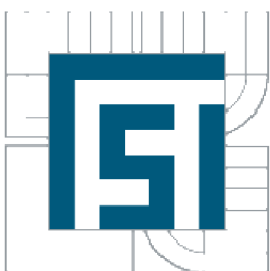




**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

## **ŘÍZENÍ SOUSTAV VYŠŠÍCH ŘÁDŮ**

CONTROL OF HIGHER ORDER PLANT

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**PAVEL ZVARA**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. OLGA DAVIDOVÁ, Ph.D.**

BRNO 2011



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky

Akademický rok: 2010/11

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Pavel Zvara

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902R001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Řízení regulovaných soustav vyšších řádů**

v anglickém jazyce:

#### **Control of higher order plant**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Některé metody syntézy regulačního obvodu potřebují mít přenos regulované soustavy v určitém jednodušším tvaru. Aby bylo možné těmito metodami navrhnout regulátory pro řízení regulovaných soustav vyšších řádů, je třeba složitější přenosy zjednodušit. Práce se bude věnovat různým náhradám složitých přenosů za jednodušší.

Cíle bakalářské práce:

- Uveďte způsoby úprav složitých přenosů regulovaných soustav na přenosy jednodušší.
- Popište použité metody syntézy.
- Navrhněte pro vybrané regulované soustavy vhodné typy regulátorů použitím různých náhrad přenosů.
- V Simulinku namodelujte regulační průběhy.
- Proveďte vyhodnocení regulace s ohledem na její přesnost a kvalitu.

Seznam odborné literatury:

BALÁTĚ, J. Automatické řízení. Praha: Nakladatelství BEN–technická literatura, 2003. 664s. ISBN 80-7300-020-2.

ŠULC, B.; VÍTEČKOVÁ, M. Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. 333s.

ISBN 80-01-03007-5

ŠVARC, I.; ŠEDA, M.; VÍTEČKOVÁ, M. Automatické řízení. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. 324s. ISBN 978-80-214-3491-2

VÍTEČKOVÁ, M.; VÍTEČEK, A. Základy automatické regulace. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2006. 198s. ISBN 80-248-1068-9.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Olga Davidová, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 11.11.2010

L.S.



Ing. Jan Roupec, Ph.D.  
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá zjednodušováním přenosů proporcionálních a integračních nekaitavých regulovaných soustav vyšších řádů. Je provedeno zjednodušení různými způsoby a navrženy parametry regulátorů. Pro seřízení všech regulátorů byla zvolena metoda požadovaného modelu. Je porovnána vhodnost jednotlivých zjednodušení s ohledem na požadavky průběhu regulace.

## **Abstract**

This work is dedicated to simplifying transfers of proportional and integral non-oscillatory plant of higher-order. A simplification was done in different ways and designed controller parameters. The desired model method was chosen for adjusting all controllers. It is possible to compare the suitability of the simplification with regard to the requirements of the regulation.

## **Klíčová slova**

Regulované soustavy vyšších řádů, spojitý regulátor, syntéza regulačních obvodů, metoda požadovaného modelu.

## **Keywords**

Higher-Order Plants, Continuous Controller, Control System Synthesis, Desired Model Method



## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucí mé práce Ing. Olze Davidovové, Ph.D. za pomoc, poskytnuté rady a poznatky během tvorby této práce.





## **Obsah**

<b>Zadání závěrečné práce</b> .....	3
<b>Abstrakt</b> .....	5
<b>1 Úvod</b> .....	11
<b>2 Regulované soustavy</b> .....	13
2.1 Nekmitavé proporcionální regulované soustavy .....	13
2.2 Nekmitavé proporcionální regulované soustavy .....	13
<b>3 Úprava přenosů regulovaných soustav</b> .....	15
<b>4 Syntéza regulačního obvodu</b> .....	17
4.1 Návrh struktury regulátoru pro zadanou regulovanou soustavu.....	17
4.2 Seřízení regulátoru metodou požadovaného modelu .....	17
<b>5 Praktická část</b> .....	19
5.1 Proporcionální regulovaná soustava s neminimální fází a dopravním zpožděním .....	20
5.2 Proporcionální regulovaná soustava s neminimální fází.....	25
5.3 Proporcionální regulovaná soustava s dopravním zpožděním .....	27
5.4 Proporcionální regulovaná soustava.....	29
5.5 Integrovní regulovaná soustava s neminimální fází a dopravním zpožděním.....	31
5.6 Integrovní regulovaná soustava s neminimální fází .....	36
5.7 Integrovní regulovaná soustava s dopravním zpožděním.....	38
5.8 Integrovní regulovaná soustava .....	40
<b>6 Závěr</b> .....	42
<b>Seznam použité literatury</b> .....	43

### **Použité zkratky**

$a$  ... zesílení regulačního obvodu

$a_n$  ... koeficient levé strany lineární diferenciální rovnice

$e$  ... regulační odchylka

$G(s)$  ... přenos soustavy

$k$  ... koeficient přenosu (zesílení) regulované soustavy

$\kappa$  ... koeficient relativního překmitu

$r_0$  ... proporcionální konstanta (váha proporcionální složky)

$s$  ... komplexní proměnná

$T_c$  ... časová konstanta

$T_i$  ... setrvačná časová konstanta

$T_d$  ... dopravní zpoždění

$T_D$  ... doporučená derivační časová konstanta

$T_i$  ... časová konstanta

$T_I$  ... doporučená integrační časová konstanta

$T_S$  ... náhradní součtová konstanta

$T_n$  ... doba náběhu

$T_u$  ... doba průtahu

$T_w$  ... požadovaná setrvačná časová konstanta

$U(s)$  ... akční veličina soustavy

$u$  ... akční veličina, vstupní veličina

$Y(s)$  ... regulovaná (výstupní) veličina soustavy

$\eta(t)$  ... spojitý jednotkový skok

## 1 Úvod

Při navrhování parametrů regulátorů se v praxi často přenosy regulovaných soustav vyskytují ve složitých tvarech. V určitých případech může být výhodnější tyto soustavy vyšších řádů zjednodušit, tedy je převést na tvary vhodnější pro návrh a seřízení regulátorů. Některé způsoby návrhů parametrů regulátorů přímo vyžadují přenosy v jednodušších tvarech. Pro různé typy regulovaných soustav se používají různé metody zjednodušení.

Po prvních kapitolách, zabývajících se úvodem do dané problematiky, obsahuje třetí část práce teoretické podklady k možným způsobům zjednodušení složitých přenosů regulovaných soustav. Ve čtvrté kapitole je popsána zvolená metoda návrhu regulátoru a to metoda požadovaného modelu. Tato metoda byla zvolena z důvodu možnosti porovnání průběhů regulace jednotlivých zjednodušení. Metoda požadovaného modelu vyžaduje podobná zjednodušení i v praxi.

Pro úpravy byly zvoleny nekmitavé proporcionální a integrační soustavy vyšších řádů. U vybraných typů proporcionálních a integračních soustav jsou v páté kapitole práce uvedeny kompletní postupy zjednodušení regulované soustavy více způsoby a dále také postupy při návrhu parametrů regulátorů. Výsledné přenosy regulovaných soustav, parametrů regulátorů a hodnot průběhů regulací byly zpracovány do tabulek. Výsledky úprav zbylých regulovaných soustav byly pro přehlednost zpracovány již jen do tabulek.

Pomocí programu Simulink byly zobrazeny přechodové charakteristiky úprav původní regulované soustavy, aby bylo možné jejich porovnání s originálem před zjednodušením. Stejně tak byly nasimulovány přechodové charakteristiky jednotlivých regulačních obvodů, které umožňují porovnání vhodnosti jednotlivých zjednodušení a následného návrhu parametrů regulátorů. Základní shrnutí výsledků obsahuje každá kapitola zabývající se praktickou úpravou. Celkové zhodnocení použitých metod je popsáno v závěru této práce.



## 2 Regulované soustavy

Regulovanou soustavu lze obvykle popsat jako zjednodušenou, modelovou představu o řízeném objektu a procesech, které jsou významné z hlediska regulace. Pro vyjádření vztahů mezi proměnnými zastupující fyzikální veličiny dané regulované soustavy se využívá určitá forma vztahů. Z hlediska regulace mají tyto veličiny jednoznačně určenou úlohu [4].

Dynamické vlastnosti regulované soustavy je možné zapsat pomocí lineární diferenciální rovnice s konstantními koeficienty, pro kterou musí být zadané počáteční podmínky. Tato rovnice má pro  $n$ -tý řád setrvačnosti tvar

$$a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + a_2 y''(t) + a_1 y'(t) = u(t). \quad (2.1)$$

Z této rovnice lze pro nulové počáteční podmínky, kterých musí být tolik kolik řádů má zapsaná diferenciální rovnice, za použití Laplaceovy transformace určit přenos této regulované soustavy

$$G_s(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_n s^n}. \quad (2.2)$$

### 2.1 Nekmitavé proporcionální regulované soustavy

Vlastností proporcionálních regulovaných soustav je, že po vychýlení z rovnovážného stavu teoreticky dosáhnou nového rovnovážného stavu bez přispění regulátoru, protože koeficient  $a_0$  ve vztahu (2.2) je nenulový. Tento koeficient se nazývá koeficient autoregulace [1].

Náhradní přenos proporcionální soustavy pak má tvar

$$G(s) = \frac{k}{T_1 s + 1} e^{-T_u s}, \quad (2.3)$$

Jde o proporcionální regulovanou soustavu se setrvačností prvního řádu a dopravním zpožděním.

Přenosy proporcionálních soustav se vyskytují ve tvarech se setrvačností vyšších řádů

$$G(s) = \frac{k}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1) \dots (T_n s + 1)} e^{-T_u s}. \quad (2.4)$$

Konstanty  $T_1, T_2, \dots, T_n$  mají fyzikální rozměr času.

### 2.2 Nekmitavé integrační regulované soustavy

Integračních regulované soustavy nemají jako proporcionální soustavy schopnost autoregulace a to z důvodů opačných než je tomu u soustav proporcionálních a to že koeficient  $a_0$  ve vztahu (2.2) je nulový. Při vyvedení soustavy z rovnovážného stavu se po odeznění přechodového děje mění výstupní signál stejnou rychlostí [1].

Náhradní přenos integrační soustavy pak má tvar

$$G(s) = \frac{k}{s(T_1 s + 1)} e^{-T_D s}, \quad (2.5)$$

jde o proporcionální regulovanou soustavu se setrvačností prvního řádu a dopravním zpožděním  
Přenosy integračních soustav se vyskytují ve tvarech se setrvačností vyšších řádů

$$G(s) = \frac{k}{s(T_1s + 1)(T_2s + 1) \dots (T_ns + 1)} e^{-T_us} . \quad (2.6)$$

Konstanty  $T_1, T_2, \dots, T_n$  mají fyzikální rozměr času.

### 3 Úprava přenosů regulovaných soustav

Zjednodušovací postupy se získají aproximací malých časových konstant náhradní součtovou časovou konstantou a náhradním dopravním zpožděním. Tyto aproximace se využívají, jak pro proporcionální, tak pro integrační soustavy. Pro tyto postupy platí mezi originálem a jednoduššími tvary přibližné rovnosti [1].

Tabulka 3.1 pro proporcionální soustavy

Původní přenos	Náhradní přenos	Parametry náhradního přenosu
$\frac{k}{(T_1s + 1) \prod_{i=2}^n (T_i s + 1)}$	$\frac{k}{(T_1s + 1)(T_s s + 1)}$	$T_s = \sum_{i=2}^n T_i,$ $T_1 \gg T_i, i = 2, 3, \dots, n.$
$\frac{k}{(T_1s + 1) \prod_{i=2}^n (T_i s + 1)}$	$\frac{k}{(T_1s + 1)} e^{-T_d s}$	$T_d = \sum_{i=2}^n T_i,$ $T_1 \gg T_i, i = 2, 3, \dots, n.$
$\frac{k}{(T_1s + 1)(T_2s + 1) \prod_{i=3}^n (T_i s + 1)}$	$\frac{k}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} e^{-T_d s}$	$T_d = \sum_{i=3}^n T_i,$ $T_1 \geq T_2 \gg T_i,$ $i = 3, 4, \dots, n.$

Tabulka 3.2 pro integrační soustavy

Původní přenos	Náhradní přenos	Parametry náhradního přenosu
$\frac{k}{s \prod_{i=1}^n (T_i s + 1)}$	$\frac{k}{s(T_s s + 1)}$	$T_s = \sum_{i=1}^n T_i.$
$\frac{k}{s \prod_{i=1}^n (T_i s + 1)}$	$\frac{k}{s} e^{-T_d s}$	$T_d = \sum_{i=1}^n T_i$
$\frac{k}{s(T_1s + 1) \prod_{i=2}^n (T_i s + 1)}$	$\frac{k}{s(T_1s + 1)} e^{-T_d s}$	$T_d = \sum_{i=2}^n T_i$ $T_1 \gg T_i, i = 2, 3, \dots, n.$

Vyskytuje-li se v čitateli přenosu dvojčlen  $1 \mp T_i s$ , je výhodné použít náhradní součtové časové konstanty a náhradního zpoždění. Tento dvojčlen je možné nahradit výrazem  $e^{\mp T_c s}$ , předpokládáme-li náhradní dopravní zpoždění  $T_d \geq 0$ , protože platí

$$e^{\mp T_c s} = 1 \pm T_c s + \frac{1}{2} T_c^2 s^2 \pm \frac{1}{6} T_c^3 s^3. \quad (3.1)$$

Aproximace uvažuje pouze první dva členy [9].

Výhodné je také používat empirické „pravidlo poloviny“ [5]. Toto pravidlo vychází z předpokladu, že je přenos regulované soustavy ve tvaru s nestabilními nulami

$$G(s) = \frac{\prod_j(1 - \tau_{j0}s)}{\prod_i(T_{i0}s + 1)} e^{-T_{d0}s}, T_{i0} \geq T_{i+1,0} > 0, \tau_{j0} \geq 0. \quad (3.2)$$

Potom podle „pravidla poloviny“ dostaneme pro náhradní přenos

$$T_i = T_1 + \frac{T_2}{2}, T_{d1} = T_{d2} + \frac{T_2}{2} + \sum_{i \geq 3} T_{i0} + \sum_j \tau_{j0}, \quad (3.3)$$

$$T_i = T_1 + \frac{T_2}{2}, T_{d1} = T_{d2} + \frac{T_2}{2} + \sum_{i \geq 3} T_{i0} + \sum_j \tau_{j0} \quad (3.4)$$

nebo

$$T_{i1} = T_1, T_{i2} = T_2 + \frac{T_3}{2}, T_{d2} = T_{d0} + \frac{T_3}{2} + \sum_{i \geq 4} T_{i0} + \sum_j \tau_{j0}. \quad (3.5)$$

Přenosy získané rychlým převedením identifikační metodou podle Strejce umožňuje vytvořit také tabulka 3-1, kterou lze využít podle níže uvedeného schématu [6].

$$\frac{1}{(T_i s + 1)^i} e^{-T_{di}s} \quad (3.6)$$

$$\frac{1}{(T_1 s + 1)} e^{-T_{d1}s} \leftrightarrow \frac{1}{(T_2 s + 1)^2} e^{-T_{d2}s}$$

Tabulka 3.3 pro převod přenosů proporcionálních soustav s dopravním zpožděním

Způsob náhrady	$\frac{1}{(T_i s + 1)^i} e^{-T_{di}s}$	i	1	2	3	4	5	6
varianta 1	$\frac{1}{T_1 s + 1} e^{-T_{d1}s}$	$\frac{T_1}{T_i}$	1	1,568	1,980	2,320	2,615	2,881
		$\frac{T_{d1} - T_{di}}{T_i}$	0	0,552	1,232	1,969	2,741	3,537
varianta 2	$\frac{1}{(T_2 s + 1)^2} e^{-T_{d2}s}$	$\frac{T_2}{T_i}$	0,638	1	1,263	1,480	1,668	1,838
		$\frac{T_{d2} - T_{di}}{T_i}$	*	0	0,535	1,153	1,821	2,532

\*použitelné pro  $T_{d1} > 0,325T$



## 4 Syntéza regulačního obvodu

Syntézou regulačního obvodu nazýváme návrh struktury a parametrů regulačního obvodu s cílem splnění očekávání a nároků námi kladených na průběh regulace.

Na základě podmínek a okolností použití regulátoru musíme zhodnotit požadavky na regulátor. Tyto se mohou například vztahovat k prostředí použití, nároky na hmotnost a velikost nebo údržbu či provoz.

Metody návrhu regulátoru využívají často již v praxi ověřená a vyzkoušená řešení. Pro návrhy regulátorů je již zpracováno široké spektrum metod, ale i u těchto metod je důležité převést nároky na regulátor tak, aby vhodně odpovídal požadované aplikaci [1].

Aby bylo možné porovnat jednotlivé postupy zjednodušení přenosu soustav, bylo nutné zvolit jednu metodu, která umožňuje návrh regulátoru pro regulované soustavy bez dopravního zpoždění i s dopravním zpožděním.

### 4.1 Návrh struktury regulátoru pro zadanou regulovanou soustavu

Volbu struktury regulátoru provádíme na základě vlastností regulované soustavy. Návrh struktury regulátoru spočívá v užití řešení pomocí členů s přenosem P, I a D. Dovoluje-li nám to použitý regulační systém, volíme jejich kombinace. Derivační funkce D nemá samostatně schopnost regulace [1].

Pro seřízení regulátorů byla v této práci zvolena metoda požadovaného modelu.

### 4.2 Seřízení regulátoru metodou požadovaného modelu

Metoda požadovaného modelu se používá k rychlému a snadnému seřízení běžných spojitéch regulátorů u analogových soustav s dopravním zpožděním.

Za pomocí této metody k nastavení běžných regulátorů lze dosáhnout nulové regulační odchylky a relativního překmitu regulované veličiny v požadovaném rozmezí 0 až 50% při skokové změně požadované veličiny [1].

Tabulka 4.1 přenosy základních analogových regulátorů

Typ	Přenos analogového regulátoru
P	$r_0$
I	$\frac{1}{T_I s}$
PI	$r_0 \left(1 + \frac{1}{T_I s}\right)$
PD	$r_0(1 + T_D s)$
PID	$r_0 \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s\right)$

Přenos regulátoru  $G_R(s)$  udávající požadovaný přenos řízení  $G_w(s)$  pak vyjadřuje následující vztah

$$G_R(s) = \frac{1}{G_S(s)} \frac{G_w(s)}{1 - G_w(s)}. \quad (4.1)$$

Předpoklad pro metodu požadovaného modelu je ten, že požadovaný přenos řízení má pro spojitě regulační obvody tvar

$$G_w = \frac{a}{s + ae^{-T_d s}} e^{-T_d s}. \quad (4.2)$$

Zesílení otevřeného regulačního obvodu lze pro praktické použití určit s dostatečnou přesností z následného vztahu

$$a = \frac{1}{\beta T_d}, \quad (4.3)$$

kde koeficient  $\beta$  je závislý na relativním překmitu  $\kappa$ .

Tab. 4.2 závislost koeficientu  $\beta$  na relativním překmitu

$\kappa$	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$\beta$	2,718	1,944	1,720	1,561	1,437	1,337	1,248	1,172	1,104	1,045	0,992

Ze vztahů (4.1), (4.2) a (4.3) potom získáme vztah pro přenos doporučeného regulátoru

$$G_R(s) = \frac{a}{s G_S(s)} e^{-T_d s}. \quad (4.4)$$

Metodu požadovaného modelu lze také využít při nastavení regulátorů pro regulované soustavy s nulovým dopravním zpožděním. Pro tyto soustavy má požadovaný přenos řízení následující tvar

$$G_w(s) = \frac{1}{T_w s + 1}, \quad (4.5)$$

ve kterém je  $T_w$  požadovaná časová konstanta regulačního obvodu. Tuto konstantu je nutné zvolit vzhledem k omezení akční veličiny a maximální nastavitelnou hodnotou zesílení regulátoru [6].

Tabulka 4.3 doporučené typy analogových regulátorů a hodnoty stavitelných parametrů

REGULOVANÁ SOUSTAVA		REGULÁTOR				
		TYP	$r_0$		$T_I$	$T_D$
			$T_d = 0$	$T_d > 0$		
1	$\frac{k}{s} e^{-T_d s}$	P	$\frac{1}{kT_w}$	$\frac{a}{k}$	-	-
2	$\frac{k}{T_1 s + 1} e^{-T_d s}$	PI	$\frac{T_I}{kT_w}$	$\frac{aT_I}{k}$	$T_1$	-
3	$\frac{k}{s(T_1 s + 1)} e^{-T_d s}$	PD	$\frac{1}{kT_w}$	$\frac{a}{k}$	-	$T_1$
4	$\frac{k}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-T_d s}$ $T_1 \geq T_2$	PID	$\frac{T_I}{kT_w}$	$\frac{aT_I}{k}$	$T_1 + T_2$	$\frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2}$

## 5 Praktická část

Praktická část obsahuje výpočty a výsledky zjednodušení přenosů zvolených proporcionalní a integračních soustav a následné syntézy regulátorů pro tyto zjednodušené soustavy. Výsledky jsou zpracovány do tabulek a grafů. Pro vybranou proporcionalní a integrační soustavu byl uveden podrobný postup zjednodušení soustavy různými metodami a návrhy regulátorů metodou požadovaného modelu se zvoleným překmitem 5%.

Jelikož návrh regulátoru metodou požadovaného modelu umožňuje volbu velikosti překmitu a regulaci s nulovou odchylkou, bylo pro porovnání průběhů regulací měřeno dosažení překmitu  $\pm 2\%$ .

### 5.1 Proporcionalní soustava 4. řádu s neminimální fází a dopravním zpožděním

$$G_s(s) = \frac{3(1 - 2s)}{(10s + 1)(2s + 1)(s + 1)(0,5s + 1)} e^{-4s}$$

Tuto soustavu lze pomocí tabulky 3.1 zjednodušit dvěma způsoby a na tyto ještě aplikovat „pravidlo poloviny“.

#### 5.1.1 Zjednodušení na integrační soustavu 1. řádu s dopravním zpožděním

$$G_s(s) = \frac{k}{(T_s s + 1)} e^{-T_d s}$$

$$T_s = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 = 13,5$$

$$T_d = T_c + T_d = 2 + 4 = 6$$

$$G_s(s) = \frac{3}{(13,5s + 1)} e^{-6s}$$

Pro tuto soustavu byl metodou požadovaného modelu zvolen a navržen PI regulátor. Byl zvolen 5% regulační překmit  $\kappa = 0,05$ . Pro tento překmit byl z tabulky 4.2 určen koeficient  $\beta$ .

$$a = \frac{1}{\beta T_d} = \frac{1}{1,944 \cdot 6} = 0,0857$$

$$T_i = T_1 = 13,5$$

$$r_0 = \frac{a \cdot T_i}{k} = \frac{0,0857 \cdot 13,5}{3} = 0,386$$

$$G_R(s) = r_0 \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)$$

$$G_R(s) = 0,386 \left(1 + \frac{1}{13,5s}\right)$$

### 5.1.2 Zjednodušení na proporcionální soustavu 2. řádu s dopravním zpožděním

$$G_s(s) = \frac{k}{(T_1s + 1)(T_s s + 1)} e^{-T_d s}$$

$$T_s = T_2 + T_3 + T_4 = 2 + 1 + 0,5 = 3,5$$

$$T_d = T_c + T_d = 2 + 4 = 6$$

$$G_s(s) = \frac{3}{(10s + 1)(3,5s + 1)} e^{-6s}$$

Pro tuto soustavu byl pomocí metody požadovaného modelu zvolen a navržen PID regulátor.

Byl zvolen 5% regulační překmit  $\kappa = 0,05$ . Pro tento překmit byl z *tabulky 4.2* určen koeficient  $\beta$ .

$$a = \frac{1}{\beta T_d} = \frac{1}{1,944 \cdot 6} = 0,0857$$

$$T_i = T_1 + T_2 = 10 + 3,5 = 13,5$$

$$T_D = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 + T_2} = \frac{10 \cdot 3,5}{10 + 3,5} = 2,59$$

$$r_0 = \frac{a \cdot T_i}{k} = \frac{0,0857 \cdot 13,5}{3} = 0,386$$

$$G_R(s) = r_0 \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s \right)$$

$$G_R(s) = 0,386 \left( 1 + \frac{1}{13,5s} + 2,59s \right)$$

### 5.1.3 Zjednodušení na proporcionální soustavu 1. řádu s dopravním zpožděním s využitím pravidla poloviny

$$G_s(s) = \frac{k}{(T_s s + 1)} e^{-T_d s}$$

$$T_s = T_1 + \frac{T_2}{2} = 10 + \frac{2}{2} = 11$$

$$T_d = T_c + T_d + \frac{T_2}{2} + T_3 + T_4 = 2 + 4 + \frac{2}{2} + 1 + 0,5 = 8,5$$

$$G_s(s) = \frac{3}{(11s + 1)} e^{-8,5s}$$

Pro tuto soustavu byl metodou požadovaného modelu zvolen a navržen PI regulátor. Byl zvolen 5% regulační překmit  $\kappa = 0,05$ . Pro tento překmit byl z *tabulky 4.2* určen koeficient  $\beta$ .

$$a = \frac{1}{\beta T_d} = \frac{1}{1,944 \cdot 8,5} = 0,0605$$

$$T_i = T_1 = 11$$

$$r_0 = \frac{a \cdot T_i}{k} = \frac{0,0605 \cdot 11}{3} = 0,221$$

$$G_R(s) = r_0 \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

$$G_R(s) = 0,221 \left( 1 + \frac{1}{11s} \right)$$

#### 5.1.4 Zjednodušení na proporcionální soustavu 2. řádu s dopravním zpožděním s využitím pravidla poloviny

$$G_s(s) = \frac{k}{(T_1 s + 1)(T_s s + 1)} e^{-T_d s}$$

$$T_s = T_2 + \frac{T_3}{2} = 2 + 0,5 = 2,5$$

$$T_d = T_c + T_d + \frac{T_3}{2} + T_4 = 2 + 4 + 0,5 + 0,5 = 7$$

$$G_s(s) = \frac{3}{(10s + 1)(2,5s + 1)} e^{-5s}$$

Pro tuto soustavu byl pomocí metody požadovaného modelu zvolen a navržen PID regulátor.

Byl zvolen 5% regulační překmit  $\kappa = 0,05$ . Pro tento překmit byl z *tabulky 4.2* určen koeficient  $\beta$ .

$$a = \frac{1}{\beta T_d} = \frac{1}{1,944 \cdot 7} = 0,0735$$

$$T_i = T_1 + T_2 = 10 + 2,5 = 12,5$$

$$T_D = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 + T_2} = \frac{10 \cdot 2,5}{10 + 2,5} = 2$$

$$r_0 = \frac{a \cdot T_i}{k} = \frac{0,0735 \cdot 12,5}{3} = 0,306$$

$$G_R(s) = r_0 \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s \right)$$

$$G_R(s) = 0,306 \left( 1 + \frac{1}{12,5s} + 2s \right)$$

### 5.1.5 Porovnání zjednodušení soustav a návrhů jejich regulace

Tabulka 5.1 porovnání zjednodušených přechodových charakteristik a parametrů pro ně navržených regulátorů

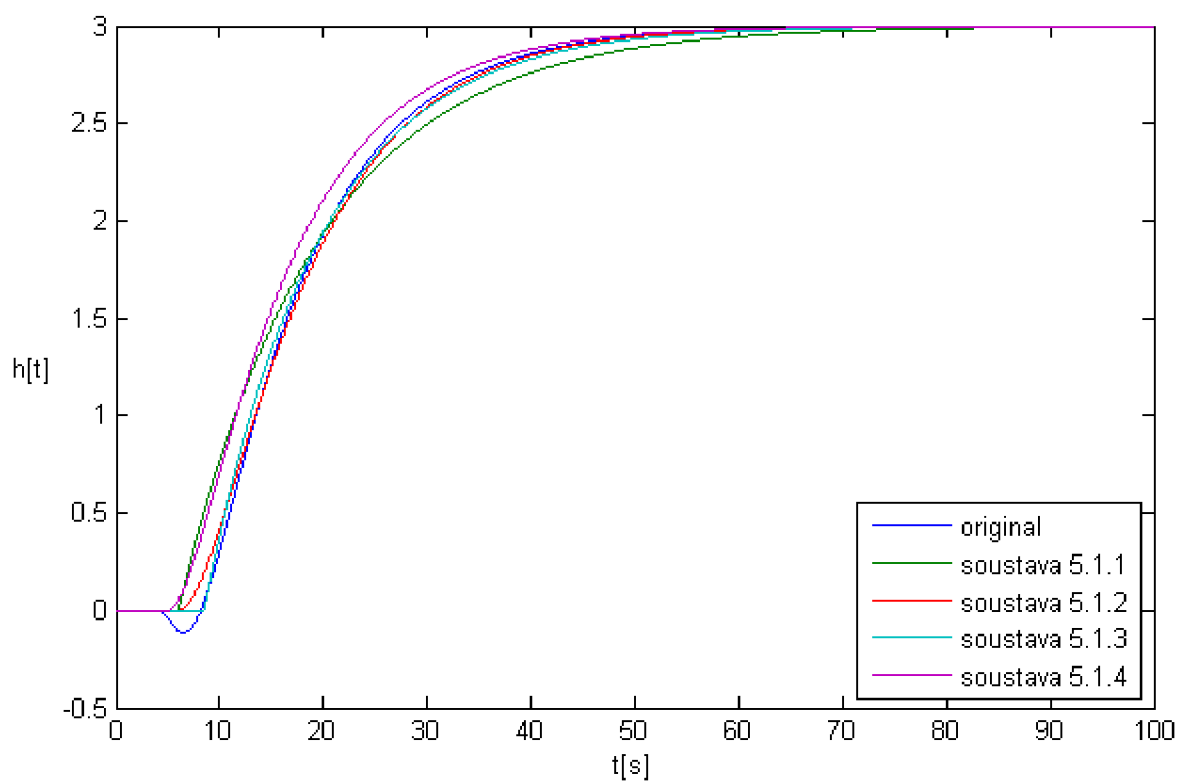
Přenos původní zvolené regulované soustavy			
$G_s(s) = \frac{3(1 - 2s)}{(10s + 1)(2s + 1)(s + 1)(0,5s + 1)} e^{-4s}$			
Náhradní soustava			
$G_s(s) = \frac{3}{(13,5s + 1)} e^{-6s} \quad (5.1.1)$			
$G_s(s) = \frac{3}{(10s + 1)(3,5s + 1)} e^{-6s} \quad (5.1.2)$			
$G_s(s) = \frac{3}{(11s + 1)} e^{-8,5s} \quad (5.1.3)$			
$G_s(s) = \frac{3}{(10s + 1)(2,5s + 1)} e^{-5s} \quad (5.1.4)$			
Náhradní soustava	Přenos navrženého regulátoru	Maximální překmit [%]	Doba regulace [s]
(5.1.1)	$G_R(s) = 0,386 \left( 1 + \frac{1}{13,5s} \right)$	5,02	30,33
(5.1.2)	$G_R(s) = 0,386 \left( 1 + \frac{1}{13,5s} + 2,59s \right)$	4,94	29,39
(5.1.3)	$G_R(s) = 0,221 \left( 1 + \frac{1}{11s} \right)$	4,86	43,00
(5.1.4)	$G_R(s) = 0,306 \left( 1 + \frac{1}{12,5s} + 2s \right)$	0,0	27,80

V tabulce 5.1 jsou uvedeny čtyři různé úpravy přenosu původní soustavy, pro které byly metodou požadovaného modelu navrženy regulátory. Pouze v jednom případě, kdy byl překmit nulový byl z jistou odchylkou dodržen požadovaný překmit 5%.

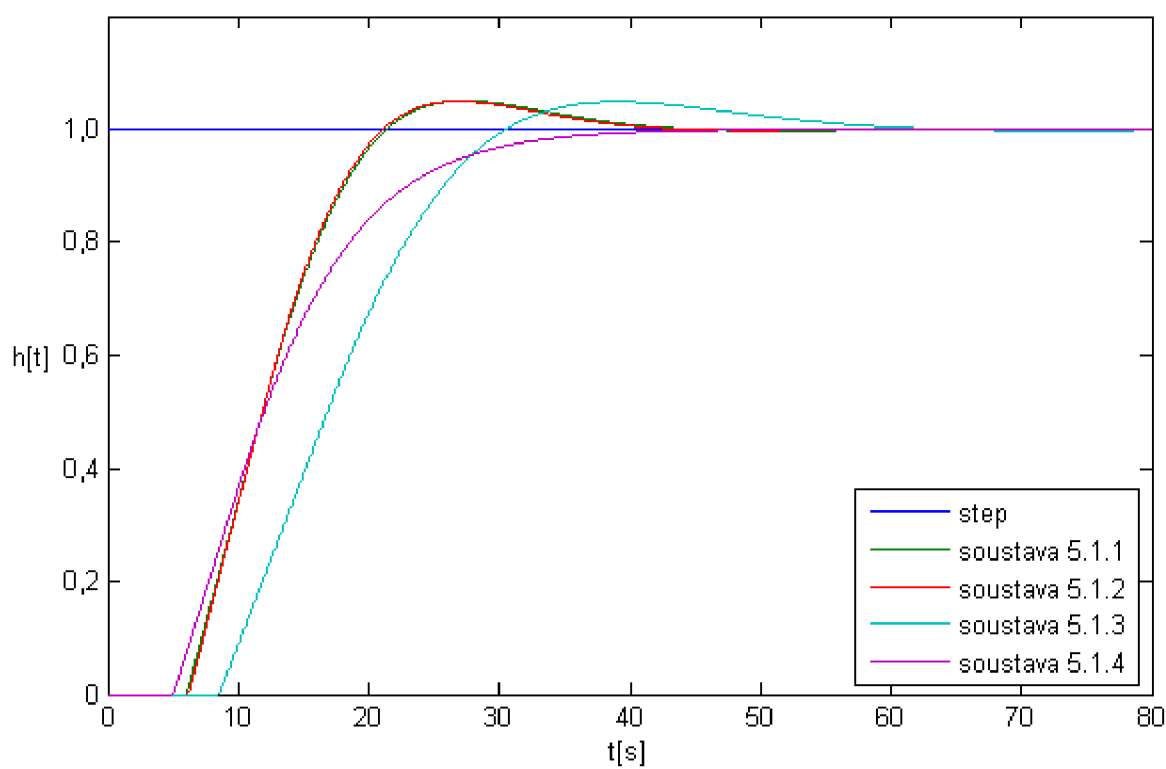
V grafu 5.1 lze porovnat průběhy přechodových charakteristik původní soustavy a jejich jednotlivých úprav, graf 5.2 jsou vykresleny průběhy regulačních soustav.

Nejblíže se průběhu původní soustavy blíží upravené soustavy 5.1.2 a 5.1.3. Nejrychlejší odezvu na jednotkový skok měl regulátor navržený pro soustavu 5.1.4.

Graf 5.1 zobrazení přechodových charakteristik úprav soustavy 5.1



Graf 5.2 zobrazení průběhů regulace úprav soustavy 5.1





## 5.2 Proporcionální soustava 4. řádu

Tuto soustavu lze pomocí tabulky 3.2 zjednodušit dvěma způsoby a na tyto ještě aplikovat „pravidlo poloviny“.

Tabulka 5.2 porovnání zjednodušených přechodových charakteristik a parametrů pro ně navržených regulátorů

Přenos původní zvolené regulované soustavy			
$G_s(s) = \frac{3}{(10s + 1)(2s + 1)(s + 1)(0,5s + 1)}$			
Náhradní soustava			
$G_s(s) = \frac{3}{(10s + 1)} e^{-3,5s} \quad (5.2.1)$			
$G_s(s) = \frac{3}{(10s + 1)(3,5s + 1)} \quad (5.2.2)$			
$G_s(s) = \frac{3}{(11s + 1)} e^{-2,5s} \quad (5.2.3)$			
$G_s(s) = \frac{3}{(10s + 1)(2,5s + 1)} e^{-s} \quad (5.2.4)$			
Náhradní soustava	Přenos navrženého regulátoru	Relativní překmit [%]	Doba regulace [s]
(5.2.1)	$G_R(s) = 0,49 \left(1 + \frac{1}{10s}\right)$	5,01	17,70
(5.2.2)	$G_R(s) = 1,157 \left(1 + \frac{1}{13,5s} + 2,6s\right)$	0,00	15,28
(5.2.3)	$G_R(s) = 0,754 \left(1 + \frac{1}{11s}\right)$	4,98	12,64
(5.2.4)	$G_R(s) = 2,14 \left(1 + \frac{1}{12,5s} + 2s\right)$	5,26	6,04

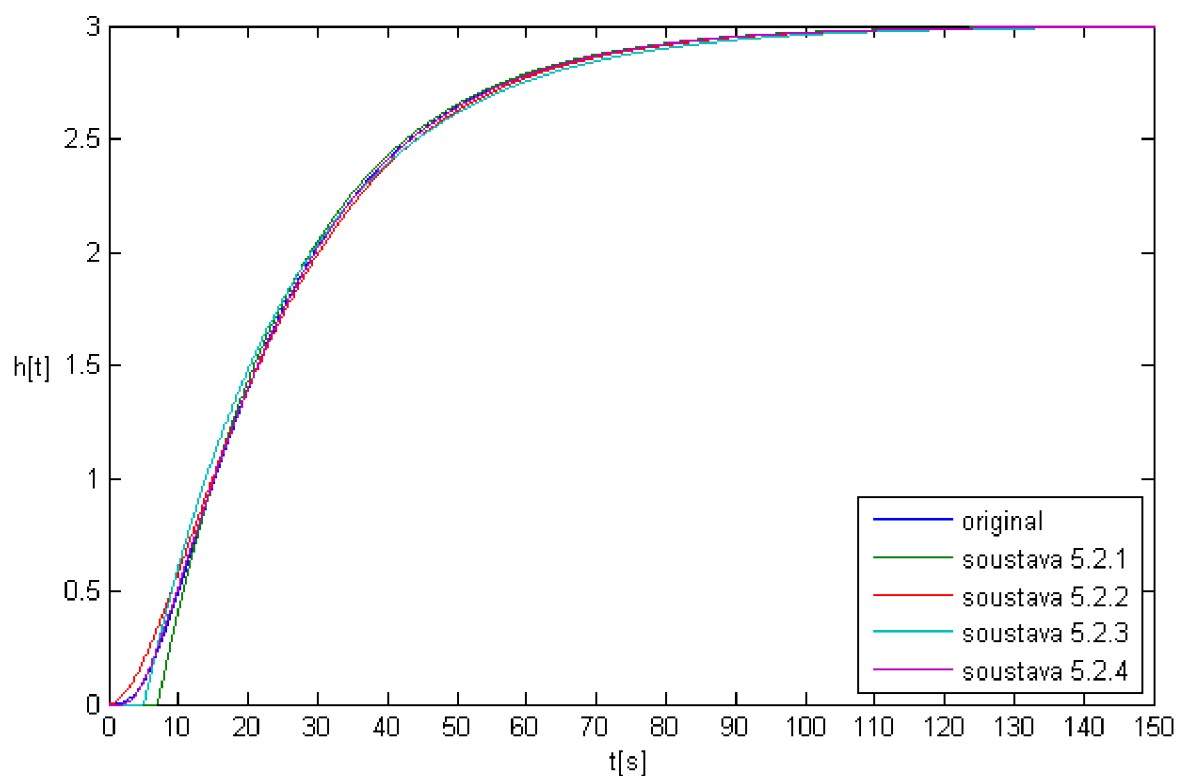
V tabulce 5.2 jsou uvedeny čtyři různé úpravy přenosu původní soustavy, pro které byly metodou požadovaného modelu navrženy regulátory. Až na jeden případ, kdy je překmit nulový, byl s malou odchylkou dodržen požadovaný překmit 5%.

V grafu 5.3 lze porovnat průběhy přechodových charakteristik původní soustavy a jejich jednotlivých úprav, v grafu 5.4 jsou vykresleny průběhy regulačních soustav.

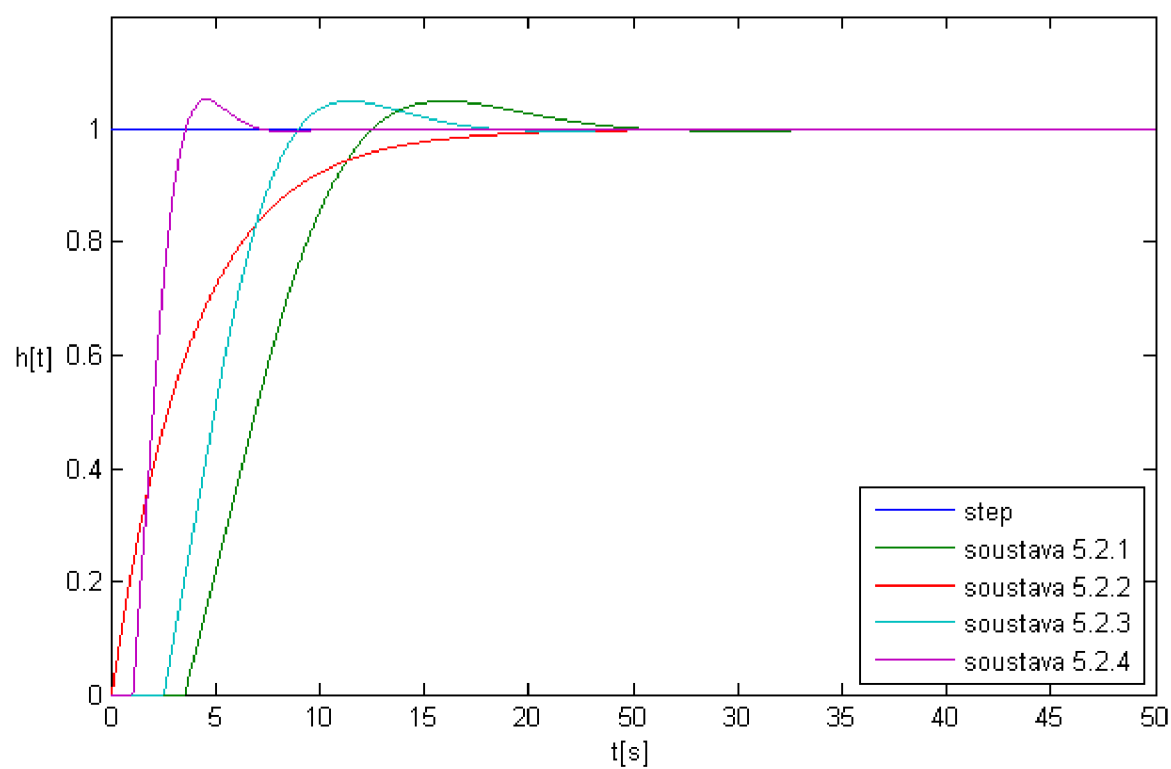
V tomto případě jsou všechny přenosové charakteristiky zjednodušených soustav téměř shodné s přenosem soustavy původní.

Největší podobnost má přenos soustavy 5.2.4, pro níž navržený regulátor poskytuje nejrychlejší odezvu na jednotkový skok za cenu mírného překročení požadovaného překmitu.

Graf 5.3 zobrazení přechodových charakteristik úprav soustavy 5.2



Graf 5.4 zobrazení průběhů regulace úprav soustavy 5.2



### 5.3 Proporcionální soustava 4. řádu s neminimální fází

Tuto soustavu lze pomocí tabulky 3.2 zjednodušit dvěma způsoby a na tyto ještě aplikovat „pravidlo poloviny“.

Tabulka 5.3 porovnání zjednodušených přechodových charakteristik a parametrů pro ně navržených regulátorů

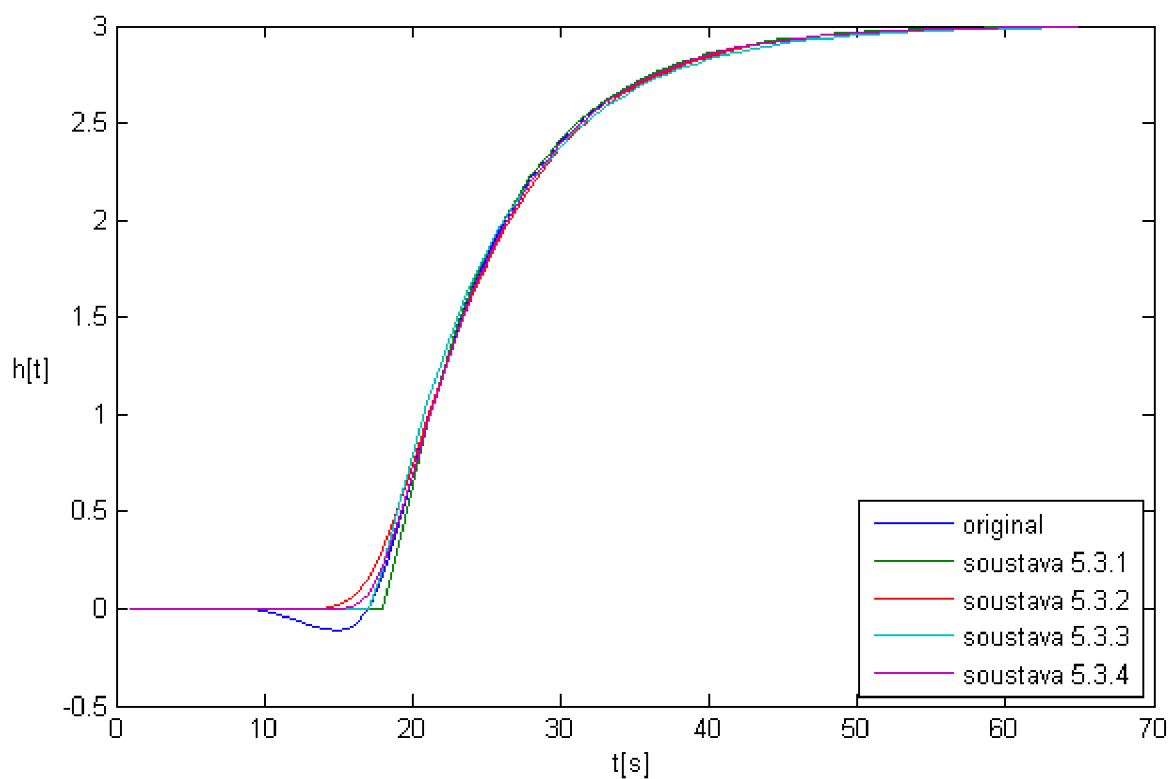
Přenos původní zvolené regulované soustavy			
$G_s(s) = \frac{3(1 - 2s)}{(10s + 1)(2s + 1)(s + 1)(0,5s + 1)}$			
Náhradní soustava			
$G_s(s) = \frac{3}{(10s + 1)} e^{-5,5s} \quad (5.3.1)$			
$G_s(s) = \frac{3}{(10s + 1)(3,5s + 1)} e^{-2s} \quad (5.3.2)$			
$G_s(s) = \frac{3}{(11s + 1)} e^{-4,5s} \quad (5.3.3)$			
$G_s(s) = \frac{3}{(10s + 1)(2,5s + 1)} e^{-3s} \quad (5.3.4)$			
Náhradní soustava	Přenos navrženého regulátoru	Relativní překmit [%]	Doba regulace [s]
(5.3.1)	$G_R(s) = 0,312\left(1 + \frac{1}{10s}\right)$	5,03	27,81
(5.3.2)	$G_R(s) = 1,16\left(1 + \frac{1}{13,5s} + 2,59s\right)$	5,13	10,10
(5.3.3)	$G_R(s) = 0,419\left(1 + \frac{1}{11s}\right)$	4,99	22,75
(5.3.4)	$G_R(s) = 0,714\left(1 + \frac{1}{12,5s} + 2s\right)$	5,0	15,11

V tabulce 5.3 jsou uvedeny čtyři různé úpravy přenosu původní soustavy, pro které byly metodou požadovaného modelu navrženy regulátory. V tomto případě byl až na malou odchylku u druhé soustavy dodržen překmit 5%.

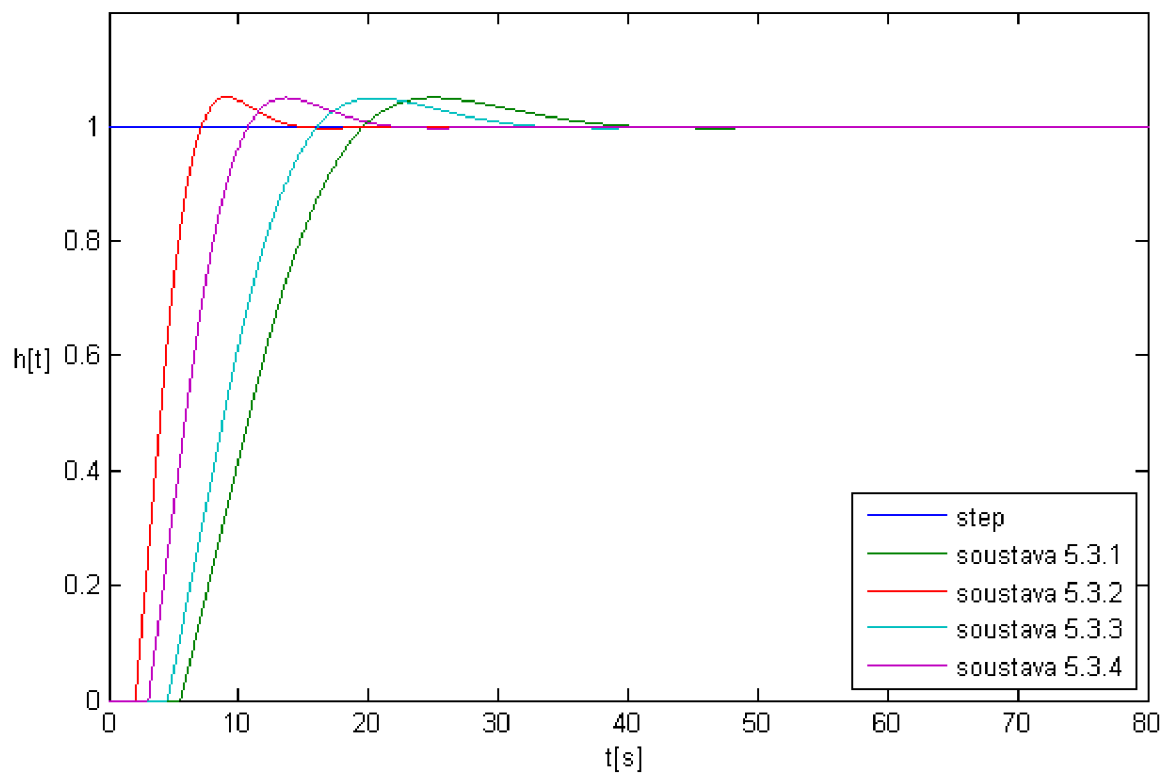
V grafu 5.5 lze porovnat průběhy přechodových charakteristik původní soustavy a jejich jednotlivých úprav, graf 5.6 jsou vykresleny průběhy regulačních soustav.

V tomto případě jsou všechny přenosové charakteristiky zjednodušených soustav téměř shodné s přenosem soustavy původní. Nejrychlejší odezvu na jednotkový skok měl regulátor navržený pro soustavu 5.3.2 opět při mírném překročení požadovaného překmitu.

Graf 5.5 zobrazení přechodových charakteristik úprav soustavy 5.3



Graf 5.6 zobrazení průběhů regulace úprav soustavy 5.3



#### 5.4 Proporcionální soustava 4. řádu s dopravním zpožděním

Tuto soustavu lze pomocí tabulky 3.2 zjednodušit dvěma způsoby a na tyto ještě aplikovat „pravidlo poloviny“.

Tabulka 5.4 porovnání zjednodušených přechodových charakteristik a parametrů pro ně navržených regulátorů

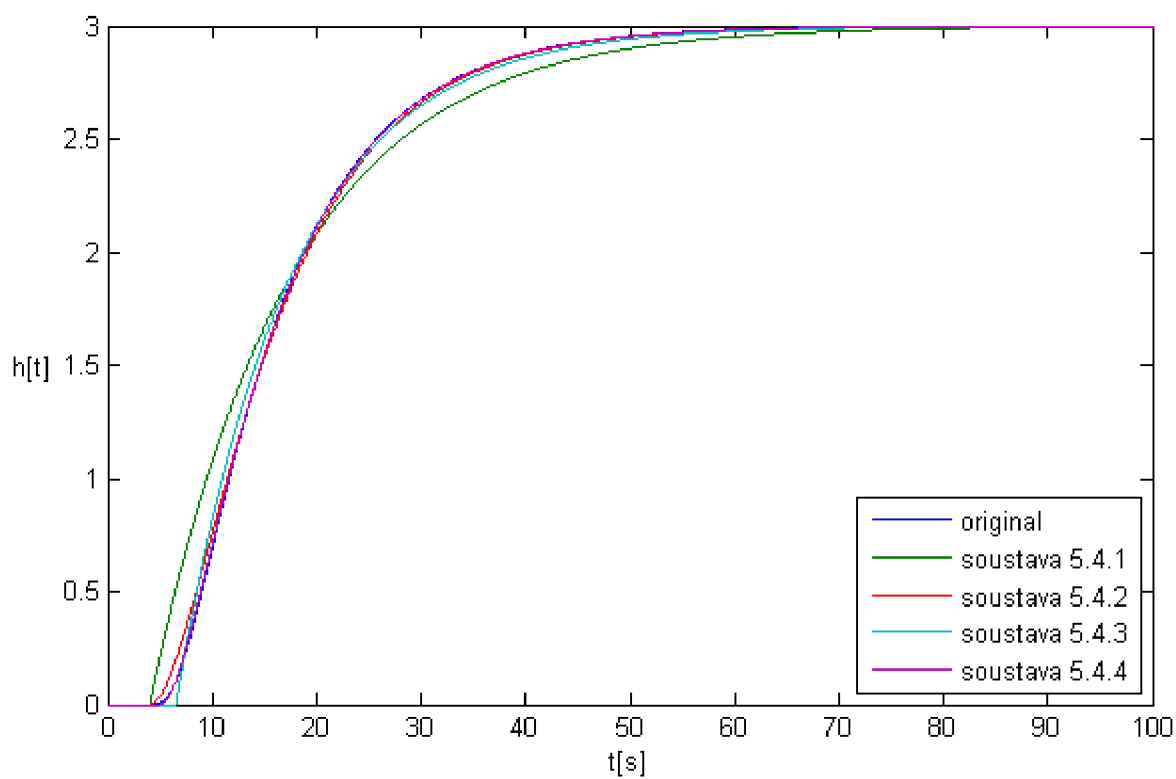
Přenos původní zvolené regulované soustavy			
$G_s(s) = \frac{3}{(10s + 1)(2s + 1)(s + 1)(0,5s + 1)} e^{-4s}$			
Náhradní soustava			
$G_s(s) = \frac{3}{(13,5s + 1)} e^{-4s} \tag{5.4.1}$			
$G_s(s) = \frac{3}{(10s + 1)(3,5s + 1)} e^{-4s} \tag{5.4.2}$			
$G_s(s) = \frac{3}{(11s + 1)} e^{-6,5s} \tag{5.4.3}$			
$G_s(s) = \frac{3}{(10s + 1)(2,5s + 1)} e^{-5s} \tag{5.4.4}$			
Náhradní soustava	Přenos navrženého regulátoru	Relativní překmit [%]	Doba regulace [s]
(5.4.1)	$G_R(s) = 0,579 \left(1 + \frac{1}{13,5s}\right)$	5,02	20,22
(5.4.2)	$G_R(s) = 0,59 \left(1 + \frac{1}{13,5s} + 2,59s\right)$	6,15	19,05
(5.4.3)	$G_R(s) = 0,29 \left(1 + \frac{1}{11s}\right)$	4,98	32,87
(5.4.4)	$G_R(s) = 0,429 \left(1 + \frac{1}{12,5s} + 2s\right)$	5,02	25,24

V tabulce 5.4 jsou uvedeny čtyři různé úpravy přenosu původní soustavy, pro které byly metodou požadovaného modelu navrženy regulátory. V tomto případě nebyl u druhé soustavy dodržen překmit 5%.

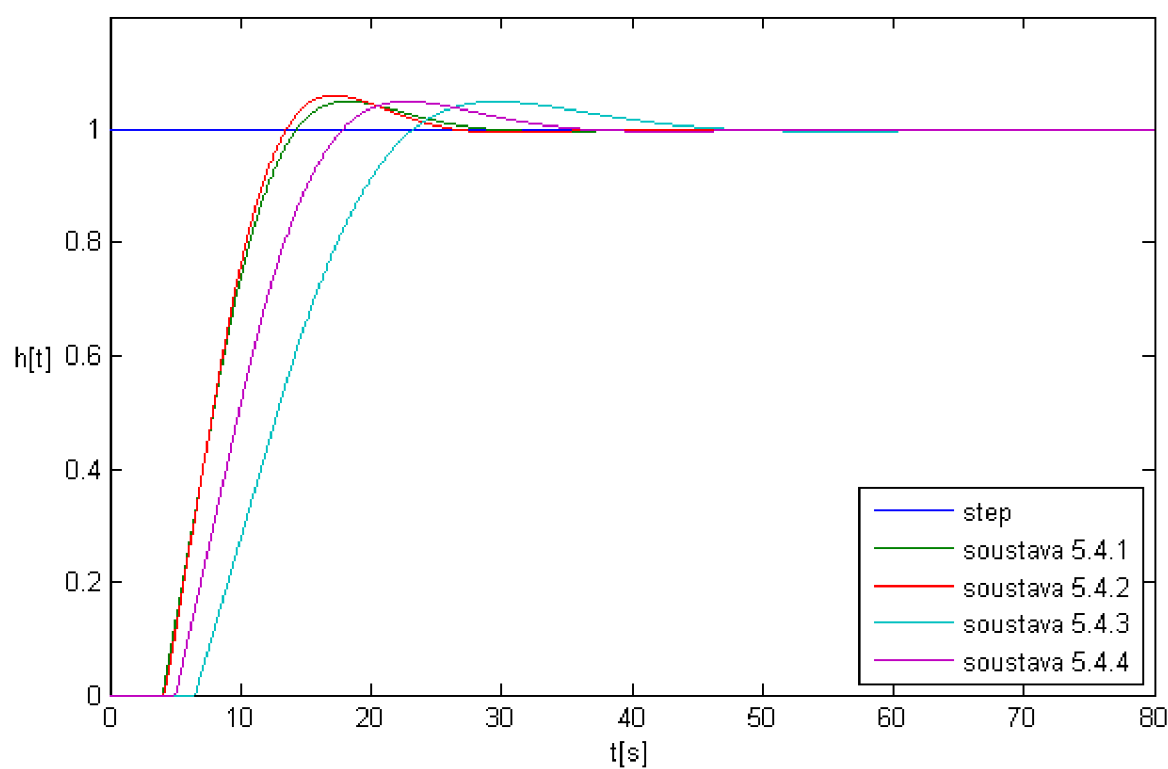
V grafu 5.7 lze porovnat průběhy přechodových charakteristik původní soustavy a jejich jednotlivých úprav, graf 5.8 jsou vykresleny průběhy regulátorů.

V tomto případě se od přenosu původní soustavy nejvíce odlišuje přenos soustavy 5.4.1, přenosy zbývajících náhrad soustav se přibližují původní. Nejrychlejší odezvu na jednotkový skok měl regulátor navržený pro soustavu 5.4.2 při více než procentním překročení požadovaného překmitu.

Graf 5.7 zobrazení přechodových charakteristik úprav soustavy 5.4



Graf 5.8 zobrazení průběhů regulace úprav soustavy 5.4



### 5.5 Integrovní soustava 4. řádu s neminimální fází a dopravním zpožděním

$$G_s(s) = \frac{3(1 - 2s)}{s(10s + 1)(2s + 1)(s + 1)(0,5s + 1)} e^{-4s}$$

Tuto soustavu lze pomocí tabulky 3.2 zjednodušit třemi způsoby. Jako čtvrtý způsob bylo využito „pravidlo poloviny“.

#### 5.5.1 Zjednodušení na integrační soustavu 1. řádu s dopravním zpožděním

$$G_s(s) = \frac{k}{s(T_s s + 1)} e^{-T_d s}$$

$$T_s = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 = 13,5$$

$$T_d = T_d + T_c = 4 + 2 = 6$$

$$G_s(s) = \frac{3}{s(13,5s + 1)} e^{-6s}$$

Pro tuto soustavu byl metodou požadovaného modelu zvolen a navržen PD regulátor.

Byl zvolen 5% regulační překmit  $\kappa = 0,05$ . Pro tento překmit byl z tabulky 4.2 určen koeficient  $\beta$ .

$$a = \frac{1}{\beta T_d} = \frac{1}{1,944 \cdot 6} = 0,0857$$

$$T_D = T_1 = 13,5$$

$$r_0 = \frac{a}{k} = \frac{0,0857}{3} = 0,0286$$

$$G_R(s) = r_0(1 + T_D \cdot s)$$

$$G_R(s) = 0,0286(1 + 13,5s)$$

#### 5.5.2 Zjednodušení na integrační soustavu 1. řádu s dopravním zpožděním

$$G_s(s) = \frac{k}{s(T_s s + 1)} e^{-T_d s}$$

$$T_s = T_1 = 10$$

$$T_d = T_d + T_c + T_2 + T_3 + T_4 = 4 + 2 + 2 + 1 + 0,5 = 9,5$$

$$G_s(s) = \frac{3}{s(10s + 1)} e^{-9,5s}$$

Pro tuto soustavu byl metodou požadovaného modelu zvolen a navržen PD regulátor.

Byl zvolen 5% regulační překmit  $\kappa = 0,05$ . Pro tento překmit byl z *tabulky 4.2* určen koeficient  $\beta$ .

$$a = \frac{1}{\beta T_d} = \frac{1}{1,944 \cdot 9,5} = 0,0541$$

$$T_D = T_1 = 10$$

$$r_0 = \frac{a}{k} = \frac{0,0541}{3} = 0,018$$

$$G_R(s) = r_0(1 + T_D \cdot s)$$

$$G_R(s) = 0,018(1 + 10s)$$

### 5.5.3 Zjednodušení na integrační soustavu s dopravním zpožděním

$$G_s(s) = \frac{k}{s} e^{-T_d s}$$

$$T_d = T_d + T_c + T_1 + T_2 + T_3 + T_4 = 4 + 2 + 10 + 2 + 1 + 0,5 = 19,5$$

$$G_s(s) = \frac{3}{s} e^{-19,5s}$$

Pro tuto soustavu byl metodou požadovaného modelu zvolen a navržen P regulátor.

Byl zvolen 5% regulační překmit  $\kappa = 0,05$ . Pro tento překmit byl z *tabulky 4.2* určen koeficient  $\beta$ .

$$a = \frac{1}{\beta T_d} = \frac{1}{1,944 \cdot 19,5} = 0,0264$$

$$r_0 = \frac{a}{k} = \frac{0,0264}{3} = 0,0088$$

$$G_R(s) = r_0$$

$$G_R(s) = 0,0088$$

### 5.5.4 Zjednodušení na integrační soustavu 1. řádu s dopravním zpožděním s využitím pravidla poloviny

$$G_s(s) = \frac{k}{s(T_s s + 1)} e^{-T_d s}$$

$$T_s = T_1 + \frac{T_2}{2} = 10 + \frac{2}{2} = 11$$



$$T_d = T_d + T_c + \frac{T_2}{2} + T_3 + T_4 = 4 + 2 + \frac{2}{2} + 1 + 0,5 = 8,5$$

$$G_s(s) = \frac{3}{s(11s + 1)} e^{-8,5s}$$

Pro tuto soustavu byl metodou požadovaného modelu zvolen a navržen PD regulátor.

Byl zvolen 5% regulační překmit  $\kappa = 0,05$ . Pro tento překmit byl z *tabulky 4.2* určen koeficient  $\beta$ .

$$a = \frac{1}{\beta T_d} = \frac{1}{1,944 \cdot 8,5} = 0,0605$$

$$T_D = T_1 = 11$$

$$r_0 = \frac{a}{k} = \frac{0,0605}{3} = 0,02$$

$$G_R(s) = r_0(1 + T_D \cdot s)$$

$$G_R(s) = 0,02(1 + 11s)$$

### 5.5.5 Porovnání zjednodušení soustav a návrhů jejich regulace

Tabulka 5.5 porovnání zjednodušených přechodových charakteristik a parametrů pro ně navržených regulátorů

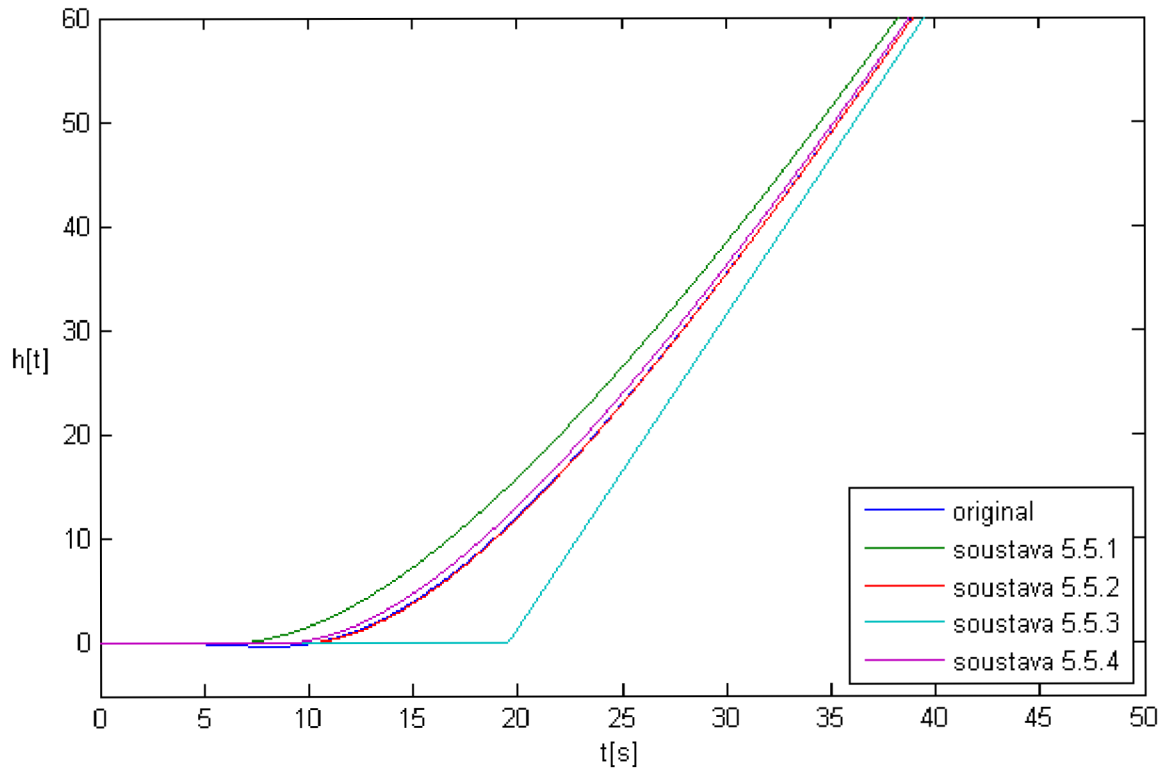
Přenos původní zvolené regulované soustavy			
$G_s(s) = \frac{3(1 - 2s)}{s(10s + 1)(2s + 1)(s + 1)(0,5s + 1)} e^{-4s}$			
Náhradní soustava			
$G_s(s) = \frac{3}{s(13,5s + 1)} e^{-6s} \quad (5.5.1)$			
$G_s(s) = \frac{3}{s(10s + 1)} e^{-9,5s} \quad (5.5.2)$			
$G_s(s) = \frac{3}{s} e^{-19,5s} \quad (5.5.3)$			
$G_s(s) = \frac{3}{s(11s + 1)} e^{-8,5s} \quad (5.5.4)$			
Náhradní soustava	Přenos navrženého regulátoru	Relativní překmit [%]	Doba regulace [s]
(5.5.1)	$G_R(s) = 0,0286(1 + 13,5s)$	6,15	30,26
(5.5.2)	$G_R(s) = 0,018(1 + 10s)$	5,30	47,34
(5.5.3)	$G_R(s) = 0,088$	5,42	31,4
(5.5.4)	$G_R(s) = 0,02(1 + 11s)$	5,03	109,57

V tabulce 5.5 jsou uvedeny čtyři různé úpravy přenosu původní soustavy, pro které byly metodou požadovaného modelu navrženy regulátory. V tomto případě byl požadovaný překmit 5% dodržen pouze u soustavy 5.5.4.

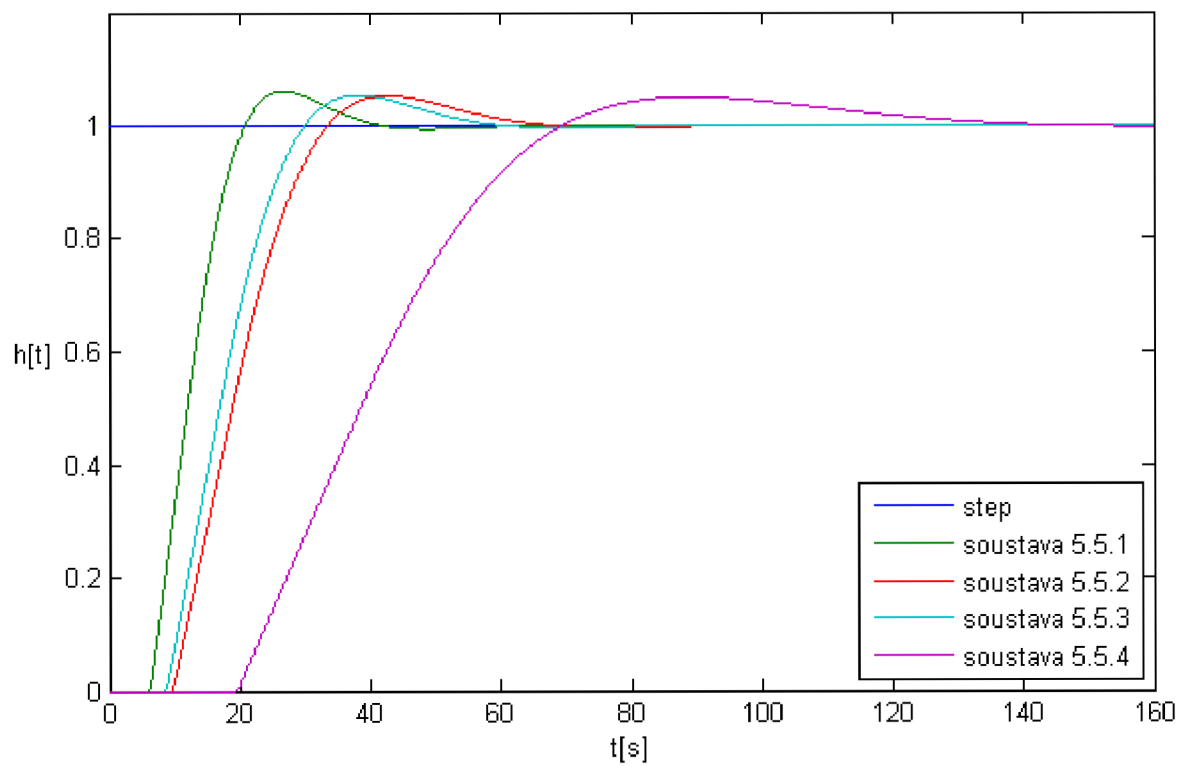
V grafu 5.9 lze porovnat průběhy přechodových charakteristik původní soustavy a jejich jednotlivých úprav, graf 5.10 jsou vykresleny průběhy regulátorů.

V tomto případě se přenosu původní soustavy nejvíce přibližují přenosy soustav 5.5.2 a 5.5.4, přenosy zbývajících náhradních soustav se od přenosů původní soustavy odlišují. Nejrychlejší odezvu na jednotkový skok měl regulátor navržený pro soustavu 5.5.1 při více než procentním překročení požadovaného překmitu.

Graf 5.9 zobrazení přechodových charakteristik úprav soustavy 5.5



Graf 5.10 zobrazení průběhů regulace úprav soustavy 5.5



### 5.6 Integrační soustava 4. řádu

Tuto soustavu lze pomocí tabulky 3.3 zjednodušit třemi způsoby. Jako čtvrtý způsob bylo využito „pravidlo poloviny“.

Tabulka 5.6 porovnání zjednodušených přechodových charakteristik a parametrů pro ně navržených regulátorů

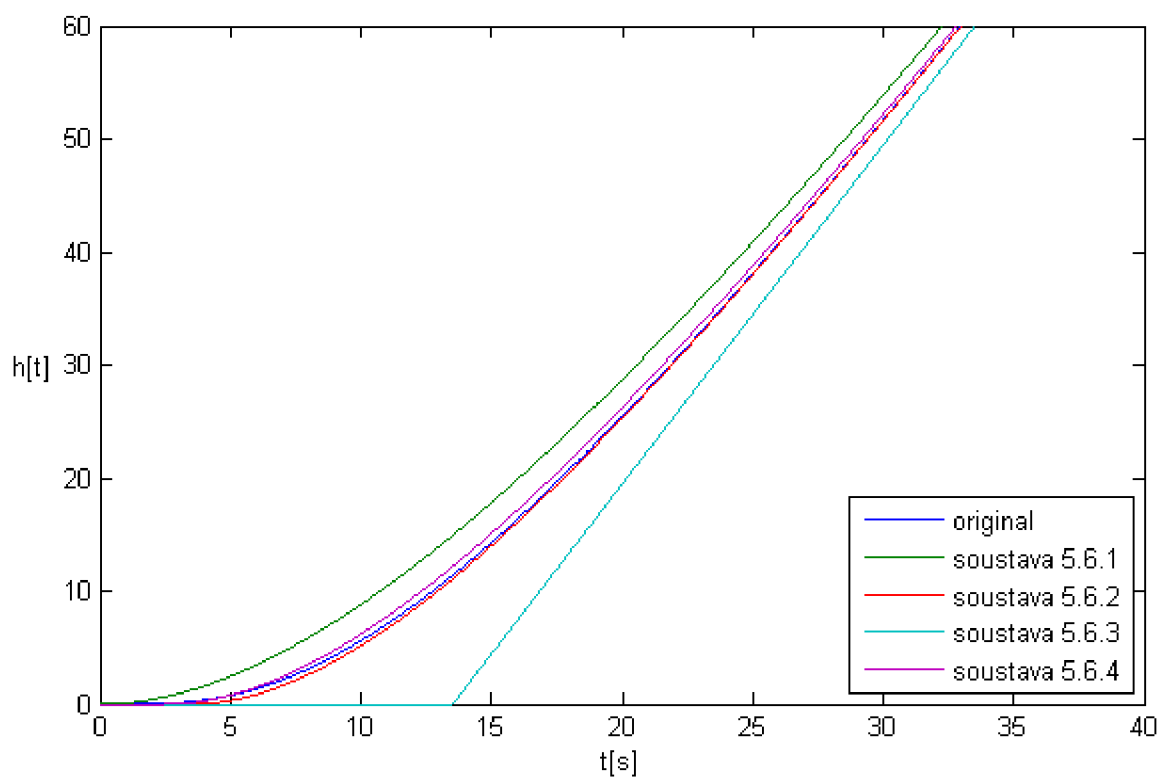
Přenos původní zvolené regulované soustavy			
$G_s(s) = \frac{3}{s(10s + 1)(2s + 1)(s + 1)(0,5s + 1)}$			
Náhradní soustava			
$G_s(s) = \frac{3}{s(13,5s + 1)} \quad (5.6.1)$			
$G_s(s) = \frac{3}{s(10s + 1)} e^{-3,5s} \quad (5.6.2)$			
$G_s(s) = \frac{3}{s} e^{-13,5s} \quad (5.6.3)$			
$G_s(s) = \frac{3}{s(11s + 1)} e^{-2,5s} \quad (5.6.4)$			
Náhradní soustava	Přenos navrženého regulátoru	Relativní překmit [%]	Doba regulace [s]
(5.6.1)	$G_R(s) = 0,0857(1 + 13,5s)$	0,00	15,20
(5.6.2)	$G_R(s) = 0,049(1 + 10s)$	5,11	17,70
(5.6.3)	$G_R(s) = 0,01$	0,00	58,10
(5.6.4)	$G_R(s) = 0,0686(1 + 11s)$	5,16	12,66

V tabulce 5.6 jsou uvedeny čtyři různé úpravy přenosu původní soustavy, pro které byly metodou požadovaného modelu navrženy regulátory. V tomto případě mají soustavy 5.6.1 a 5.6.4 nulový překmit, zbývající regulační soustavy překročily požadovaný překmit minimálně.

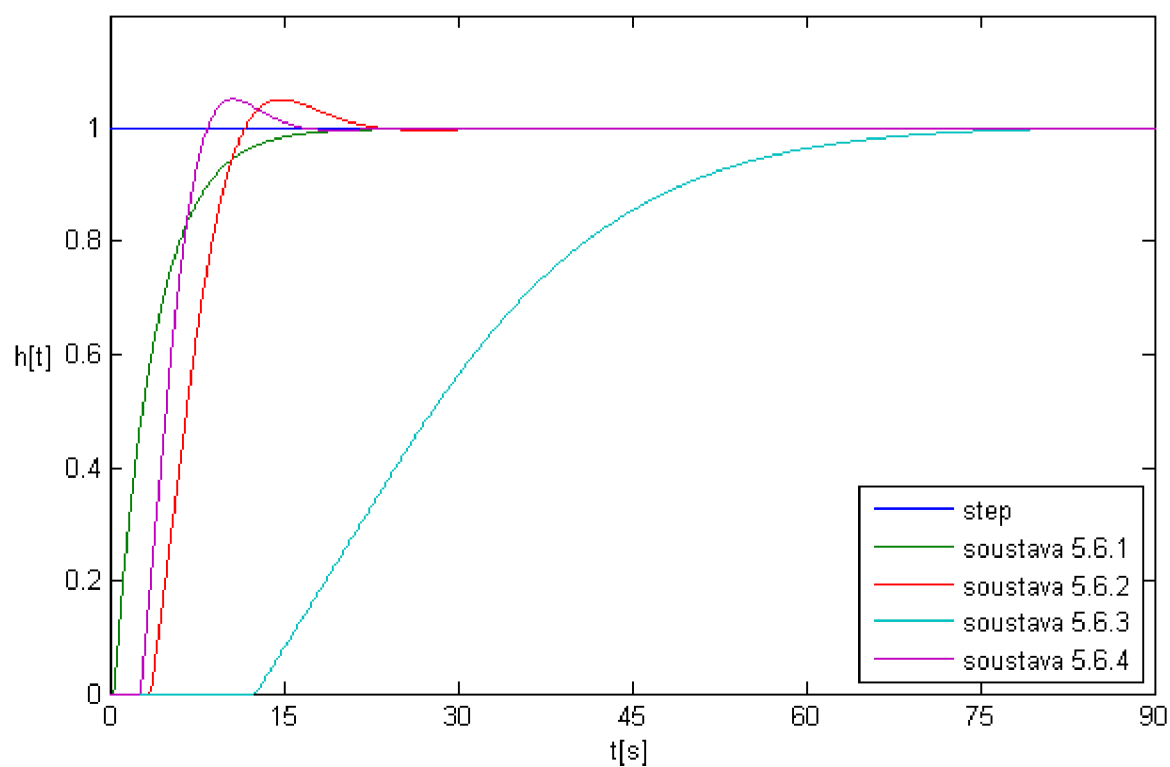
V grafu 5.11 lze porovnat průběhy přechodových charakteristik původní soustavy a jejich jednotlivých úprav, v grafu 5.12 jsou vykresleny průběhy regulátorů.

V tomto případě se přenosu původní soustavy nejvíce přibližují přenosy soustav 5.6.2 a 5.6.4, přenosy zbývajících náhradních soustav se od přenosů původní soustavy odlišují. Nejrychlejší odezvu na jednotkový skok měl regulátor navržený pro soustavu 5.6.4 s nulovým překmitem.

Graf 5.11 zobrazení přechodových charakteristik úprav soustavy 5.6



Graf 5.12 zobrazení průběhů regulace úprav soustavy 5.6



### 5.7 Integrovní soustava 4. řádu s neminimální fází

Tuto soustavu lze pomocí tabulky 3.3 zjednodušit třemi způsoby. Jako čtvrtý způsob bylo využito „pravidlo poloviny“.

Tabulka 5.7 porovnání zjednodušených přechodových charakteristik a parametrů pro ně navržených regulátorů

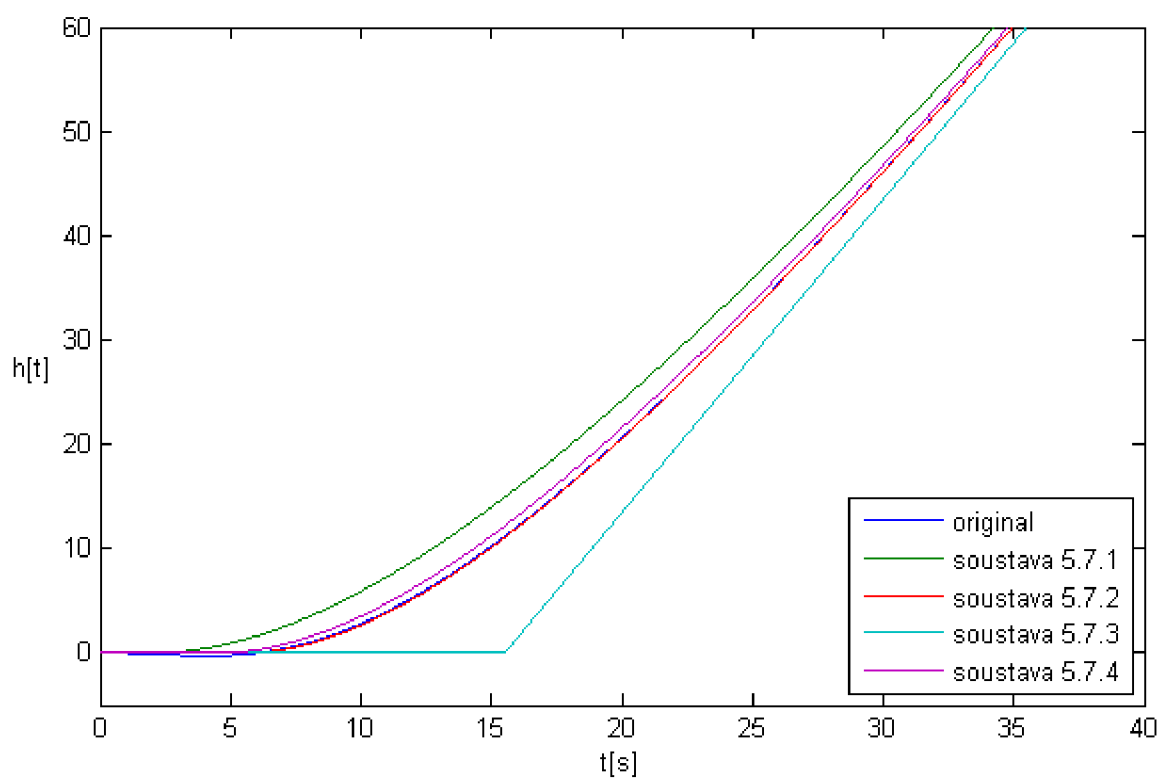
Přenos původní zvolené regulované soustavy			
$G_s(s) = \frac{3(1 - 2s)}{s(10s + 1)(2s + 1)(s + 1)(0,5s + 1)}$			
Náhradní soustava			
$G_s(s) = \frac{3}{s(13,5s + 1)} e^{-2s} \quad (5.7.1)$			
$G_s(s) = \frac{3}{s(10s + 1)} e^{-5,5s} \quad (5.7.2)$			
$G_s(s) = \frac{3}{s} e^{-15,5s} \quad (5.7.3)$			
$G_s(s) = \frac{3}{s(11s + 1)} e^{-4,5s} \quad (5.7.4)$			
Náhradní soustava	Přenos navrženého regulátoru	Relativní překmit [%]	Doba regulace [s]
(5.7.1)	$G_R(s) = 0,0857(1 + 13,5s)$	9,11	10,72
(5.7.2)	$G_R(s) = 0,031(1 + 10s)$	5,90	27,58
(5.7.3)	$G_R(s) = 0,011$	4,81	78,4
(5.7.4)	$G_R(s) = 0,038(1 + 11s)$	6,45	22,78

V tabulce 5.7 jsou uvedeny čtyři různé úpravy přenosu původní soustavy, pro které byly metodou požadovaného modelu navrženy regulátory. V tomto případě byl požadovaný překmit 5% dodržen pouze u soustavy 5.7.3.

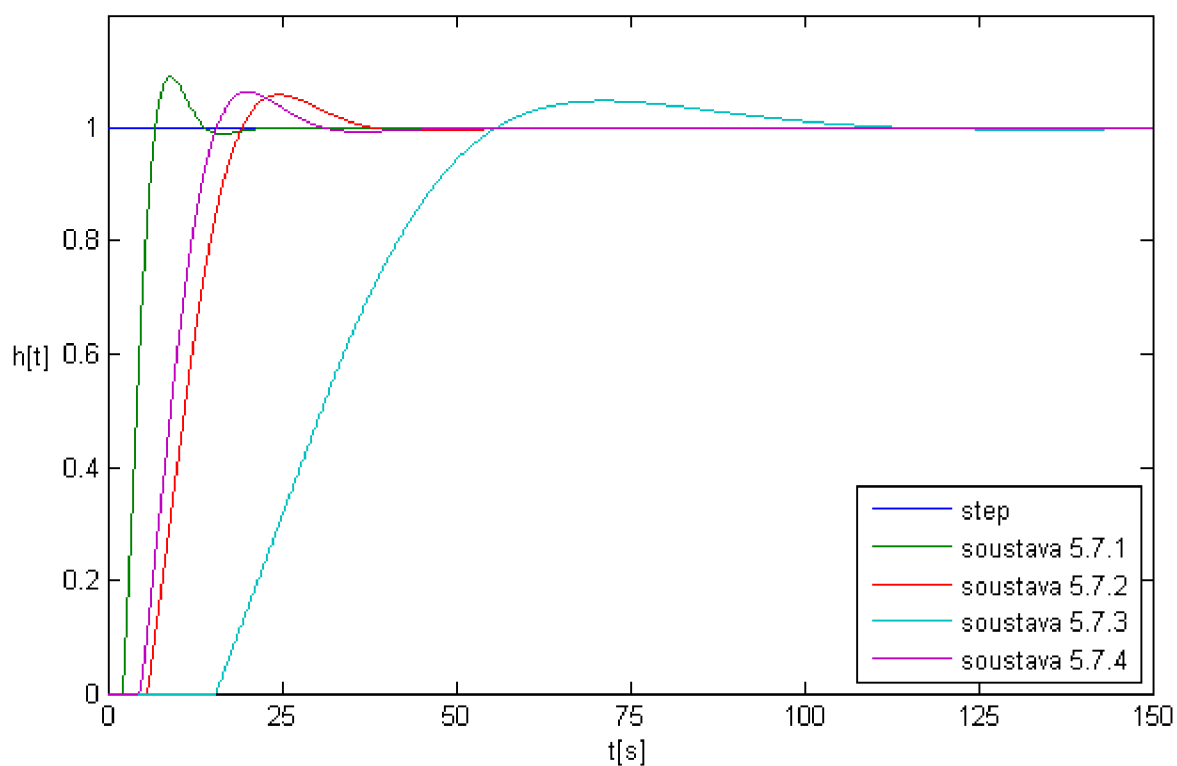
V grafu 5.13 lze porovnat průběhy přechodových charakteristik původní soustavy a jejich jednotlivých úprav, v grafu 5.14 jsou vykresleny průběhy regulátorů.

V tomto případě se přenosu původní soustavy nejvíce přibližují přenosy soustav 5.7.2 a 5.7.4, přenosy zbývajících náhradních soustav se od přenosů původní soustavy odlišují. Nejrychlejší odezvu na jednotkový skok měl regulátor navržený pro soustavu 5.7.1 při více než čtyř procentním překročení požadovaného překmitu.

Graf 5.13 zobrazení přechodových charakteristik úprav soustavy 5.7



Graf 5.14 zobrazení průběhů regulace úprav soustavy 5.7



### 5.8 Integrovní soustava 4. řádu s dopravním zpožděním

Tuto soustavu lze pomocí tabulky 3.3 zjednodušit třemi způsoby. Jako čtvrtý způsob bylo využito „pravidlo poloviny“.

Tabulka 5.8 porovnání zjednodušených přechodových charakteristik a parametrů pro ně navržených regulátorů

Přenos původní zvolené regulované soustavy			
$G_s(s) = \frac{3}{s(10s + 1)(2s + 1)(s + 1)(0,5s + 1)} e^{-4s}$			
Náhradní soustava			
$G_s(s) = \frac{3}{s(13,5s + 1)} e^{-2s} \quad (5.8.1)$			
$G_s(s) = \frac{3}{s(10s + 1)} e^{-7,5s} \quad (5.8.2)$			
$G_s(s) = \frac{3}{s} e^{-17,5s} \quad (5.8.3)$			
$G_s(s) = \frac{3}{s(11s + 1)} e^{-6,5s} \quad (5.8.4)$			
Náhradní soustava	Přenos navrženého regulátoru	Relativní překmit [%]	Doba regulace [s]
(5.8.1)	$G_R(s) = 0,0429(1 + 13,5s)$	0,00	21,39
(5.8.2)	$G_R(s) = 0,023(1 + 10s)$	5,89	37,33
(5.8.3)	$G_R(s) = 0,0098$	5,01	88,45
(5.8.4)	$G_R(s) = 0,026(1 + 11s)$	5,34	32,6

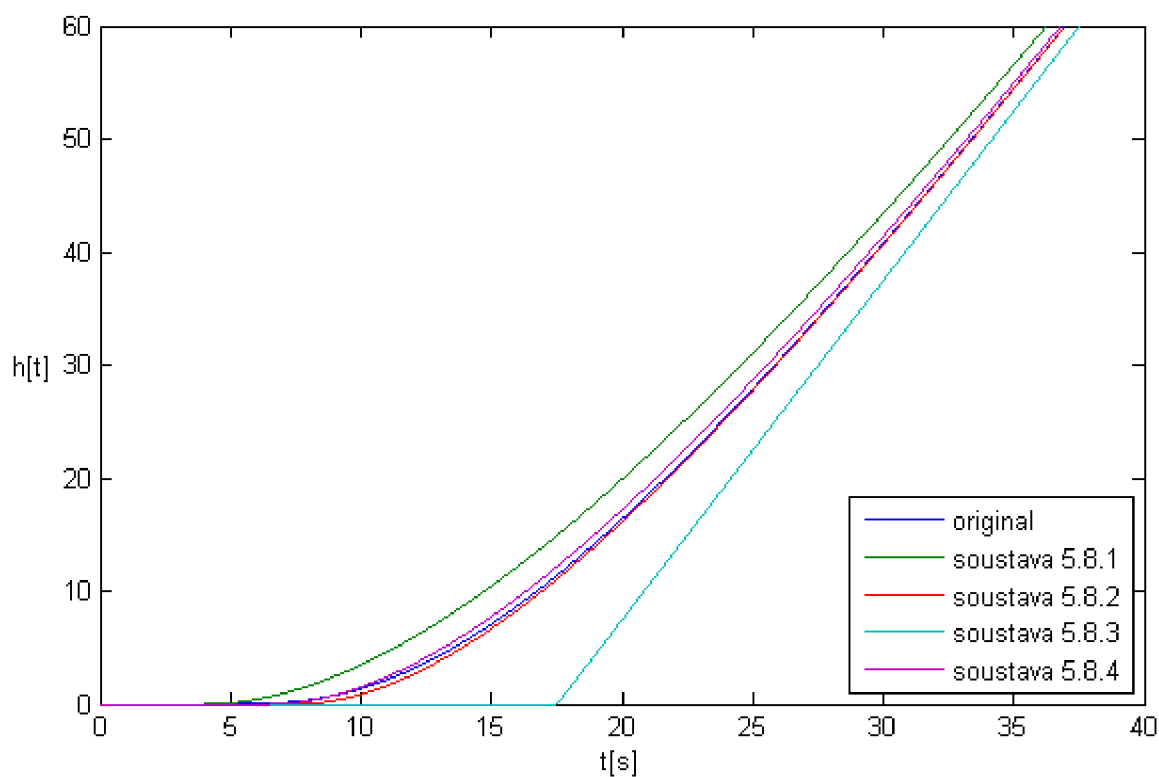
V tabulce 5.8 jsou uvedeny čtyři různé úpravy přenosu původní soustavy, pro které byly metodou požadovaného modelu navrženy regulátory. V tomto případě byl požadovaný překmit 5% dodržen pouze u soustavy 5.8.3 a u soustavy 5.8.1 byl relativní překmit nulový.

V grafu 5.15 lze porovnat průběhy přechodových charakteristik původní soustavy a jejich jednotlivých úprav, v grafu 5.16 jsou vykresleny průběhy regulátorů.

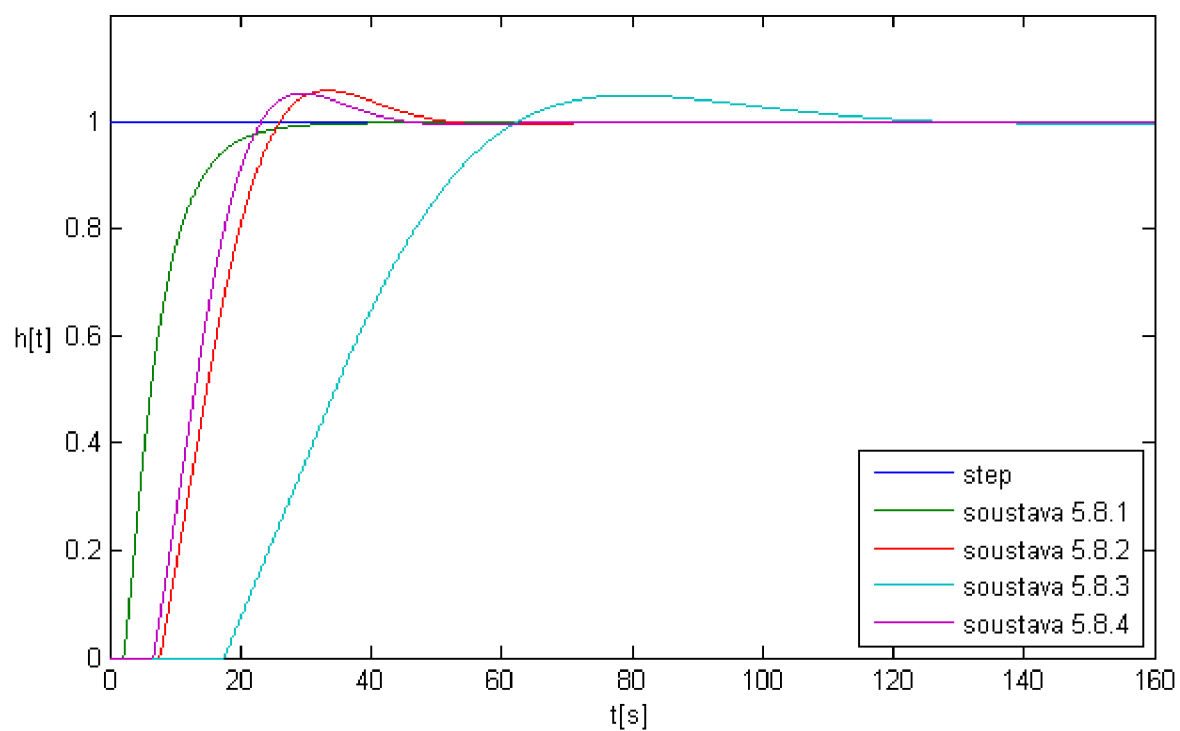
V tomto případě se přenosu původní soustavy nejvíce přibližují přenosy soustav 5.8.2 a 5.8.4, přenosy zbývajících náhradních soustav se od přenosů původní soustavy odlišují. Nejrychlejší odezvu na jednotkový skok měl regulátor navržený pro soustavu 5.8.1 s nulovým relativním překmitem.



Graf 5.15 zobrazení přechodových charakteristik úprav soustavy 5.8



Graf 5.16 zobrazení průběhů regulace úprav soustavy 5.8



## 6 Závěr

V bakalářské práci byly popsány možné varianty zjednodušení nekmitavých proporcionálních a integračních regulovaných soustav. Byla vybrána metoda pro návrh parametrů regulátorů a to metoda požadovaného modelu.

V praktické části byly těmito postupy získány náhradní přenosy zvolených regulovaných soustav a pro ně navrženy parametry regulátorů. Výsledkem těchto výpočtů bylo vytvoření grafických modelů pomocí programu Simulink. Z modelů bylo možno posoudit skutečnou podobnost s přenosem původní soustavy. Z modelů regulačních obvodů bylo zjištěno, zda byl dodržen relativní překmit 5% a odečtena rychlost regulace k určenému překmitu  $\pm 2\%$ .

Jako první byly zvoleny čtyři typy přenosů nekmitavých proporcionálních regulovaných soustav. Výsledné přenosy jsou velice podobné přenosu původní regulované soustavy, menší odchylky jsou více patrné na počátku přechodové charakteristiky regulované soustavy, kde je u soustav s neminimální fází také zjevná náhrada za dopravní zpoždění. Znatelnější odchylky mezi použitými způsoby zjednodušení byly u soustav jejichž původní přenosy obsahovaly dopravní zpoždění. Jako nejméně výhodný se jeví způsob úpravy na soustavu 1. řádu a v případě soustavy, která obsahovala neminimální fází i na soustavu 2. řádu s využitím pravidla poloviny.

Při hodnocení kvality regulace se ukázalo, že se ne vždy podařilo u navrženého regulátoru dodržet požadovaný překmit 5%, ale u většiny regulovaných obvodů toto provázela kratší doba regulace. Tyto skutečnosti je nutné zvážit při stanovování nároků na regulační obvod.

Druhé v pořadí byly zvoleny čtyři typy přenosů nekmitavých integračních regulovaných soustav. Při porovnávání výsledných přechodových charakteristik se u všech typů soustav ukázaly jako nejpodobnější původní soustavě charakteristiky získané na základě zjednodušení náhradou malých časových konstant dopravním zpožděním a využitím pravidla poloviny. Jako méně shodující se s původním přenosem se ukázaly způsoby sečtením všech malých časových konstant na jednu časovou konstantu a náhrada všech malých časových konstant dopravním zpožděním.

Při hodnocení kvality regulace se z hlediska rychlosti regulace ukázal jako nejvýhodnější PD regulátor navržený pro soustavu zjednodušenou sečtením malých časových konstant na jednu časovou konstantu, avšak i u některých těchto regulačních obvodů nebyl dodržen požadovaný překmit 5%. Z hlediska shody náhradního a původního přenosu regulované soustavy s ohledem na rychlost regulace se jako nejvýhodnější jevila kombinace zjednodušení s využitím pravidla poloviny a následně navrženého PD regulátoru.

Z provedených výpočtů a simulací vyplývá, že pro zvolené nekmitavé integrační soustavy je možné zvolit jakýsi univerzální model zjednodušení soustavy a následně navržení parametrů regulátoru. Pro proporcionální soustavy toto není zcela možné a v případě praktického použití by bylo nutné určit, zda je požadovaná co největší shoda s původní soustavou, nejkratší doba regulace nebo doržení překmitu.

Použitá metoda návrhu regulátoru zaručuje pro oba typy soustav nulovou regulační odchylku, ale ne vždy se podaří dodržet požadovaný překmit.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BALÁTĚ, Jaroslav. *Automatické řízení*. 2. vydání Praha: Nakladatelství BEN – technická literatura, 2009. 664 s. ISBN 80-7300-148-9.
- [2] ŠVARC, Ivan; ŠEDA, Miloš; VÍTEČKOVÁ, Miluše. *Automatické řízení*. 1. vydání Brno: CERM, 2007. 324 s. ISBN 978-80-214-3491-2
- [3] ŠVARC, Ivan. *Automatizace-automatické řízení*. 1. vydání Brno: CERM, 2002. 262 s. ISBN 80-214-2087-1.
- [4] ŠULC, Bohumil; VÍTEČKOVÁ, Miluše. *Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů*. 1. vydání Vydavatelský ČVUT, 2004. 333 s. ISBN 80-01-03007-5
- [5] SKOGESTAD, Sigurd. Simple analytic rules for model reductions and PID controller tuning *Journal of process control*, No. 13, 2003, pp. 291-309
- [6] VÍTEČKOVÁ, Miluše. *Seřízení regulátorů metodou inverze dynamiky* 1. vydání Ostrava: VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 1998. 56 s. ISBN 80-7078-628-0
- [7] KARBAN, Pavel. *Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink* 1. vydání Brno: COMPUTERPRESS, 2006. 220s. ISBN 80-251-1448-1
- [8] FARANA, David; SMUTNÝ, Lubomír; VÍTEČEK, Antonín; VÍTEČKOVÁ, Miluše. *Z pracování závěrečných prací z oblasti automatizace a informatiky*. 1. vydání Ostrava: VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2004. 116 s. ISBN 80-248-0557-x
- [9] VÍTEČKOVÁ, Miluše; VÍTEČEK, Antonín. *Základy automatické regulace*. 1. vydání Ostrava: VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2006. 200 s. ISBN 80-248-1068-9