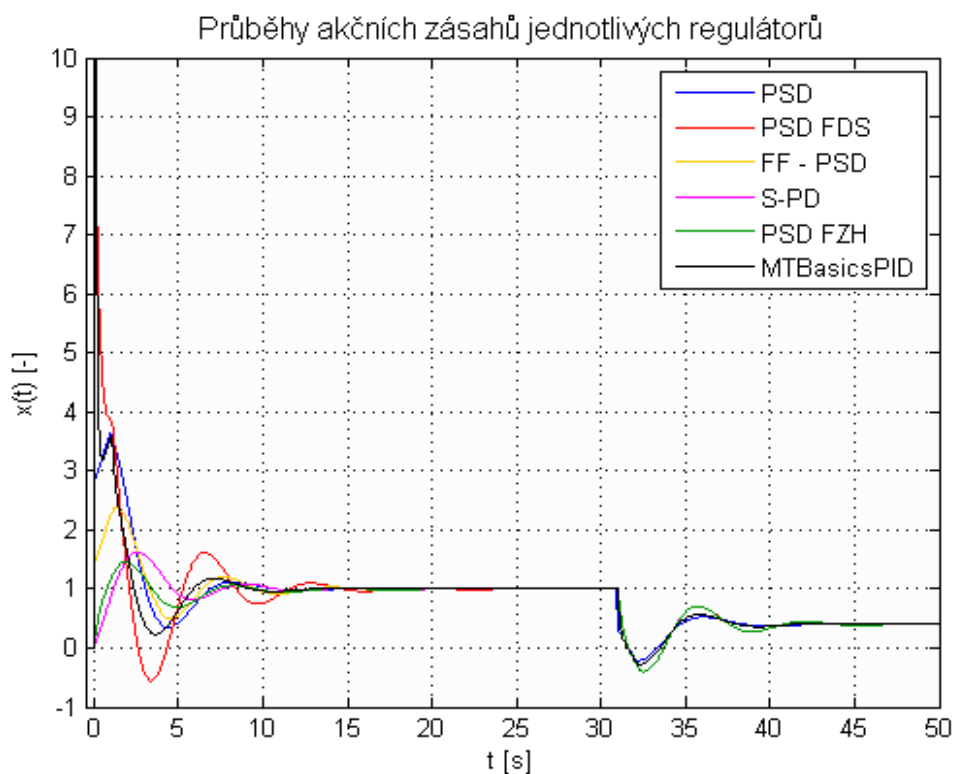
Tab. 7.22: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle **Tab. 5.1** a **Tab. 7.21 (S9)**

Perioda vzorkování	$T_{vz} [s]$	0,01
Zesílení regulátoru	$K[-]$	2,8008
Integrační časová konstanta	$T_I [s]$	3,2807
Derivační časová konstanta	$T_D [s]$	0,8202
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	$T_f [s]$	0,08202

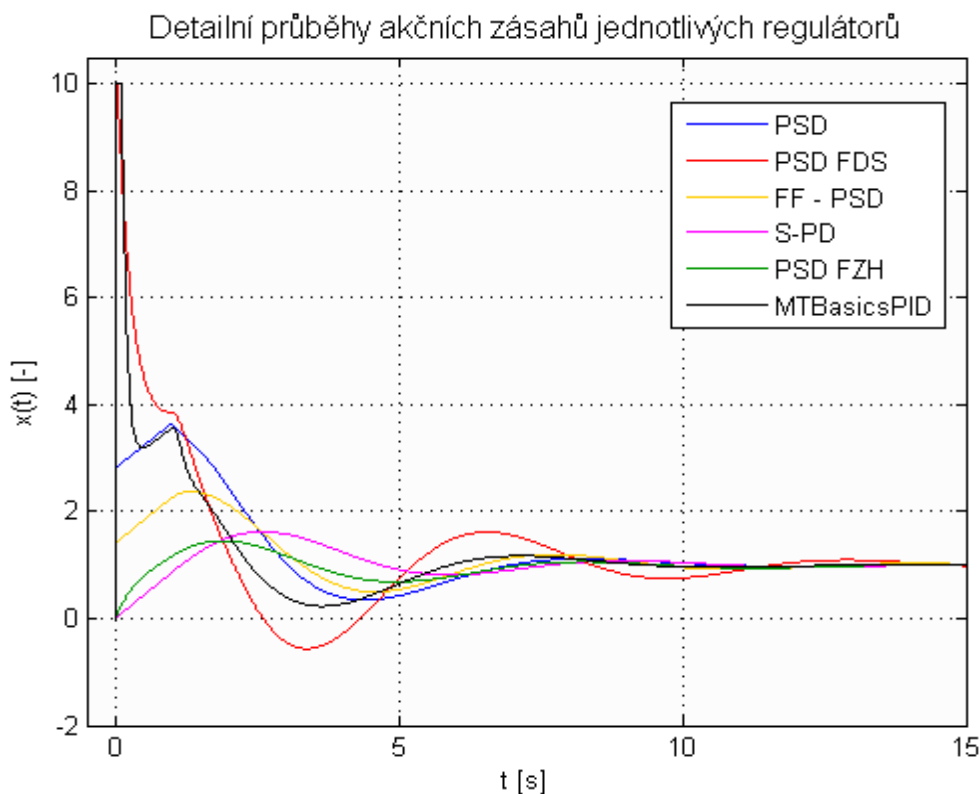
Zesilovací činitel filtru derivační složky	$N [-]$	3
Filtr žádané hodnoty	$\alpha [-]$	0,0
	$T_I [s]$	4,1008
AntiW (S-PD)	$T_T [s]$	4,1008
Feed Forward	$\beta [-]$	0,5



Obr. 7.36: Průběhy výstupu regulované soustavy č. 9 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v **Tab. 7.22**



Obr. 7.37: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 7.22 (S9)**



Obr. 7.38: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 7.22 (S9)**

Již při pohledu na přenosovou funkci této soustavy, resp. její časovou konstantu se vybízí použít periodu vzorkování $T_{vz} = 0,1s$. Jak již ale bylo naznačeno při simulacích soustavy č. 1, kombinace nevhodné velikosti periody vzorkování s velkým zesílením může způsobit rozkmitání testovaného systému MTBasicsPID regulátorem. V **příloze 3** na **Obr. P3.12** a **Obr. P3.13** je zobrazen výstup této testované soustavy společně s akčním zásahem použitého regulátoru MTBasicsPID, pro nastavení hodnot parametrů regulátorů určených Z-N metodu, při periodě vzorkování $T_{vz} = 0,1s$. Soustava je rozkmitána tlumenými kmity a ani po 70 vteřinách, kdy vstupuje porucha, není výstup soustavy ustálen. Z toho důvodu byla použita perioda vzorkování $T_{vz} = 0,01s$.

Překmit při náběhu žádané hodnoty pro PSD regulátor s Feed-Forward strukturou na **Obr. 7.36** lze odstranit zmenšením hodnoty parametru β .

Hodnoty parametrů regulátorů určené dle funkčního bloku harmonické analýzy MTBasicsOscillationTuning (**Příloha 4 – Tab. P3.12**) jsou téměř shodné s hodnotami parametrů z **Tab. 7.22**. Výrazně nižší je pouze hodnota zesílení regulátorů. Ta má za následek menší velikost prvního překmitu při náběhu žádané hodnoty. Reakce na působení poruchy jsou totožné.

7.10 Soustava č. 10 (S10)

Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,05$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na člen $\frac{1}{(p+1)^2}$ soustavy v čase $t = 25$ s.

$$F_{10}(p) = \frac{2}{(10p + 1)(p + 1)^2}$$

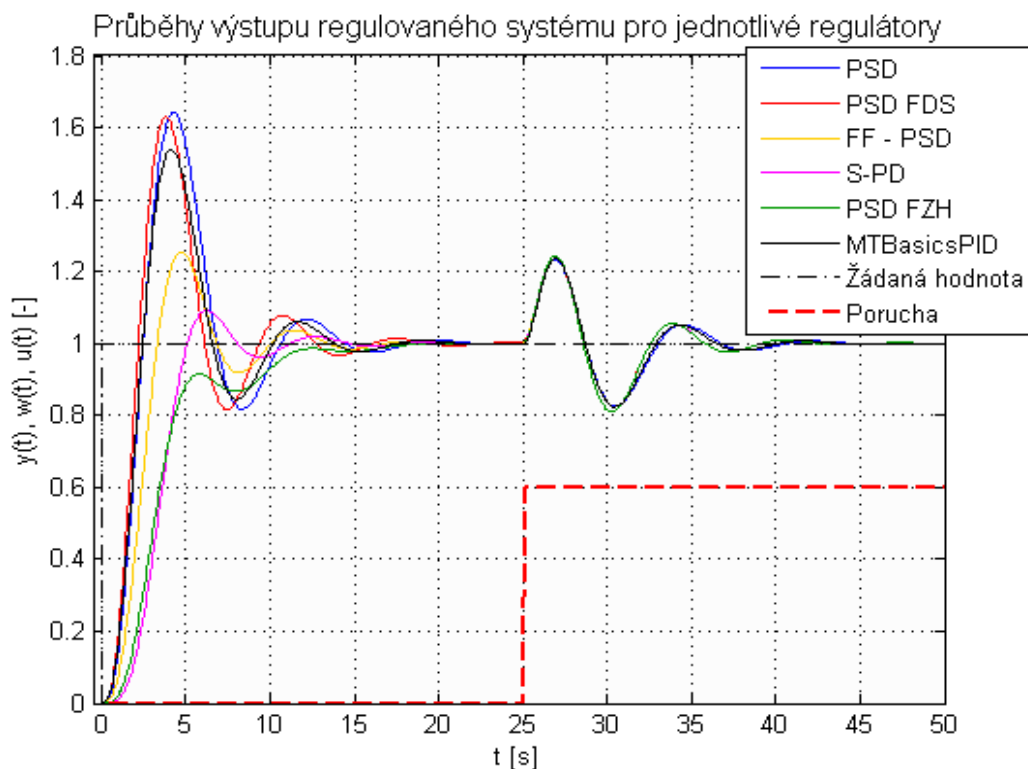
Tab. 7.23: Kritické parametry soustavy č. 10 získané pomocí Matlabu ($T_{vz} = 0,05$ s)

Kritické zesílení	$K_{krit} [-]$	11,505
Kritická perioda	$T_{krit} [s]$	5,8783

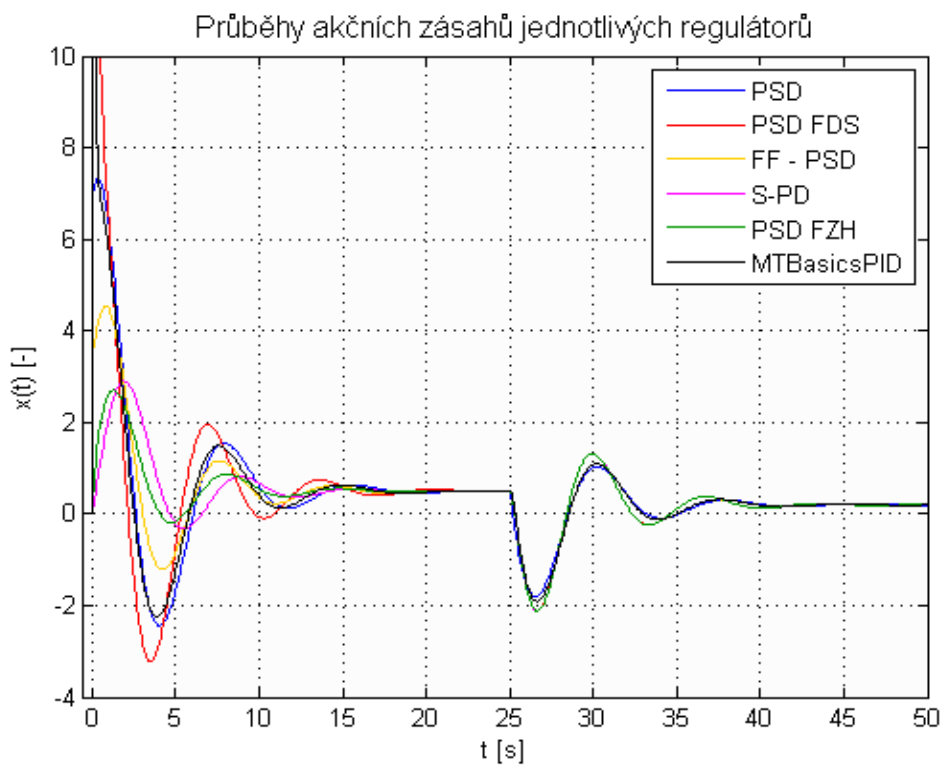
Tab. 7.24: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle **Tab. 5.1** a **Tab. 7.23** (S10)

Perioda vzorkování	$T_{vz} [s]$	0,05
Zesílení regulátoru	$K[-]$	6,9003
Integrační časová konstanta	$T_i [s]$	2,9391
Derivační časová konstanta	$T_D [s]$	0,7348
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	$T_f [s]$	0,07348

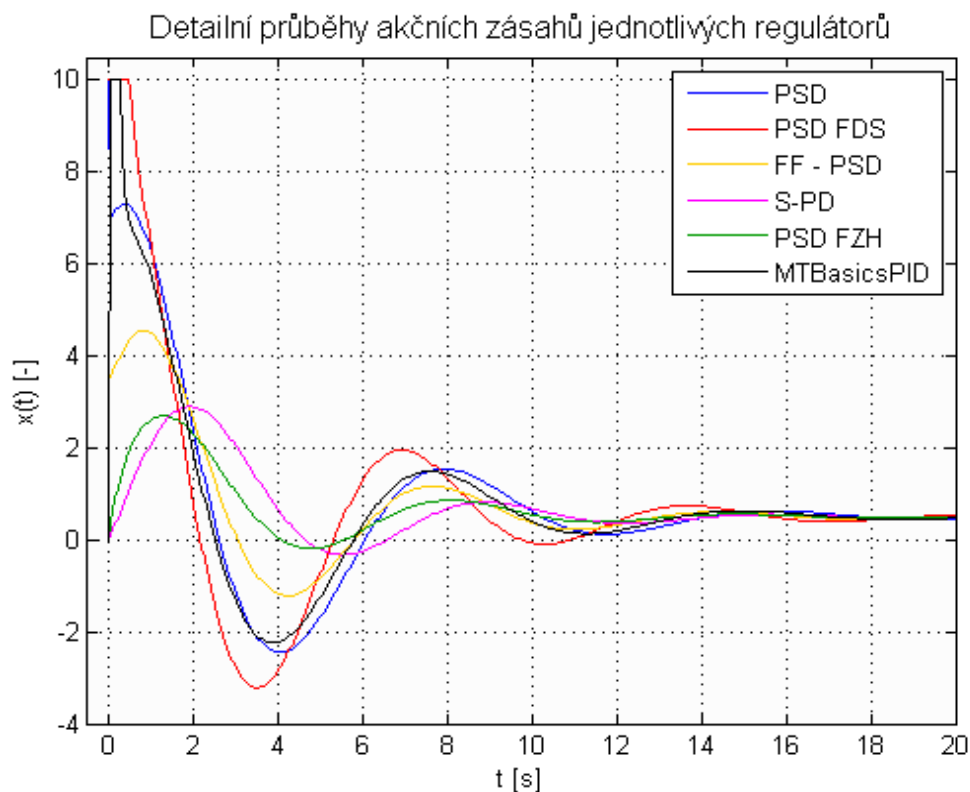
Zesilovací činitel filtru derivační složky	$N [-]$	3
Filtr žádané hodnoty	$\alpha [-]$	0,0
	$T_1 [s]$	3,6739
AntiW (S-PD)	$T_T [s]$	3,6739
Feed Forward	$\beta [-]$	0,5



Obr. 7.39: Průběhy výstupu regulované soustavy č. 10 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v **Tab. 7.24**



Obr. 7.40: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 7.24 (S10)**



Obr. 7.41: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 7.24 (S10)**

Dle očekávání, regulátory pro omezení překmitu omezují překmit při náběhu žádané hodnoty (60% pro PSD regulátor). V tomto případě, jako jediný, je průběh výstupu regulované soustavy za použití PSD regulátoru s filtrem hodnoty bez překmitu.

Vzhledem k povaze soustavy byly hodnoty parametrů regulátorů uvedené v **Tab. P2.13** určeny pomocí identifikační bloku MTBasicsOscillationTuning. Porovnání průběhů získaných použitím zmíněných parametrů (**příloha 2: Obr. P2.37**) a průběhů na **Obr. 7.39** dokazuje již několikrát zmíněnou skutečnost, že použitím nastavení parametrů regulátorů dle B&R dosáhnout méně kmitavého průběhu výstupu regulovaného systému.

8 TESTOVÁNÍ NA REÁLNÝCH MODELECH

Testování na reálných modelech bylo prováděno na laboratorním přípravku (zapojení OZ) připojeném k programovatelnému automatu B&R. Samotné testování probíhalo dvojím způsobem. Prvně byly použity regulátory zmíněné v **kapitole 3** za použití programu Matlab-Simulink (R2009b) komunikující s Automation Studiem (V3.0.80.38) prostřednictvím komunikačního klienta [11]. A následně byl prostřednictvím Automation Studia (V4.1.9.44) použit regulátor firmy B&R.

Na laboratorním přípravku bylo možno nastavit tři časové konstanty testovaných soustav. Teoreticky tedy přenosová funkce testovaného přípravku odpovídá přenosu:

$$F_S(p) = \frac{1}{(T_1p + 1)(T_2p + 1)(T_3p + 1)}$$

Reálně se ale jedná o pouhý odhad, je-li v úvahu bráno stárí daného laboratorního přípravku a tím také přítomný drift, či působící nelinearity. Byly použity 2 varianty nastavení časových konstant. Vzhledem k tomu, že nebyla provedena identifikace reálných soustav, byly tyto soustavy přivedeny na mez stability a na základně zjištěných kritických parametrů byly dle druhé Z-N metody navrženy hodnoty parametrů regulátorů. Stejně jako v případě simulací byly použity regulátory zmíněné v **kapitolách 3 a 4**.

Pro obě soustavy jsou zobrazeny průběhy podle klasické nastavení Z-N (**Tab. 5.1**) Průběhy, u kterých byly hodnoty parametrů regulátorů určeny funkčním blokem MTBasicsStepTuning jsou uvedeny na konci **přílohy 2**.

Stejně jako v případě testování regulátorů na simulačních modelech, byly i pro toto testování regulátorů nastaven maximální a minimální možný akční zásah regulátorů. Opět je to hodnota ± 10 . Zde se však jedná o maximální a minimální možné hodnoty napětí, jež mohly být na vstupu testovaného laboratorního přípravku.

8.1 Reálná soustava č. 1 (R1)

Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,05$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na poslední člen $\frac{1}{(p+1)}$ soustavy v čase $t = 15$ s.

$$F_1(p) = \frac{1}{(p + 1)^3}$$

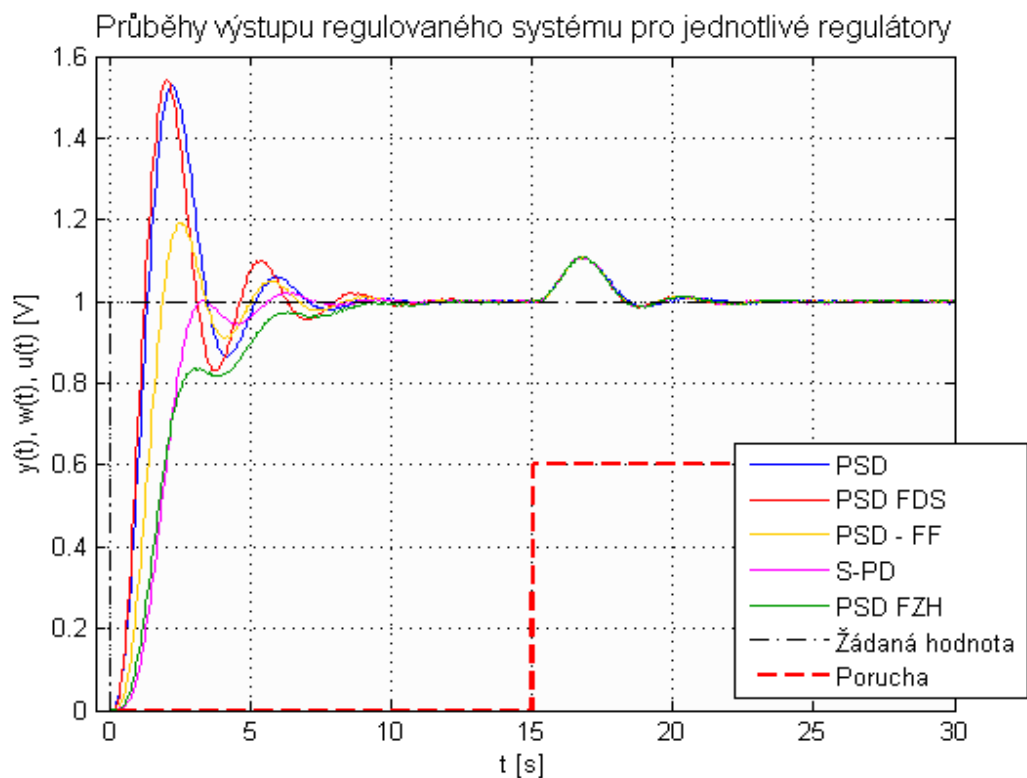
Tab. 8.1: Kritické parametry reálné soustavy č. 1 ($T_{vz} = 0,05$ s)

Kritické zesílení	$K_{krit} [-]$	8,8
Kritická perioda	$T_{krit} [s]$	3,2

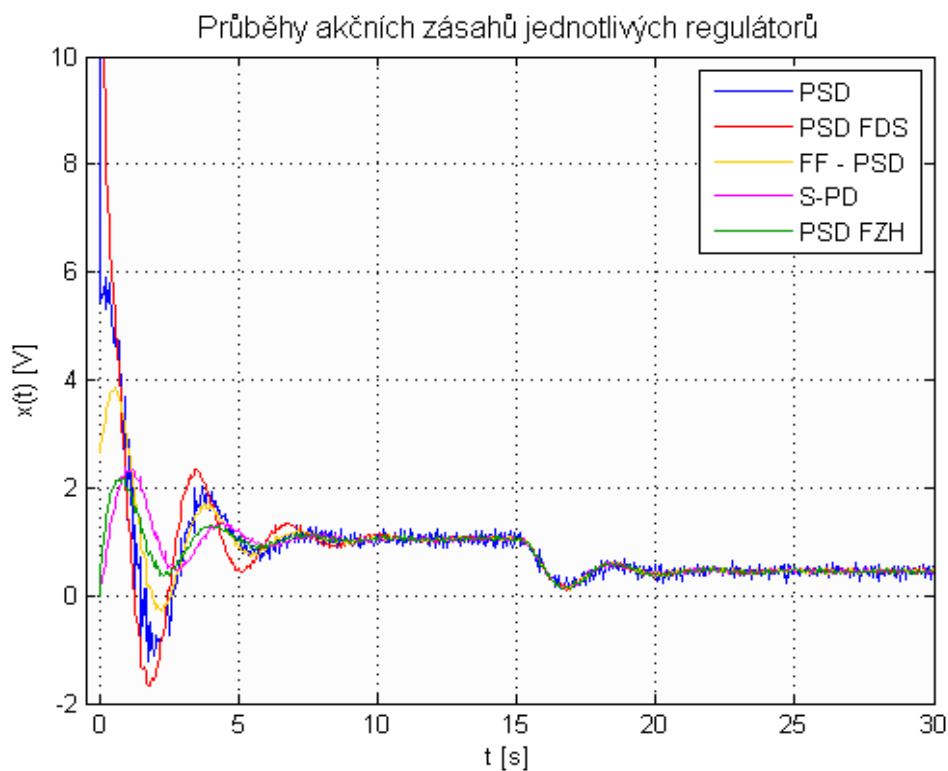
Tab. 8.2: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle **Tab. 5.1** a **Tab. 8.1 (R1)**

Perioda vzorkování	$T_{vz} [s]$	0,05
Zesílení regulátoru	$K[-]$	5,280
Integrační časová konstanta	$T_I [s]$	1,60
Derivační časová konstanta	$T_D [s]$	0,40
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	$T_f [s]$	0,004

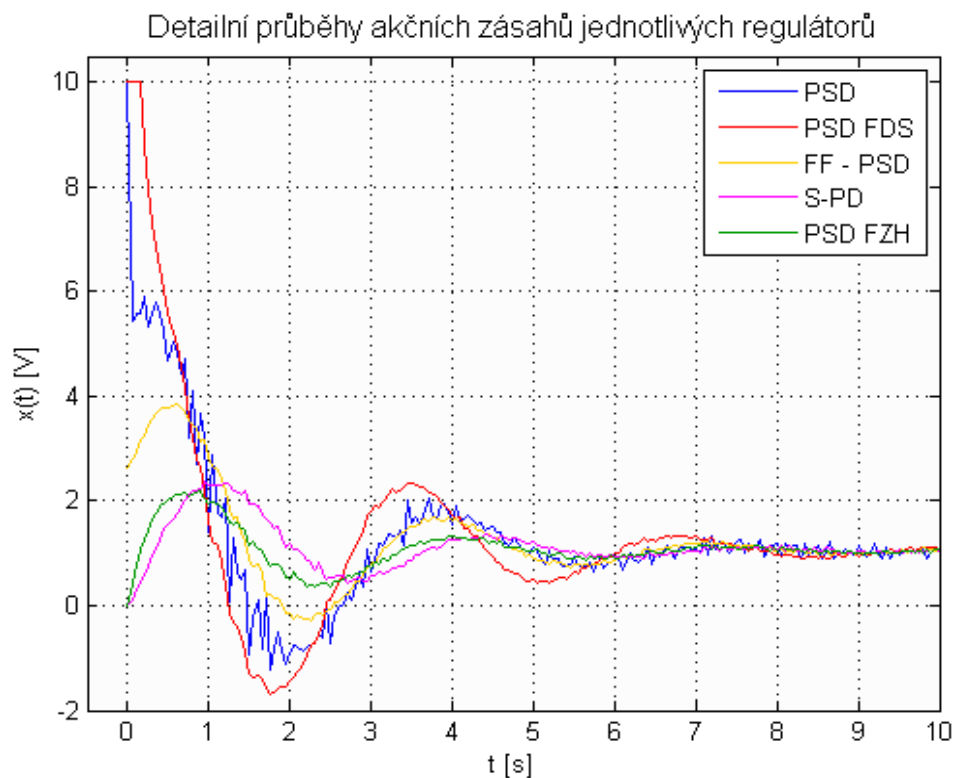
Zesilovací činitel filtru derivační složky	$N [-]$	3
Filtr žádané hodnoty	$\alpha [-]$	0,0
	$T_I [s]$	2,0
AntiW (S-PD)	$T_T [s]$	2,0
Feed Forward	$\beta [-]$	0,5



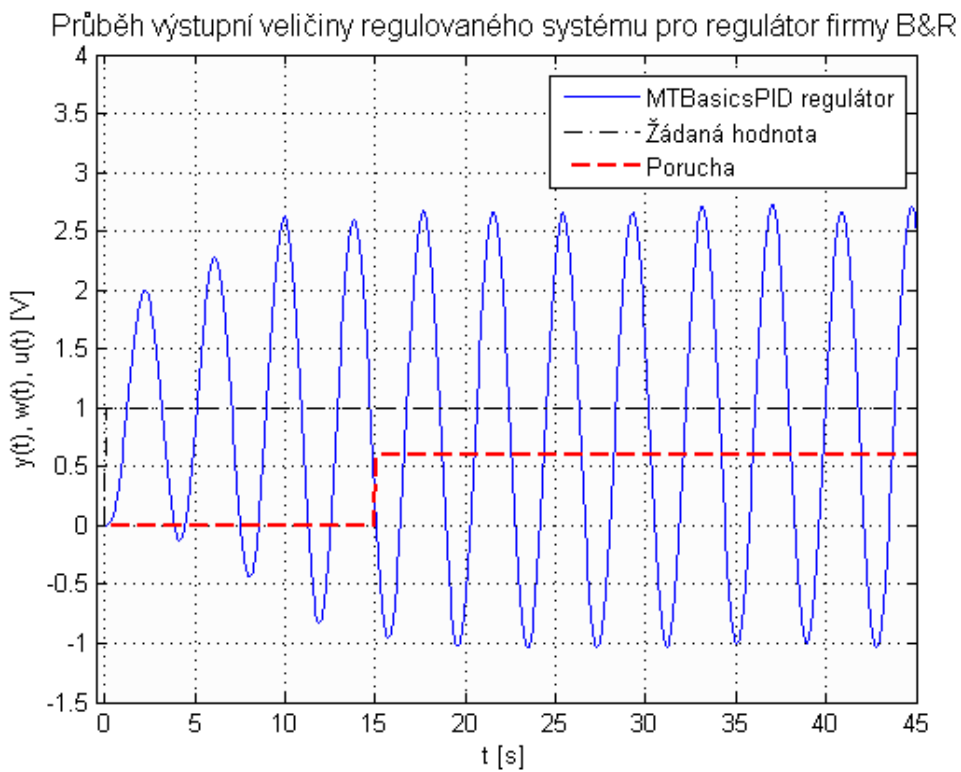
Obr. 8.1: Průběhy výstupu reálné soustavy č. 1 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v **Tab. 8.2**



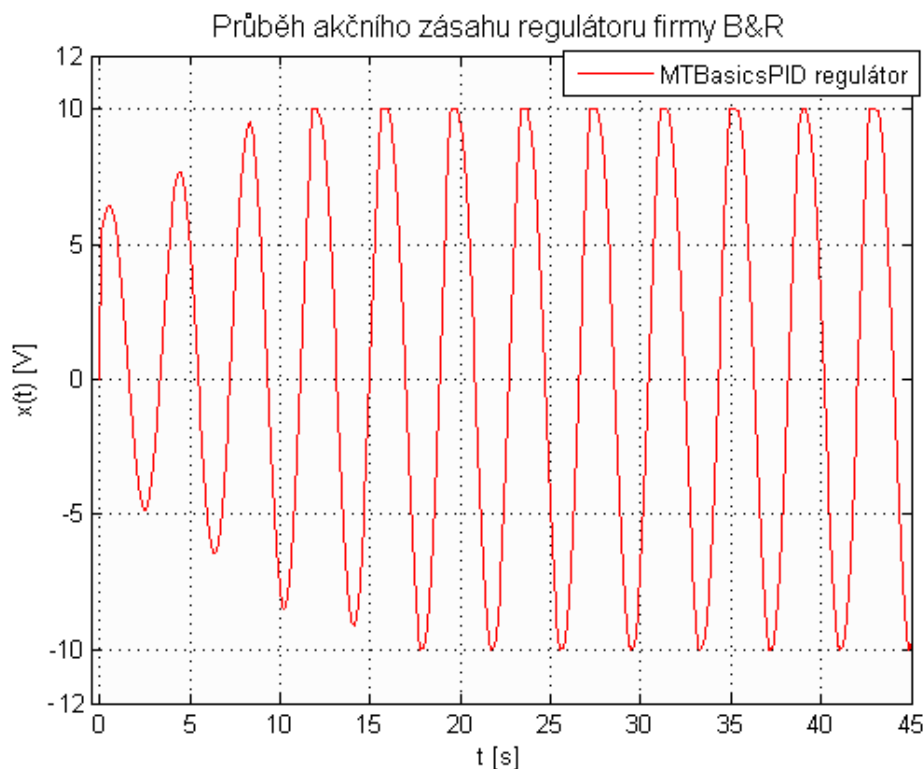
Obr. 8.2: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 8.2 (R1)**



Obr. 8.3: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 8.2 (R2)**



Obr. 8.4: Průběh výstupu reálné soustavy č. 1 pro hodnoty parametrů regulátoru MTBasicsPID uvedených v **Tab. 8.2**



Obr. 8.5: Průběh akčního zásahu regulátoru MTBasicsPID pro hodnoty parametrů tohoto regulátoru uvedených v **Tab. 8.2 (R1)**

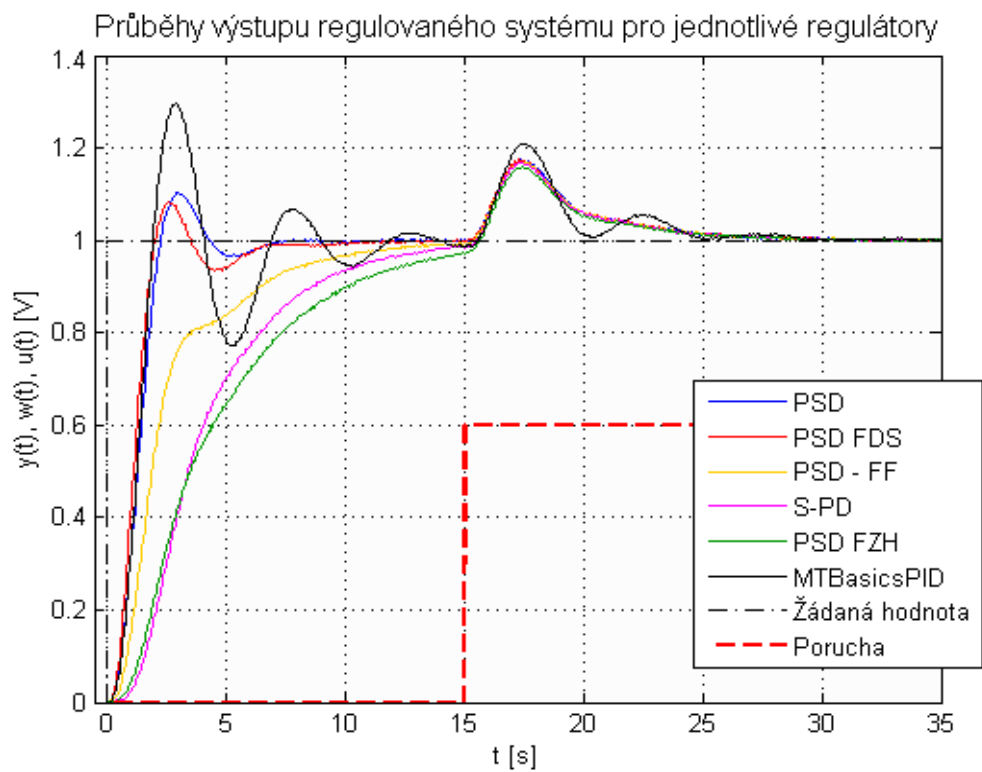
Chování MTBasicsPID regulátoru je v případě regulace reálné soustavy č. 1 (**R1**) podobné, jako u simulační soustavy č. 1 (**S1**) Totiž regulátor MTBasicsPID opět rozkmitává soustavu ustálenými kmity (**Obr. 8.4** a **Obr. 8.5**) Znovu se tedy projevuje nevhodná kombinace zvolené periody vzorkování společně s nastavením velikosti zesílení a integrační časové konstanty regulátoru dle Z-N metody.

I v tomto případě bylo provedeno testování nastavení hodnot parametrů regulátorů dle Z-N metody s úpravou pro omezení kmitání. Jednotlivé hodnoty parametrů jsou uvedeny v **Tab. 8.3** a výsledné průběhy jsou zobrazeny na **Obr. 8.6**, **8.7** a **8.8**.

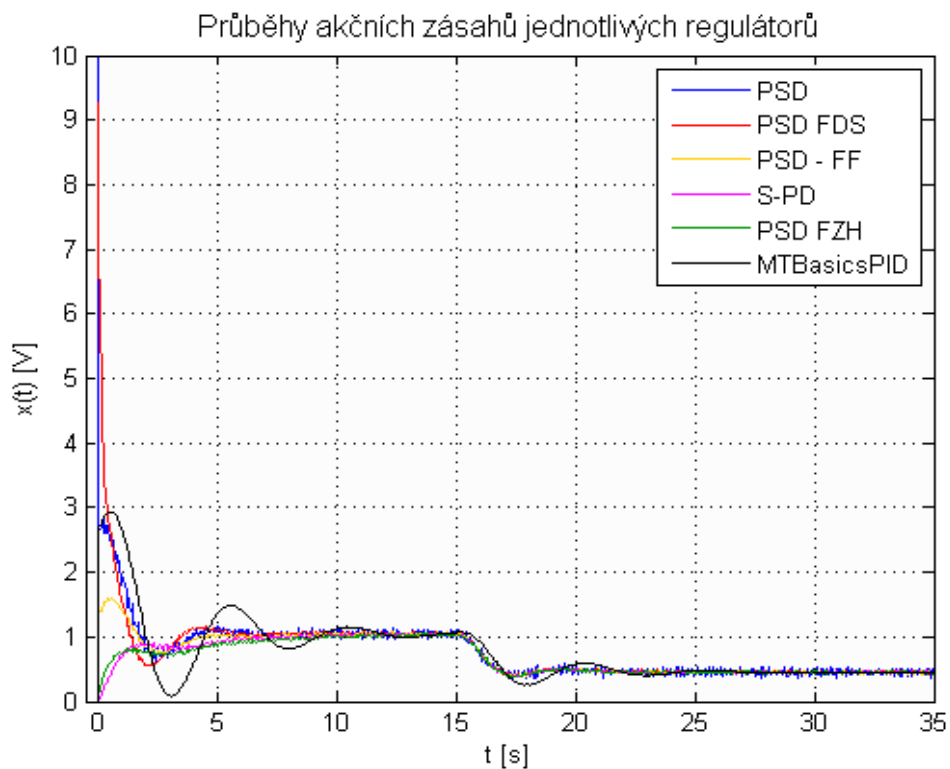
Tab. 8.3: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle **Tab. 5.2** a **Tab. 8.1 (R1)**

Perioda vzorkování	T_{vz} [s]	0,05
Zesílení regulátoru	K [-]	2,64
Integrační časová konstanta	T_I [s]	3,20
Derivační časová konstanta	T_D [s]	0,40
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	T_f [s]	0,04

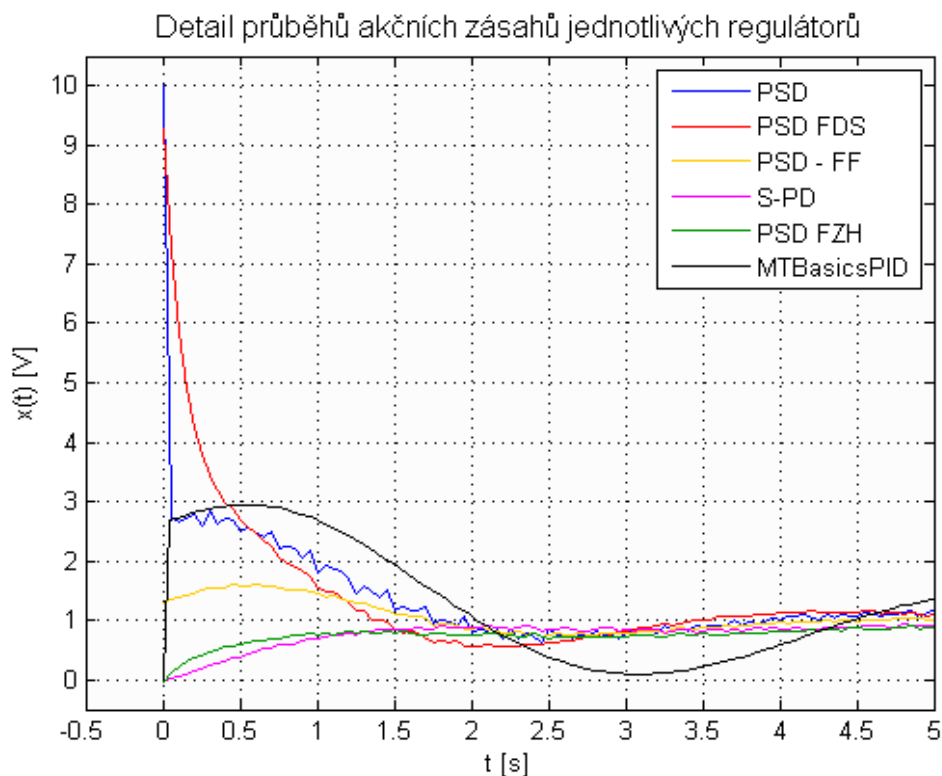
Zesilovací činitel filtru derivační složky	N [-]	3
Filtr žádané hodnoty	α [-]	0,0
	T_I [s]	3,6
AntiW (S-PD)	T_T [s]	3,6
Feed Forward	β [-]	0,5



Obr. 8.6: Průběhy výstupu reálné soustavy č. 1 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v **Tab. 8.3**



Obr. 8.7: Průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 8.3 (R1)**



Obr. 8.8: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 8.3 (R1)**

Byť již regulátor MTBasicsPID nerozkmitává soustavu, je stále přechodný děj příliš kmitavý. Také reakce na poruchu je větší oproti ostatním regulátorům. (**Obr. 8.6**) Tato problematika je popsána již v **podkapitole 7.1** při provádění simulací.

V průbězích výstupu regulované soustavy je pro použití PSD regulátor společně s PSD regulátorem s filtrací derivační složky (**Obr. 8.6**) přítomen pouze 1 překmit žádané hodnoty (dostí malý, asi 10%). Kdežto na **Obr. 8.1** je pro tyto regulátory překmit okolo 50% žádané hodnoty. Použitím metody Z-N s úpravou pro omezení kmitání lze tedy dosáhnout „kvalitnějších“ výsledků, neboli lépe řečeno méně kmitavého průběhu přechodného děje spolu a s tím související velikostí akčních zásahů regulátoru.

Průběh výstupu této testované soustavy společně s průběhem akčního zásahu regulátoru MTBasicsPID pro periodu vzorkování $T_{vz} = 0,01s$ je uveden v **příloze 3** na **Obr. P4.14** a **Obr. P4.15**.

8.2 Reálná soustava č. 2 (R2)

Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,02$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na vstup soustavy v čase $t = 15$ s.

$$F_2(p) = \frac{1}{(1 + 0,7p)(1 + 2p)(1 + 0,2p)}$$

Tab. 8.4: Kritické parametry reálné soustavy č. 2

Kritické zesílení	$K_{krit} [-]$	17,6
Kritická perioda	$T_{krit} [s]$	2,2

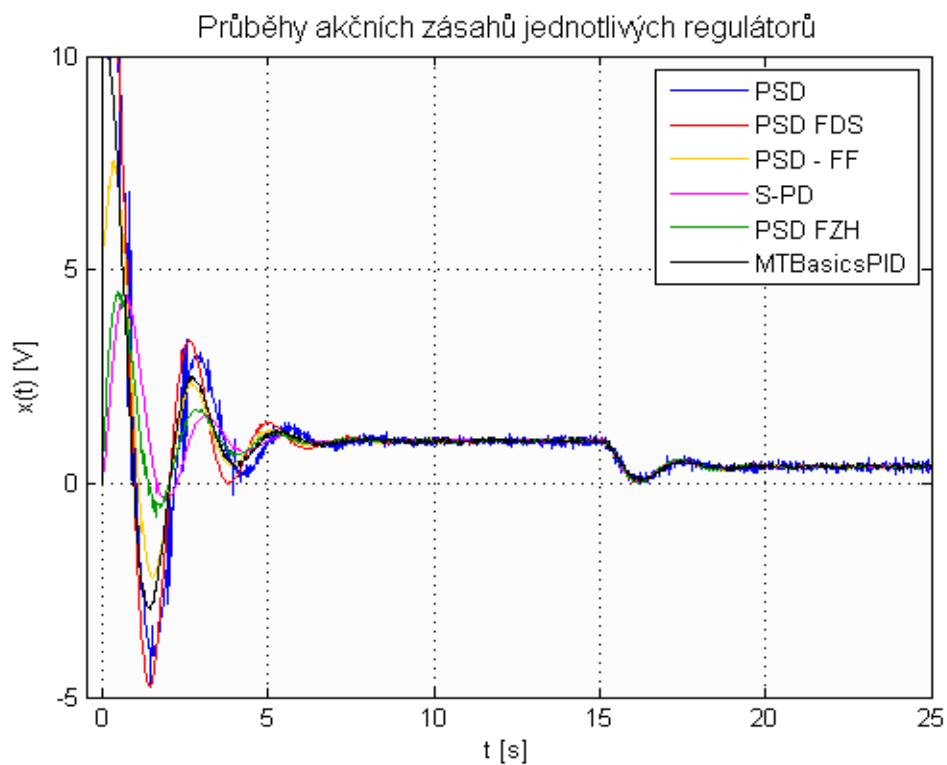
Tab. 8.5: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle **Tab. 5.1** a **Tab. 8.4 (R2)**

Perioda vzorkování	$T_{vz} [s]$	0,02	Zesilovací činitel filtru derivační složky	N [-]	3
Zesílení regulátoru	$K [-]$	10,56	Filtr žádané hodnoty	$\alpha [-]$	0,0
Integrační časová konstanta	$T_I [s]$	1,10		$T_I [s]$	1,375
Derivační časová konstanta	$T_D [s]$	0,2750	AntiW (S-PD)	$T_T [s]$	1,375
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	$T_f [s]$	0,0275	Feed Forward	$\beta [-]$	0,5

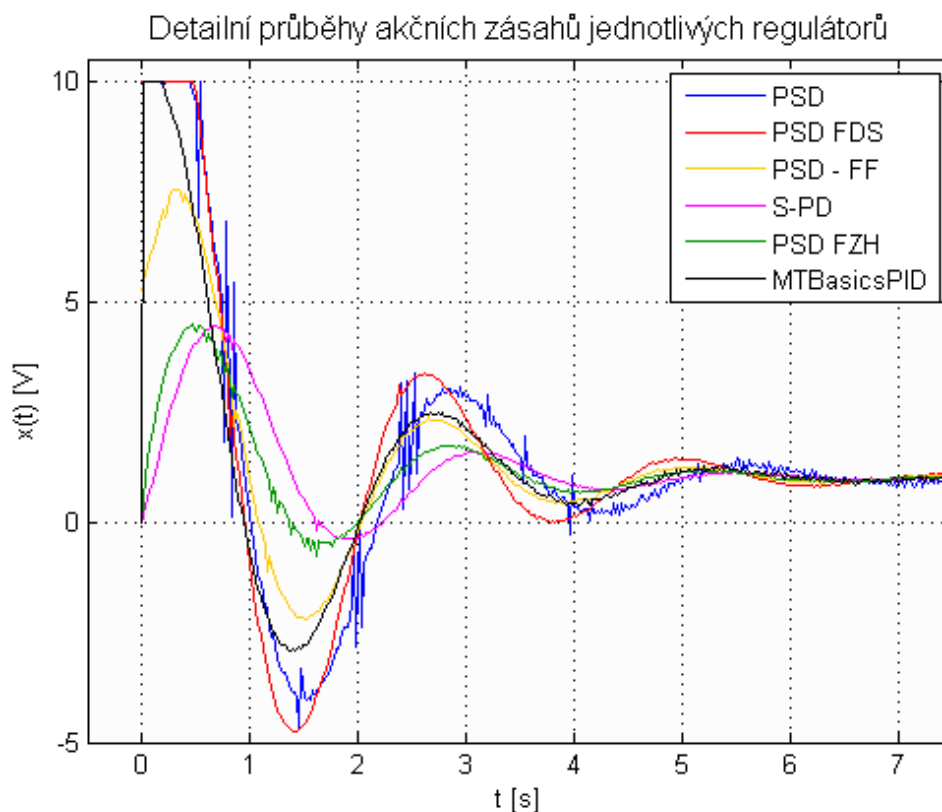
Tato soustava je rychlejší než předešlá soustava, což je dáno malými časovými konstantami. Oproti první reálné soustavě, jsou hodnoty parametrů regulátorů pro tuto soustavu rozdílné. Zejména 2krát větší zesílení a menší hodnota integrační časové konstanty. Jak lze však vidět na průbězích na **Obr. 8.9**, MTBasicsPID regulátor nerozkmitává soustavu netlumenými a ani tlumenými kmity. Toho bylo dosaženo vhodnou volbou velikosti periody vzorkování. Ta byla zvolena jako jedna desetina nejmenší časové konstanty testované soustavy.



Obr. 8.9: Průběhy výstupu reálné soustavy č. 2 pro hodnoty parametrů jednotlivých regulátorů uvedených v **Tab. 8.5**



Obr. 8.10: Průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 8.5 (R2)**



Obr. 8.11: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. 8.5 (R2)**

Pro obě reálné soustavy, bylo provedeno i testování za použití hodnot parametrů regulátorů určených funkčním blokem MTBasicsStepTuning. V **příloze 2** jsou v **Tab. P2. 14** a **Tab. P2.15** zmíněné parametry uvedeny. Použitím těchto parametrů bylo dosaženo „optimálních“ přechodných dějů. V případě soustavy č. 2 je zesílení regulátoru téměř 10krát menší a integrační časová konstanta má dvojnásobnou velikost. Velikost překmitu při náběhu změny žádané hodnoty je v tomto případě v řádech jednotek procent (**Obr. P2.43**), oproti průběhům na **Obr. 8.9**. Zde je velikost překmitu až 70% pro PSD regulátor bez filtrace derivační složky.

Pro soustavu č. 1 (**Obr. P2.40**) bylo dosaženo podobného přechodného děje, jako při použití hodnot parametrů regulátorů dle Z-N metody s úpravou pro omezení kmitání (**Tab. 8.3**). Pro zmíněné nastavení hodnot parametrů regulátorů (**Tab. P2. 14**, zachována stejná velikost periody vzorkování) je průběh pro MTBasicsPID regulátor téměř totožný průběhem pro PSD regulátor s filtrací derivační složky. Lepší je pro nastavení parametrů regulátorů dle B&R v tomto případě i reakce na poruchu. Ta není tak dlouhá jak tomu na **Obr. 8.6** (menší velikost integrační časové konstanty).

9 ZÁVĚR

Byla provedena analýza a porovnání různých struktur diskrétních variant PID regulátoru, jakožto i PID regulátoru používaného firmou B&R, testovaných na předem zvolených modelech systémů nejčastěji se objevujících v praxi

Testování na zvolených modelech systémů v kapitole 7 bylo prováděno pomocí programu Matlab, jeho nadstavby Simulink a také pomocí vývojového prostředí Automation Studio, ve kterém bylo realizováno testování regulátoru MTBasicsPID.

U všech testovaných modelů soustav se nejvyšší hodnotou překmitu při náběhu žádané hodnoty vyznačovaly PSD regulátor a PSD regulátor s filtrací derivační složky a to v rozmezí 30% - 60% dle typu soustavy pro Z-N nastavení a v rozsahu 5% - 50% dle typu soustavy pro nastavení dle B&R. Toto nastavení hodnot parametrů regulátorů bylo realizováno dvojnásobným způsobem, resp. použitím dvou identifikačních bloků zmíněných v kapitole 4. Tedy funkčního bloku aproximace přechodové charakteristiky MTBasicsStepTuning a funkčního bloku harmonické analýzy MTBasicsOscillationTuning. Pro identifikaci soustav s dopravním zpožděním byl použit funkční blok harmonické analýzy, neboť při identifikaci funkčním blokem aproximace přechodové charakteristiky způsobovaly výsledné parametry rozkmitání testovaného systému. Průběhy jak výstupů regulovaných systémů, tak i akčních zásahů regulátorů pro výše uvedené nastavení jsou umístěny v **příloze 3**.

Obecně lze říci, že oproti Z-N metodě nastavení hodnot parametrů regulátorů, která předpokládá 3 viditelné překmity, byly pro nastavení dle B&R přítomny pouze 1 až 2 překmity. To ovšem neplatí pro testované modely soustav s dopravním zpožděním, kde měly výsledné průběhy až 4 (případně 5) viditelných překmitů. Reakce na jednotkový skok poruchy, působící téměř vždy do nějaké části testovaného systému, byly však téměř shodné pro obě použítá nastavení parametrů regulátorů.

V průběhu simulací bylo zjištěno, že použití regulátoru MTBasicsPID firmy B&R při různých strukturách procesů je ovlivněno hlavně maximální možnou hodnotou velikosti periody vzorkování v kombinaci s návrhem parametrů regulátoru pomocí metody Ziegler-Nichols. Jasným příkladem je ověření jak simulacemi, tak i testováním na reálném přípravku pro soustavu č. 1. Zde pro periodu vzorkování zvolenou $T_{vz} = 0,05s$ a nastavením hodnot parametrů regulátorů dle Z-N metody začal testovaný systém kmitat tlumenými kmity. Obdobně tomu bylo i při provádění simulací na soustavě č. 9 pro velikost periody vzorkování $T_{vz} = 0,1s$.

U soustav č. 4 a 5 je při náběhu žádané hodnoty přítomen podkmit. To je způsobeno přítomnou nestabilní nulou v přenosech jednotlivých soustav. U soustav prvního řádu s dopravním zpožděním, tedy soustav č. 6 a 7 se do značné míry projevoval, samozřejmě v kombinaci s dopravním zpožděním, vliv derivační složky, jež se prezentovala pravidelnými zákmity v akčních zásazích použitých regulátorů. V případě

soustavy č. 6 byla hodnota derivační časové konstanty snížena na velice nízkou hodnotu. (řádově jednotky ms) A na základě následně získaných průběhů lze konstatovat, že v případě soustavy č. 6 by stačilo použít PI (PS) regulátor.

Byť působil jednotkový skok poruchy vždy do nějaké části testovaného systému, nebyly „reakce“ jednotlivých regulátorů příliš odlišné.

Dle zadání bylo také provedeno testování na reálných modelech. Zajímavá je zde soustava č. 2. u které je asi největší rozdíl ve velikostech překmitů při náběhu žádané hodnoty pro již zmíněné metody nastavení parametrů regulátorů. Dle Z-N metody se velikost prvního překmitu pohybuje okolo 70%. Naproti tomu, při použití nastavení regulátorů dle B&R byl překmit při náběhu žádané hodnoty okolo 10%.

Původním záměrem bylo použít realizovat algoritmy regulátorů používaných firmou B&R. Ale vzhledem k tomu, že mi tyto struktury regulátorů (algoritmy) nebyly poskytnuty, pravděpodobně se jedná o know how zmíněné firmy, byl použit regulátor, obsažený v knihovně Automation Studia (taktéž produkt firmy B&R), který je navržen dle zmíněných algoritmů.

Zmíněné testování použitím regulátoru firmy B&R nebylo prováděno pomocí programu Matlab a to z důvodů absence driverů pro zmíněnou verzi Automation Studia.

Na základě naměřených průběhů regulovaných soustav za použití uvedených struktur regulátorů spolu s regulátorem firmy B&R, lze konstatovat, že se MTBasicsPID regulátor firmy B&R se svým průběhem nejvíce podobá klasickému PSD regulátoru s filtrací derivační složky. Případné rozdíly v průbězích jsou dle mého názoru způsobeny rozdílnými způsoby filtrace derivační složky.

Na základě provedených simulací a ověření na reálných modelech lze konstatovat, že pro uvedená nastavení regulátoru MTBasicsPID není možno dosáhnout přechodného děje bez překmitu. Ten by však mohl být dosažen dodatečnou úpravou jednotlivých parametrů regulátorů.

10 LITERATURA

- [1] PIVOŇKA, P.: Číslicová řídicí technika [Skriptum]. Brno: VUT, FEKT, 2012. 112s
- [2] Automation Studio, B&R Automation Studio Software Help, Ver. V 4.1.9.44 [cit 2017-22-05]
- [3] ÅSTRÖM, K., J., HÄGGLUND, T.: Benchmark Systems for PID Control. Proceedings IFAC Workshop, Terrassa, Spain, 2000.
- [4] BLAHA, P., VAVŘÍN, P.: Řízení a regulace I. [Skriptum]. Brno: VUT, FEKT, 2009. 213s.
- [5] BOBÁL, V. a kol.: Praktické aspekty samočinně se nastavujících regulátoru a implementace. VUT Brno, 1999. 242s.
- [6] SÝKORA, D. Návrh a realizace vzorových úloh pro PLC B&R Automation [online]. Brno: VUT,FSI, 2014 [cit. 2017-05-23].
Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/33432>
- [7] BULENÍNEC, M. Nastavování regulátorů PID typu variantami první a druhé metody Zieglera-Nicholse. [online]. Brno: VUT, FEKT, 2015 [cit. 2017-05-23].
Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/38768>
- [8] JURA, P.: Signály a systémy. Část 3. Diskrétní signály a diskrétní systémy.[Skriptum]. VUT, FEKT, Brno, 2010
- [9] PIVOŇKA, P. Comparative Analysis in Implementations Discrete PIDControllers. In Proceedings East West Fuzzy Colloquium 2008. Zittau,Germany, 2008. s. 162-167
- [10] PELIKÁN, Radek. Porovnávací studie diskretních PSD regulátorů [online]. VUT, FEKT, 2008 [cit. 2017-05-23].
Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/2990>
- [11] MALÍK, Dalibor. MATLAB/Simulink, Real-Time simulace a řízení [online]. Brno: VUT, FEKT, 2010 [cit. 2017-05-23].
Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/15684>

Seznam symbolů, veličin a zkratk

PID	Proporcionálně-integračně-derivační
PSD	Proporcionálně-sumačně-diferenční
PSD regulátor	Proporcionálně-sumačně-diferenční regulátor
PSD FDS	PSD regulátor s filtrací derivační složky
PSD FF	PSD regulátor s Feed-Forward strukturou (dopředným vstupem)
S-PD	Sumačně – proporcionálně diferenční regulátor
PSD FZH	PSD regulátor s filtrem žádané hodnoty
Z-N	Ziegler-Nichols (Ziegler-Nicholsova metoda)
K_{Krit}	Kritické zesílení [-]
K_{Krit}	Kritická perioda [s]
K	Zesílení regulátoru [-]
T_I	Integrační časová konstanta regulátoru [s]
T_D	Derivační časová konstanta regulátoru [s]
$w(t)$	Žádaná hodnota [-] [V]
$y(t)$	Výstup z procesu (soustavy) [-] [V]
$x(t)$	Akční zásah [-] [V]
$x(t)$	Porucha [-] [V]

Seznam příloh

Příloha 1: Popis použitých funkčních bloků obsažených v knihovnách AS

Příloha 2: Průběhy výstupů testovaných systémů a akčních zásahů regulátorů pro nastavení parametrů regulátorů dle B&R

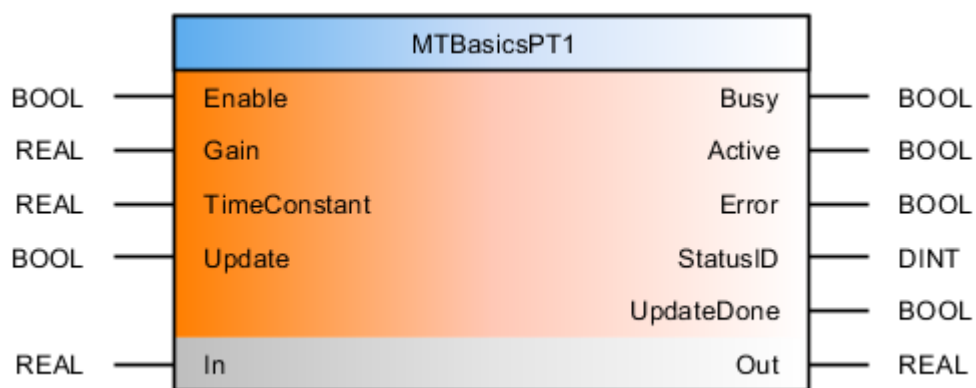
Příloha 3: Průběhy výstupů testovaných systémů a akčních zásahů regulátorů pro specifická nastavení parametrů regulátorů

PŘÍLOHA 1

Popis použitých funkčních bloků obsažených v knihovně AS

V této příloze je uveden popis vstupů a výstupů funkčních bloků popsaných v kapitole 4. Uvedeny jsou pouze „důležité“ vstupy a výstupy zmíněných bloků, které byly použity. [5] Všechny uvedené funkční bloky jsou v program volány se zvolenou periodou. Tato perioda odpovídá vzorkovací periodě T_{vz} , jak je uvedeno v kapitole 3.

Soustava 1. řádu MTBasicsPT1



Obr. P1.1: Funkční blok MTBasicsPT1 včetně vstupů a výstupů

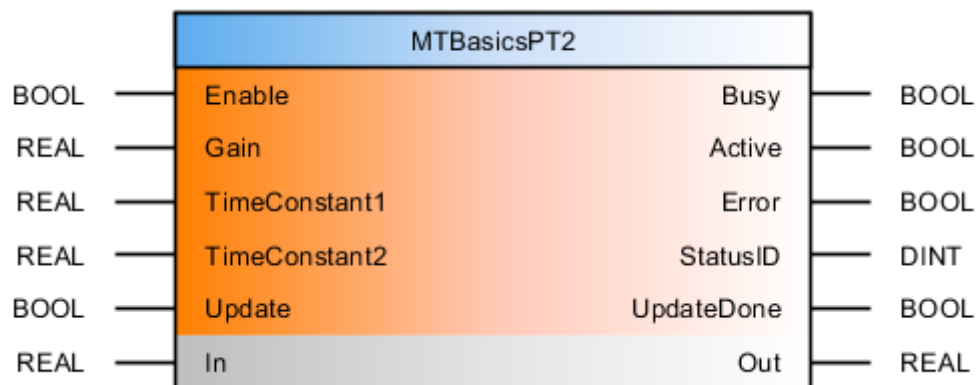
Vstupy:

- **Enable:** Vstup typu BOOL zajišťující zapnutí /vypnutí bloku.
- **Gain:** Zesílení soustavy
- **TimeConstant:** Časová konstanta soustavy
- **Update:** Při náběžné hraně aktualizuje všechny předchozí hodnoty (pokud byly v průběhu programu změněny)
- **In:** Vstup soustavy

Výstupy:

- **Active** Funkční blok je aktivní (je používán)
- **Error** Pokud je tento výstup aktivní, došlo k chybě
- **UpdateDone** Aktualizace prvních tří vstupů podmíněná vstupem **Update** proběhla úspěšně
- **Out:** Výstup soustavy

Soustava 2. řádu MTBasicsPT2



Obr. P1.2: Funkční blok MTBasicsPT2 včetně vstupů a výstupů

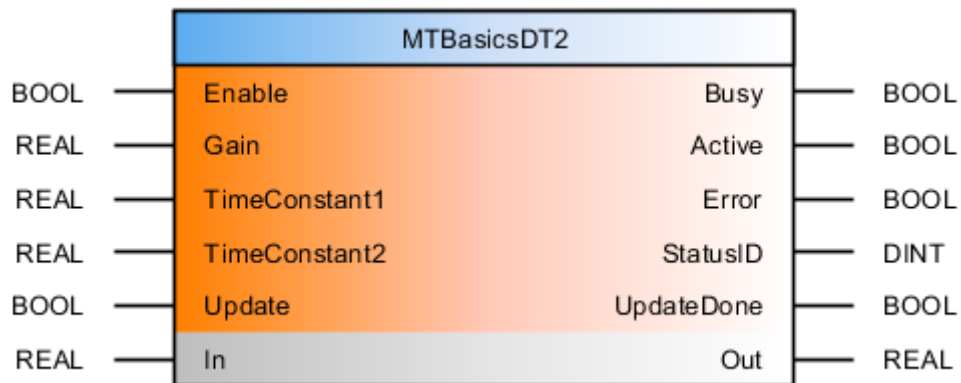
Vstupy:

- **Enable:** Vstup typu BOOL zajišťující zapnutí /vypnutí bloku.
- **Gain:** Zesílení soustavy
- **TimeConstant1:** První časová konstanta soustavy
- **TimeConstant2:** Druhá časová konstanta soustavy
- **Update:** Při náběžné hraně aktualizuje všechny předchozí hodnoty (pokud byly v průběhu programu změněny)
- **In:** Vstup soustavy

Výstupy:

- **Active** Funkční blok je aktivní (je používán)
- **Error** Pokud je tento výstup aktivní, došlo k chybě
- **UpdateDone** Aktualizace prvních čtyř vstupů podmíněná vstupem **Update** proběhla úspěšně
- **Out:** Výstup soustavy

Derivace 2. řádu MTBasicsDT2



Obr. P1.3: Funkční blok MTBasicsDT2 včetně vstupů a výstupů

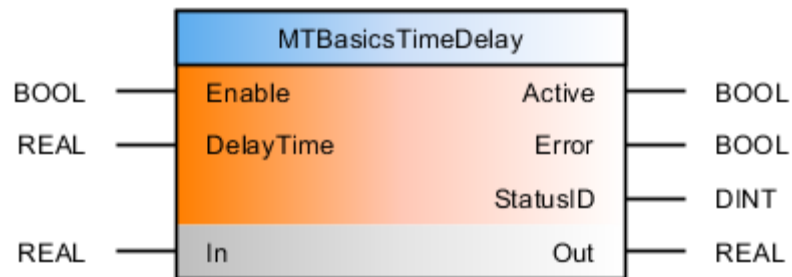
Vstupy:

- **Enable:** Vstup typu BOOL zajišťující zapnutí /vypnutí bloku.
- **Gain:** Zesílení
- **TimeConstant1:** První časová konstanta
- **TimeConstant2:** Druhá časová konstanta
- **Update:** Při náběžné hraně aktualizuje všechny předchozí hodnoty (pokud byly v průběhu programu změněny)
- **In:** Vstup bloky

Výstupy:

- **Active** Funkční blok je aktivní (je používán)
- **Error** Pokud je tento výstup aktivní, došlo k chybě
- **UpdateDone** Aktualizace prvních čtyř vstupů podmíněná vstupem **Update** proběhla úspěšně
- **Out:** Výstup soustavy

Dopravní zpoždění MTBasicsTimeDelay



Obr. P1.4: Funkční blok MTBasicsDT2 včetně vstupů a výstupů

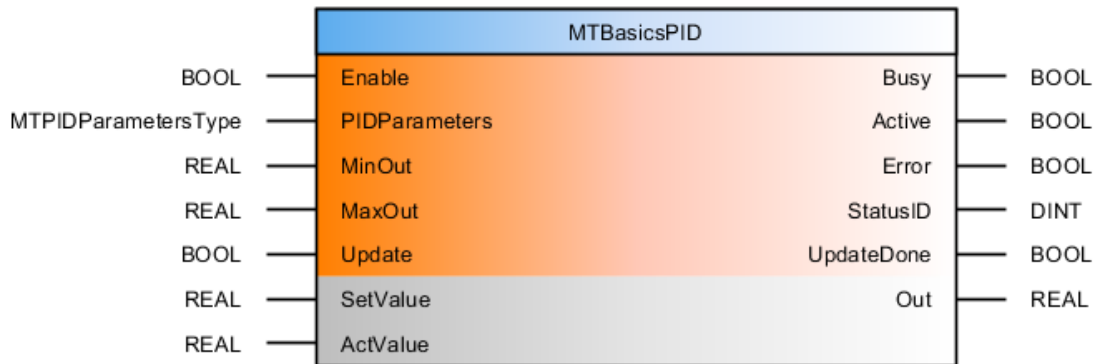
Vstupy:

- **Enable:** Vstup typu BOOL zajišťující zapnutí /vypnutí bloku.
- **Delay Time:** Hodnota, resp. velikost doby zpoždění ve vteřinách
- **In:** Vstup bloky

Výstupy:

- **Active** Funkční blok je aktivní (je používán)
- **Error** Pokud je tento výstup aktivní, došlo k chybě
- **Out:** Výstup soustavy

Regulátor MTBasicsPID



Obr. P1.5: Funkční blok MTBasicsPID včetně vstupů a výstupů

Vstupy:

- **Enable:** Vstup typu BOOL zajišťující zapnutí /vypnutí bloku.
- **PIDParameters:** Vstupem je proměnná typu MTPIDParameters (viz dále)
- **MinOut:** Omezení výstupu regulátoru – Minimální hodnota
- **MaxOut:** Omezení výstupu regulátoru – Maximální hodnota
- **Update:** Při náběžné hraně aktualizuje všechny předchozí hodnoty (pokud byly v průběhu programu změněny)
- **SetValue:** Žádaná hodnota přivedena na vstup regulátoru
- **ActValue:** Aktuální hodnota regulovaného systému

Výstupy:

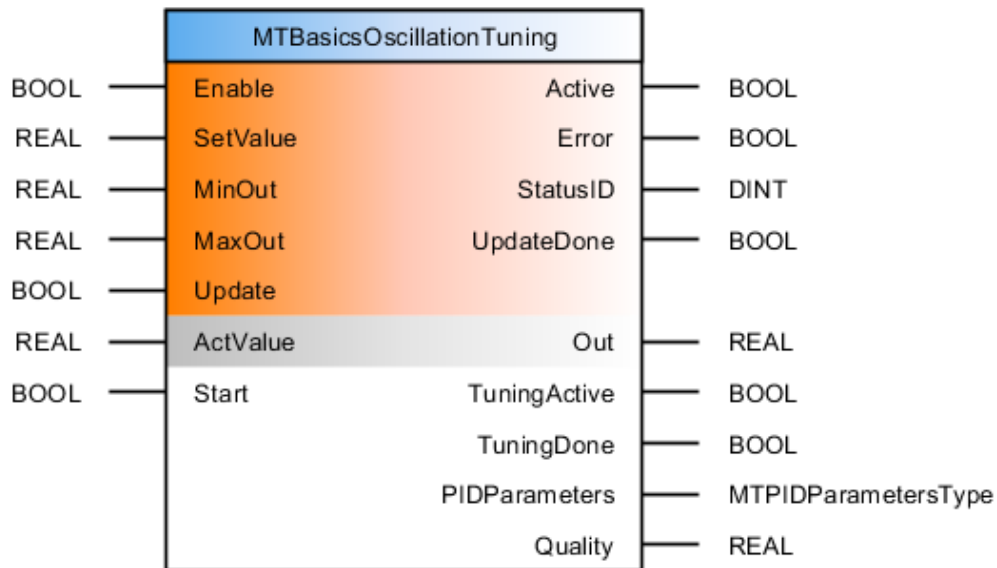
- **Active** Funkční blok je aktivní (je používán)
- **Error** Pokud je tento výstup aktivní, došlo k chybě
- **UpdateDone** Aktualizace prvních čtyř vstupů podmíněná vstupem **Update** proběhla úspěšně
- **Out:** Výstup regulátoru

MTPIDParameters

Jedná se o strukturu obsahující proměnné uvedené v rovnici (4.1). Všechny tyto proměnné jsou datového typu REAL.

- K_p Zesílení regulátoru
- T_i Integrační časová konstanta regulátoru
- T_d Derivační časová konstanta regulátoru
- T_f Časová konstanta filtru derivační složky

Funkční blok harmonické analýzy MTBasicsOscillationTuning



Obr. P1.6: Funkční blok MTBasicsOscillationTuning včetně vstupů a výstupů

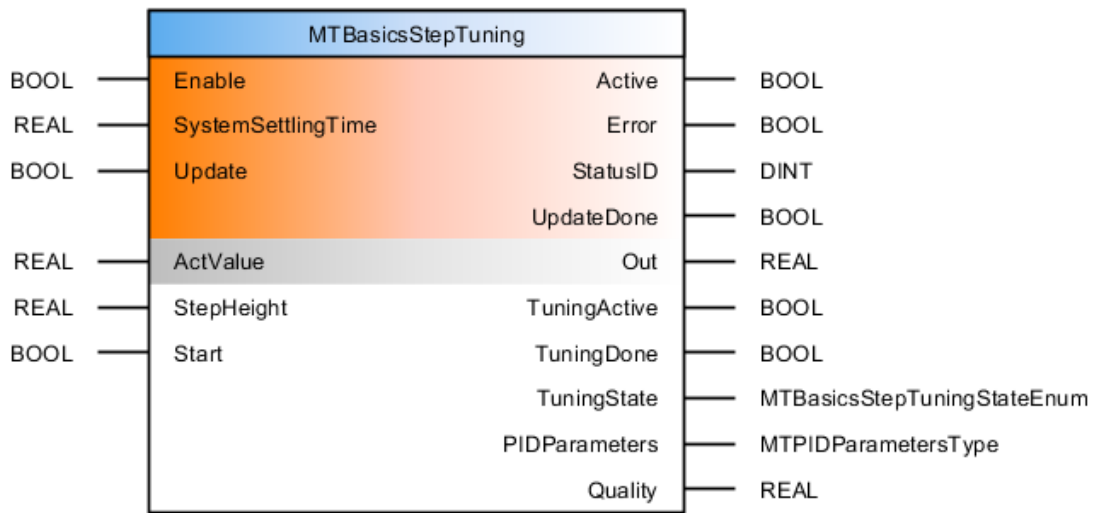
Vstupy:

- **Enable:** Vstup typu BOOL zajišťující zapnutí /vypnutí bloku.
- **SetValue:** Žádaná hodnota přivedena na vstup tohoto bloku
- **MinOut:** Omezení výstupu – Minimální hodnota, kterou lze budit analyzovaný systém
- **MaxOut:** Omezení výstupu – Maximální hodnota kterou lze budit analyzovaný systém
- **Update:** Při náběžné hraně aktualizuje všechny předchozí hodnoty (pokud byly v průběhu programu změněny)
- **ActValue:** Aktuální hodnota regulovaného systému
- **Start:** Při náběžné hraně se spustí analýza, ta je prováděna v závislosti na vstupu **ActValue**

Výstupy:

- **Active** Funkční blok je aktivní (je používán)
- **Error** Pokud je tento výstup aktivní, došlo k chybě
- **UpdateDone** Aktualizace prvních čtyř vstupů podmíněná vstupem **Update** proběhla úspěšně
- **Out:** Výstup bloku
- **TuningActive:** Výstup v aktivním stavu značí, že analýza probíhá
- **TuningDone** Výstup v aktivním stavu značí, že analýza již proběhla
- **PIDParameters:** Výstupem je proměnná typu MTPIDParameters (viz výše)
- **Quality** V procentech udána kvalita identifikace (resp. hodnot na výstupu **PIDParameters**)

Funkční aproximace přechodové charakteristiky MTBasicsStepTuning



Obr. P1.7: Funkční blok MTBasicsOscillationTuning včetně vstupů a výstupů

Vstupy:

- **Enable:** Vstup typu BOOL zajišťující zapnutí /vypnutí bloku.
- **SystemSettlingTime**
- Čas, který uběhne, než začne blok pracovat (užití tohoto času k ustálení výstupu systému)
- **Update:** Při náběžné hraně aktualizuje všechny předchozí hodnoty (pokud byly v průběhu programu změněny)
- **ActValue:** Aktuální hodnota regulovaného systému
- **Start:** Při náběžné hraně se spustí analýza, ta je prováděna v závislosti na vstupu **ActValute**

Výstupy:

- **Active** Funkční blok je aktivní (je používán)
- **Error** Pokud je tento výstup aktivní, došlo k chybě
- **UpdateDone** Aktualizace prvních čtyř vstupů podmíněná vstupem **Update** proběhla úspěšně
- **Out:** Výstup bloku
- **TuningActive:** Výstup v aktivním stavu značí, že analýza probíhá
- **TuningDone** Výstup v aktivním stavu značí, že analýza již proběhla
- **PIDParameters:** Výstupem je proměnná typu MTPIDParameters (viz výše)
- **Quality** V procentech udána kvalita identifikace (resp. hodnot na výstupu **PIDParameters**)

PŘÍLOHA 2

Průběhy výstupů testovaných systémů a akčních zásahů regulátorů pro nastavení parametrů regulátorů dle B&R

V této příloze jsou uvedeny výsledné průběhy jak simulovaných, tak i reálných soustav pro nastavení určené funkčními bloky MTBasicsStepTuning (S1 – S5,R1,R2) a MTBasicsOscillationTuning (S6 – S10).

Značení, tabulky i jednotlivé průběhy jsou zobrazeny stejně, jak je tomu v **kapitole 7 a 8**.

Značení:

PSD	PSD regulátor (popsán rovnicí (3.2))
PSD FDS	PSD regulátor s filtrací derivační složky (rovnice (3.2), kde derivační složka je realizována dle rovnice (3.3))
PSD – FF	PSD regulátor s dopřednou vazbou (rovnice (3.6) a (3.7))
S-PD	S-PD regulátor (popsán rovnicí (3.5))
PSD FZH	PSD regulátor s filtrem žádané hodnoty, který popisuje rovnice (3.4)
MTBasicsPID	MTBasicsPID regulátor (dle rovnice (4.1))

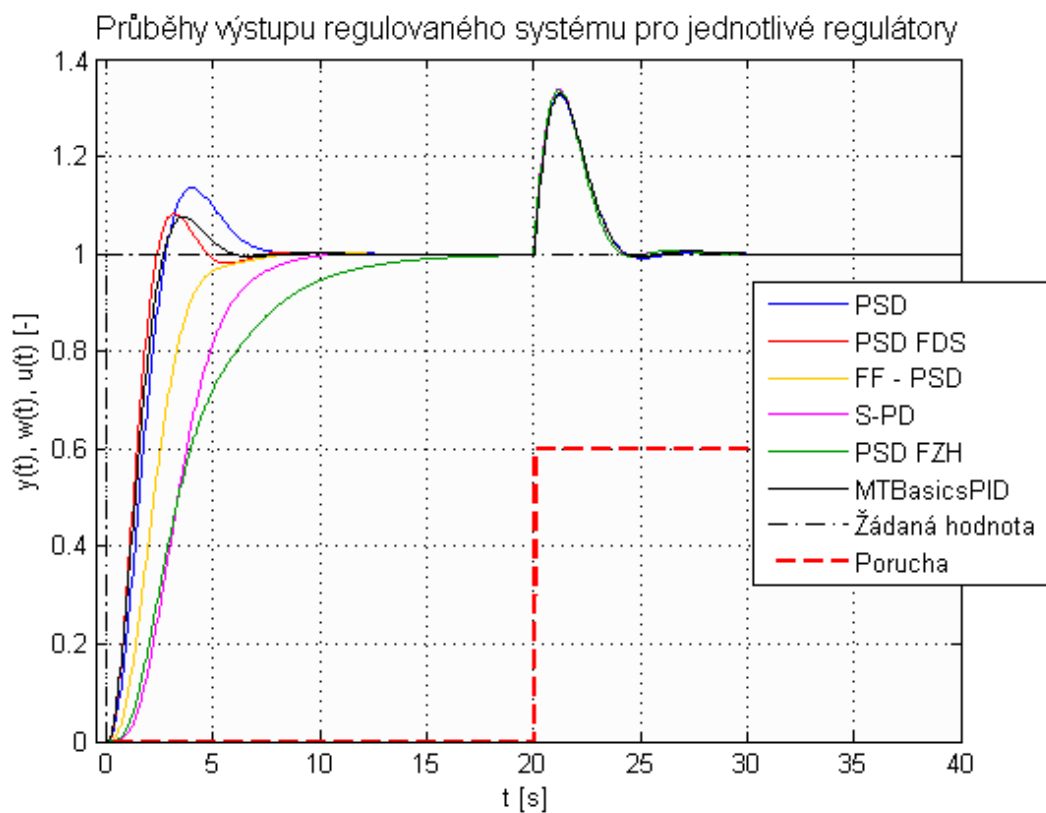
Soustava č. 1 (S1)

Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,05$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na poslední člen $\frac{1}{(p+1)}$ soustavy v čase $t = 20$ s.

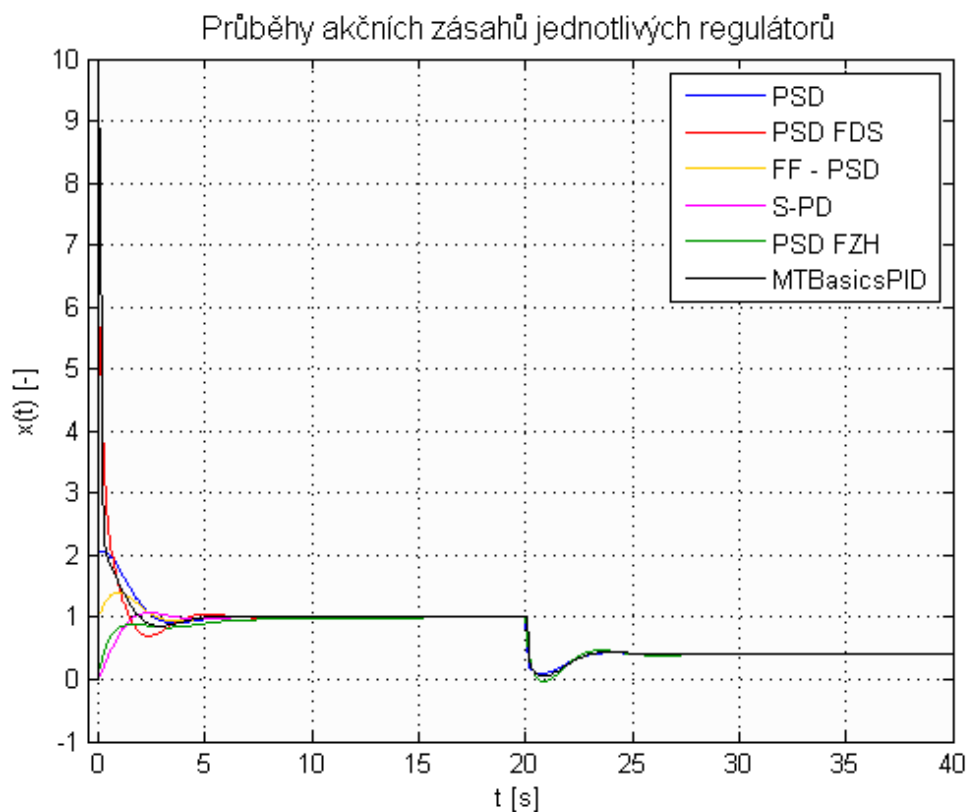
$$F_1(p) = \frac{1}{(p+1)^3}$$

Tab. P2.1 Parametry regulátorů zjištěných funkčním blokem MTBasicsStepTuning (S1)

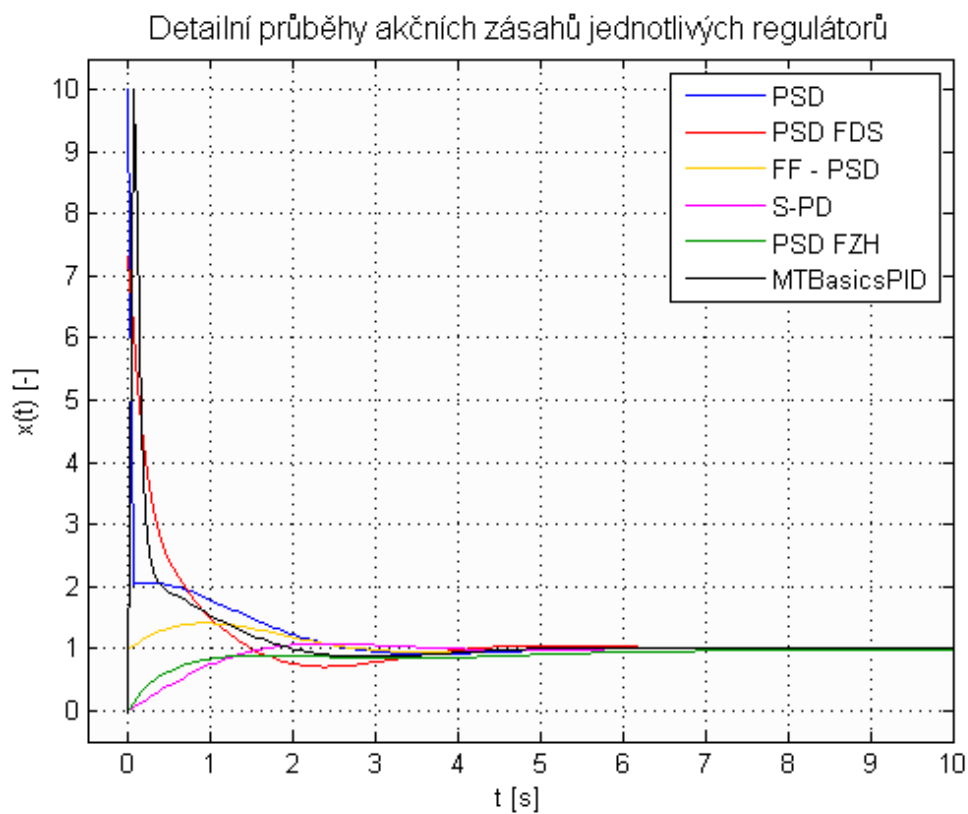
Perioda vzorkování	T_{vz} [s]	0,05	Zesilovací činitel filtru derivační složky	N [-]	3
Zesílení regulátoru	K [-]	2,0	Filtr žádané hodnoty	α [-]	0,0
Integrační časová konstanta	T_I [s]	2,4401		T_1 [s]	3,0318
Derivační časová konstanta	T_D [s]	0,5917	AntiW (S-PD)	T_T [s]	3,0318
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	T_f [s]	0,05917	Feed Forward	β [-]	0,5



Obr.: P2. 1: Průběh výstupu regulované soustavy č. 1 pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.1**



Obr.: P2. 2: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.1 (S1)**



Obr.: P2. 3: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.1 (S1)**

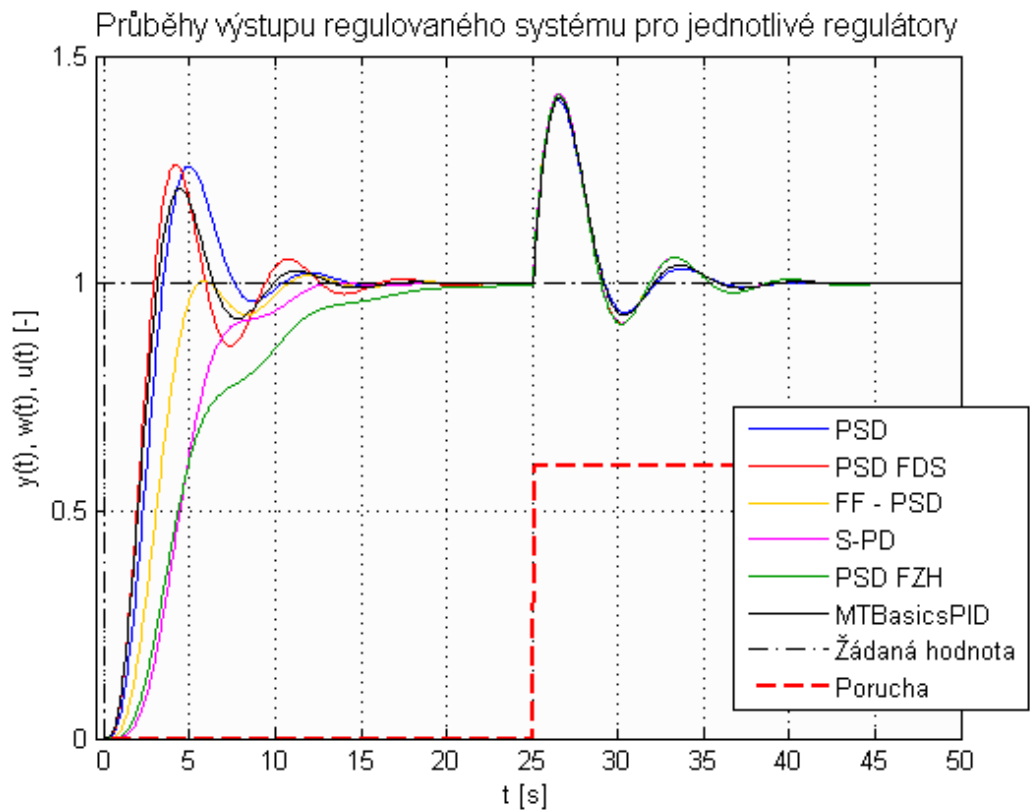
Soustava č. 2 (S2)

Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,05$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na poslední člen $\frac{1}{(p+1)}$ soustavy v čase $t = 25$ s.

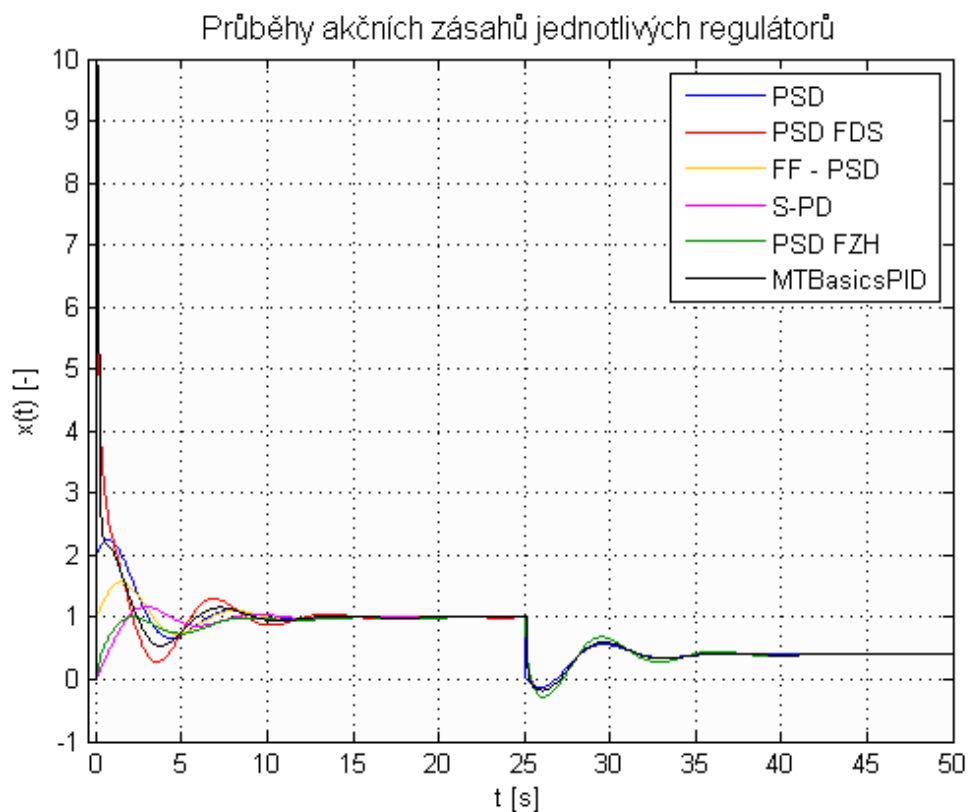
$$F_2(p) = \frac{1}{(p+1)^4}$$

Tab. P2.2: Parametry regulátorů zjištěných funkčním blokem MTBasicsStepTuning (S2)

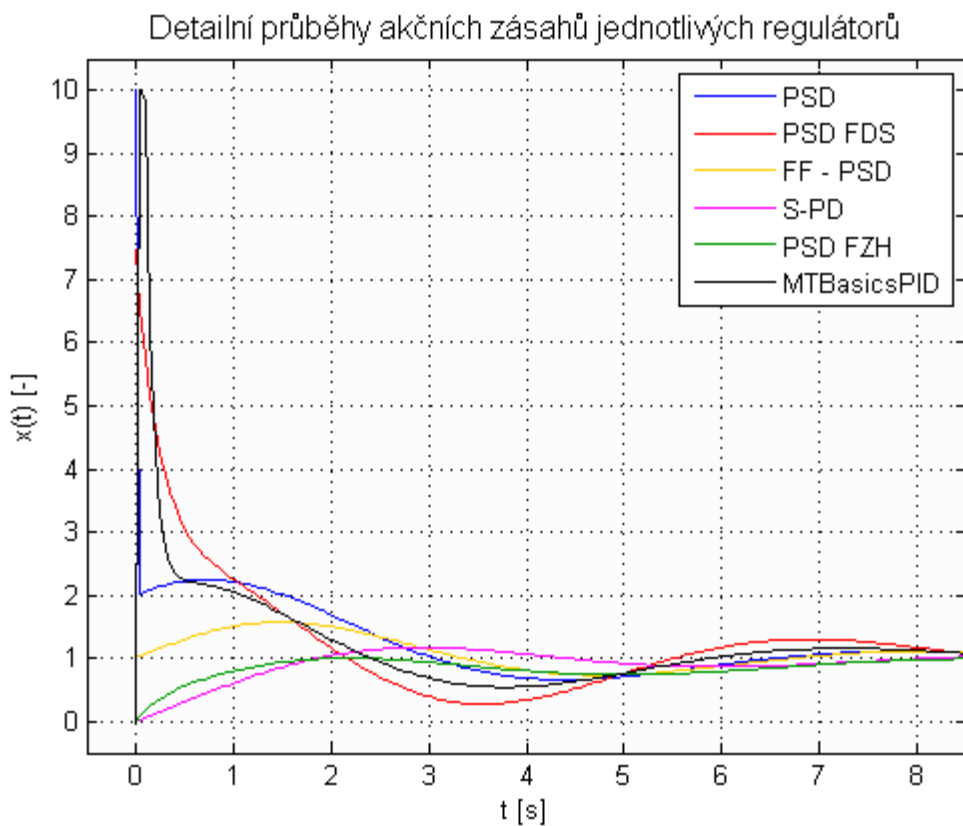
Perioda vzorkování	T_{vz} [s]	0,05	Zesilovací činitel filtru derivační složky	N [-]	3
Zesílení regulátoru	K [-]	2,0	Filtr žádané hodnoty	α [-]	0,0
Integrační časová konstanta	T_I [s]	3,2403		T_I [s]	4,0216
Derivační časová konstanta	T_D [s]	0,7858	AntiW (S-PD)	T_T [s]	4,0216
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	T_f [s]	0,7858	Feed Forward	β [-]	0,5



Obr.: P2. 4: Průběh výstupu regulované soustavy č. 2 pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.2**



Obr.: P2. 5: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedené v **Tab. P2.2 (S2)**



Obr.: P2. 6: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedené v **Tab. P2.2 (S2)**

Soustava č. 3 (S3)

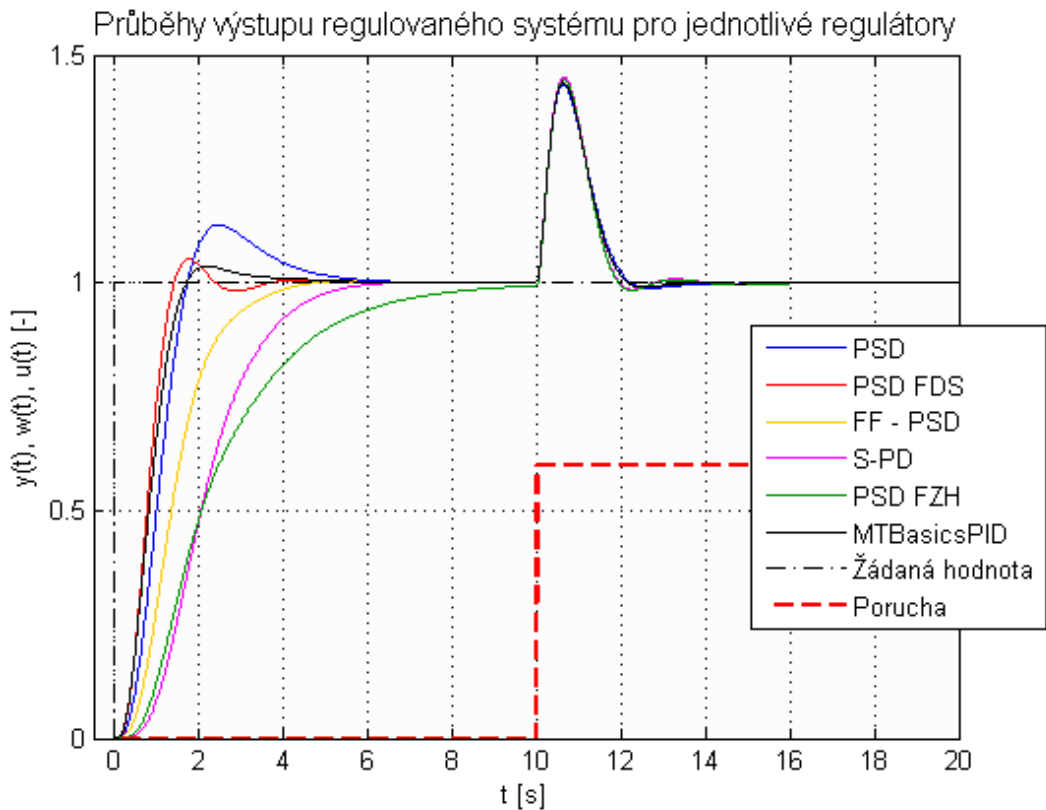
Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,01$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na poslední dva členy soustavy $\frac{1}{(0,5^2p+1)(0,5^3p+1)}$ soustavy v čase $t = 10$ s.

$$F_3(p) = \frac{1}{(p+1)(0,5p+1)(0,5^2p+1)(0,5^3p+1)}$$

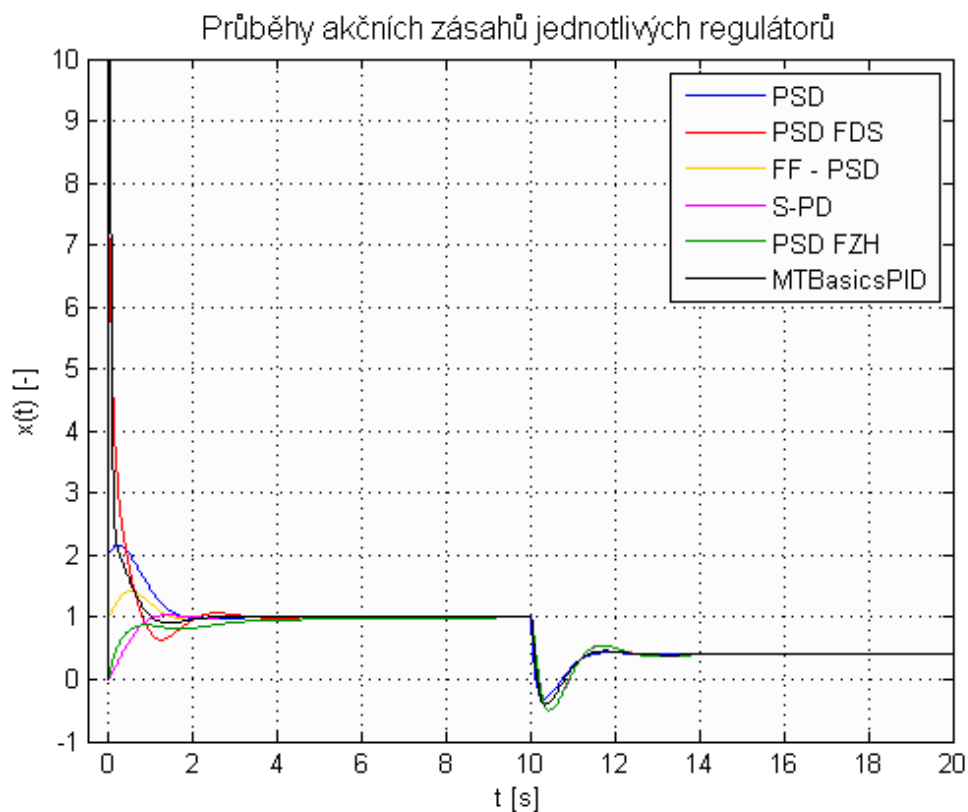
Tab. P2.3: Parametry regulátorů zjištěných funkčním blokem MTBasicsStepTuning (S3)

Perioda vzorkování	T_{vz} [s]	0,01
Zesílení regulátoru	K [-]	2,0005
Integrační časová konstanta	T_I [s]	1,5068
Derivační časová konstanta	T_D [s]	0,3654
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	T_f [s]	0,3654

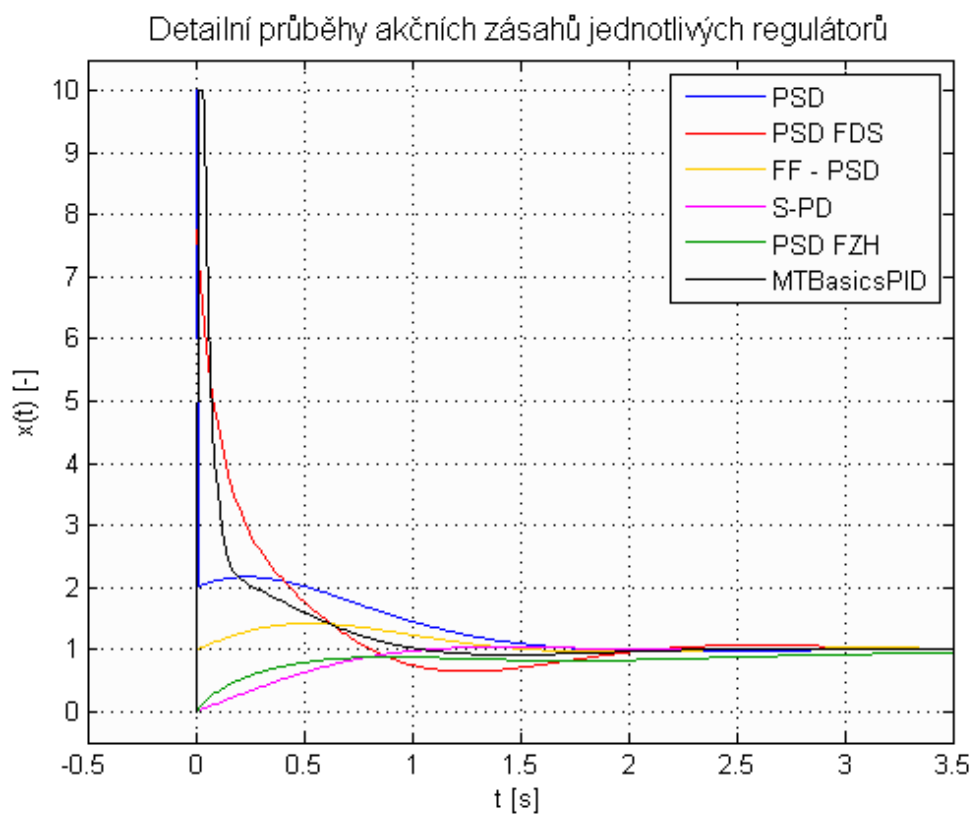
Zesilovací činitel filtru derivační složky	N [-]	3
Filtr žádané hodnoty	α [-]	0,0
	T_I [s]	1,8722
AntiW (S-PD)	T_T [s]	1,8722
Feed Forward	β [-]	0,5



Obr.: P2. 7: Průběh výstupu regulované soustavy č. 3 pro hodnoty parametrů regulátorů uvedené v **Tab. P2.3**



Obr.: P2. 8: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.3 (S3)**



Obr.: P2. 9: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.3 (S3)**

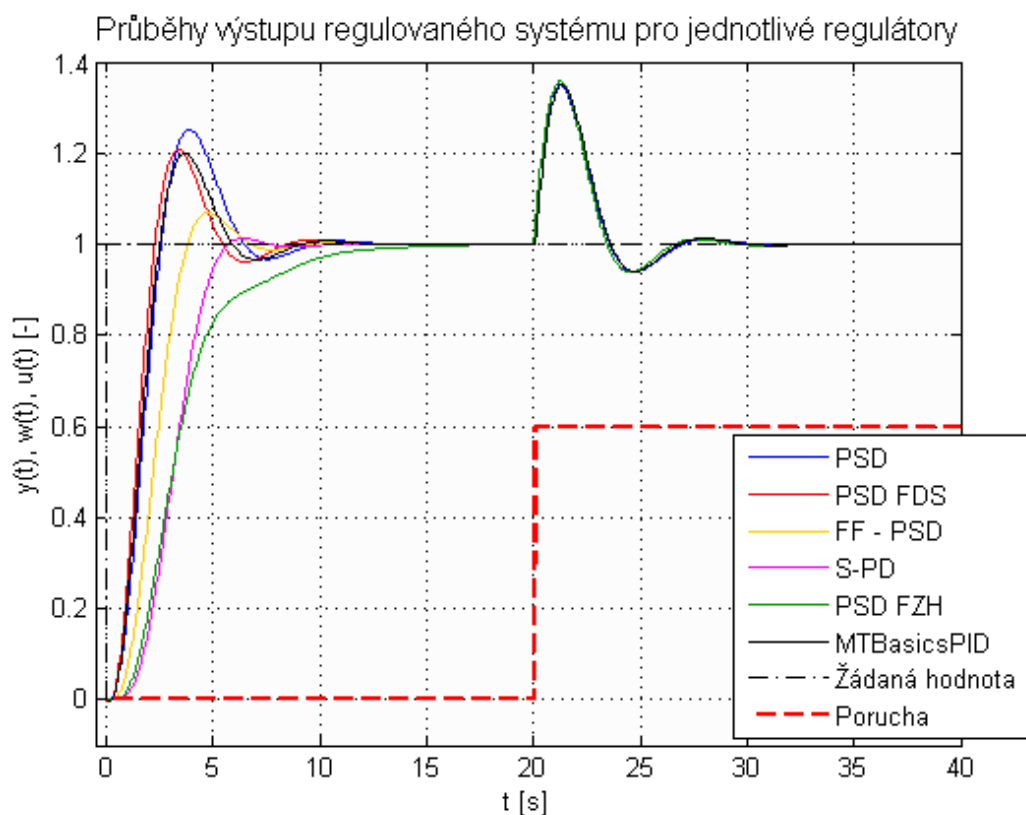
Soustava č. 4 (S4)

Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,05$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na člen $\frac{1}{(p+1)}$ soustavy v čase $t = 20$ s.

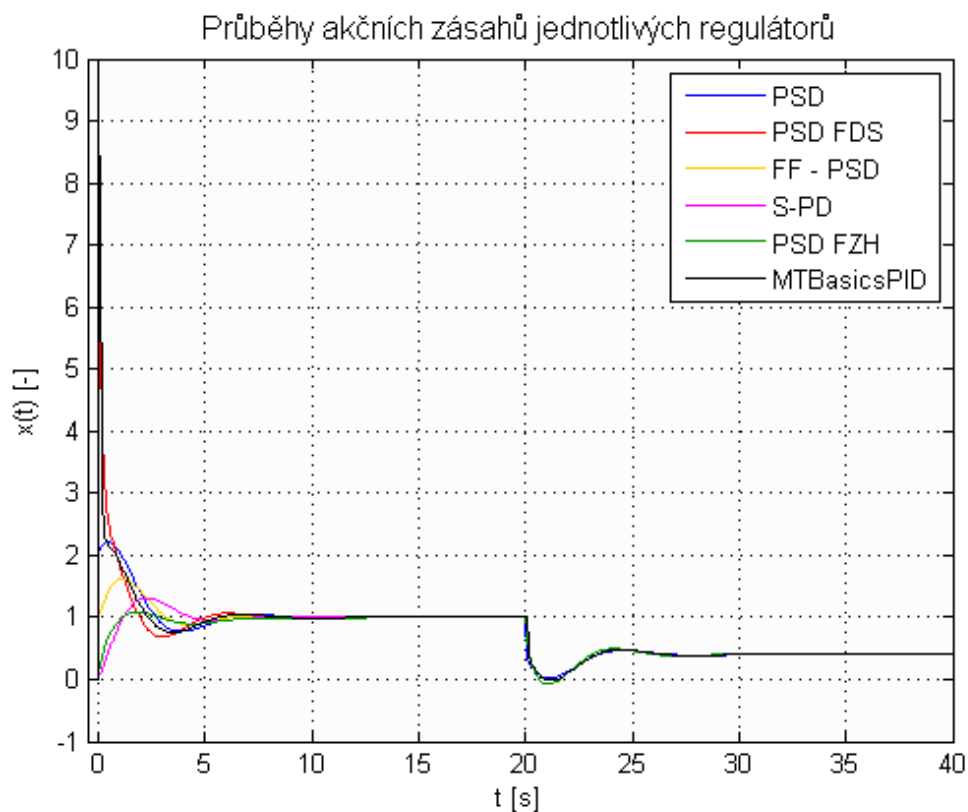
$$F_4(p) = \frac{1 - 0,1p}{(p + 1)^3}$$

Tab. P2.4: Parametry regulátorů zjištěných funkčním blokem MTBasicsStepTuning (S4)

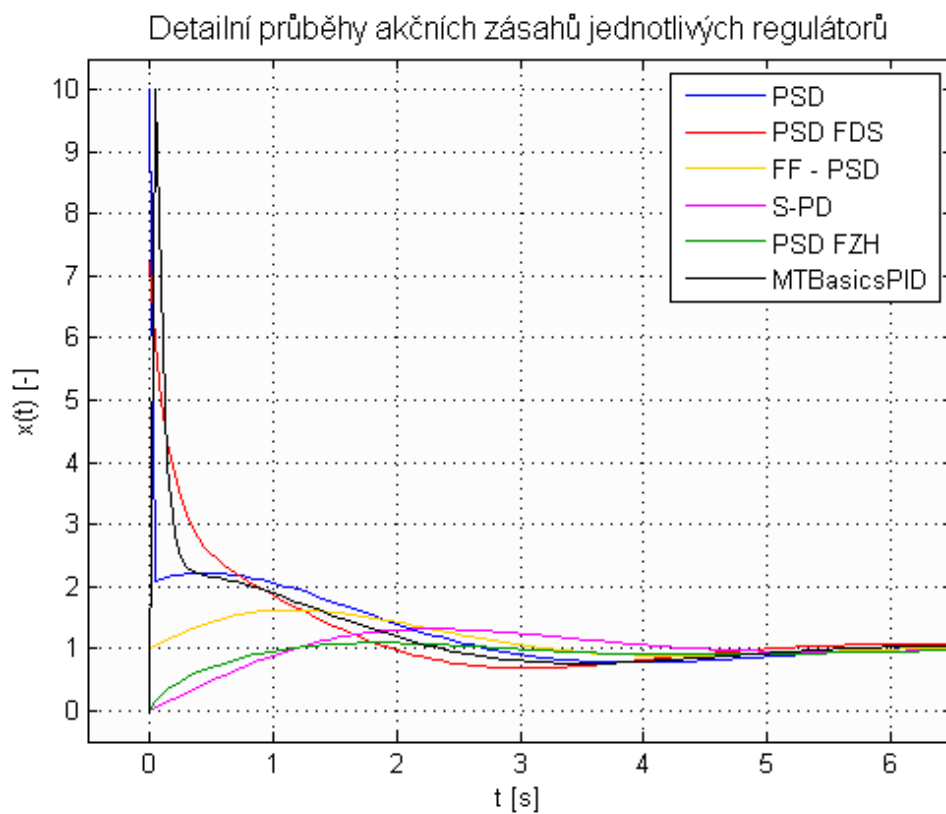
Perioda vzorkování	T_{vz} [s]	0,05	Zesilovací činitel filtru derivační složky	N [-]	3
Zesílení regulátoru	K [-]	2,0001	Filtr žádané hodnoty	α [-]	0,0
Integrační časová konstanta	T_I [s]	2,1198		T_1 [s]	2,6339
Derivační časová konstanta	T_D [s]	0,5141	AntiW (S-PD)	T_T [s]	2,6339
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	T_f [s]	0,5141	Feed Forward	β [-]	0,5



Obr.: P2. 10: Průběh výstupu regulované soustavy č. 4 pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.4**



Obr.: P2. 11: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.4 (S4)**



Obr.: P2. 12: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.4 (S4)**

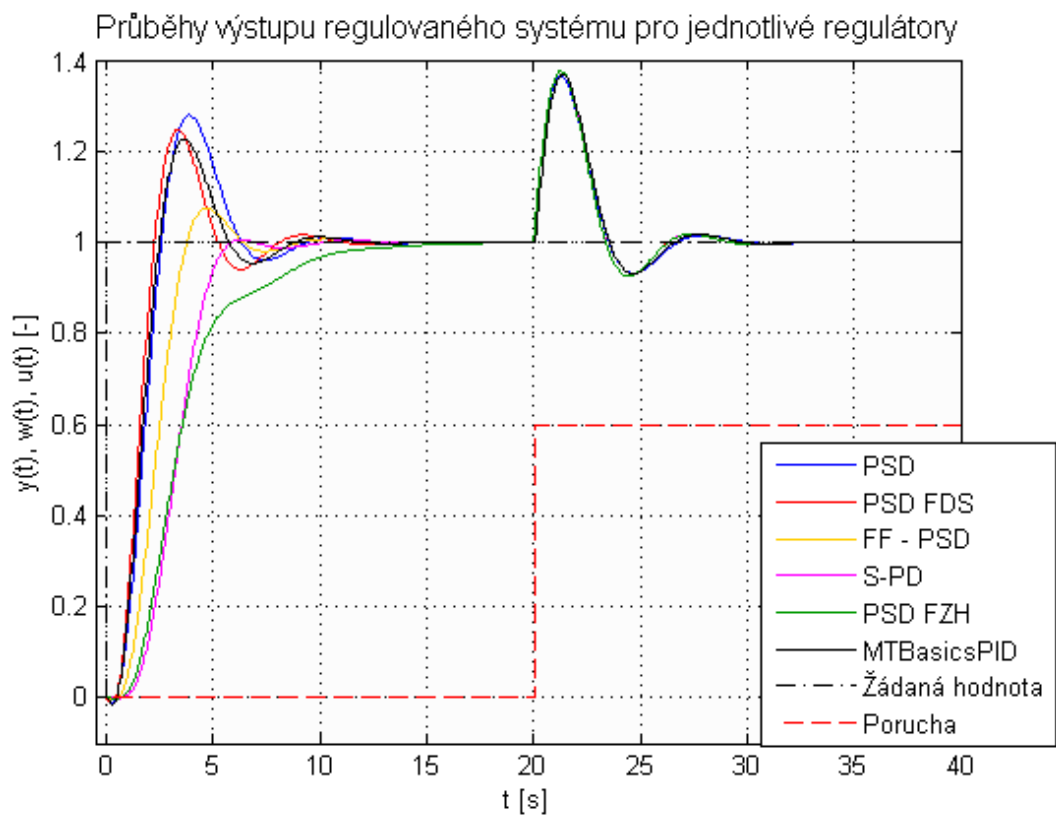
Soustava č. 5 (S5)

Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,05$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na člen $\frac{1}{(p+1)}$ soustavy v čase $t = 20$ s.

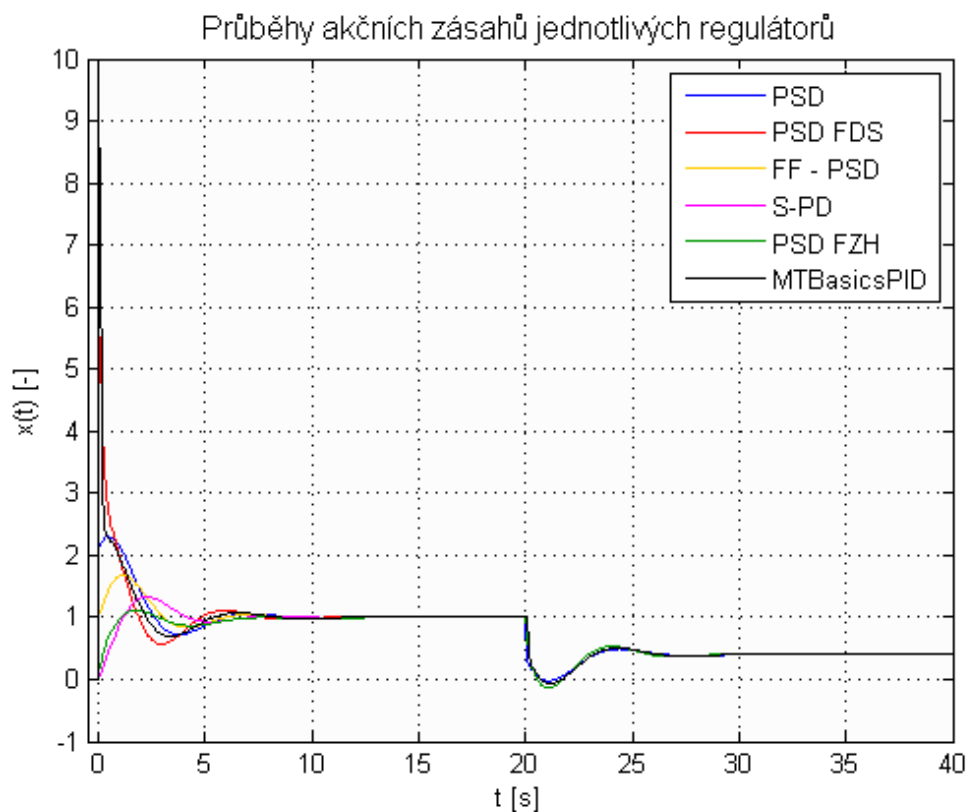
$$F_5(p) = \frac{1 - 0,2p}{(p + 1)^3}$$

Tab. P2.5: Parametry regulátorů zjištěných funkčním blokem MTBasicsStepTuning (S5)

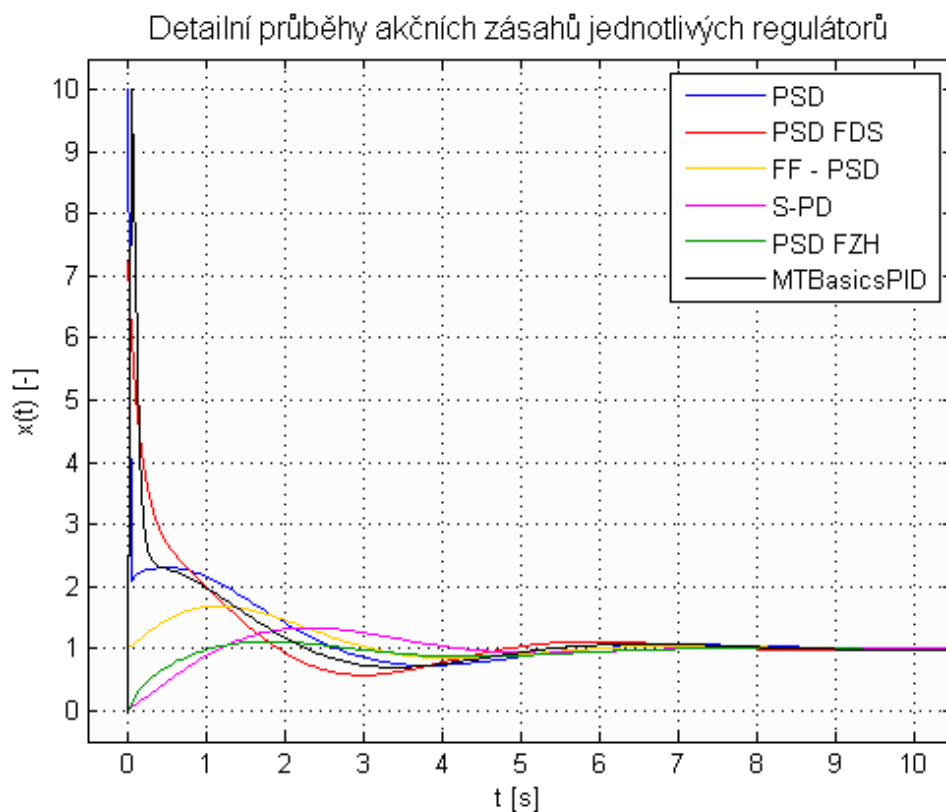
Perioda vzorkování	T_{vz} [s]	0,05	Zesilovací činitel filtru derivační složky	N [-]	3
Zesílení regulátoru	K [-]	2,0001	Filtr žádané hodnoty	α [-]	0,0
Integrační časová konstanta	T_I [s]	2,1999		T_1 [s]	2,7334
Derivační časová konstanta	T_D [s]	0,5335	AntiW (S-PD)	T_T [s]	2,7334
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	T_f [s]	0,5335	Feed Forward	β [-]	0,5



Obr.: P2. 13: Průběh výstupu regulované soustavy č. 5 pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.5**



Obr.: P2. 14: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.5 (S5)**



Obr.: P2. 15: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.5 (S5)**

Soustava č. 6 (S6)

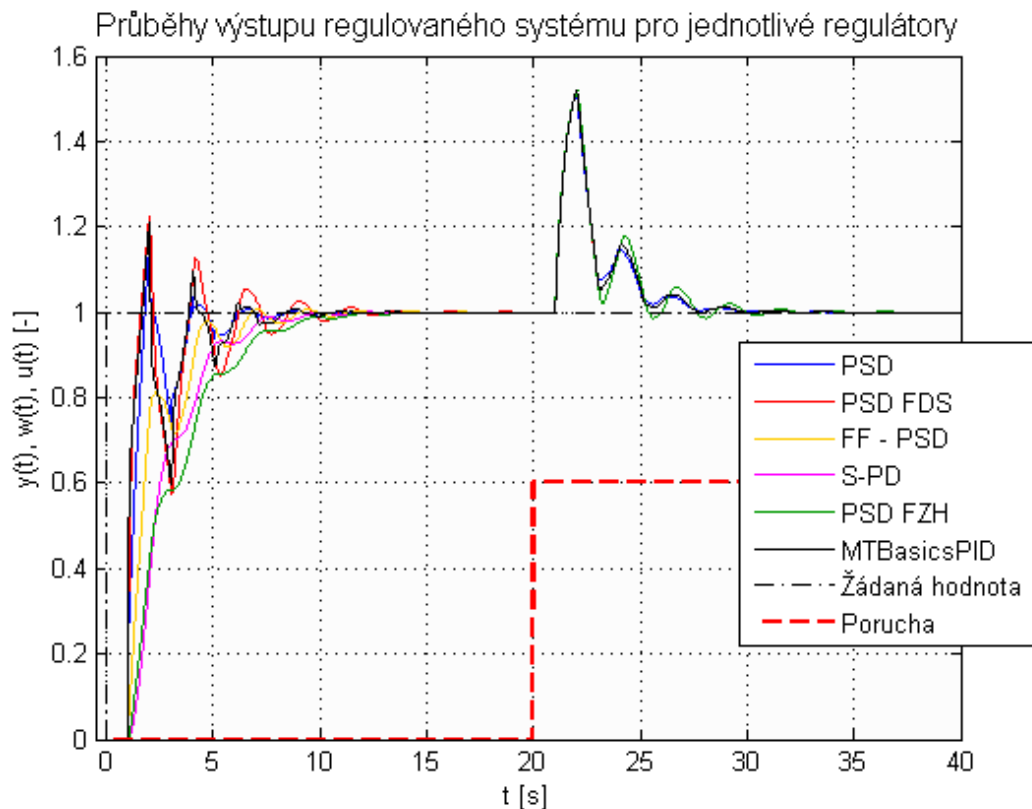
Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,01$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na vstup soustavy v čase $t = 20$ s.

$$F_6(p) = \frac{1}{(1 + 0,5p)} e^{-p}$$

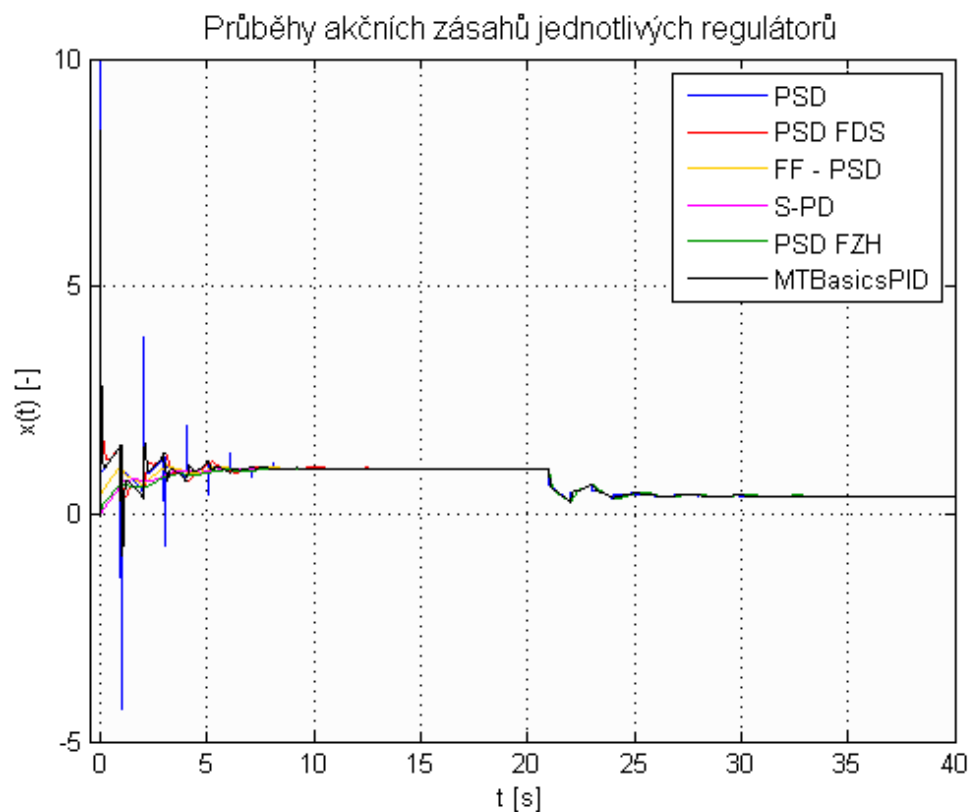
Tab. P2.6: Parametry regulátorů zjištěných funkčním blokem MTBasicsOscillationTuning (S6)

Perioda vzorkování	T_{vz} [s]	0,01
Zesílení regulátoru	K [-]	0,8737
Integrační časová konstanta	T_I [s]	1,3600
Derivační časová konstanta	T_D [s]	0,3264
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	T_f [s]	0,03264

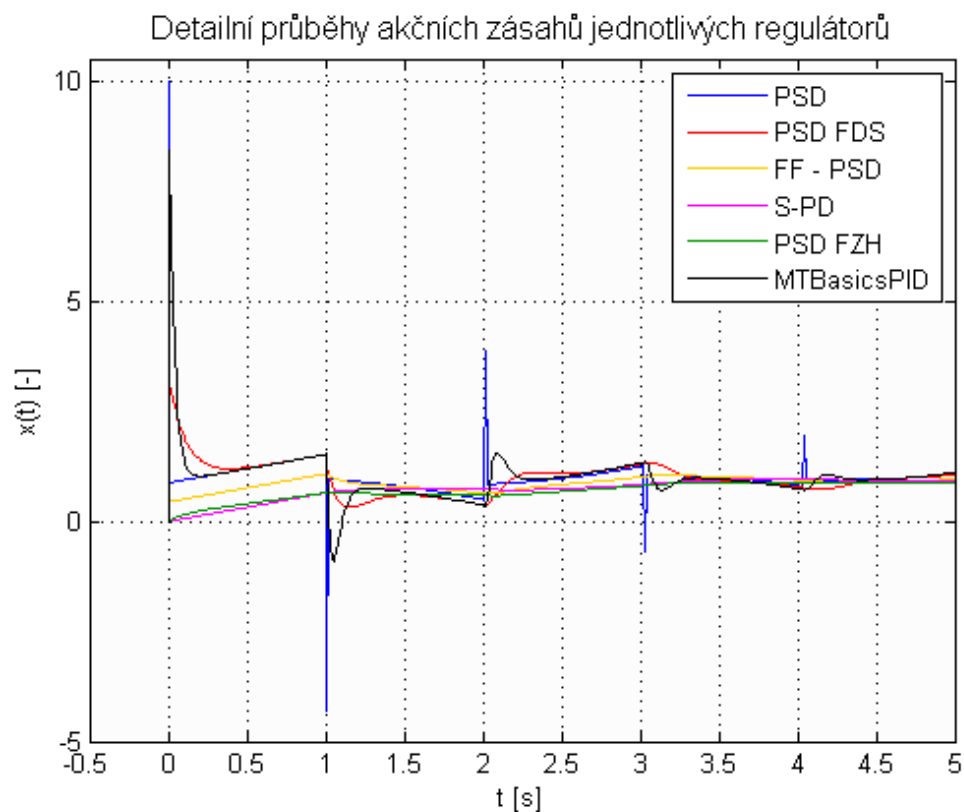
Zesilovací činitel filtru derivační složky	N [-]	3
Filtr žádané hodnoty	α [-]	0,0
	T_1 [s]	1,6864
AntiW (S-PD)	T_T [s]	1,6864
Feed Forward	β [-]	0,5



Obr.: P2. 16: Průběh výstupu regulované soustavy č. 6 pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.6**



Obr.: P2. 17: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.6 (S6)**



Obr.: P2. 18: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.6 (S6)**

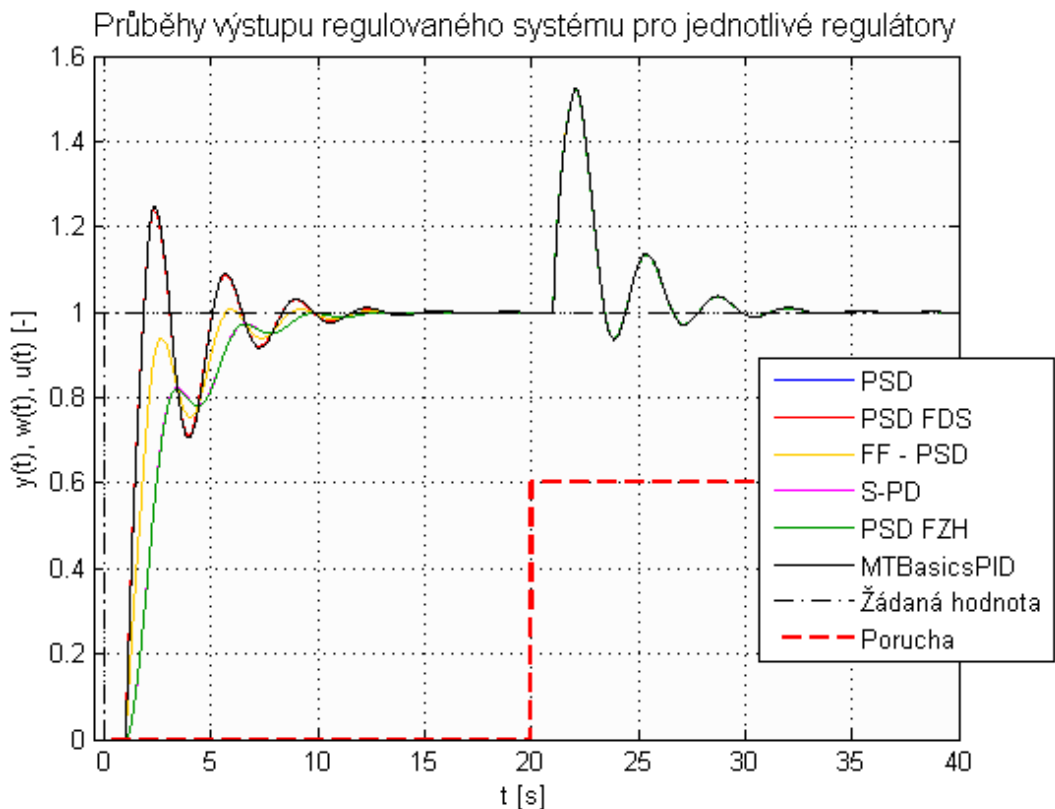
Soustava č. 6 (S6) – Nízká hodnota T_d

Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,01$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na soustavu v čase $t = 20$ s.

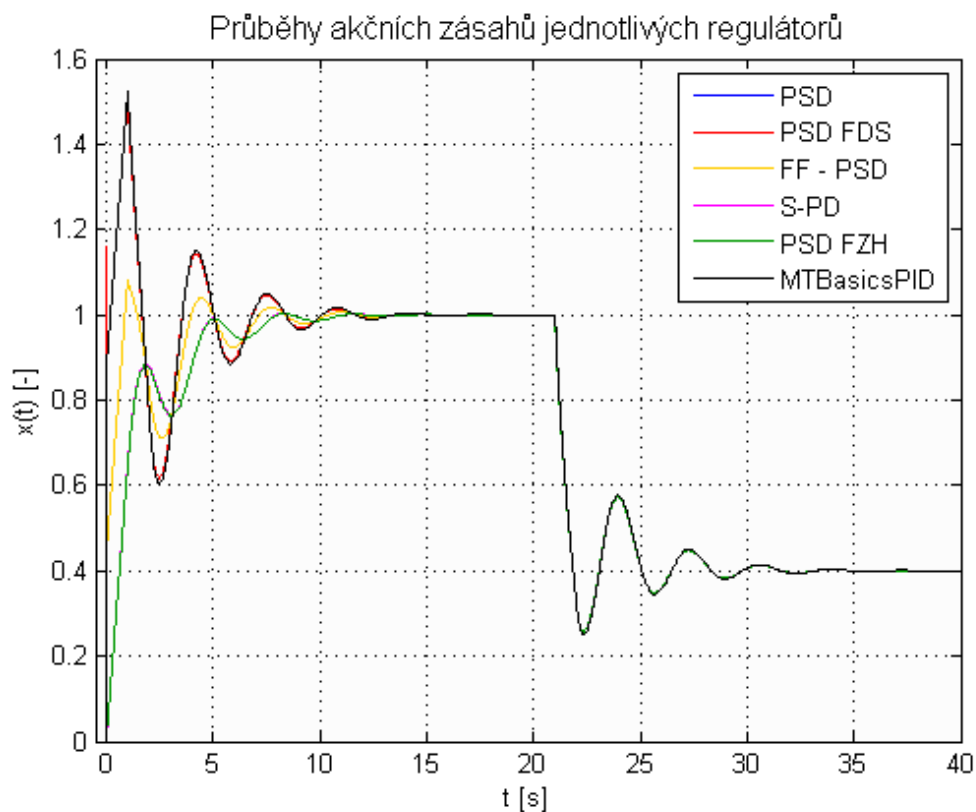
$$F_6(p) = \frac{1}{(1 + 0,5p)} e^{-p}$$

Tab. P2.7: Parametry regulátorů zjištěných funkčním blokem MTBasicsOscillationTuning pro nízkou hodnotu derivační časové konstanty (S6)

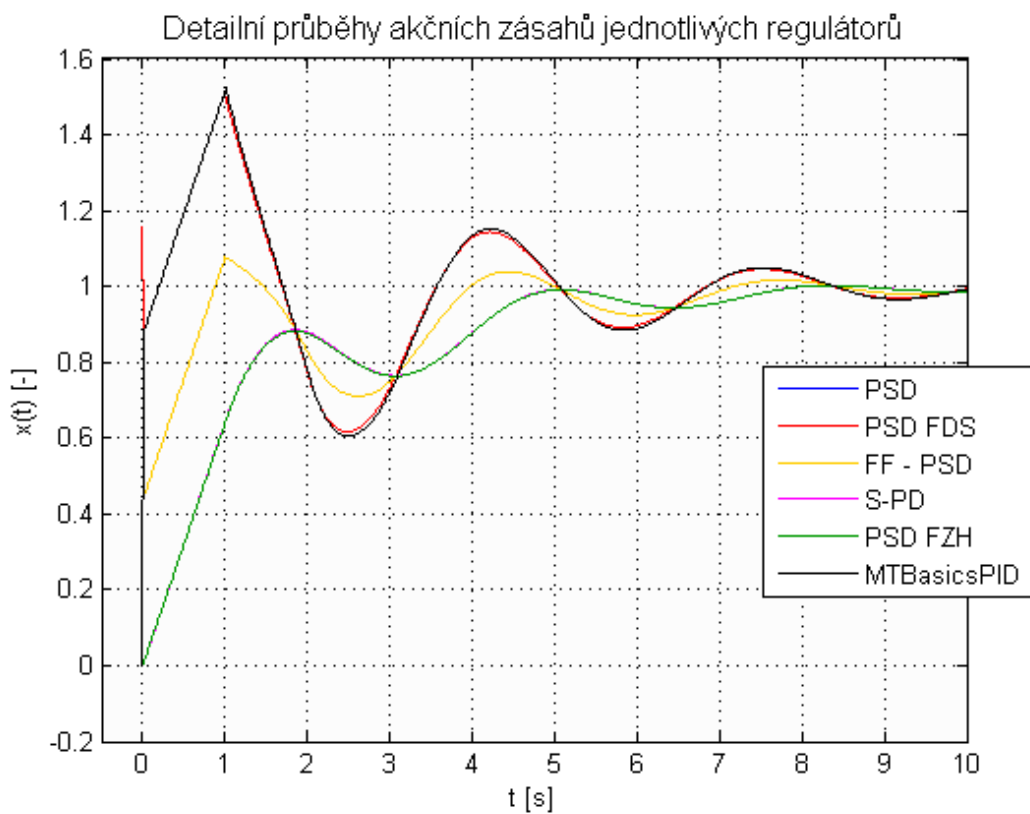
Perioda vzorkování	T_{vz} [s]	0,01	Zesilovací činitel filtru derivační složky	N [-]	3
Zesílení regulátoru	K [-]	0,8737	Filtr žádané hodnoty	α [-]	0,0
Integrační časová konstanta	T_I [s]	1,3600		T_I [s]	1,3633
Derivační časová konstanta	T_D [s]	$3,264 \cdot 10^{-3}$	AntiW (S-PD)	T_T [s]	1,3633
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	T_f [s]	$3,264 \cdot 10^{-4}$	Feed Forward	β [-]	0,5



Obr.: P2. 19: Průběh výstupu regulované soustavy č. 6 pro hodnoty parametrů regulátorů uvedené v **Tab. P2.7**



Obr.: P2. 20: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.7 (S6)**



Obr.: P2. 21: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.7 (S6)**

Soustava č. 7 (S7)

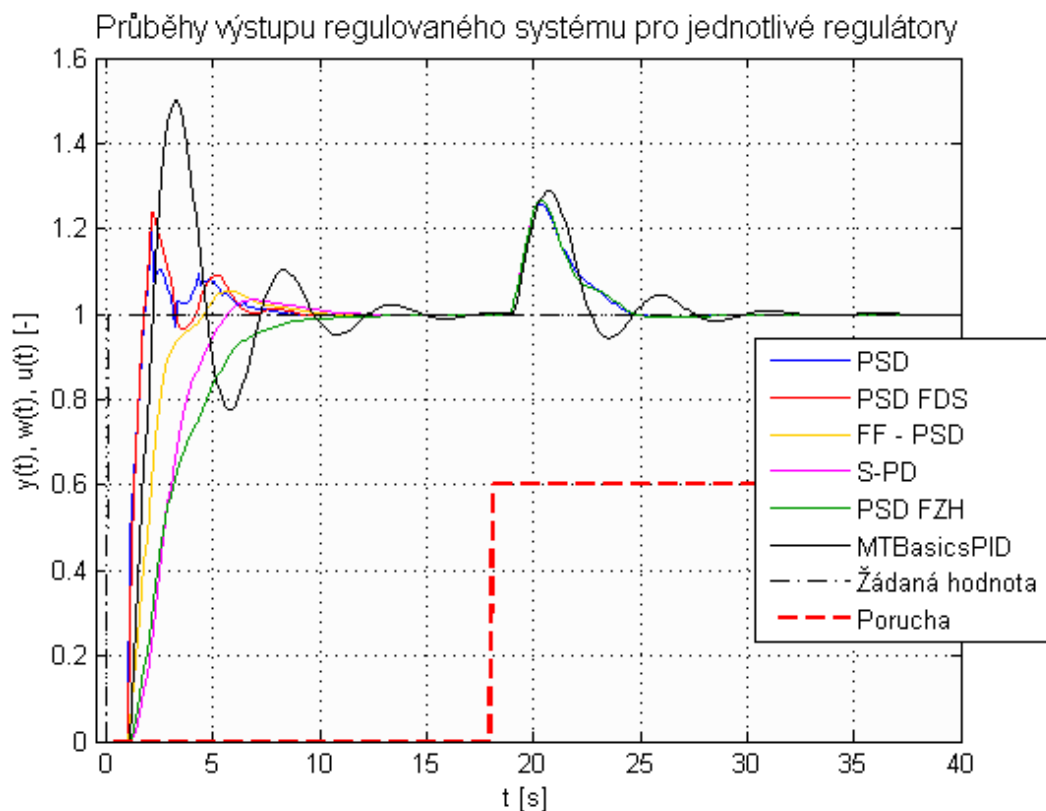
Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,1$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na vstup soustavy v čase $t = 18$ s.

$$F_7(p) = \frac{1}{(1 + 2p)} e^{-p}$$

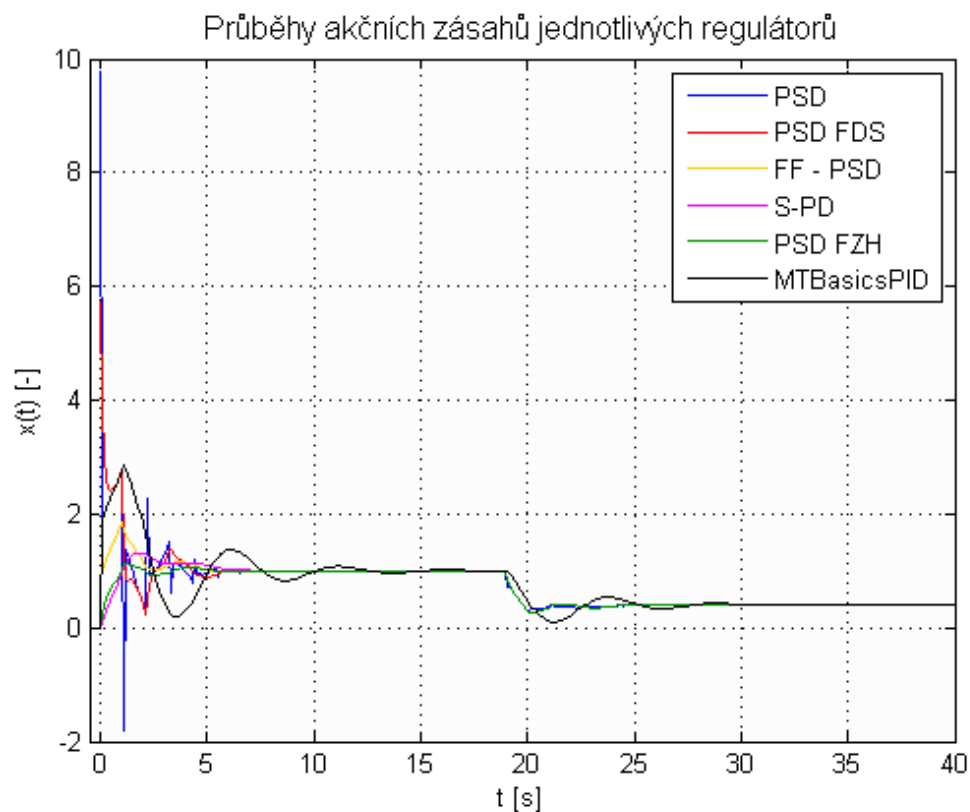
Tab. P2.8 Parametry regulátorů zjištěných funkčním blokem MTBasicsOscillationTuning (S7)

Perioda vzorkování	T_{vz} [s]	0,1
Zesílení regulátoru	K [-]	1,7979
Integrační časová konstanta	T_I [s]	1,850
Derivační časová konstanta	T_D [s]	0,4440
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	T_f [s]	0,04440

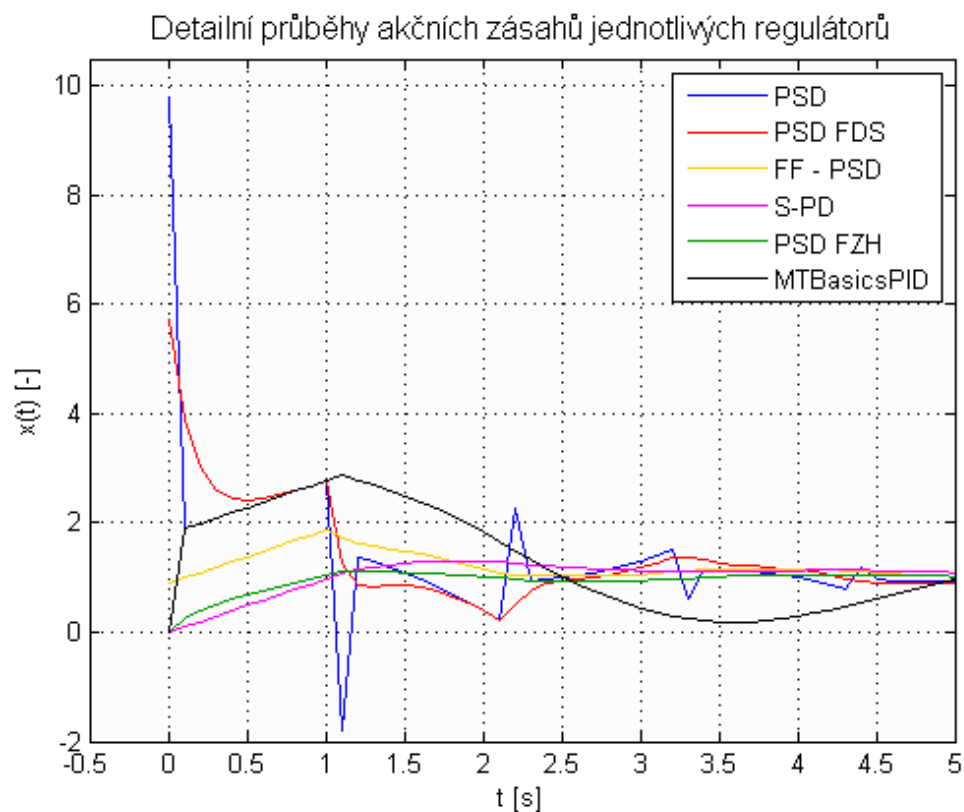
Zesilovací činitel filtru derivační složky	N [-]	3
Filtr žádané hodnoty	α [-]	0,0
	T_1 [s]	2,2940
AntiW (S-PD)	T_T [s]	2,2940
Feed Forward	β [-]	0,5



Obr.: P2. 22: Průběh výstupu regulované soustavy č. 7 pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.8**



Obr.: P2. 23: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.8 (S7)**



Obr.: P2. 24: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.8 (S7)**

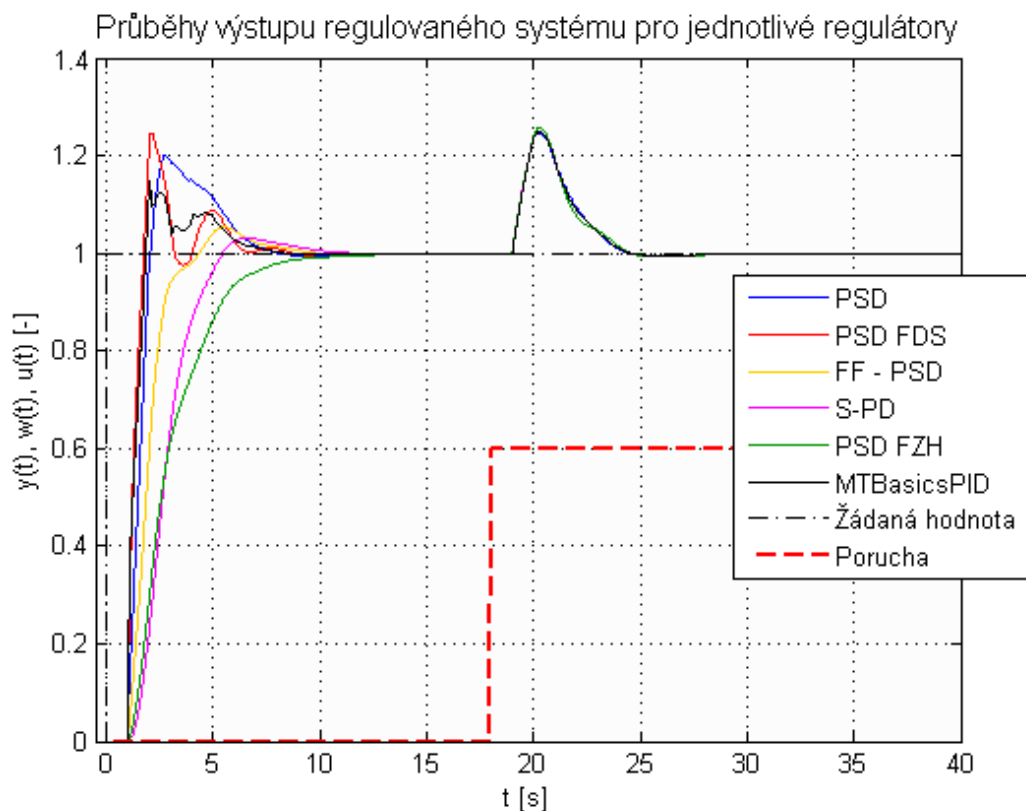
Soustava č. 7 (S7) – Menší hodnota periody vzorkování

Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,01$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na vstup soustavy v čase $t = 18$ s.

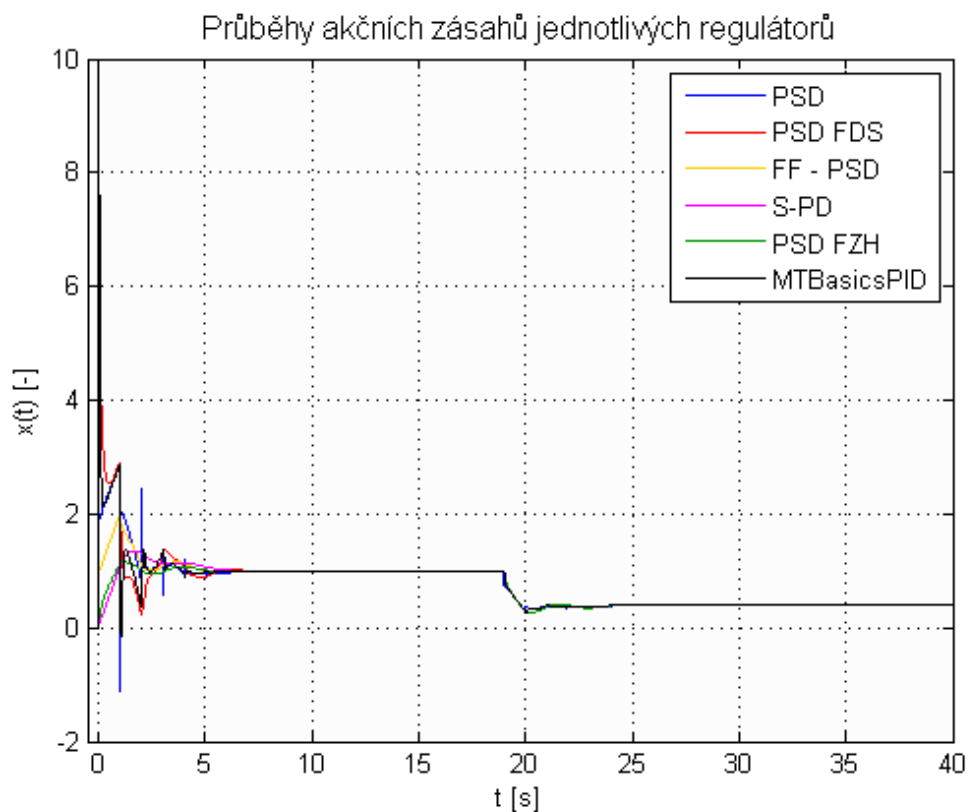
$$F_7(p) = \frac{1}{(1 + 2p)} e^{-p}$$

Tab. P2.9: Parametry regulátorů zjištěných funkčním blokem MTBasicsOscillationTuning pro hodnotu periody vzorkování $T_{vz} = 0,01$ s (S7)

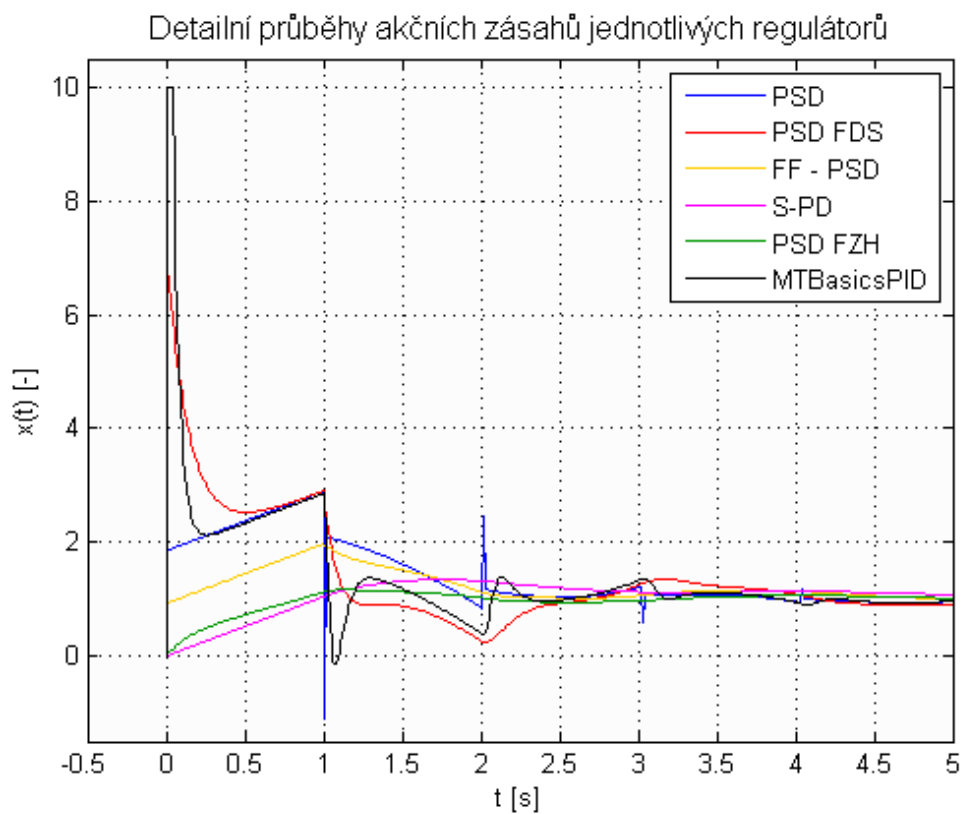
Perioda vzorkování	T_{vz} [s]	0,01	Zesilovací činitel filtru derivační složky	N [-]	3
Zesílení regulátoru	K [-]	1,8532	Filtr žádané hodnoty	α [-]	0,0
Integrační časová konstanta	T_I [s]	1,770		T_1 [s]	2,1948
Derivační časová konstanta	T_D [s]	0,4248	AntiW (S-PD)	T_T [s]	2,1948
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	T_f [s]	0,04248	Feed Forward	β [-]	0,5



Obr.: P2. 25: Průběh výstupu regulované soustavy č. 7 pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.9**



Obr.: P2. 26: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2. 9 (S7)**



Obr.: P2. 27: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.9 (S7)**

Soustava č. 8 (S8)

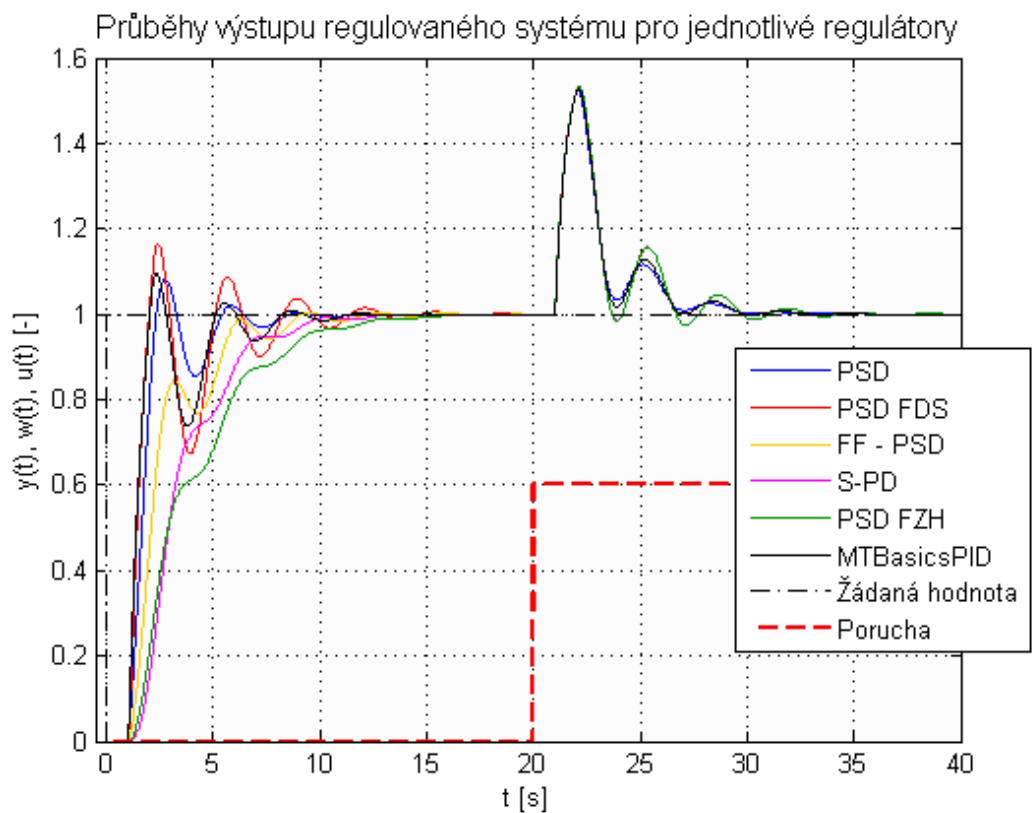
Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,01$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na člen $\frac{1}{(0,5p+1)}$ soustavy v čase $t = 20$ s.

$$F_8(p) = \frac{1}{(1 + 0,5p)^2} e^{-p}$$

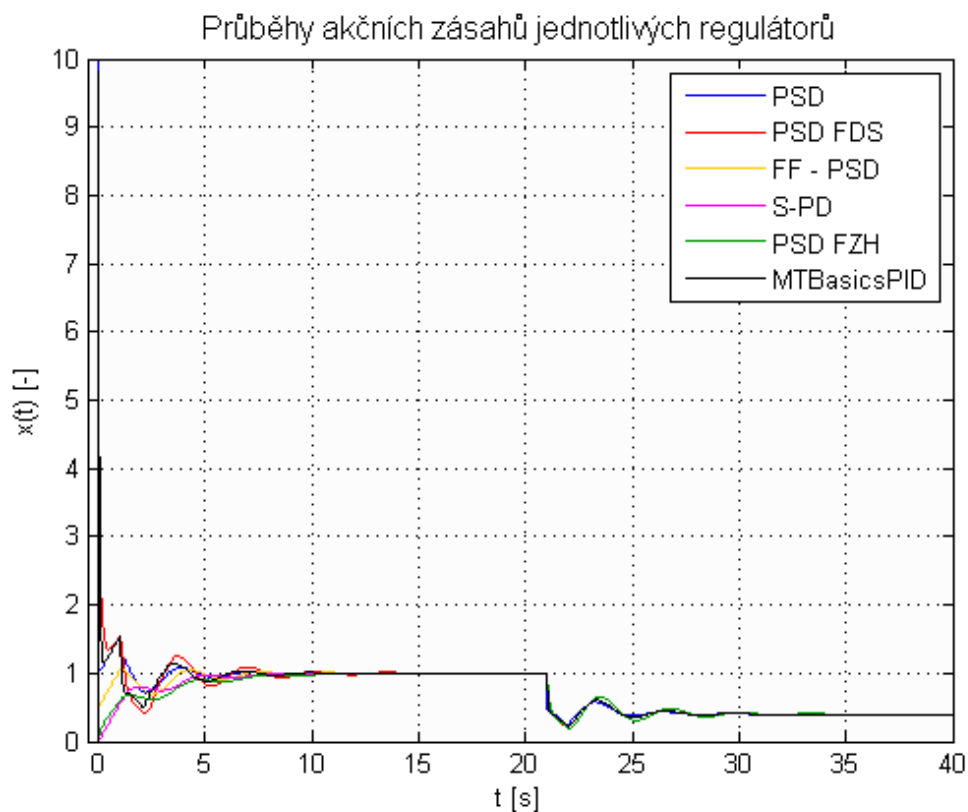
Tab. P2.10: Parametry regulátorů zjištěných funkčním blokem MTBasicsOscillationTuning včetně (S8)

Perioda vzorkování	T_{vz} [s]	0,01
Zesílení regulátoru	K [-]	0,9882
Integrační časová konstanta	T_I [s]	1,820
Derivační časová konstanta	T_D [s]	0,4368
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	T_f [s]	0,04368

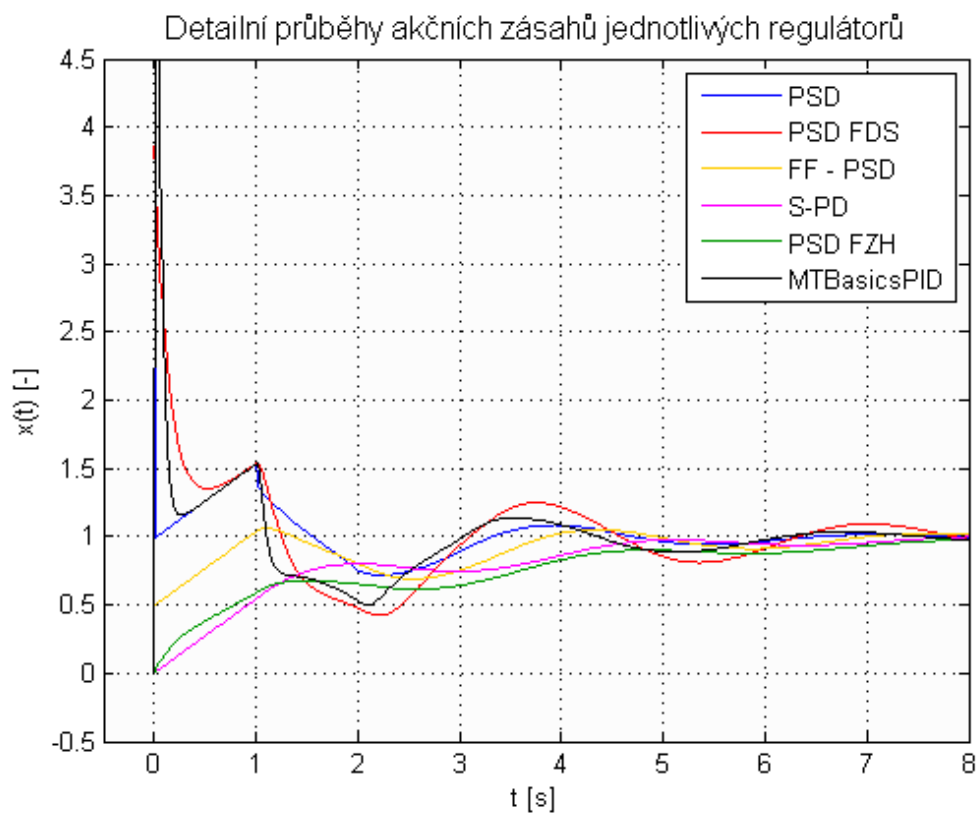
Zesilovací činitel filtru derivační složky	N [-]	3
Filtr žádané hodnoty	α [-]	0,0
	T_1 [s]	2,2568
AntiW (S-PD)	T_T [s]	2,2568
Feed Forward	β [-]	0,5



Obr.: P2. 28: Průběh výstupu regulované soustavy č. 8 pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.10**



Obr.: P2. 29: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.10 (S8)**



Obr.: P2. 30: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.10 (S8)**

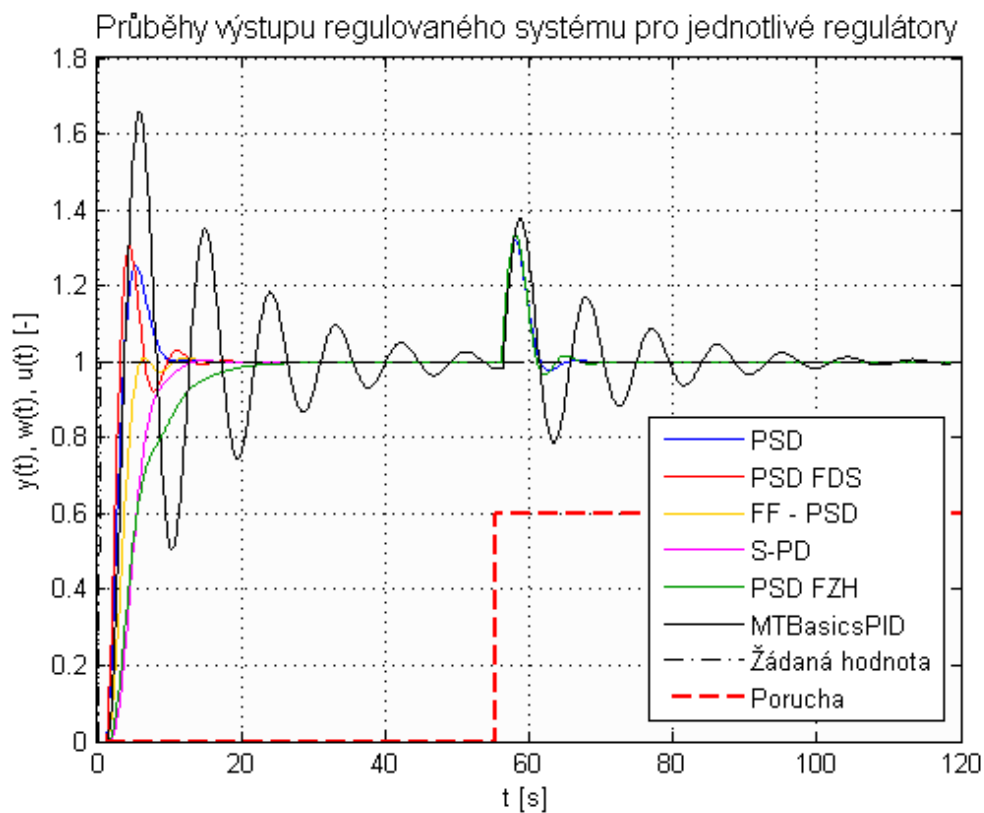
Soustava č. 9 (S9)

Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,1$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na člen $\frac{1}{(2p+1)}$ soustavy v čase $t = 30$ s.

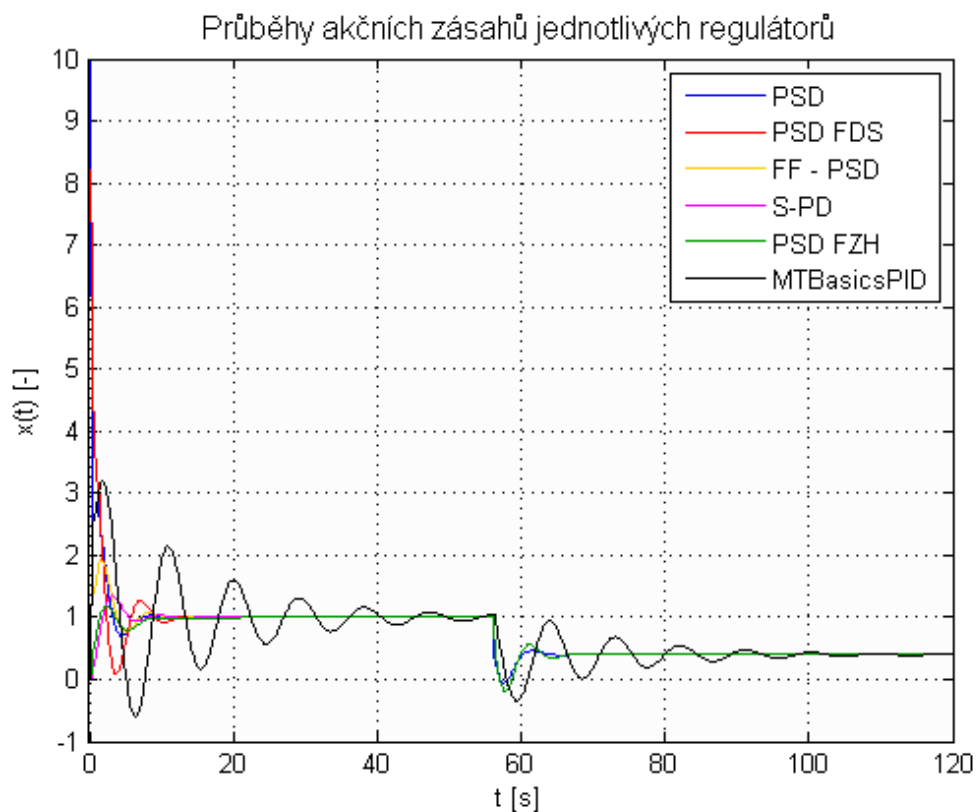
$$F_9(p) = \frac{1}{(1 + 2p)^2} e^{-p}$$

Tab. P2.11: Parametry regulátorů zjištěných funkčním blokem MTBasicsOscillationTuning (S9)

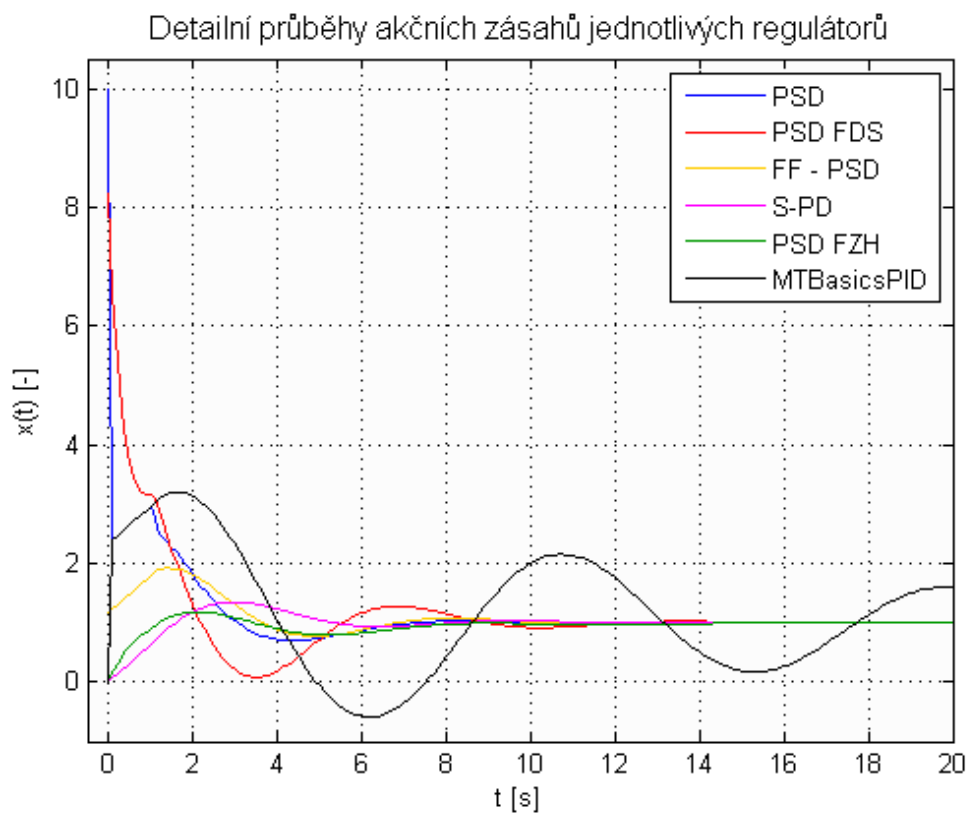
Perioda vzorkování	T_{vz} [s]	0,1	Zesilovací činitel filtru derivační složky	N [-]	3
Zesílení regulátoru	K [-]	2,3249	Filtr žádané hodnoty	α [-]	0,0
Integrační časová konstanta	T_I [s]	3,5999		T_I [s]	4,4639
Derivační časová konstanta	T_D [s]	0,8640	AntiW (S-PD)	T_T [s]	4,4639
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	T_f [s]	0,08640	Feed Forward	β [-]	0,5



Obr.: P2. 31: Průběh výstupu regulované soustavy č. 9 pro hodnoty parametrů regulátorů uvedené v **Tab. P2.11**



Obr.: P2. 32: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.11 (S9)**



Obr.: P2. 33: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.11 (S9)**

Soustava č. 9 (S9) – Menší hodnota periody vzorkování

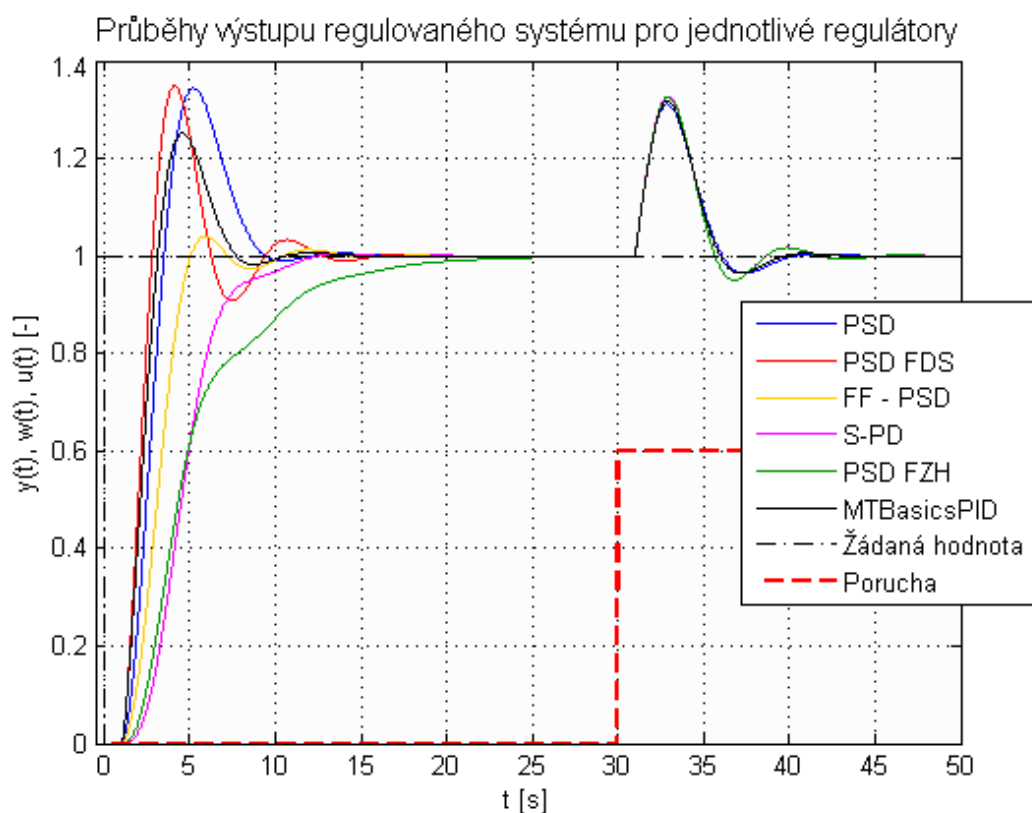
Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,01$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na poslední člen $\frac{1}{(2p+1)}$ soustavy v čase $t = 20$ s.

$$F_9(p) = \frac{1}{(1 + 2p)^2} e^{-p}$$

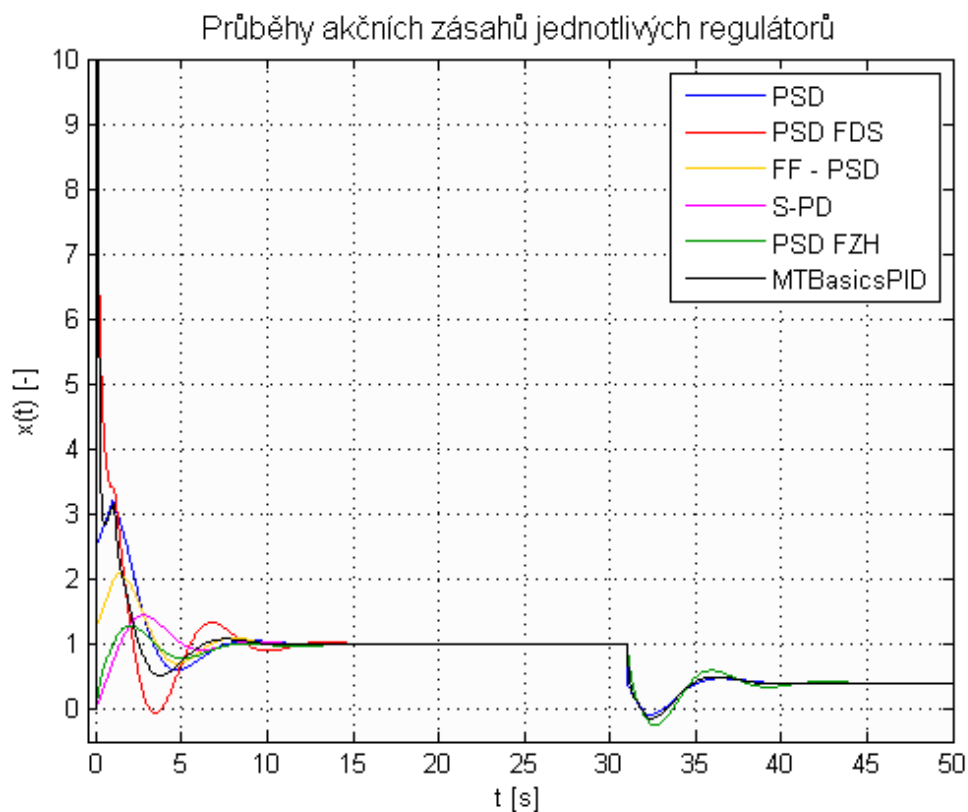
Tab. P2.12: Parametry regulátorů zjištěných funkčním blokem MTBasicsOscillationTuning pro velikost periody vzorkování $T_{vz} = 0,01$ s (S9)

Perioda vzorkování	T_{vz} [s]	0,01
Zesílení regulátoru	K [-]	2,4824
Integrační časová konstanta	T_I [s]	3,4276
Derivační časová konstanta	T_D [s]	0,8334
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	T_f [s]	0,08334

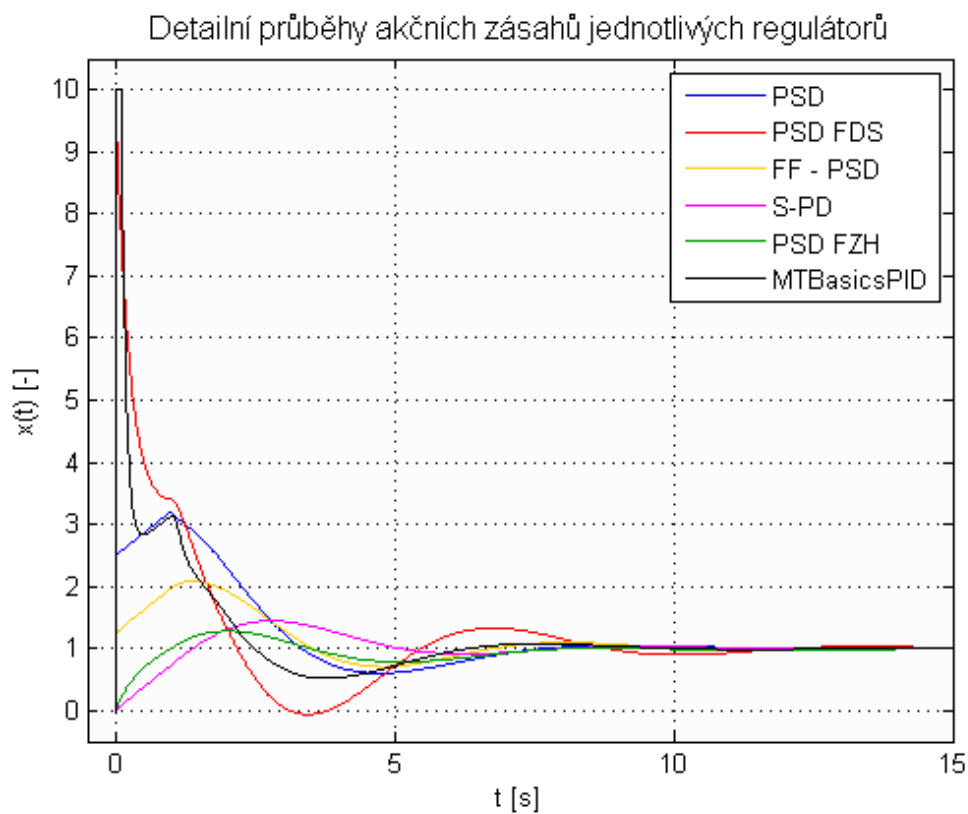
Zesilovací činitel filtru derivační složky	N [-]	3
Filtr žádané hodnoty	α [-]	0,0
	T_1 [s]	4,261
AntiW (S-PD)	T_T [s]	4,261
Feed Forward	β [-]	0,5



Obr.: P2. 34: Průběh výstupu regulované soustavy č. 9 pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.12**



Obr.: P2. 35: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.12 (S9)**



Obr.: P2. 36: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.12 (S9)**

Soustava č. 10 (S10)

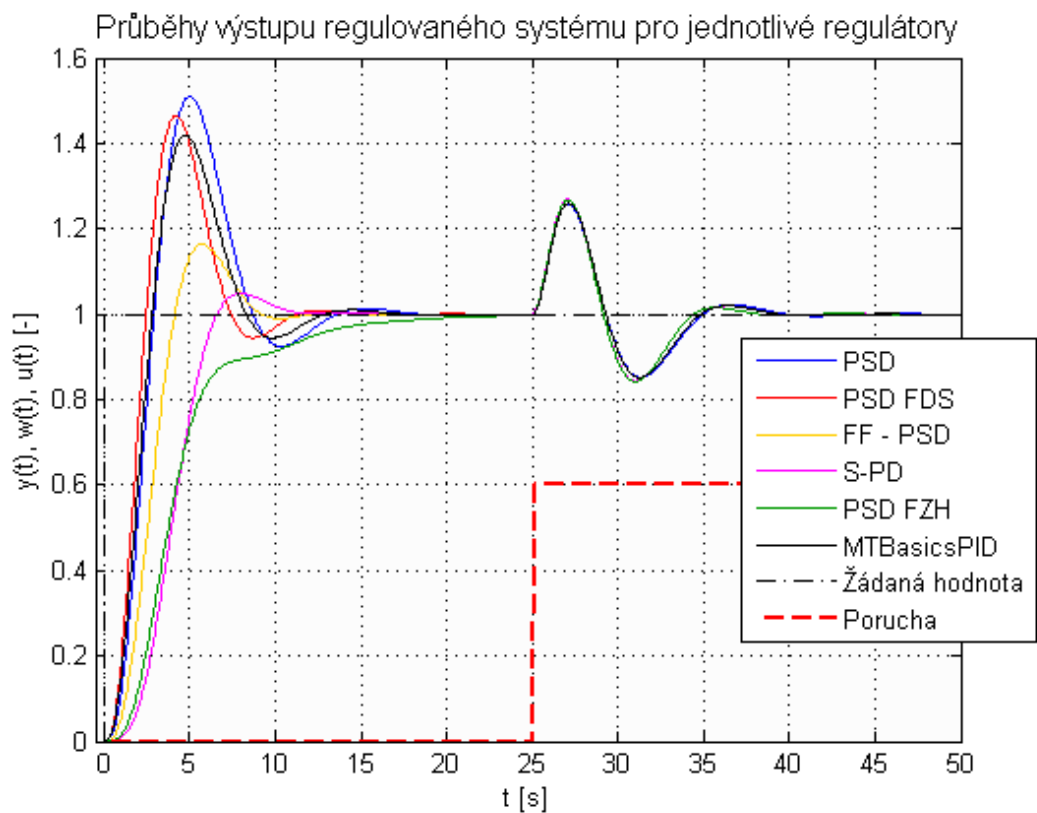
Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,05$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na člen $\frac{1}{(p+1)^2}$ soustavy v čase $t = 25$ s.

$$F_{10}(p) = \frac{2}{(10p + 1)(p + 1)^2}$$

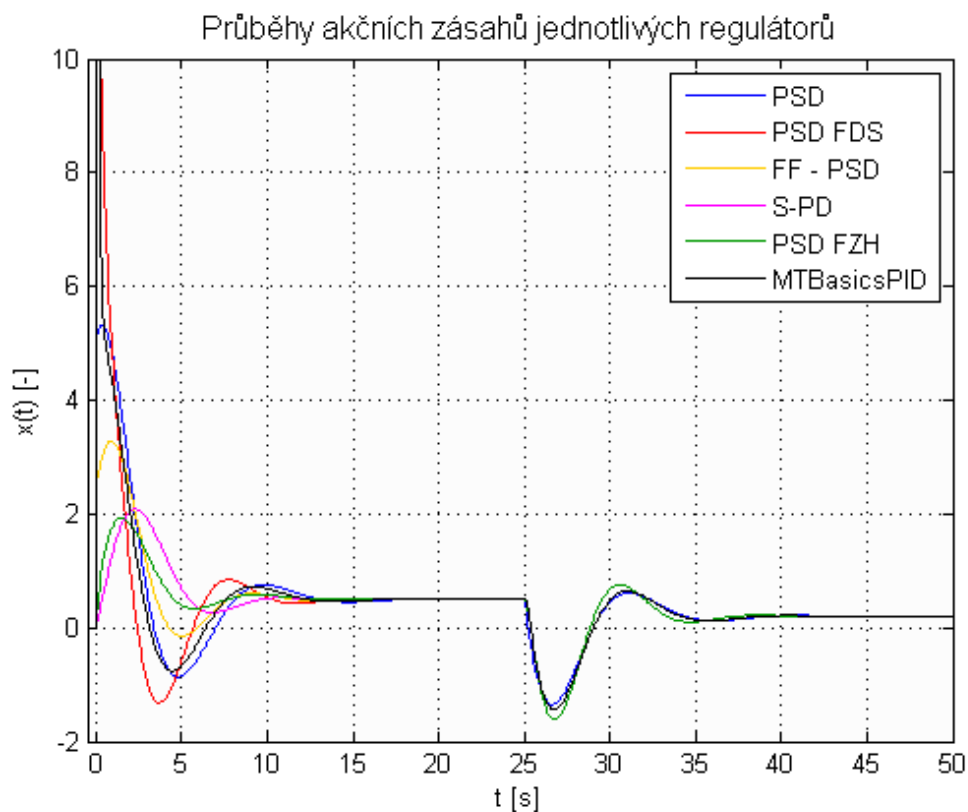
Tab. P2.13: Parametry regulátorů zjištěných funkčním blokem MTBasicsOscillationTuning (S10)

Perioda vzorkování	T_{vz} [s]	0,05
Zesílení regulátoru	K [-]	5,0641
Integrační časová konstanta	T_I [s]	3,4625
Derivační časová konstanta	T_D [s]	0,8310
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	T_f [s]	0,08310

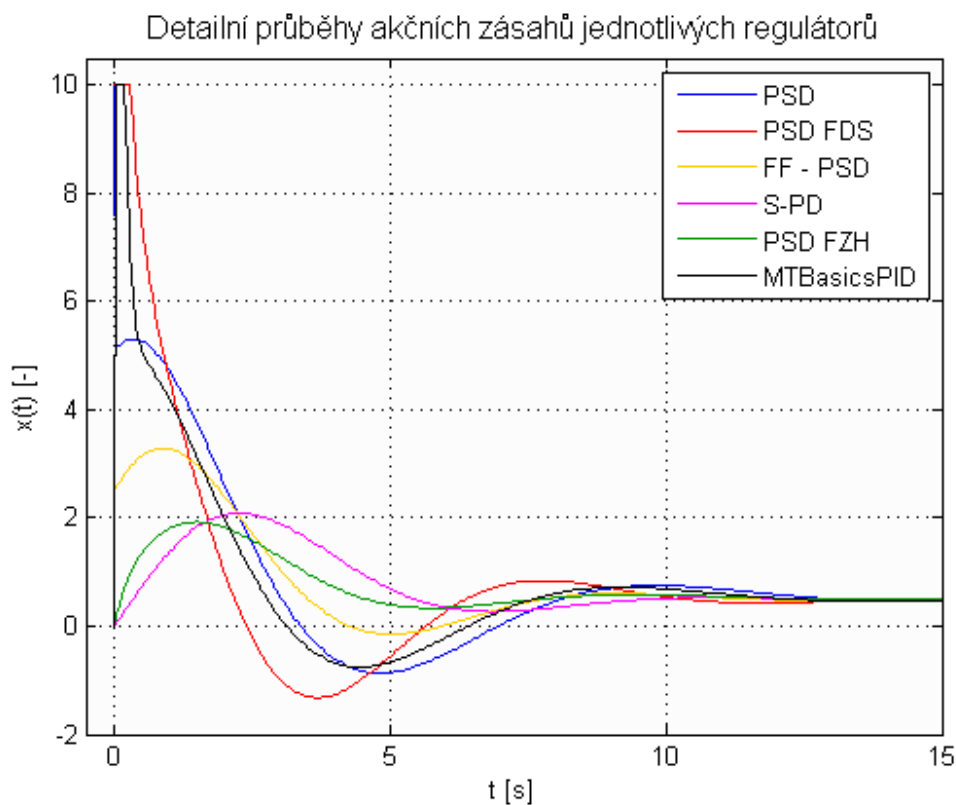
Zesilovací činitel filtru derivační složky	N [-]	3
Filtr žádané hodnoty	α [-]	0,0
	T_I [s]	4,2935
AntiW (S-PD)	T_T [s]	4,2935
Feed Forward	β [-]	0,5



Obr.: P2. 37: Průběh výstupu regulované soustavy č. 10 pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.13**



Obr.: P2. 38: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.13 (S10)**



Obr.: P2. 39: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.13 (S10)**

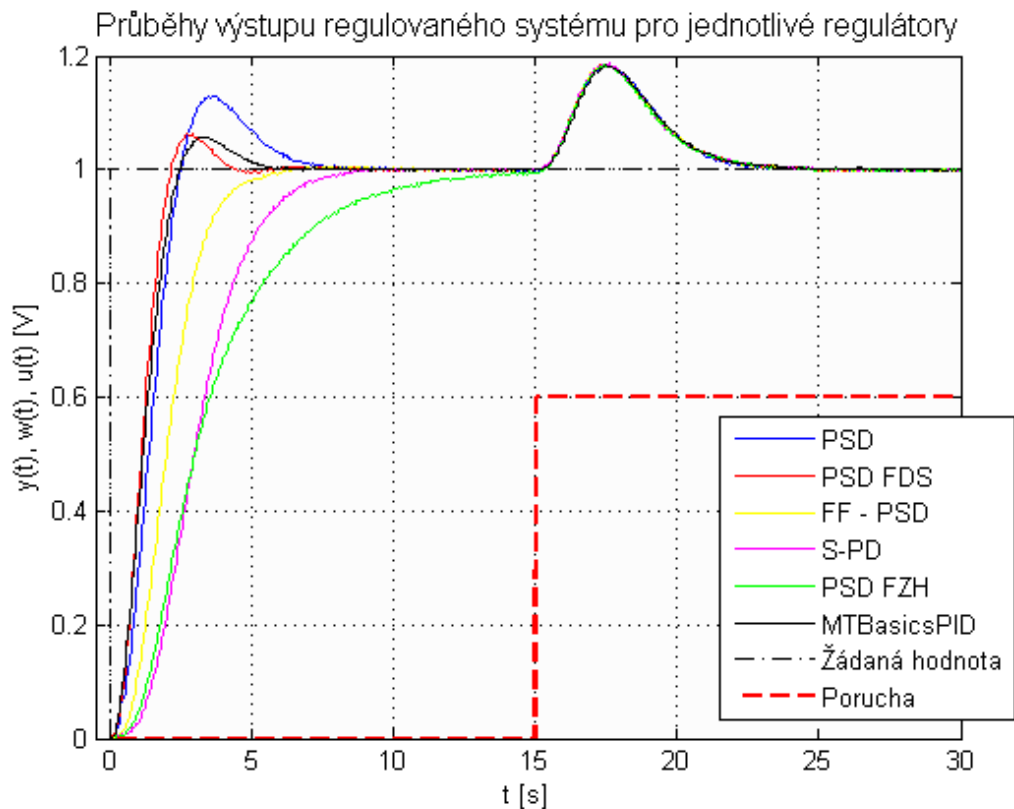
Reálná soustava č. 1 (R1)

Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,05$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na vstupu soustavy v čase $t = 15$ s.

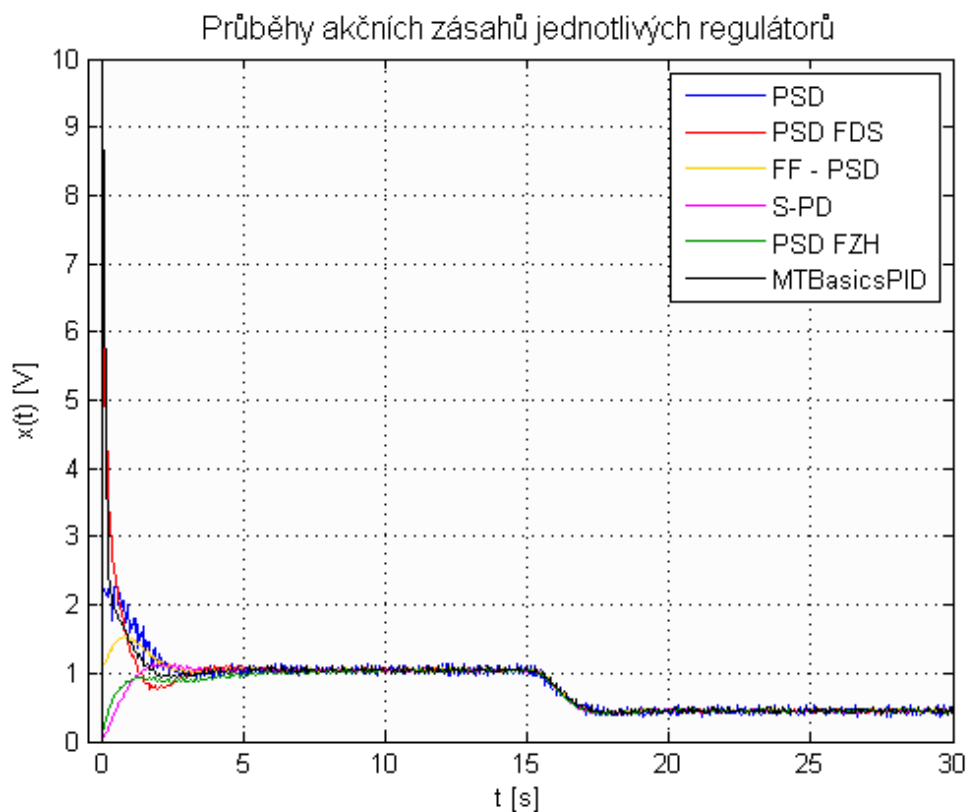
$$F_1(p) = \frac{1}{(p + 1)^3}$$

Tab. P2.14: Parametry regulátorů zjištěných funkčním blokem MTBasicsStepTuning (R1)

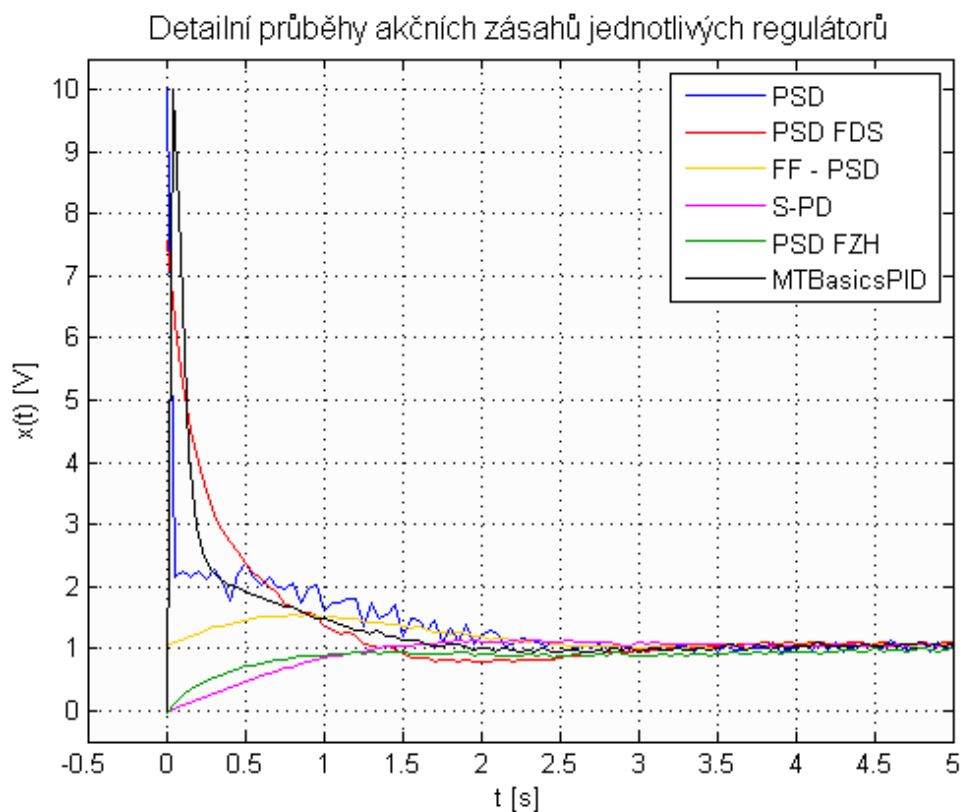
Perioda vzorkování	T_{vz} [s]	0,05	Zesilovací činitel filtru derivační složky	N [-]	3
Zesílení regulátoru	K [-]	2,1018	Filtr žádané hodnoty	α [-]	0,0
Integrační časová konstanta	T_I [s]	2,1625		T_1 [s]	2,6869
Derivační časová konstanta	T_D [s]	0,5244	AntiW (S-PD)	T_T [s]	2,6829
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	T_f [s]	0,05244	Feed Forward	β [-]	0,5



Obr.: P2. 40: Průběh výstupu reálné soustavy č. 1 pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.14**



Obr.: P2. 41: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.14 (R1)**



Obr.: P2. 42: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.14 (R1)**

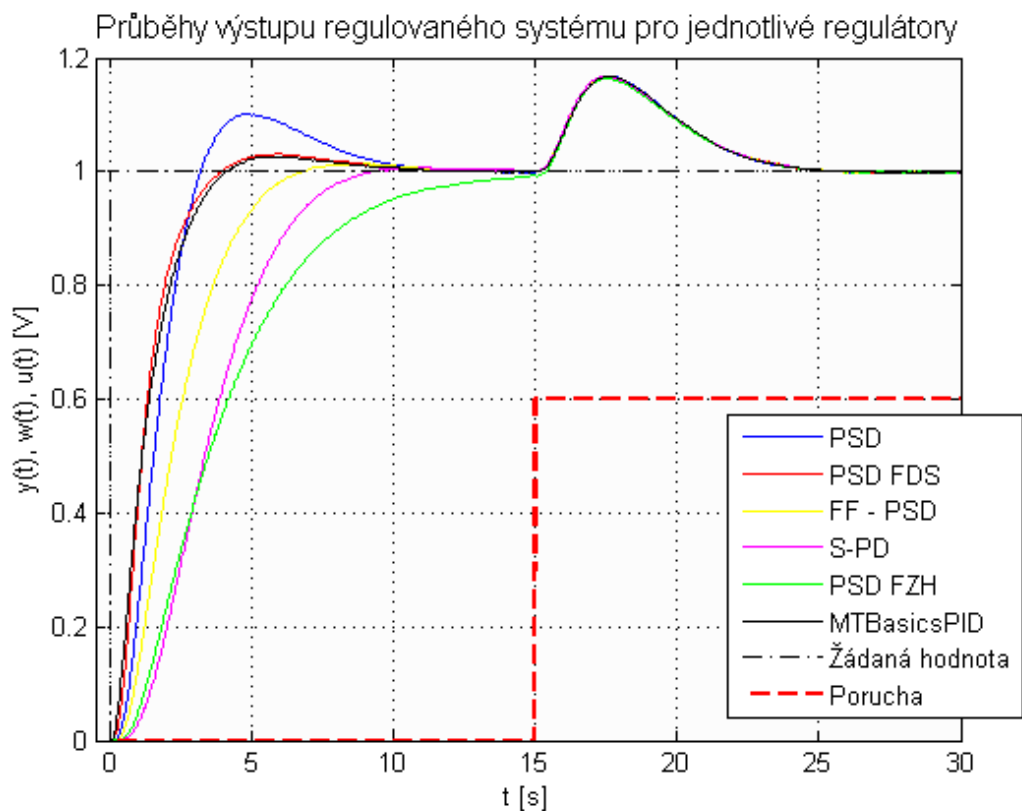
Reálná soustava č. 2 (R2)

Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,02$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na vstup soustavy v čase $t = 15$ s.

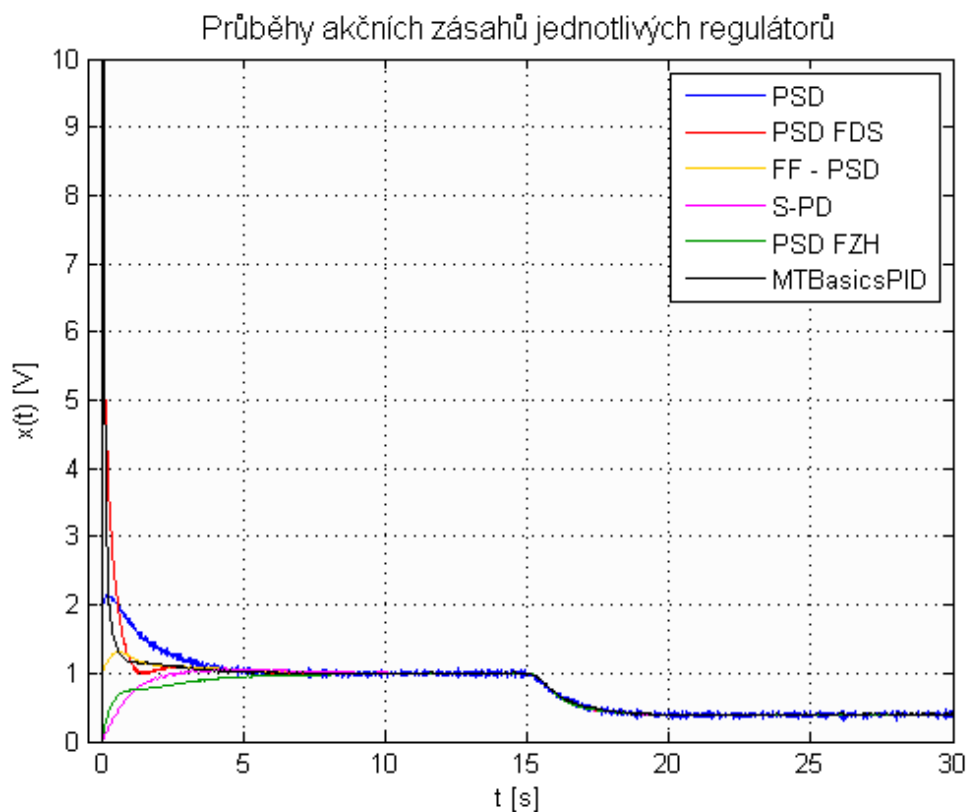
$$F_2(p) = \frac{1}{(1 + 0,7p)(1 + 2p)(1 + 0,2p)}$$

Tab. P2.15: Parametry regulátorů zjištěných funkčním blokem MTBasicsStepTuning (R2)

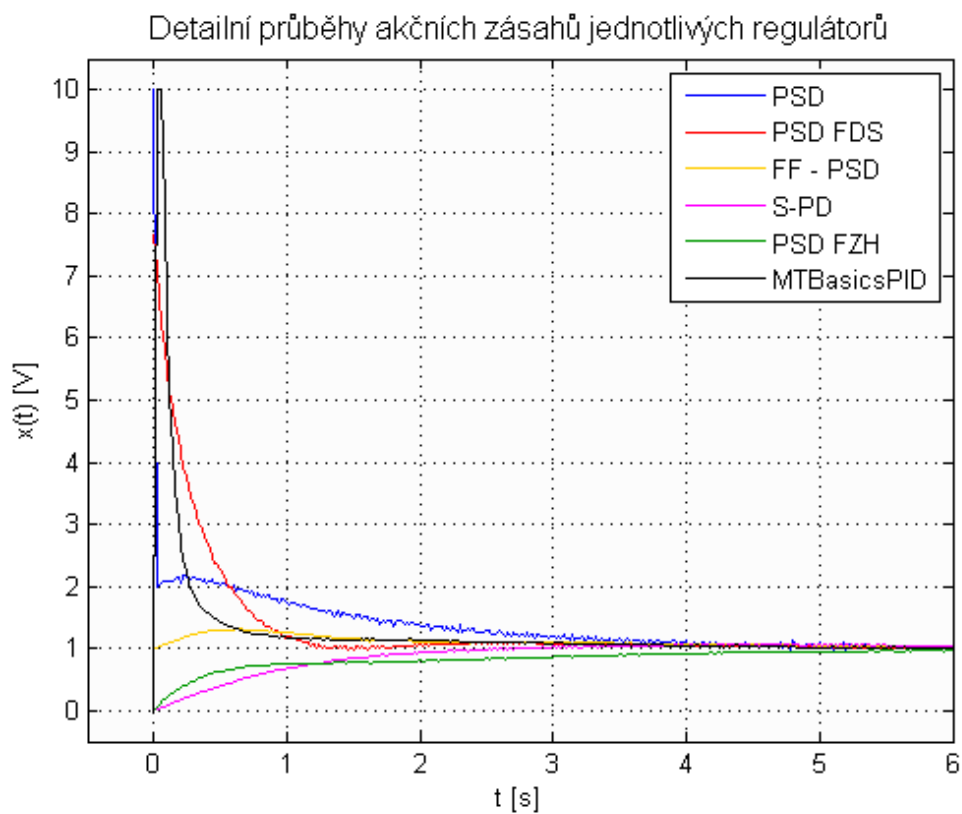
Perioda vzorkování	T_{vz} [s]	0,02	Zesilovací činitel filtru derivační složky	N [-]	3
Zesílení regulátoru	K [-]	1,9925	Filtr žádané hodnoty	α [-]	0,0
Integrační časová konstanta	T_I [s]	2,4284		T_1 [s]	3,0173
Derivační časová konstanta	T_D [s]	0,5889	AntiW (S-PD)	T_T [s]	3,0173
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	T_f [s]	0,05889	Feed Forward	β [-]	0,5



Obr.: P2. 43: Průběh výstupu reálné soustavy č. 2 pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.15**



Obr.: P2. 44: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.15 (R2)**



Obr.: P2. 45: Detailní průběhy akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P2.15 (R2)**

PŘÍLOHA 3

Průběhy výstupů testovaných systémů a akčních zásahů regulátorů pro specifická nastavení parametrů

V této příloze jsou uvedeny výsledné průběhy jak simulovaných, tak i reálných soustav pro specifická nastavení.

Značení, tabulky i jednotlivé průběhy jsou zobrazeny stejně, jak je tomu v **kapitolách 7 a 8**.

Značení:

PSD	PSD regulátor (popsán rovnicí (3.2))
PSD FDS	PSD regulátor s filtrací derivační složky (rovnice (3.2), kde derivační složka je realizována dle rovnice (3.3))
PSD – FF	PSD regulátor s dopřednou vazbou (rovnice (3.6) a (3.7))
S-PD	S-PD regulátor (popsán rovnicí (3.5))
PSD FZH	PSD regulátor s filtrem žádané hodnoty, který popisuje rovnice (3.4)
MTBasicsPID	MTBasicsPID regulátor (dle rovnice (4.1))

Soustava č. 1 (S1)

Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,01$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na poslední člen $\frac{1}{(p+1)}$ soustavy v čase $t = 20$ s.

$$F_1(p) = \frac{1}{(p+1)^3}$$

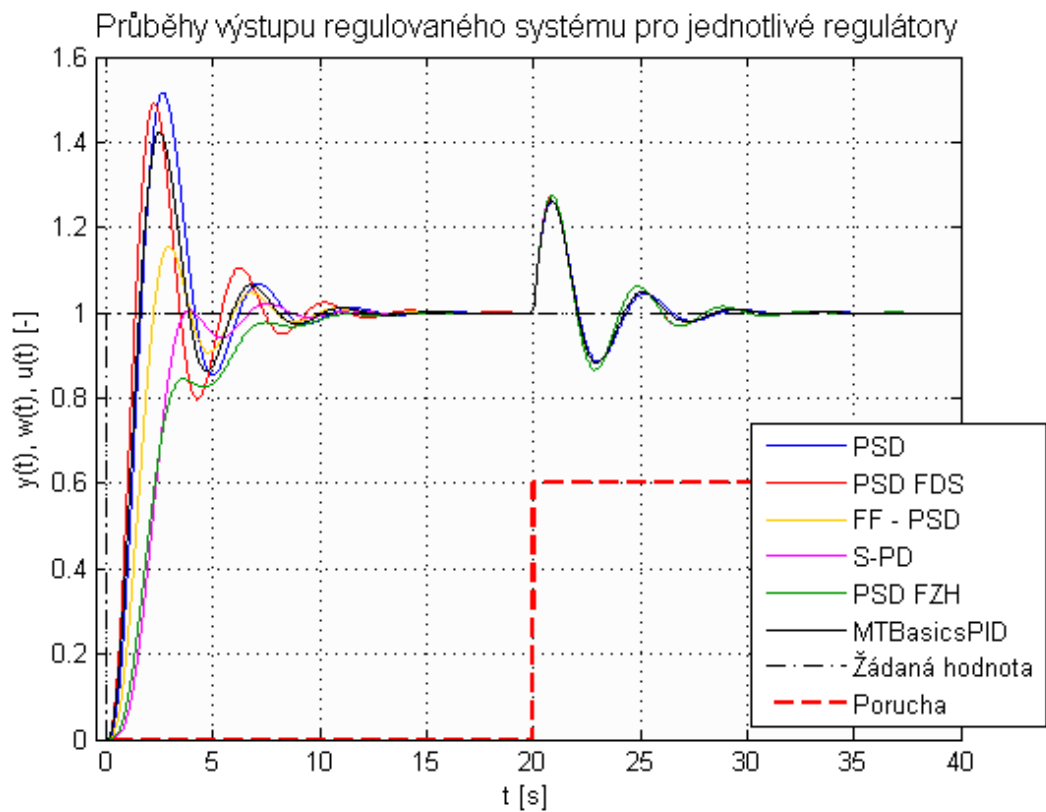
Tab. P3.1: Kritické parametry soustavy č. 1 získané pomocí Matlabu ($T_{vz} = 0,01$ s)

Kritické zesílení	$K_{krit} [-]$	7,8826
Kritická perioda	$T_{krit} [s]$	3,6516

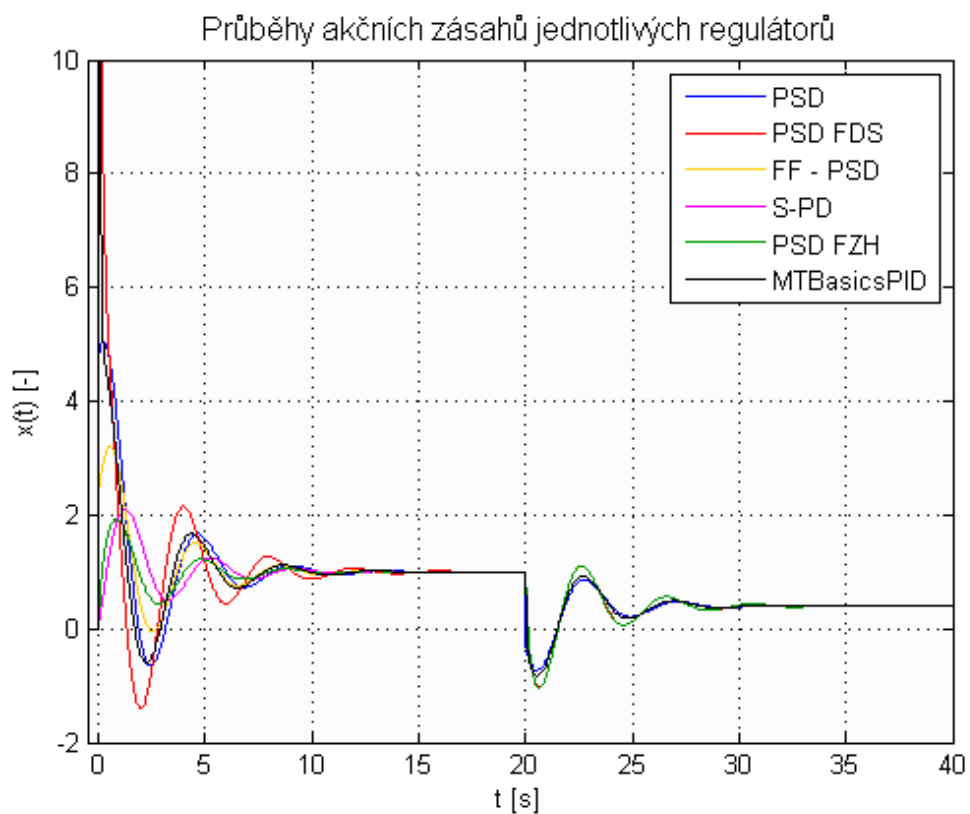
Tab. P3.2: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle **Tab. 5.1a** **Tab. P3.1** pro hodnotu periody vzorkování $T_{vz} = 0,01$ s (**S1**)

Perioda vzorkování	$T_{vz} [s]$	0,01
Zesílení regulátoru	$K[-]$	4,7295
Integrační časová konstanta	$T_I [s]$	1,8258
Derivační časová konstanta	$T_D [s]$	0,4564
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	$T_f [s]$	0,04564

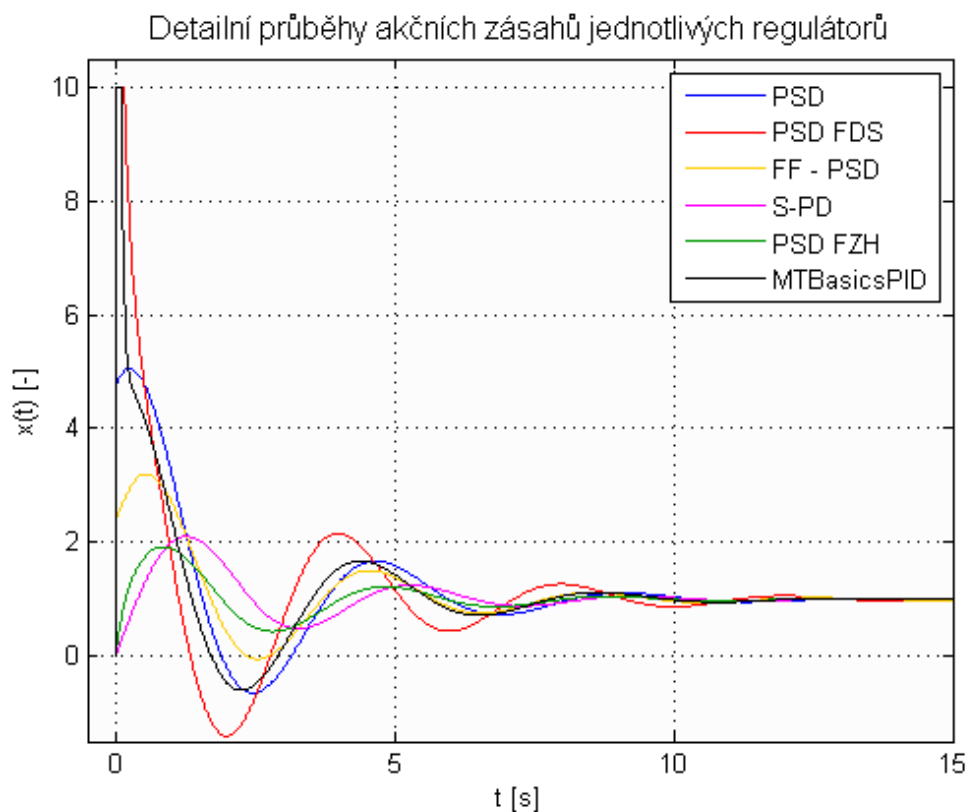
Zesilovací činitel filtru derivační složky	$N [-]$	3
Filtr žádané hodnoty	$\alpha [-]$	0,0
	$T_I [s]$	2,822
AntiW (S-PD)	$T_T [s]$	2,822
Feed Forward	$\beta [-]$	0,5



Obr.: P3. 1: Průběh výstupu regulované soustavy č. 1 pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P3.2 (S1)**



Obr.: P3. 2: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P3.2 (S1)**



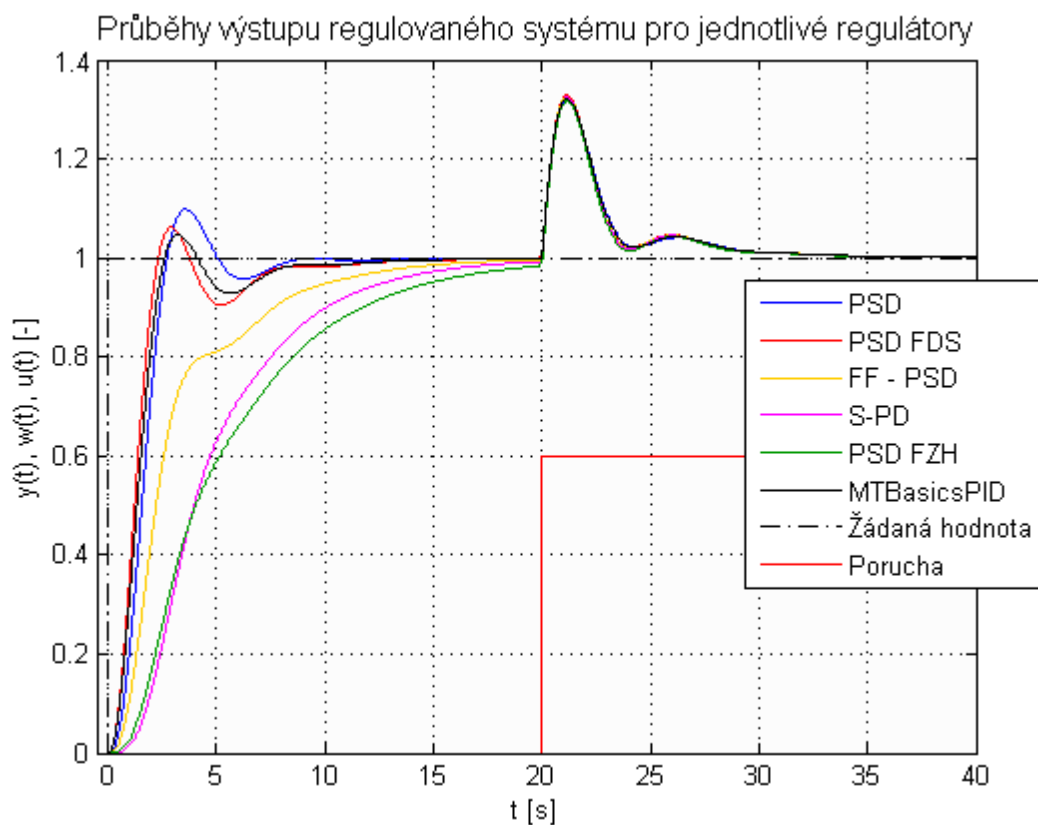
Obr.: P3. 3: Detailní průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedené v **Tab. P3.2 (S1)**

Pro soustavu č. 1 bylo také provedeno testování pro parametry regulátorů navržené dle Z-N metody s úpravou pro omezení kmitání (**Tab. 5.2**).

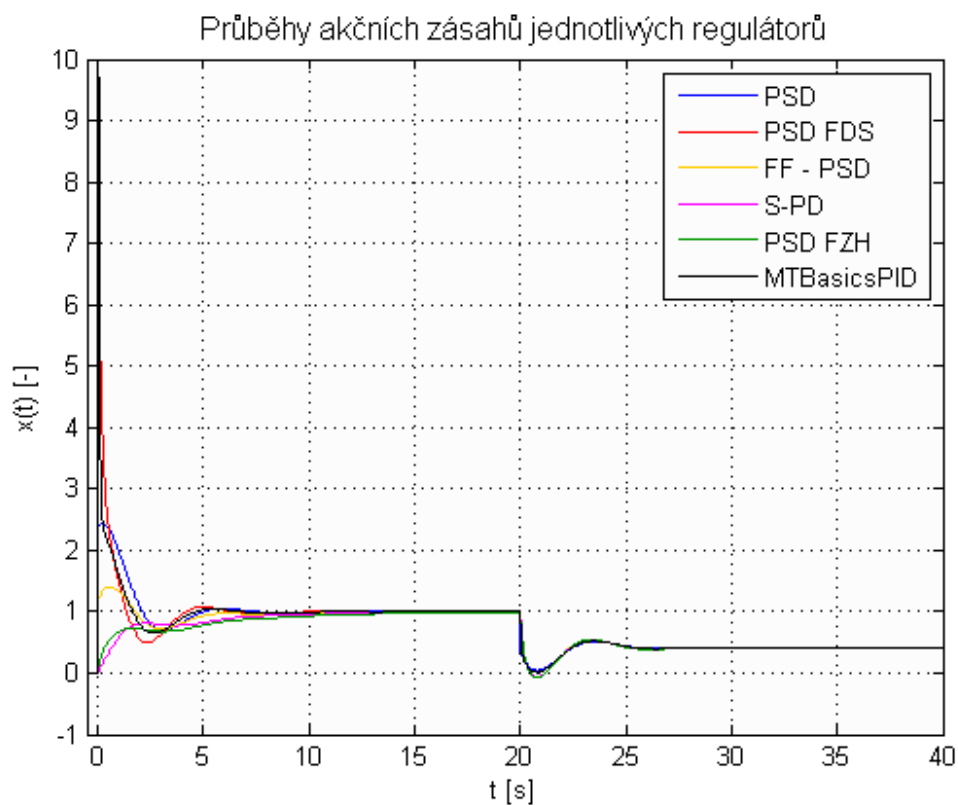
Tab. P3.3: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle **Tab. 5.2** a **Tab. 7.1** pro hodnotu periody vzorkování $T_{vz} = 0,01s$ (**S1**)

Perioda vzorkování	T_{vz} [s]	0,01
Zesílení regulátoru	K [-]	2,3648
Integrační časová konstanta	T_i [s]	3,6516
Derivační časová konstanta	T_D [s]	0,4564
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	T_f [s]	0,04564

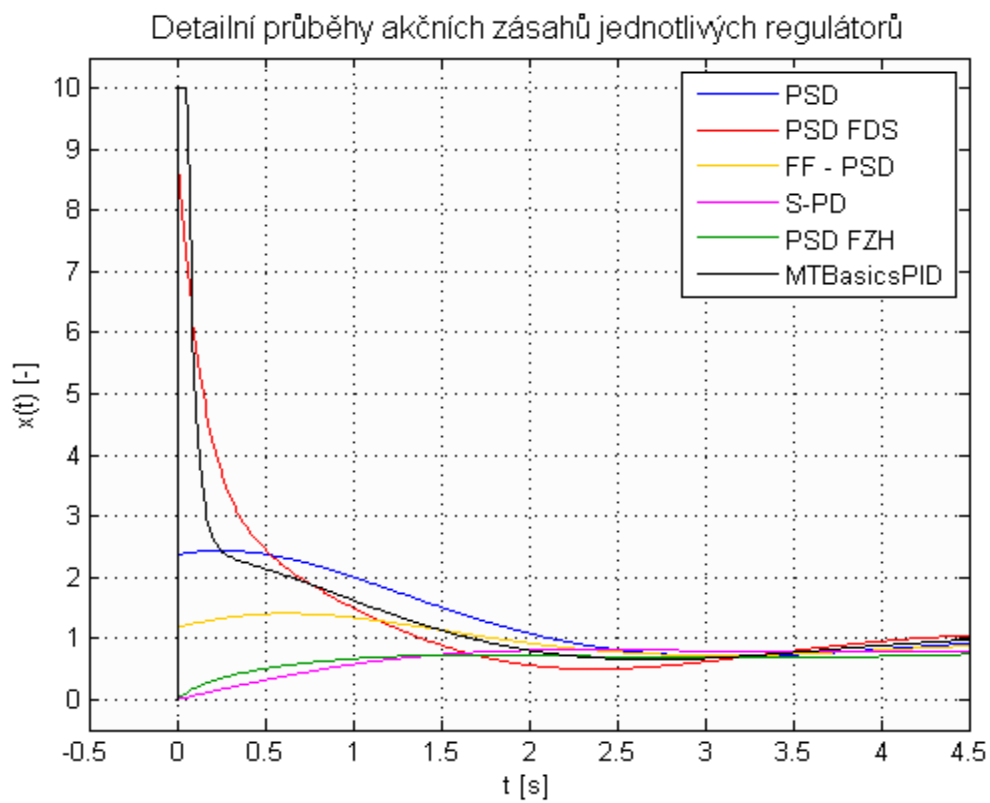
Zesilovací činitel filtru derivační složky	N [-]	3
Filtr žádané hodnoty	α [-]	0,0
	T_1 [s]	4,1082
AntiW (S-PD)	T_T [s]	4,1082
Feed Forward	β [-]	0,5



Obr.: P3. 4: Průběh výstupu regulované soustavy č. 1 pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P3.3(S1)**



Obr.: P3. 5: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P3.3 (S1)**



Obr.: P3. 6: Detailní průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedených v **Tab. P3.3 (S1)**

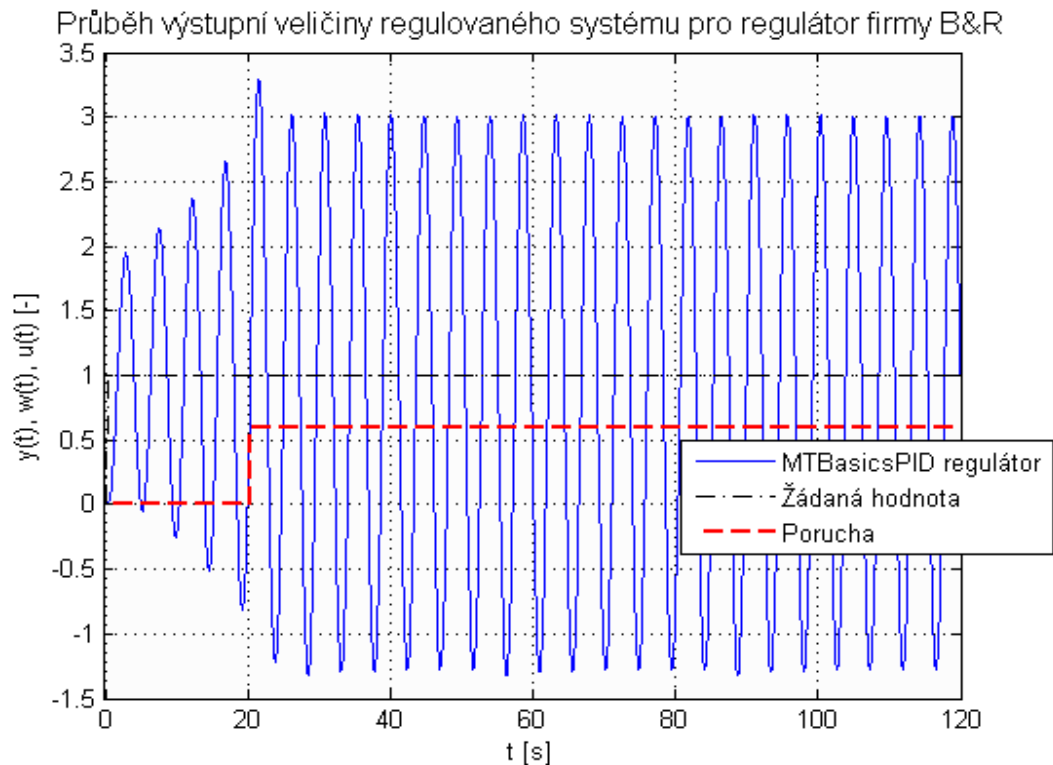
Soustava č. 1 (S1) – Perioda vzorkování – 50ms

Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,05$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na poslední člen $\frac{1}{(p+1)}$ soustavy v čase $t = 20$ s.

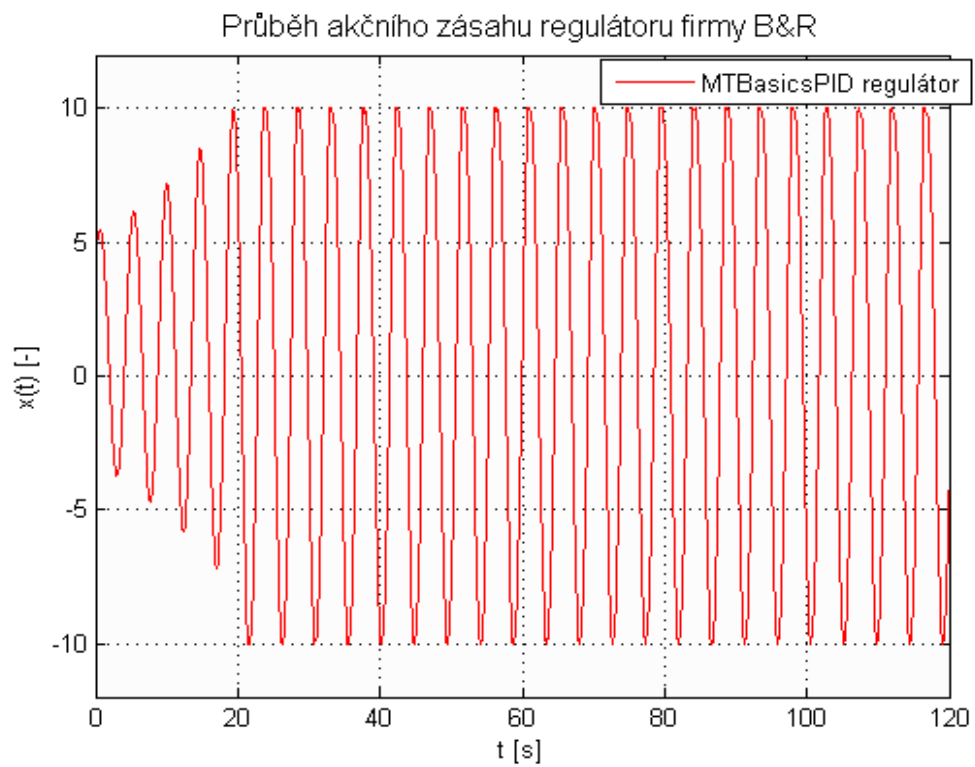
$$F_1(p) = \frac{1}{(p+1)^3}$$

Tab. P3. 4: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle **Tab. 5.1** a **Tab. 7.1 (S1)**

Perioda vzorkování	T_{vz} [s]	0,05	Zesilovací činitel filtru derivační složky	N [-]	3
Zesílení regulátoru	K [-]	4,4689	Filtr žádané hodnoty	α [-]	0,0
Integrační časová konstanta	T_I [s]	1,8728		T_I [s]	2,341
Derivační časová konstanta	T_D [s]	0,4682	AntiW (S-PD)	T_T [s]	2,341
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	T_f [s]	0,04682	Feed Forward	β [-]	0,5



Obr.: P3. 7: Průběh výstupu regulované soustavy č. 1 pro hodnoty parametrů regulátoru MTBasicsPID uvedených v **Tab. P3.4 (S1)**



Obr.: P3. 8: Průběh akčního zásahu regulátoru MTBasicsPID pro hodnoty parametrů tohoto regulátoru uvedených v **Tab. P3.4 (S1)**

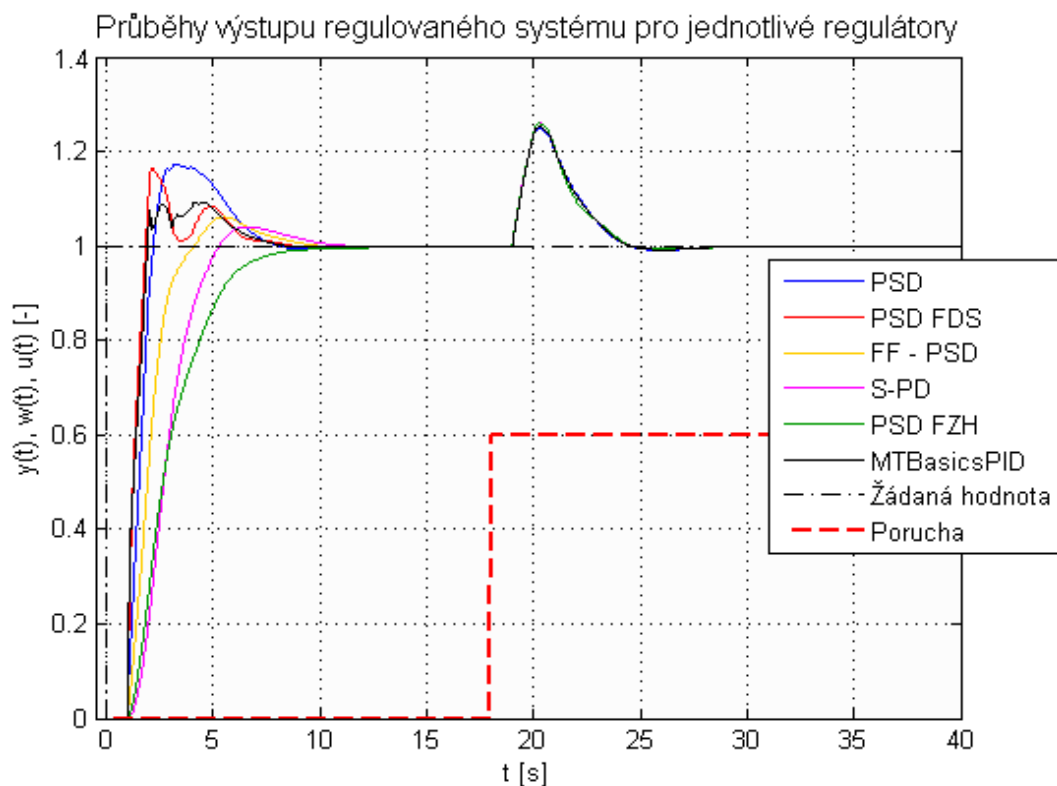
Soustava č. 7 (S7) - Úprava zesílení

Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,01$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na vstup soustavy v čase $t = 18$ s.

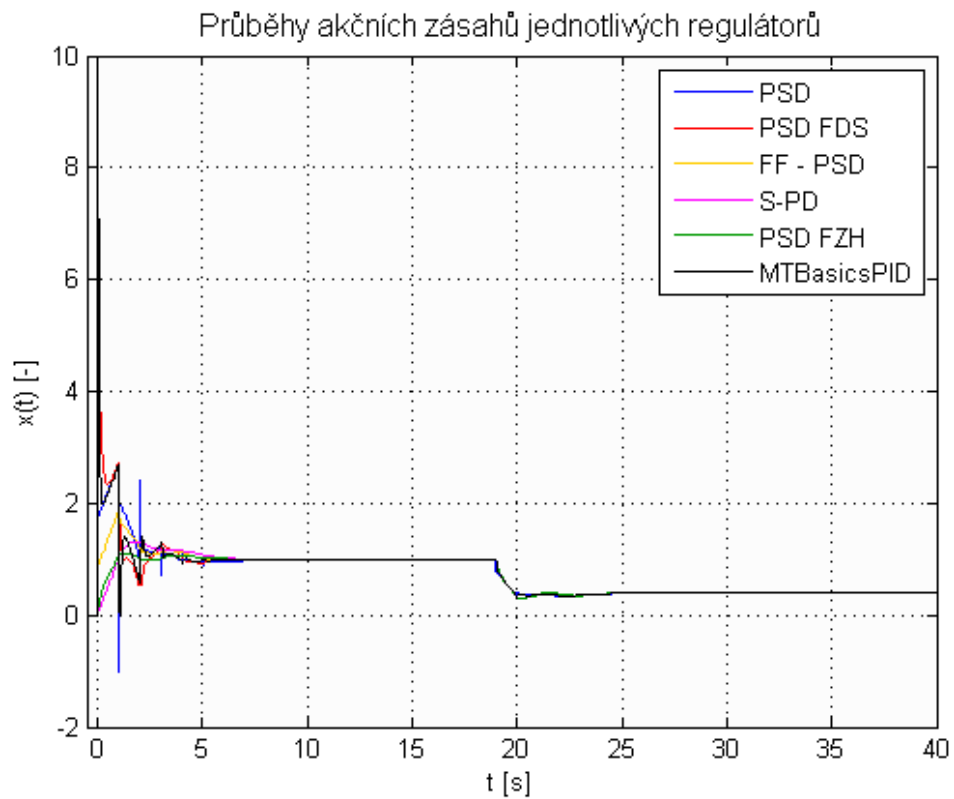
$$F_4(p) = \frac{1}{(1 + 2p)} e^{-p}$$

Tab. P3.5: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle **Tab. 5.1** a **Tab. 7.17** včetně velikosti periody vzorkování a úpravy hodnoty zesílení regulátorů (S7)

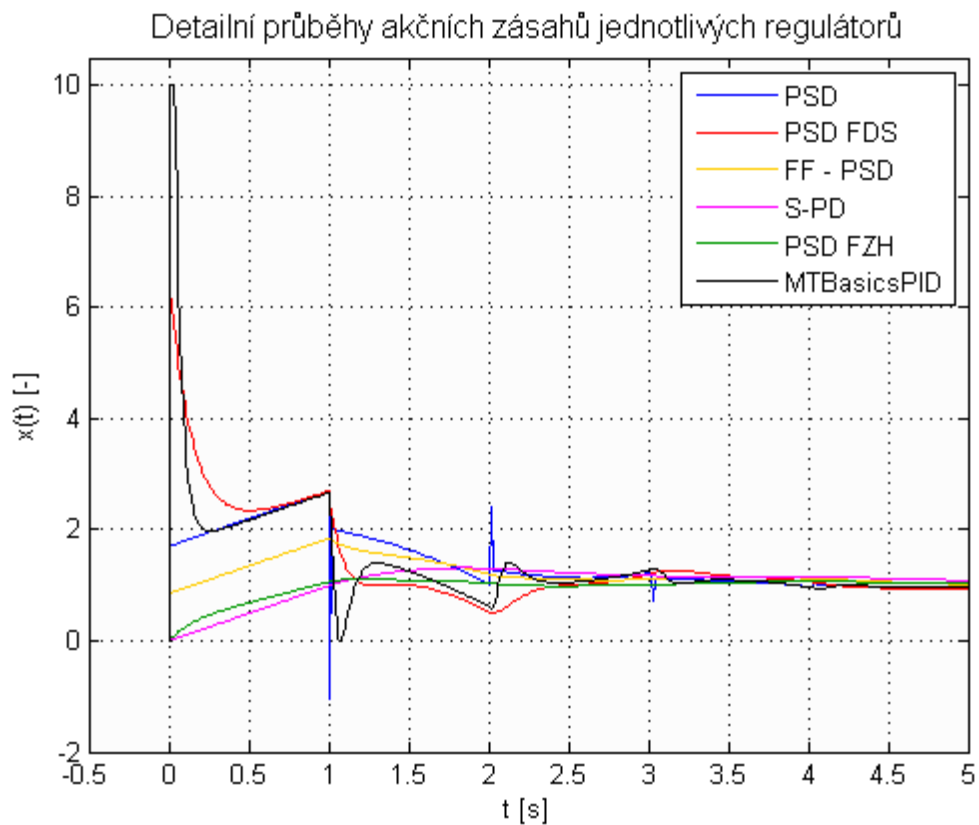
Perioda vzorkování	T_{vz} [s]	0,01	Zesilovací čítnel filtru derivační složky	N [-]	3
Zesílení regulátoru	K [-]	1,7061	Filtr žádané hodnoty	α [-]	0,0
Integrační časová konstanta	T_i [s]	1,7181		T_1 [s]	2,1746
Derivační časová konstanta	T_d [s]	0,4295	AntiW (S-PD)	T_T [s]	2,1746
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	T_f [s]	0,04295	Feed Forward	β [-]	0,5



Obr.: P3. 9: Průběh výstupu regulované soustavy č. 7 pro hodnoty parametrů regulátorů uvedené v **Tab. P3.5** (S7)



Obr.: P3. 10: Průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedené v **Tab. P3.5 (S7)**



Obr.: P3. 11: Detailní průběh akčních zásahů jednotlivých regulátorů pro hodnoty parametrů regulátorů uvedené v **Tab. P3.5 (S7)**

Soustava č. 9 (S9)

Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,1$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na člen $\frac{1}{(1+2p)}$ soustavy v čase $t = 70$ s.

$$F_9(p) = \frac{1}{(1+2p)^2} e^{-p}$$

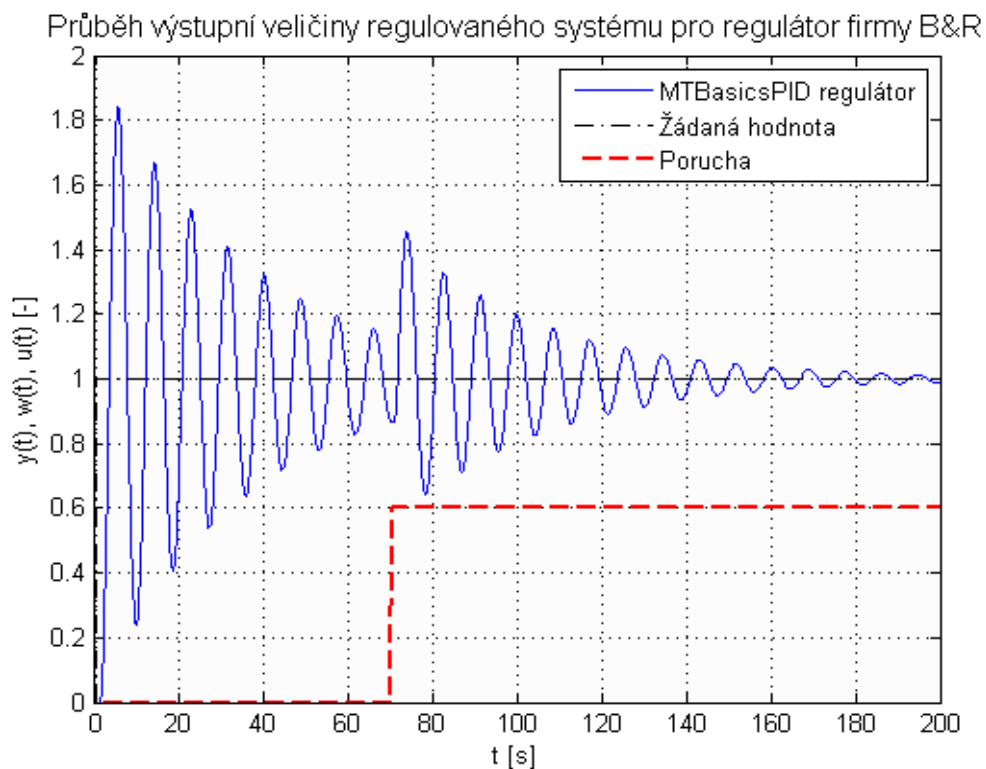
Tab. P3. 6: Kritické parametry soustavy č. 9 získané pomocí Matlabu ($T_{vz} = 0, 1$ s)

Kritické zesílení	$K_{krit} [-]$	4,484
Kritická perioda	$T_{krit} [s]$	6,7186

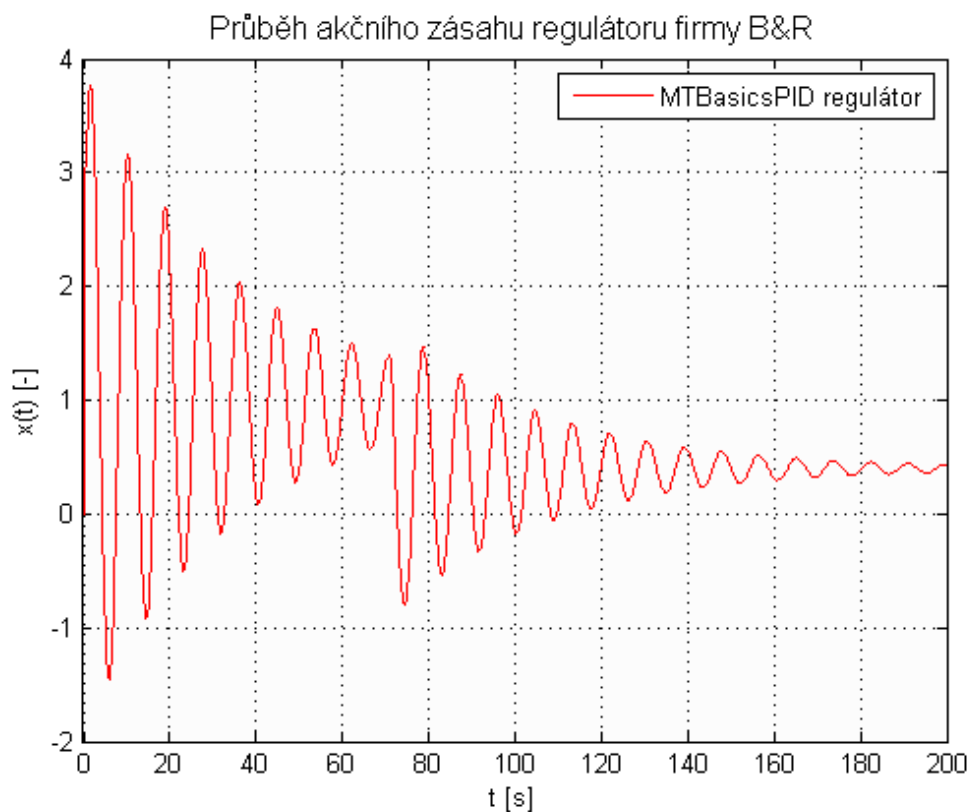
Tab. P3.7: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle **Tab. 5.1** a **Tab. P3.5 (S9)**

Perioda vzorkování	$T_{vz} [s]$	0,1
Zesílení regulátoru	$K[-]$	2,699
Integrační časová konstanta	$T_I [s]$	3,3593
Derivační časová konstanta	$T_D [s]$	0,8398
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	$T_f [s]$	0,8398

Zesilovací činitel filtru derivační složky	$N [-]$	3
Filtr žádané hodnoty	$\alpha [-]$	0,0
	$T_1 [s]$	4,1991
AntiW (S-PD)	$T_T [s]$	4,1991
Feed Forward	$\beta [-]$	0,5



Obr.: P3. 12: Průběh výstupu regulované soustavy č. 9 pro hodnoty parametrů regulátoru MTBasicsPID uvedených v **Tab. P3.7 (S9)**



Obr.: P3. 13: Průběh akčního zásahu regulátoru MTBasicsPID pro hodnoty parametrů tohoto regulátoru uvedených v **Tab. P3.7 (S9)**

Reálná soustava č. 1 (R1)

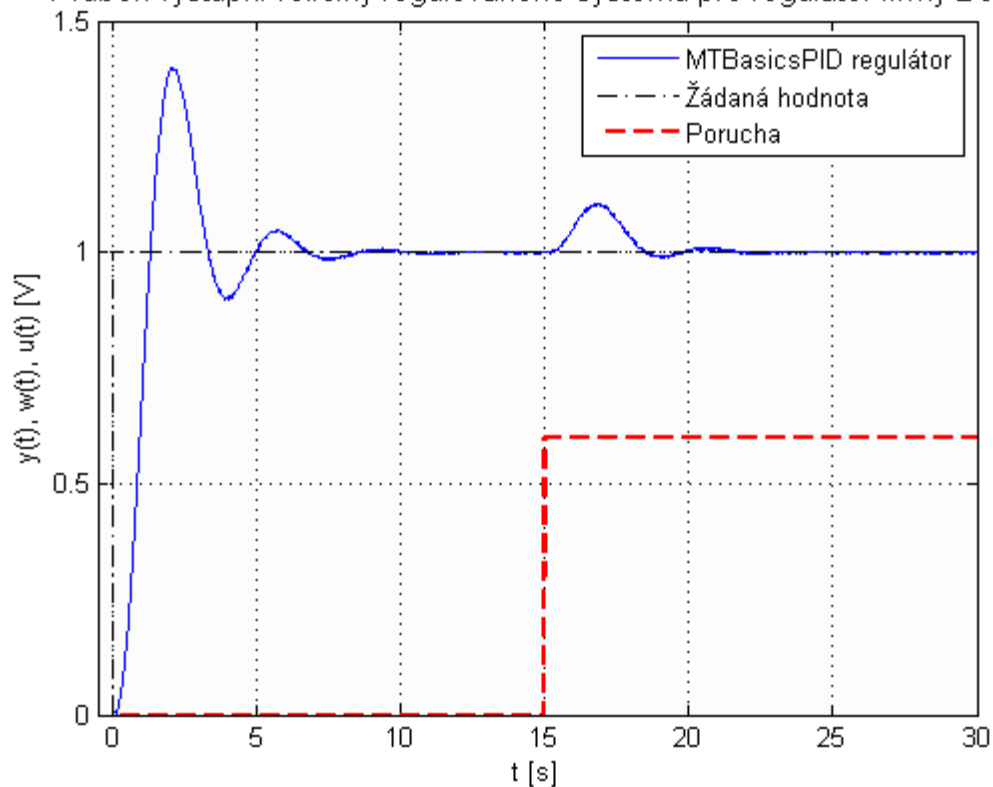
Perioda vzorkování byla zvolena $T_{vz} = 0,01$ s. Jednotkový skok poruchy o velikosti 0,6 působí na poslední člen $\frac{1}{(p+1)}$ soustavy v čase $t = 15$ s.

$$F_s(p) = \frac{1}{(p+1)^3}$$

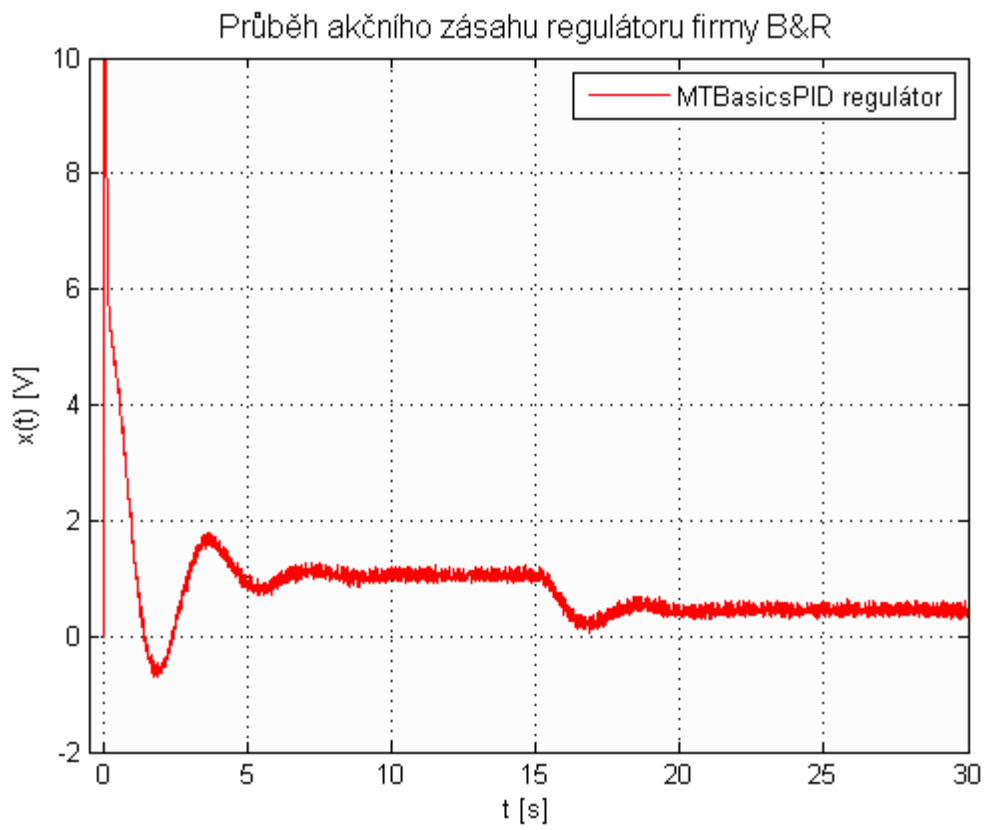
Tab. P3.8: Hodnoty parametrů regulátorů nastavené dle **Tab. 5.1** a **Tab. 8.1 (R1)**

Perioda vzorkování	T_{vz} [s]	0,01	Zesilovací činitel filtru derivační složky	N [-]	3
Zesílení regulátoru	K [-]	5,280	Filtr žádané hodnoty	α [-]	0,0
Integrační časová konstanta	T_i [s]	1,60		T_1 [s]	2,0
Derivační časová konstanta	T_D [s]	0,40	AntiW (S-PD)	T_T [s]	2,0
Časová konstanta filtru derivační složky (MTBasicsPID)	T_f [s]	0,004	Feed Forward	β [-]	0,5

Průběh výstupní veličiny regulovaného systému pro regulátor firmy B&R



Obr.: P3. 14: Průběh výstupu reálné soustavy č. 1 pro hodnoty parametrů regulátoru MTBasicsPID uvedených v **Tab. P3.8 (R1)**



Obr.: P3. 15: Průběh akčního zásahu regulátoru MTBasicsPID pro hodnoty parametrů tohoto regulátoru uvedených v **Tab. P3.8 (R1)**