

**Podpora cvičení z předmětu:  
„Teorie automatického řízení I.“**

Support exercising from subject:  
„Automatic control theory I“

Jana Vyoralová



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
Ústav automatizace a řídicí techniky  
akademický rok: 2006/2007

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jana VYORALOVÁ**  
Studijní program: **B 3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**

Téma práce: **Podpora cvičení z předmětu "Teorie automatického řízení I"**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte literární rešerši na problematiku týkající se podpory elektronické formy výuky v oblasti automatického řízení. Zaměřte se zejména na oblast spjitých systémů.
2. Navrhněte formu zpracování elektronické učební pomůcky pokrývající obsah cvičení předmětu "Teorie automatického řízení I".
3. Převezměte, upravte a příp. doplňte již existující elektronické podklady k podpoře cvičení předmětu "Teorie automatického řízení I".
4. Naplňte obsah této elektronické učební pomůcky mimo potřebné teorie zejména dostatečným množstvím názorných příkladů. Při zpracování této učební pomůcky využijte také možností programového prostředí MATLAB/SIMULINK.
5. Zprovozněte vytvořenou elektronickou učební pomůcku na Internetu.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] ASTRÖM, K., HÄGGLUND, T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. USA : Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina, 1995. 343 s.  
[2] BALÁTĚ, J. Automatické řízení. 2. přeprac. vyd. Praha : BEN – technická literatura, Praha, 2004. 664 s.  
[3] BROŽA, P. Programování WWW stránek pro úplné začátečníky. Praha: Computer Press, 2000. 200 s.  
[4] KOSEK, J. Téměř vše o WWW [online]. c1999–2006 , 13.12.2006 [cit. 2007–01–18]. Dostupný z WWW: <<http://www.kosek.cz/>>.  
[5] PROKOP, R., MATUSŮ, R., PROKOPOVÁ, Z.: Teorie automatického řízení – lineární spojité dynamické systémy. Zlín: UTB Zlín, 2006. 98 s.

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Pavel Navrátil, Ph.D.**

Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání bakalářské práce:

**13. února 2007**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**25. května 2007**

Ve Zlíně dne 13. února 2007

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
*děkan*



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
*ředitel ústavu*

## ABSTRAKT

Cílem této práce bylo vytvořit elektronickou učební pomůcku pokrývající obsah cvičení předmětu „Teorie automatického řízení I“. Dalším bodem pak bylo navrhnout strukturu této učebnice, naplnit její obsah mimo potřebné teorie zejména dostatečným množstvím názorných příkladů s využitím programového prostředí MATLABu, přičemž jako zdroje dat bylo využito již existujících (elektronických) podkladů. Tyto zdroje byly upraveny a doplněny o další příklady a kapitoly.

Dalším cílem bylo ověřit vybrané klasické metody syntézy pro zadané proporcionalní přenosy a to jak pro přenos bez dopravního zpoždění, tak i pro přenos s dopravním zpožděním a tyto klasické metody poté srovnat podle kvality regulace.

Klíčová slova:

automatické řízení, Matlab, Laplaceova transformace, přenos systému, diferenciální rovnice, přechodová funkce, impulsní funkce, frekvenční přenos, identifikace regulovaných soustav, stabilita, syntéza regulačního obvodu.

## ABSTRACT

The goal of this paper work was to create electronic textbook covering the contents of the practise of the subject "Automatic control theory I". The structure of this textbook was suggested so that it was filled not only with the necessary theory but also with enough practical examples using the program Matlab. These sources have been modified and other examples and chapters have been added.

Another goal was to verify the chosen classical methods of synthesis for ordered proportional transfer function i.e. for system without transport delay and for system with transport delay. Then these classical methods were compared according to the quality of the regulation.

Keywords:

automatic control, Matlab, Laplace transformation, transmission system, differential equation, transitional function, pulse function, frequency response, identification controlled systems, stability, synthesis control loop.

Děkuji vedoucímu své bakalářské práce Ing. Pavlu Navrátilovi, Ph. D. za odborné vedení, vysokou profesionalitu, podnětné připomínky a rady udílené při vypracování práce.

Prohlašuji, že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvolněno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně 31.8.2007

.....  
Jana Vyoralová

## OBSAH

<b>1. ÚVOD</b> .....	8
<b>2. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU</b> .....	10
<b>3. TVORBA WWW STRÁNEK</b> .....	13
3.1. Internet.....	13
3.2. Základní služba Internetu - WWW.....	13
3.3. Tvorba WWW .....	13
<b>4. SYNTÉZA REGULAČNÍHO OBVODU - VYUŽITÍ KLASICKÝCH METOD SYSTÉZY</b> .....	16
4.1 Vybrané metody syntézy .....	16
4.1.1 Ziegler-Nicholsova (Z-N) metoda kritického zesílení.....	16
4.1.2 Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky.....	17
4.1.3 Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky (Åströмова úprava) .....	18
4.1.4 Chien, Hrones a Reswickova metoda (CHR metoda) .....	19
4.1.5 Cohen-Coonova metoda .....	20
4.1.6 Fruehaufova metoda .....	21
4.1.7 Metoda vyváženého nastavení.....	22
4.1.8 Naslinova metoda .....	22
4.1.9 Whiteleyova metoda .....	22
4.1.10 Metoda požadovaného modelu .....	25
4.2 Aproximace dopravního zpoždění.....	30
4.3 Kvalita regulace.....	31
<b>5. POPIS INTEGROVANÉHO VÝVOJOVÉHO PROSTŘEDÍ MATLAB</b> .....	33
<b>6. SIMULACE REGULAČNÍHO POCHODU PRO RŮZNÉ METODY NASTAVENÍ REGULÁTORU</b> .....	35
6.1. Typ proporcionální regulované soustavy bez dopravního zpoždění .....	36
6.1.1. Z-N metoda kritického zesílení .....	36
6.1.2. Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky.....	38
6.1.3. Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky (Åströмова úprava) .....	39
6.1.4. Chien, Hrones a Reswickova metoda (CHR metoda) .....	40
6.1.5. Cohen-Coonova metoda .....	41
6.1.6. Fruehaufova metoda .....	43
6.1.7. metoda vyváženého nastavení .....	44
6.1.8. naslinova metoda .....	46
6.1.9. Whiteleyova metoda .....	47
6.1.10. Metoda požadovaného modelu .....	49
6.2. Typ proporcionální regulované soustavy bez dopravního zpoždění .....	50
6.2.1. Z-N metoda kritického zesílení .....	50
6.2.2. Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky.....	52
6.2.3. Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky (Åströмова úprava) .....	53
6.2.4. Chien, Hrones a Reswickova metoda (CHR metoda) .....	54

---

6.2.5. Cohen-Coonova metoda .....	55
6.2.6. Fruehaufova metoda .....	56
6.2.7. Metoda vyváženého nastavení.....	58
6.2.8. Naslinova metoda .....	59
6.2.9. Whiteleyova metoda .....	61
6.2.10. Metoda požadovaného modelu.....	63
6.3. Porovnání vybraných klasických metod syntézy podle kvality regulace.....	64
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>66</b>
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>67</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>68</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>69</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>71</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>73</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>74</b>

## 1. ÚVOD

Základním předpokladem a dnes již podmínkou uplatnění různých forem automatizace výrobních, inženýrských i řídicích procesů je založit a rozšiřovat počítačovou podporu všech zmíněných činností. Proto se tato bakalářská práce zabývá především tvorbou elektronických podkladů čerpajících převážně z teorie syntézy regulačního obvodu, zejména potom návrhem parametrů spojitých regulátorů.

Oblast syntézy automatického řízení se stala jednou z nejdůležitějších součástí v oblasti průmyslové automatizace. Své místo zaujala i v nevýrobních oblastech jako je např. automatizace budov, automobilů, ... . Syntéza automatického řízení si proto zaslouží být prezentována i široké veřejnosti. V době rozvoje informačních technologií je nejlepším způsobem této prezentace využití aplikací běžících na standartních osobních počítačích.

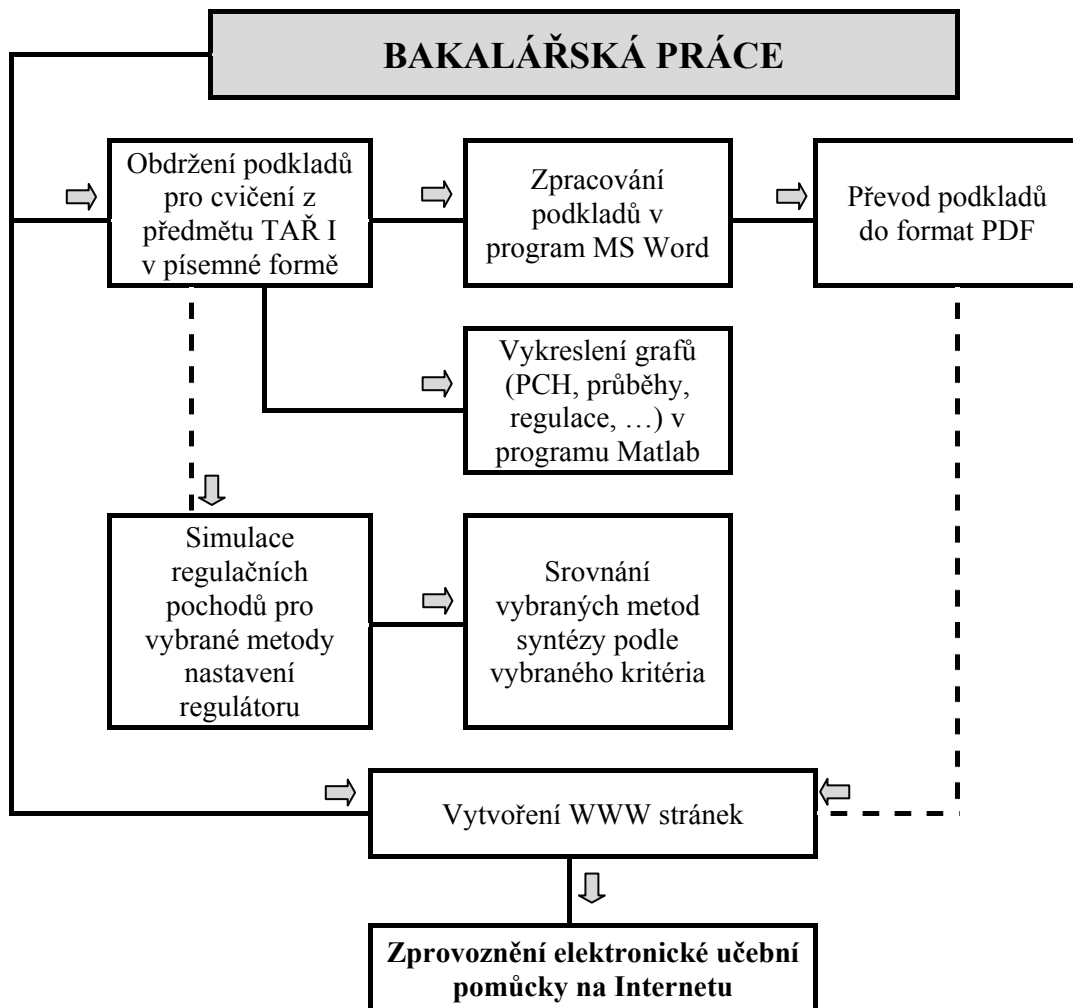
Práce se zabývá tvorbou elektronických pomůcek pro podporu cvičení předmětu "Teorie automatického řízení I". Vytvořené elektronické podklady by měly pomoci studentům při zpracování zadaných prací a to jak seminární práce, tak i laboratorních prací. Další částí práce je zprovoznění webových stránek zahrnujících zpracované elektronické podklady pro podporu cvičení předmětu "Teorie automatického řízení I".

Práce je věnována především tématu syntézy regulačních obvodů, pro srovnání kvality regulace pomocí klasických metod seřízení regulátoru byly zvoleny dva typy přenosů regulovaných soustav – regulovaná soustava bez dopravního zpoždění a regulovaná soustava s dopravním zpožděním.

Na následujícím obrázku (Obr. 1) je zobrazena základní struktura bakalářské práce.



## Struktura bakalářské práce



Obr. 1. - Struktura bakalářské práce

## 2. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU

Protože nedílnou součástí práce je elektronický výstup některých jejích částí – podklady pro semináře, vytvoření webových stránek, ... , je v této kapitole více přiblížena tematika počítačové podpory a uvedeno několik příkladů z aplikací této podpory na vysokých školách v České republice.

Počítačovou podporou výuky rozumíme efektivní využití moderních informačních technologií v procesu vzdělávání, nejedná se však o e-learning, protože se tato práce nezabývá i zpětnou vazbou, jako např. přezkoušení vědomostí studentů ve formě testů. Jedná se tedy pouze o elektronickou formu sdílení informací.

Tato forma vzdělání klade důraz nejen na získání informací v okamžiku, kdy jsou skutečně potřeba, ale na rozdíl od běžné výuky, kdy se informace získávají v pravidelných intervalech po krátké časové období (jedna až tři hodiny za týden v přesně stanovenou dobu a místě), také na aktuálnost informací díky možnosti rychlé aktualizace stávajících vědomostí okamžitě po publikování nových objevů. Tedy na rozdíl klasické papírové publikace, kde je nutná editace, vydání a zakoupení nové přepracované verze. Dále tato forma výuky není vázána na schopnosti učitele dostavit se na místo školení, ať již z důvodu nemoci nebo přírodních podmínek.

### **Výhody počítačové podpory výuky:**

- student si může zvolit čas i délku trvání studia, u klasické výuky toto stanovuje vyučující,
- absence stresu ze zkoušení,
- studium pomocí počítačů, resp. Internetu vede ke snížení technických, organizačních a cestovních nákladů spojených s cestou studenta do školícího zařízení a potřebou mít toto zařízení osvětleno, vytopeno, vybaveno příslušnou technikou, ...,
- pomocí Internetových kurzů lze rychleji vyškolit větší množství studentů než při klasické výuce, zároveň je toto vzdělání přístupnější i studentům z větší geografické vzdálenosti,
- je mnohem jednodušší a rychlejší aktualizovat webové stránky, než dávat do tisku novou verzi script.

Počítačová podpora výuky nemá samozřejmě jen klady, ale výhody z ní plynoucí rozhodně převažují nad jejími nevýhodami.

### **Nevýhody počítačové podpory výuky:**

- nepřítomnost kolektivu jako motivujícího prostředí,
- poměrně vysoké náklady na pořízení počítače a platba za poskytování připojení k Internetu,

- při studiu z monitoru PC nemáme k danému předmětu zafixovaného lektora nebo pomůcky ve výuce, ke kterým si můžeme vytvořit osobní vztah a které nám následně pomáhají ve studiu daného předmětu,
- čtení z monitoru počítače zabere více času než čtení z papíru. Tisk všech materiálů není příliš ekonomický a ekologický, ale protože nejsme na čtení z obrazovky nebo displaye zvyklí, pocítujeme rychleji únavu, což nás vede k pocitu, že studiu věnujeme delší dobu, než je tomu ve skutečnosti.

Elektronická výuka se v dnešní době rozšířila téměř do všech oblastí, automatizaci řízení nevyjímaje. Prosazuje se jak ve školství, nejvíce pak na akademické půdě, tak i ve firmách, kde odpadá potřeba setkání všech pracovníků v jednom časovém okamžiku, což je důležité především v podnicích, kde je nutno, aby nedošlo k přerušení výroby. Zároveň však zaměstnanci mají přístup k informacím ve chvíli, kdy jejich nepřítomnost neovlivní chod firmy.

Elektronickou výukou týkající se oblasti automatického řízení v posledních letech začaly zabývat i pracoviště v České republice i Slovenské republice, jako např. na VŠB-TU Ostrava, na TU Liberec, na ČVUT v Praze a také na naší univerzitě, tj. UTB ve Zlíně nebo i na STU Bratislava. Na všech těchto pracovištích mají vytvořeno několik elektronických publikací a to nejenom pro oblast automatického řízení.

Na VŠB Ostrava, Fakultě strojní jsou elektronické učebnice věnované analýze regulačních obvodů. Popisují algebru blokových schémat, kmitočtové charakteristiky v logaritmických souřadnicích, regulační obvody, oblasti analýzy lineárních systémů – časové a kmitočtové oblasti a oblasti komplexní proměnné. Přístup je možný na Internetové adrese <http://www.fs.vsb.cz/books/analyza/index.html>.

Na Technické Univerzitě v Liberci, Fakultě mechatroniky existují učební texty pro předměty Teorie řízení I (analýza dynamických systémů, syntéza regulačních obvodů, identifikace, MIMO systémy, atd.) a Teorie řízení II (fuzzy řízení a regulace, nelineární systémy, diskrétní parametrická identifikace, atd.), Číslicové řízení (analýza diskrétních regulačních obvodů, modelování a diskrétní identifikace, syntéza číslicových a diskrétních stavových regulátorů), Teorie řízení pro Fakultu strojní (analýza, syntéza, nelineární systémy, atd.) a Prostředky automatického řízení. Kromě toho je zde také uveden stručný manuál k MATLABu, který je možno shlédnout ve formě webových stránek nebo si ho stáhnout ve formátu PDF (Portable Document Format) pro pozdější studium. Internetové stránky liberecké univerzity zabývající se elektronickou podporou výuky, jsou přístupné na adrese <http://www.fm.vslib.cz/~krt/>.

Na ČVUT Praha, Fakultě elektrotechnické jsou vytvořeny stránky zabývající se popisem dynamických systémů, regulačních obvodů, včetně rozvětvených a mnohorozměrových, a také teorií regulátorů. Stránky je možné navštívit na adrese <http://dce.felk.cvut.cz/sri2/ss>.

Na STU v Bratislavě, Fakultě elektrotechniky a informatiky, jsou vytvořeny různé elektronické pomůcky pro podporu výuky. Jednou z nich také modul, který je zaměřen na modelování dynamických systémů. Tento modul obsahuje mimo potřebné teorie, také vhodně vypracované ukázkové příklady s využitím Java appletů. Internetová adresa tohoto modulu je <http://www.kar.elf.stuba.sk/tar/ts/online/models/index.php>.

Na Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně, Fakultě aplikované informatiky (dále jen UTB Zlín, FAI) existuje elektronická učebnice zabývající se analýzou a syntézou dynamických systémů přístupná na adrese <http://www.caac.zde.cz>. Na univerzitě se nachází také modul zabývající se adaptivním řízením jednorozměrových diskrétních systémů. Jde o knihovnu samočinně se nastavujících regulátorů vytvořenou pro program MATLAB/Simulink, která se nachází na serveru UTB pod adresou <http://www.utb.cz/stctool> [5],[12].

### **3. TVORBA WWW STRÁNEK**

#### **3.1. Internet**

Internet je v současné době nejrozsáhlejší počítačovou sítí ve světě. Jednotlivé počítače jsou vzájemně propojeny (kabely nebo bezdrátově). Každý člověk se tedy může spojit s libovolným zařízením, které je připojeno do internetové sítě. Internet je vlastně propojení lokálních počítačových sítí pomocí vysokorychlostních datových spojů. Tyto spoje pokrývají celý svět a tvoří tak jakousi „pavučinu“. V současné době se odhaduje počet uživatelů, kteří využívají služeb internetu na více než 1 miliardu. Ti všichni mohou spolu po této síti komunikovat, nabízet informace a využívat nabízené informace. Nejvýznamnější a nejpopulárnější službou Internetu je bezesporu World Wide Web (WWW), která nabízí velmi široké spektrum nejrůznějších informací. Dalšími významnými službami jsou elektronická pošta (používá se již více než 30 let), FTP, elektronické konference, diskusní skupiny a služby umožňující komunikaci v reálném čase (CHAT, IRC, ICQ, Skype, atd.) [6], [7].

#### **3.2. Základní služba Internetu - WWW**

Zájem o Internet roste v poslední době díky službě World Wide Web (celosvětová síť - WWW), která umožňuje především přenos dat a prohlížení internetových stránek. Byla vyvinuta v roce 1990 v CERN, což je zkratka pro European Laboratory for Particle Physics (Evropská laboratoř pro fyziku částic) a skládá se z miliónů stránek ve stylu časopisu. Na rozdíl od stránek v tištěném časopisu však webové stránky mohou vedle textu a obrázků obsahovat zvuky, animace, video či interaktivní prvky. Uživatel musí mít pro fungování této služby nainstalován program - internetový prohlížeč (Microsoft Internet Explorer - MS IE, Mozilla, Opera, Netscape Navigator, atd.), který obstarává komunikaci se serverem a zobrazuje obsah webové stránky.

#### **3.3. Tvorba WWW**

HTML (Hyper Text Markup Language) je značkovací jazyk, pomocí kterého se vytvářejí internetové stránky. V dnešní době se prostý HTML kód využívá poměrně málo, často se používá v kombinaci s dalšími jazyky např.: CSS (kaskádové styly), JAVA, JavaScript a další. Samotné internetové stránky jsou jen obyčejné textové soubory s příponou .html nebo .htm, ve kterých je zapsán text obohacený o tagy, které určují význam jednotlivých částí textu a tak pro tvorbu internetových stránek postačí jednoduchý textový editor.

CSS (Kaskádové styly) je kód určující formátování založené na stylech, který definuje vlastnosti jednotlivých elementů (hlavně vzhled). Tento kód můžeme umístit do samostatného souboru s příponou .css a vytvořit na něj odkaz v části  $\langle head \rangle$  každého dokumentu, který ho bude používat. Nebo můžeme umístit CSS kód přímo do části  $\langle head \rangle$  každé stránky. Formátování se provádí postupně směrem dolů u všech výskytů příslušné značky. Pokud je to nutné, můžeme styl umístit přímo uvnitř jednotlivých značek (tagů) [8], [9].

WWW stránky elektronické podpory cvičení předmětu „Teorie automatického řízení I“ byla vytvořena v programu Poznámkový blok, který obsahují všechny verze operačního systému Windows. Jde jednoduchý textový editor, který ukládá jen ve formátu prostého textu. To je pro úpravy HTML ideální, protože si nemusíme dělat starosti s tím, že by soubor obsahoval dodatečné formátování z textového procesoru [8].

Základní rozložení WWW stránek je na Obr. 2.

Počítačová podpora předmětu: "Teorie automatického řízení I." - Microsoft Internet Explorer

Soubor Úpravy Zobrazit Oblíbené Nástroje Nápořádání

Adresa H:\\_BP\_final\www stránky\index.htm

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

Úvodní stránka  
Obsah cvičení  
Podklady pro semináře  
Seminární práce  
Přihlášení ke zkoušce  
Odkazy

FAI UTB ZLÍN  
Pavel NAVRÁTIL  
pnavratil@fai.utb.cz

Stránky cvičení z předmětu Teorie automatického řízení I.

Block diagram showing a control system with input  $W(s)$ , error signal  $E(s)$ , controller  $G_R(s)$ , disturbance  $V(s)$ , summing junction for  $U(s)$ , plant  $G_S(s)$ , disturbance  $N(s)$ , and output  $Y(s)$ .

autoři: Ing. Pavel Navrátil, Ph.D.; Jana Vyoralová

Tento počítač

Obr. 2. - Úvodní stránka elektronické učebnice

Webová stránka je rozčleněna na tři rámce, v levém se nachází hlavní menu, které obsahuje tyto položky:

Úvodní stránka: Tato položka obsahuje stručný popis obsahu vytvořené elektronické učební pomůcky a základní informace o aplikaci Matlab.

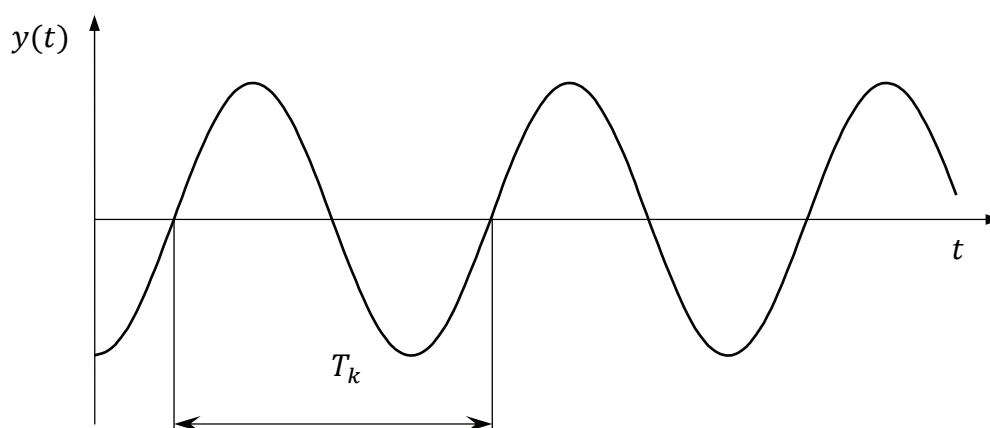
- Obsah cvičení: Zde se nachází osnova předmětu Teorie automatického řízení I.
- Podklady pro semináře: Zpracované učební podklady k předmětu „Teorie automatického řízení I“ členěné dle osnovy předmětu:
- Matematické modely
  - Laplaceova transformace
  - Popis dynamických vlastností systému
  - Určení výsledného přenosu složeného systému
  - Stabilita systému
  - Identifikace regulovaných soustav
  - Syntéza regulačního obvodu
  - Popis systému ve stavovém prostoru
  - Mnohorozměrové systémy
- Seminární práce: Položka obsahuje zadání dvou semestrálních prací:
- Vnější popis a analýza spojitého dynamického systému
  - Syntéza spojitého jednorozměrového regulačního obvodu a vnitřní popis system
  - Ukázkové protokoly pro vnější popis a analýzu spojitého dynamického systému
- Ukázka testu: Ukázka testových otázek
- Přihlášení ke zkoušce: Zde se nachází odkaz na Studijní agendu UTB (<http://www.portal.utb.cz>), pro přihlášení ke zkoušce
- Odkazy: Seznam užitečných odkazů k dalším studijním materiálům pro předmět TAŘ I

## 4. SYNTÉZA REGULAČNÍHO OBVODU - VYUŽITÍ KLASICKÝCH METOD SYSTÉZY

### 4.1 Vybrané metody syntézy

#### 4.1.1 Ziegler-Nicholsova (Z-N) metoda kritického zesílení

Základní myšlenkou je přivést obvod na hranici stability. Toho dosáhneme použitím pouze proporcionální složky PID regulátoru ve zpětné vazbě, derivační a integrační složky budou vyřazeny nastavením  $T_I = \infty$  a  $T_D = 0$ , resp.  $r_{-1} = 0$  a  $r_1 = 0$ . Vlivem proporcionální složky se zvyšuje zesílení  $k_P$ , resp.  $r_0$  až k hodnotě  $k_{Pk}$ , resp.  $r_{0k}$  až do doby, kdy je obvod na hranici stability (netlumené kmity na výstupu z řízeného systému). Zesílení regulátoru, při kterém se tak stane, nazýváme kritickým zesílením  $k_P = k_{Pk}$ , resp.  $r_0 = r_{0k}$  a periodu kritických kmitů  $T = T_k$ . Tyto kritické hodnoty dosazujeme do empirických vztahů pro jednotlivé typy regulátoru (Tab. 1) a vypočteme tak jejich stavitelné parametry.



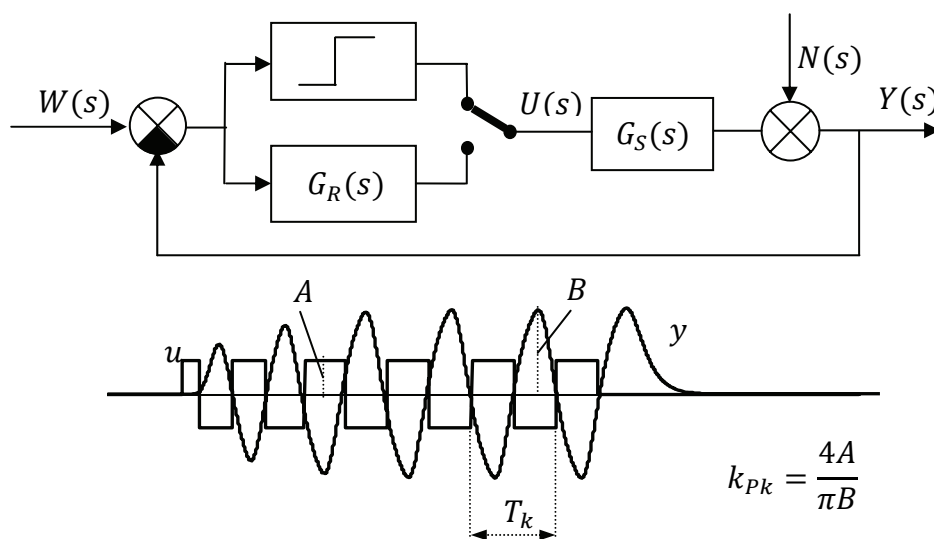
Obr. 3. - Určení  $T_k$  při  $r_{0k}$

Tab. 1. - Nastavení parametrů regulátoru metodou Ziegler-Nichols

	$k_P$	$T_I$	$T_D$	$r_0$	$r_{-1}$	$r_1$
<b>P</b>	$0,5 k_{Pk}$	-	-	$0,5 r_{0k}$	-	-
<b>PI</b>	$0,45 k_{Pk}$	$0,85 T_k$	-	$0,45 r_{0k}$	$\frac{0,54 r_{0k}}{T_k}$	-
<b>PD</b>	$0,4 k_{Pk}$	-	$0,05 T_k$	$0,4 r_{0k}$	-	$0,02 r_{0k} T_k$
<b>PID</b>	$0,6 k_{Pk}$	$0,5 T_k$	$0,12 T_k$	$0,6 r_{0k}$	$\frac{1,2 r_{0k}}{T_k}$	$0,075 r_{0k} T_k$



Kritické zesílení a kritická perioda kmitů lze určit i jiným způsobem a to vložением nelinearity (relé) do zpětné vazby (Obr. 4). Z kritických hodnot (Tab. 1) se pak určí parametry regulátoru. Kritické parametry se mimo výše uvedeného postupu dají určit, pokud je znám přenos regulované soustavy, i výpočtem s pomocí kritérií stability z charakteristické rovnice a to  $r_{0k}$ , resp.  $k_{Pk}$  - pomocí algebraického kritéria (např. Hurwitzovo kritérium),  $T_k$  - pomocí frekvenčního kritéria (např. kritérium Michajlovovo - Leonardovo) [2], [3].



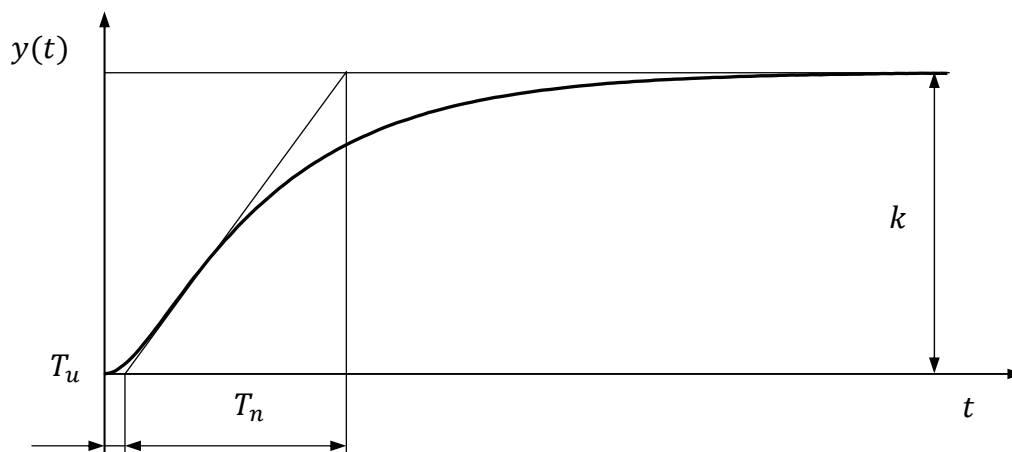
Obr. 4. - Určení  $T_k$  a  $k_{Pk}$  při vložení nelinearity (relé) do zpětné vazby

Při výpočtu lze využít Nyquistova kritéria vycházejícího z otevřeného regulačního obvodu, tedy:

$G_O(s) = G_R(s)G_S(s)$ , přičemž na regulátoru  $G_R(s)$  je nastavena pouze  $P$  složka, čili  $r_0$ .

#### 4.1.2 Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky

Z naměřené přechodové charakteristiky regulované soustavy (aperiodického typu) odečteme dobu průtahu  $T_u$ , dobu náběhu  $T_n$  a zesílení  $k$ . Vypočteme parametr  $\gamma$ , platí  $\gamma = T_n / T_u$ . Ze získaných parametrů vypočítáme parametry regulátoru (Tab. 2) [2], [3].

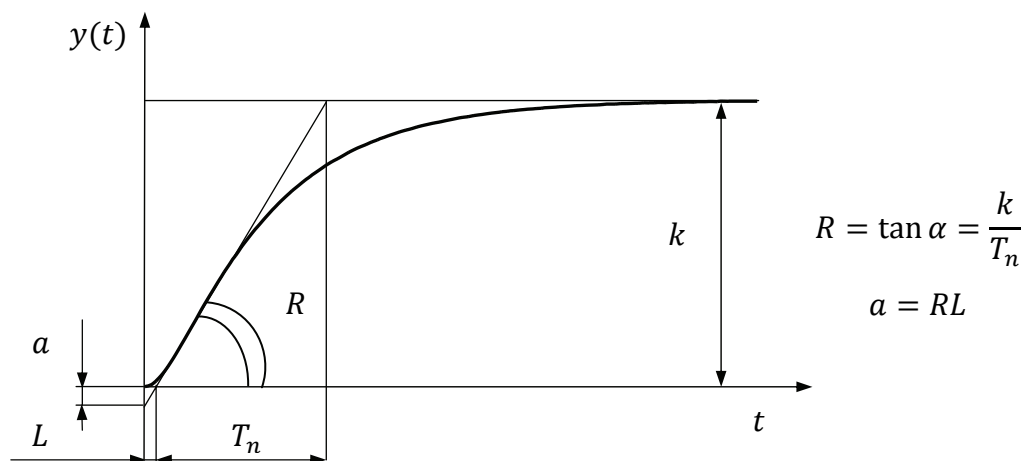
Obr. 5. - Určení parametrů  $k$ ,  $T_n$  a  $T_u$  z přechodové charakteristik regulované soustavy

Tab. 2. - Nastavení parametrů regulátoru ze získaných hodnot z přechodové charakteristiky

	$k_P$	$T_I$	$T_D$
<b>P</b>	$\gamma \frac{1}{k}$	-	-
<b>PI</b>	$0,9\gamma \frac{1}{k}$	$3,5T_u$	-
<b>PD</b>	$1,2\gamma \frac{1}{k}$	-	$0,25T_u$
<b>PID</b>	$1,25\gamma \frac{1}{k}$	$2T_u$	$0,5T_u$

#### 4.1.3 Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky (Åströмова úprava)

Jedná se o podobnou metodu jako 4.1.2, která používá fiktivní dopravní zpoždění. Je opět vhodná pro aperiodické přechodové charakteristiky. Postup je obdobný jako v předchozím případě. Pro určení parametrů regulátoru se použije Tab. 3 [2], [3].

Obr. 6. - Určení parametrů  $a$ ,  $L$  z přechodové charakteristik regulované soustavy

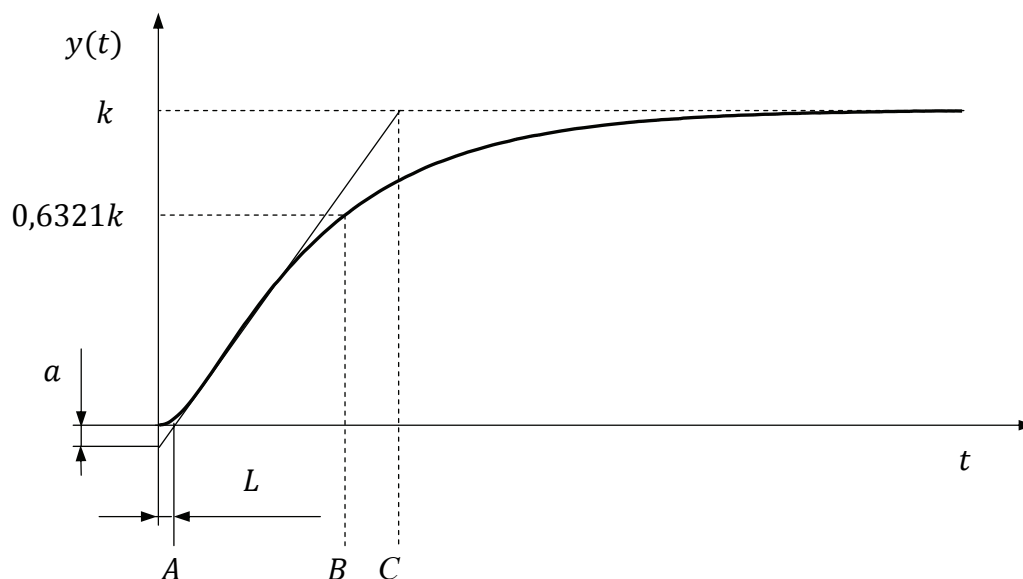
Tab. 3. - Nastavení parametrů regulátoru ze získaných hodnot podle Åströmovy úpravy

	$k_P$	$T_I$	$T_D$
<b>P</b>	$\frac{1}{a}$	-	-
<b>PI</b>	$0,9 \frac{1}{a}$	$3L$	-
<b>PID</b>	$1,25 \frac{1}{a}$	$2L$	$0,5L$

#### 4.1.4 Chien, Hrones a Reswickova metoda (CHR metoda)

Pro nastavení parametrů regulátoru musíme nejdříve určit následující parametry, a to parametr  $a$ ,  $L$  a  $T$ . Parametr  $T$  je časová konstanta, kterou můžeme určit dvěma způsoby.

První je určení  $T$  jako času, kdy přechodová charakteristika regulované soustavy dosáhne hodnoty  $0,6321k$  (vzdálenost AB – Obr. 7). Druhou možností je získat  $T$  z doby náběhu, potom platí  $T = T_n$  (vzdálenost AC - viz Obr. 7) [2], [3].

Obr. 7. - Určení parametrů  $a$ ,  $L$ ,  $T$  z přechodové charakteristiky regulované soustavy

Tab. 4. - Nastavení parametrů regulátoru pro CHR metodu

Překmit	0%			20%		
	$k_P$	$T_I$	$T_D$	$k_P$	$T_I$	$T_D$
<b>P</b>	$\frac{0,3}{a}$	-	-	$\frac{0,7}{a}$	-	-
<b>PI</b>	$\frac{0,35}{a}$	1,2T	-	$\frac{0,6}{a}$	T	-
<b>PID</b>	$\frac{0,6}{a}$	T	0,5L	$\frac{0,95}{a}$	1,4T	0,47L

Tab. 5. - Nastavení parametrů regulátoru při působení poruchy pro CHR metodu

Překmit	0%			20%		
	$k_P$	$T_I$	$T_D$	$k_P$	$T_I$	$T_D$
<b>P</b>	$\frac{0,3}{a}$	-	-	$\frac{0,7}{a}$	-	-
<b>PI</b>	$\frac{0,6}{a}$	4L	-	$\frac{0,7}{a}$	2,3L	-
<b>PID</b>	$\frac{0,95}{a}$	2,4L	0,42L	$\frac{1,2}{a}$	2L	0,42L

#### 4.1.5 Cohen-Coonova metoda

Metoda návrhu regulátoru vychází z přenosu tří-parametrového modelu:

$$G_S(s) = \frac{k}{1 + sT} e^{-sL} \quad (1)$$

Tato metoda dává poměr tlumení  $\frac{1}{4}$ , tzn. že bude mít odezvu u druhého kmitu čtvrtinu první amplitudy. Výpočet parametrů regulátoru je uveden v Tab. 6.

Tab. 6. - Parametry regulátoru pro Cohen-Coonovu metodu

	$k_P$	$T_I$	$T_D$
<b>P</b>	$\frac{1}{kr} \left(1 + \frac{r}{3}\right)$	-	-
<b>PI</b>	$\frac{1}{kr} \left(0,9 + \frac{r}{12}\right)$	$\frac{30 + 3r}{9 + 20r} L$	-
<b>PID</b>	$\frac{1}{kr} \left(\frac{4}{3} + \frac{r}{4}\right)$	$\frac{32 + 6r}{13 + 8r} L$	$\frac{4}{11 + 2r} L$

kde:  $r = \frac{L}{T}$

Parametry regulátoru mohou být vypočteny také využitím tzv. normalizovaného dopravního zpoždění  $\tau$  (Tab. 7).

Tab. 7. - Parametry regulátoru pro Cohen-Coonovu metodu (2. způsob výpočtu)

	$k_p$	$T_I$	$T_D$
<b>P</b>	$\frac{1}{a} \left( 1 + \frac{0,35\tau}{1-\tau} \right)$	-	-
<b>PI</b>	$\frac{0,9}{a} \left( 1 + \frac{0,092\tau}{1-\tau} \right)$	$\frac{3,3 + 3\tau}{1 + 1,2\tau} L$	-
<b>PD</b>	$\frac{1,24}{a} \left( 1 + \frac{0,13\tau}{1-\tau} \right)$	-	$\frac{0,27 - 0,36\tau}{1 - 0,87\tau} L$
<b>PID</b>	$\frac{1,35}{a} \left( 1 + \frac{0,18\tau}{1-\tau} \right)$	$\frac{2,5 + 2\tau}{1 - 0,39\tau} L$	$\frac{0,37 - 0,37\tau}{1 - 0,81\tau} L$

$$\text{kde: } r = \frac{L}{T}; \tau = \frac{L}{L+T}$$

#### 4.1.6 Fruehaufova metoda

Metoda vychází z přenosu tří-parametrového modelu:

$$G_s(s) = \frac{k}{1 + sT} e^{-sL} \quad (2)$$

V Tab. 8 jsou uvedeny výpočty parametrů jednotlivých regulátorů.

Tab. 8. - Parametry regulátoru pro Fruehaufovu metodu

	$k_p$	$T_I$	$T_D$
<b>PI-A</b>	$\frac{5T}{9kL}$	$5L$	-
<b>PI-B</b>	$\frac{T}{2kL}$	$T$	-
<b>PID-A</b>	$\frac{5T}{9kL}$	$5T$	$\leq 0,5L$
<b>PID-B</b>	$\frac{T}{2kL}$	$T$	$\leq 0,5L$

Kde: PI-A, PID-A: Nastavení parametrů regulátoru pro podmínku  $\frac{L}{T} < 0,33$

PI-B, PID-B: Nastavení parametrů regulátoru pro podmínku  $\frac{L}{T} \geq 0,33$

#### 4.1.7 Metoda vyváženého nastavení

Metoda návrhu regulátoru vychází z přenosu tří-parametrového modelu:

$$G_S(s) = \frac{k}{1 + sT} e^{-sL} \quad (3)$$

Tato metoda zabezpečuje kromě minimálního překmitu také vyváženost mezi proporcionálními a integračními zásahy a šetří akční členy. V Tab. 9 jsou uvedeny výpočty parametrů jednotlivých regulátorů s využitím tzv. normalizovaného dopravního zpoždění  $\tau$  a průměrné doby ustálení  $T_{ar}$ .

Tab. 9. - Parametry regulátoru pro metodu vyváženého nastavení

	$k_P$	$T_I$	$T_D$
PI	$\frac{1}{k} \left[ 1 - \frac{2\tau}{1 + \sqrt{1 + 2\tau^2}} \right]$	$\left[ \frac{1 + \sqrt{1 + 2\tau^2}}{2} - \tau \right] T_{ar}$	-
PID	$\frac{1}{k} \left[ 1 - \frac{2\tau}{1 + \sqrt{1 + 2\tau^2}} \right]$	$\left[ \frac{1 + \sqrt{1 + 2\tau^2}}{2} - \tau \right] T_{ar}$	$\leq \frac{T_I}{4}$

$$\text{kde: } T_{ar} = L + T, \tau = \frac{L}{L+T}$$

#### 4.1.8 Naslinova metoda

Naslim dokázal, že pokud pro koeficienty charakteristické rovnice:

$$a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 = 0 \quad (4)$$

platí nerovnosti:

$$a_i^2 \geq \alpha a_{i-1} a_{i+1} \text{ pro } i = 1, 2, \dots, (n - 1) \quad (5)$$

pak maximální přeregulování  $\Delta y_{max} [\%]$  (překmit) závisí na hodnotě  $\alpha$  podle Tab. 10.

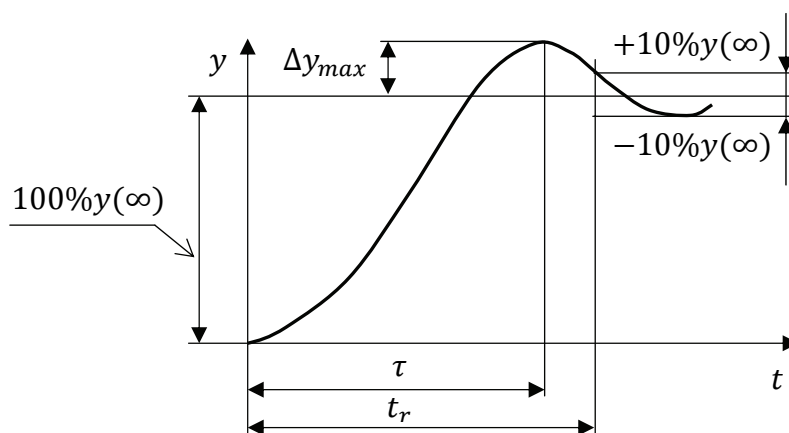
Tab. 10. - Závislost  $\Delta y_{max} [\%]$  na  $\alpha$  podle Naslima

$\alpha$	1,75	1,8	1,9	2	2,2	2,4
$\Delta y_{max} [\%]$	16	12	8	5	3	1

#### 4.1.9 Whiteleyova metoda

Metoda vychází ze vzorových typů přenosových funkcí uzavřeného regulačního obvodu, které udávají vyhovující regulační pochod a podle nich upravuje seřizením parametrů regulátorů

hodnoty koeficientů přenosové funkce v konkrétním případě tak, aby se koeficienty této konkrétní funkce a funkce vzorové navzájem rovnaly. Takové vzorové přenosové funkce zveřejnil Whiteley a nazval je standartními tvary přenosové funkce, která je poměrem obrazu veličiny výstupní a vstupní skokové funkce (řídící veličiny nebo poruchy). Standartní tvary zaručují, že při dodržení předepsaných koeficientů charakteristické rovnice (charakteristického mnohočlenu) pro daný typ přenosu regulačního obvodu se nepřekročí daná hodnota maximálního přeregulování, příp. i doba ustálení nebo jiné charakteristické veličiny regulačního pochodu.



Obr. 8. - Regulační pochod odpovídající standartnímu tvaru

Předpokládáme přenos řízení ve tvaru:

$$G_{W/Y}(s) = \frac{b_0}{a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0} \quad (6)$$

pro který najdeme předepsané koeficienty  $\bar{a}_i$  standartního tvaru pro daný stupeň:

$$G_{W/Y}(s) = \frac{\bar{b}_0}{\bar{a}_n s^n + \dots + \bar{a}_1 s + \bar{a}_0} \quad (7)$$

Obecně má přenos.  $G_{w/y}$   $a_n \neq 1, a_0 \neq 1$  Proto je nutno jej přetransformovat tak, aby:

$$a_n = a_0 = 1 \quad (8)$$

Postup je takový, že nejprve podělíme čitatele i jmenovatele koeficientem  $a_0$  a potom použijeme substituci:

$$s = \left(\frac{a_0}{a_n}\right)^{\frac{1}{n}} q \quad (9)$$

a dostaneme přenos ve tvaru: (10)

$$G_{W/Y}(q) = \frac{\frac{b_0}{a_0}}{\frac{a_n}{a_0} \left(\frac{a_0}{a_n}\right)^{\frac{n}{n}} q^n + \dots + \frac{a_2}{a_0} \left(\frac{a_0}{a_n}\right)^{\frac{2}{n}} q^2 + \frac{a_1}{a_0} \left(\frac{a_0}{a_n}\right)^{\frac{1}{n}} q + 1} = \frac{\beta_0}{\alpha_n q^n + \dots + \alpha_1 q + \alpha_0}$$

Koeficientům  $\alpha_i$  přiřadíme tabelované hodnoty  $\bar{\alpha}_i$  příslušného standartního tvaru z tabulky (Tab. 11) pro daný stupeň, tj.  $\bar{\alpha}_i = \alpha_i$ . Tím získáme vztahy, ze kterých pak vypočítáme vyšetřované hodnoty stavitelných parametrů regulátoru, které jsou zahrnuty v koeficientech  $\alpha_i$ .

Tabelované časy  $\tau^{tab}$ ,  $t_r^{tab}$  se přepočítají na skutečné dle vztahů:

$$\tau = \tau^{tab} \sqrt{\frac{a_0}{a_n}}; t_r = t_r^{tab} \sqrt{\frac{a_0}{a_n}} \quad (11)$$

Obdobným způsobem byly vypracovány tabulky koeficientů standartního tvaru pro přenosové funkce typu:

$$G_{W/Y}(s) = \frac{b_1 s + b_0}{a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0} \quad (12)$$

(jsou uvedeny v Tab. 12) a pro tvar přenosové funkce typu:

$$G_{W/Y}(q) = \frac{2s^2 + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0} \quad (13)$$

(jsou uvedeny v Tab. 13) [4].

Tab. 11. - Standartní tvary přenosové funkce typu (6)

Stupeň $n$	koeficienty							charakteristické hodnoty regulovaného pochodu		
	$\bar{a}_6$	$\bar{a}_5$	$\bar{a}_4$	$\bar{a}_3$	$\bar{a}_2$	$\bar{a}_1$	$\bar{a}_0$	$\tau^{tab}$ [s]	$t_r^{tab}$ [s]	$\Delta y_{max}$ [%]
2					1	1,4	1	2,65	7	5
3				1	2	2	1	3,35	9,5	8,7
4			1	2,6	3,4	2,6	1	4,25	15	11,7
5		1	3,2	5,2	5,2	3,2	1	4,95	>18	13
6	1	3,7	7,5	9,1	7,5	3,7	1	5,55		13,3



Tab. 12. - Standardní tvary přenosové funkce typu (12)

Stupeň $n$	koeficienty							charakteristické hodnoty regulovaného pochodu		
	$\bar{a}_6$	$\bar{a}_5$	$\bar{a}_4$	$\bar{a}_3$	$\bar{a}_2$	$\bar{a}_1$	$\bar{a}_0$	$\tau^{tab} [s]$	$t_r^{tab} [s]$	$\Delta y_{max} [\%]$
2					1	2,5	1	2		10
3				1	5,1	6,3	1	4,1		10
4			1	7,2	16	12	1	5,5		10
5		1	9	29	38	18	1	6,8		10
6	1	11	43	83	73	25	1	8		10

Tab. 13. - Standardní tvary přenosové funkce typu (13)

Stupeň $n$	koeficienty							charakteristické hodnoty regulovaného pochodu		
	$\bar{a}_6$	$\bar{a}_5$	$\bar{a}_4$	$\bar{a}_3$	$\bar{a}_2$	$\bar{a}_1$	$\bar{a}_0$	$\tau^{tab} [s]$	$t_r^{tab} [s]$	$\Delta y_{max} [\%]$
3				1	6,7	6,7	1	3,5		10
4			1	7,9	15	7,9	1	5,4		15
5		1	18	69	69	18	1	6,5		20
6	1	36	251	485	251	36	1	8		20

#### 4.1.10 Metoda požadovaného modelu

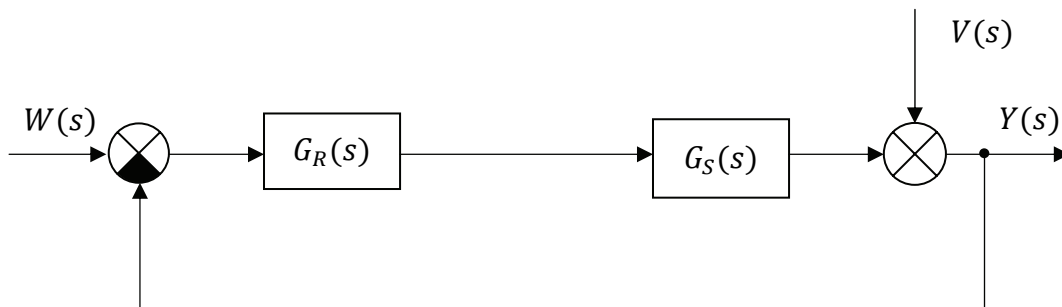
Tuto metodu lze použít pro regulaci soustav s i bez dopravního zpoždění.

Velkou výhodou této metody je, že se dá použít jak pro spojitou tak i pro diskrétní regulaci.

Na následujícím obrázku je zobrazeno schéma uzavřeného regulačního obvodu, ve kterém je použit konvenční regulátor (přenosem  $G_R(s)$  podle tabulky (Tab. 6. 14)).

kde:

$G_R(s)$  - přenos regulátoru,  $G_S(s)$  - přenos soustavy,  $W(s)$  - obraz žádané veličiny,  $V(s)$  - obraz poruchové veličiny a  $Y(s)$  - obraz regulované veličiny.



Obr. 9. - Schéma regulačního obvodu k metodě požadovaného modelu

Přestože tuto metodu podle tohoto schématu lze použít i pro působení poruchy, v této práci ji však zanedbáváme z důsledku zjednodušujících podmínek.

Přenos regulátoru  $G_R(s)$ , který zajistí požadovaný přenos řízení  $G_{W/Y}(s)$  je dán vztahem:

$$G_R(s) = \frac{G_{W/Y}(s)}{G_S(s)(1 - G_{W/Y}(s))} \quad (14)$$

Metoda návrhu regulátoru na základě předchozího vztahu se nazývá metodou kompenzační nebo metodou přímého návrhu.

Tab. 14. - Přenosy konvenčních regulátorů použitých u metody požadovaného modelu

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

kde:

$k_P$  - zesílení regulátoru,  $T_I$  - integrační časová konstanta,  $T_D$  - derivační časová konstanta

Přenos řízení se zde předpokládá ve tvaru:

$$G_{W/Y}(s) = \frac{k_O}{s + k_O} e^{-Ls} \quad (15)$$

jehož dva dominantní póly jsou porovnány s dvojicí pólů:

$$s_{1,2} = -\omega \cot(\gamma) \pm j\omega \quad (16)$$

$$\gamma = \arccos \xi_W \quad (17)$$

$L$  - přenosu (Obr. 6. 33):

$$G_R(s) = \frac{\omega_W^2}{s^2 + 2\xi_W \omega_W s + \omega_W^2} e^{-Ls} \quad (18)$$

kde:

$k_O$  - zesílení otevřeného regulačního obvodu

$\xi_W, \omega_W$  - poměrné tlumení a netlumený úhlový kmitočet uzavřeného regulačního obvodu

$\omega$  - úhlový kmitočet

$L$  - dopravní zpoždění

Po dalších úpravách dostaneme vztah:

$$k_O L = \frac{\gamma}{e^\gamma \cot(\gamma) \sin(\gamma)} \quad (19)$$

který vyjadřuje závislost zesílení otevřeného regulačního obvodu  $k_o$  a přenosu řízení (15) na poloze jeho dvou dominantních pólů, případně naopak (Obr. 10)

Na základě těchto poznatků pak můžeme určit dva mezní stavy a to:

- pro  $\gamma = 0$  dostaneme dvojnásobný reálný pól:

$$s_{1,2} = -\frac{1}{L} \quad (20)$$

kterému odpovídá zesílení otevřeného regulačního obvodu s regulátorem  $k_o^a$ , zajišťující mezní aperiodický průběh regulované veličiny, potom platí:

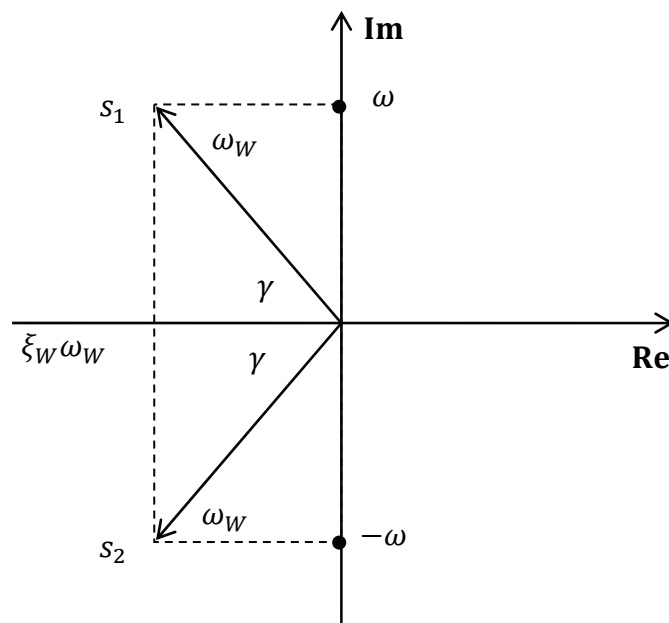
$$k_o^a = \frac{1}{L} \lim_{\gamma \rightarrow 0} (k_o L) = \frac{1}{eL} \quad (21)$$

- pro  $\gamma = \frac{\pi}{2}$  dostaneme dva ryze imaginární póly:

$$s_{1,2} = \pm j \frac{\pi}{2L} \quad (22)$$

kterým odpovídá zesílení otevřeného regulačního obvodu s regulátorem  $k_o^k$ , zajišťující kmitavý průběh regulované veličiny, potom platí:

$$k_o^k = \frac{1}{L} \lim_{\gamma \rightarrow \frac{\pi}{2}} (k_o L) = \frac{\pi}{2L} \quad (23)$$



Obr. 10. - Rozložení pólů přenosu řízení v komplexní rovině

Na základě vztahů (14), (15) lze pro regulované reprezentativní typy soustav s přenosem  $G_S(s)$  - uvedeným v tabulce (Tab. 16) určit přenos doporučeného regulátoru  $G_R(s)$  a hodnoty jeho nastavitelných parametrů, tj.:

$$G_R(s) = \frac{a_0}{sG_S(s)} e^{-Ls} \quad (24)$$

kde:

$a_0$  - numericky určená hodnota zesílení otevřeného regulačního obvodu s dopravním zpožděním

Lineární regulační plocha  $I_W$  uzavřeného obvodu se určí podle vztahu:

$$I_W = \lim_{s \rightarrow 0} \left\{ [1 - G_W(s)] \frac{1}{s} \right\} \quad (25)$$

### Soustava s dopravním zpožděním

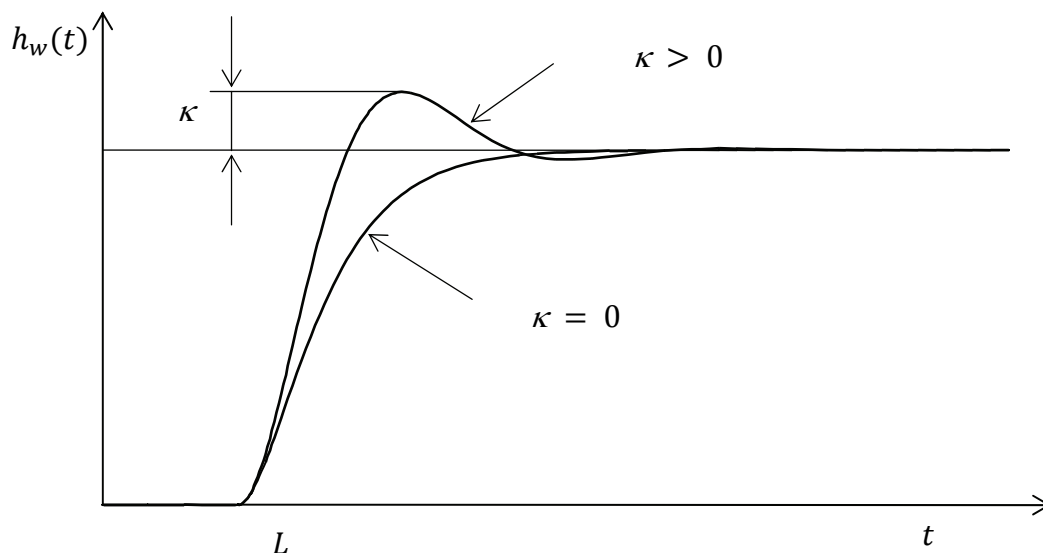
U těchto typů soustav je možné zajistit si požadovaný relativní překmit  $\kappa$  (Obr. 11) regulované veličiny. pomocí zesílení otevřeného regulačního obvodu  $a_0$  podle vztahu:

$$a_0 = \frac{1}{\beta L} \quad (26)$$

kde:  $\beta$  - koeficient pro výpočet zesílení otevřeného regulačního obvodu uvedený v tabulce (Tab. 15)

Lineární regulační plocha  $I_W(\kappa = 0)$  uzavřeného regulačního obvodu se určí na základě vztahů (14) a (24), po jejichž úpravě dostaneme:

$$I_W = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s + k_0^a e^{-Ls}} = \frac{1}{k_0^a} = e^L \quad (27)$$



Obr. 11. - Přechodová charakteristika uzavřeného obvodu s dopravním zpožděním

Tab. 15. - Koeficient  $\beta$  pro výpočet zesílení otevřeného regulačního obvodu

$\kappa$	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

### Soustava bez dopravního zpoždění

U těchto typů soustav se vychází z požadavku, aby regulační obvod s regulátorem měl přenos řízení (Obr. 12):

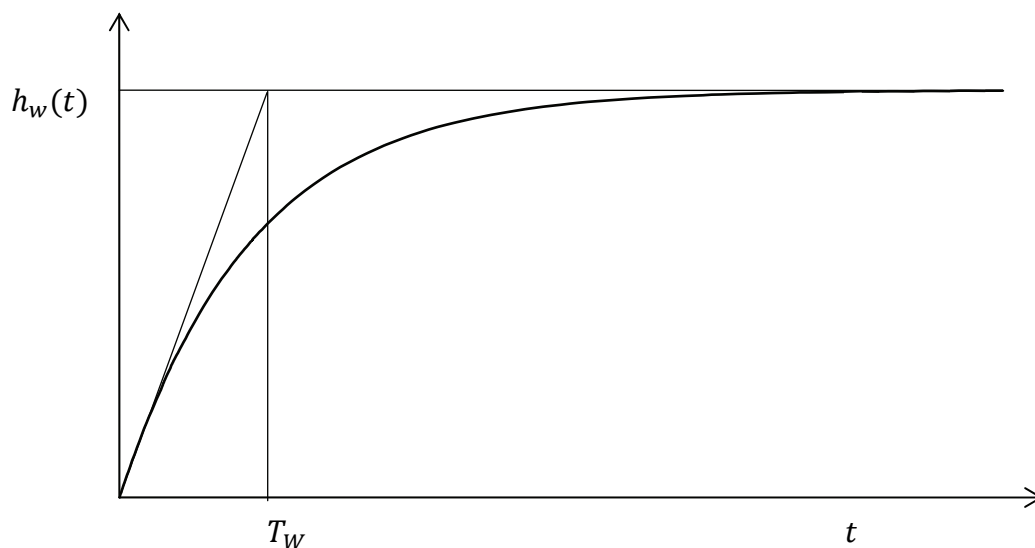
$$G_{W/Y}(s) = \frac{1}{T_W s + 1} \quad (28)$$

kde:

$T_W$  - časová konstanta uzavřeného obvodu (volí se s ohledem na omezení akční veličiny)

Lineární regulační plocha  $I_W$  ( $\kappa = 0$ ) uzavřeného regulačního obvodu se určí na základě vztahů (25) a (28), po jejichž úpravě dostaneme:

$$I_W = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{T_W}{T_W s + 1} = T_W \quad (29)$$



Obr. 12. - Přechodová charakteristika uzavřeného obvodu bez dopravního zpoždění

V následující tabulce (Tab. 16) jsou uvedeny optimální nastavitelné parametry jednotlivých regulátorů pro dané typy soustav [2],[4].

Tab. 16. - Určení nastavitelných parametrů regulátoru pro metodu požadovaného modelu

Regulovaná soustava	Typ	$L^*$		$T_I^*$	$T_D^*$
		$L = 0$	$L > 0$		
$G_s(s) = \frac{k_1}{s} e^{-Ls}$	$P$	$\frac{1}{k_1 T_W}$	$\frac{a_0}{k_1}$	-	-
$G_s(s) = \frac{k_1}{(T_1 s + 1)} e^{-Ls}$	$PI$	$\frac{T_1}{k_1 T_W}$	$\frac{a_0}{k_1}$	$T_1$	-
$G_s(s) = \frac{k_1}{s(T_1 s + 1)} e^{-Ls}$	$PD$	$\frac{1}{k_1 T_W}$	$\frac{a_0}{k_1}$	-	$T_1$
$G_s(s) = \frac{k_1}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-Ls}, T_1 \geq T_2$	$PID$	$\frac{T_1}{k_1 T_W}$	$\frac{a_0 T_1}{k_1}$	$T_1 + T_2$	$\frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2}$
$G_s(s) = \frac{k_1}{(T_0^2 s^2 + 2\xi T_0 s + 1)} e^{-Ls},$ $0,5 < \xi \leq 1$	$PID$	$\frac{T_1}{k_1 T_W}$	$\frac{a_0 T_1}{k_1}$	$2\xi T_0$	$\frac{T_0}{2\xi}$

kde :

\* - optimální (doporučená) hodnota,

$T_i$  - časové konstanty ( $i = 0, 1, 2$ ),

$\xi$  - poměrné tlumení

## 4.2 Aproximace dopravního zpoždění

Protože k výpočtu parametrů regulátoru, které jsou uvedeny v kapitole 4.1, používáme přenos regulované soustavy s dopravním zpožděním, je nutno tento přenos nejprve aproximovat pomocí některé z metod aproximace dopravního zpoždění.

Existuje několik způsobů aproximace dopravního zpoždění, zde jsou uvedeny tři způsoby.

### Padeho aproximace

Tato aproximace je vyjádřena poměrem dvou funkcí:

$$e^{-sL} \approx \frac{P_n(s)}{Q_n(s)} \quad (30)$$

kde:

$$P_n(s) = 1 - \frac{sL}{2} + \frac{n(n-1)}{2n(2n-1)} \frac{s^2 L^2}{2!} - \dots + \frac{(-1)^n n!}{(2n)!} s^n L^n$$

$$Q_n(s) = 1 + \frac{sL}{2} + \frac{n(n-1)}{2n(2n-1)} \frac{s^2 L^2}{2!} + \dots + \frac{n!}{(2n)!} s^n L^n$$

Volbou „ $n$ “ lze ovlivnit přesnost aproximace, např.:

- pro  $n = 2$  lze uspokojivě použít pro úhlový kmitočť:

$$0 \leq \omega \leq \frac{2}{L}$$

- pro  $n = 4$  lze uspokojivě použít pro úhlový kmitočť:

$$0 \leq \omega \leq \frac{6}{L}$$

Nejčastěji je používána Padeho aproximace ve zjednodušeném tvaru ( $n = 1$ ):

$$e^{-sL} \approx \frac{1 - \frac{sL}{2}}{1 + \frac{sL}{2}} \quad (31)$$

### Taylorova aproximace čitatele

Tato aproximace je vyjádřena ve tvaru:

$$e^{-sL} = (1 - Ls + \dots) \approx \sum_{n=10}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} (Ls)^n \quad (32)$$

Pro  $n = 1$  platí:

$$e^{-sL} \approx 1 - Ls \quad (33)$$

### Taylorova aproximace jmenovatele

Tato aproximace je vyjádřena ve tvaru:

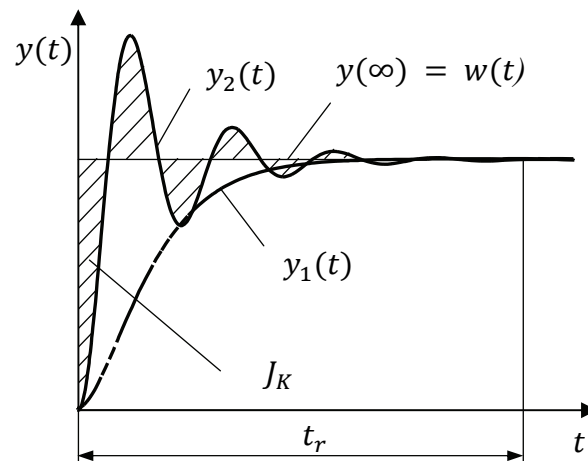
$$e^{-sL} = \frac{1}{e^{sL}} = \frac{1}{(1 + Ls + \dots)} \approx \frac{1}{\sum_{n=10}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} (Ls)^n} \quad (34)$$

Pro  $n = 1$  platí:

$$e^{-sL} \approx \frac{1}{1 + Ls}$$

## 4.3 Kvalita regulace

Pro srovnání jednotlivých regulačních pochodů byla zvolena metoda kvadratické regulační plochy. Tato metoda určuje kvalitu regulace z kvadratické regulační plochy, která leží mezi přechodovou charakteristikou a žádanou hodnotou regulačního obvodu (35). Platí, že čím menší je hodnota kvadratické regulační plochy  $J_K$ , tím je kvalita regulace větší [2].



Obr. 13. - Regulační pochody kmitavé ( $y_1(t)$ ) a periodické ( $y_2(t)$ ) vyvolané změnou žádané hodnoty  $w$  nebo vznikem poruchy  $v$

Výpočet kvadratické regulační plochy ( $J_K$ ) je proveden podle vztahu:

$$J_K = \int_0^{\infty} [y(t) - y(\infty)]^2 dt = \int_0^{\infty} [y(t) - w(t)]^2 dt \approx \int_0^{t_r} [y(t) - w(t)]^2 dt \quad (35)$$

Výhodou tohoto kritéria je, že se dá využít nejen pro aperiodické průběhy, ale i pro periodické průběhy, kde je, díky mocnině druhého řádu, zabráněno případnému zkreslení při výpočtu regulační plochy. Cílem úspěšnosti seřizování regulátoru je, aby uvedený integrál (regulační plocha) byla minimální, tj.  $J_K \rightarrow \min$ .



## 5. POPIS INTEGROVANÉHO VÝVOJOVÉHO PROSTŘEDÍ MATLAB

MATLAB je integrované prostředí pro vědeckotechnické výpočty, modelování, simulace, prezentaci a analýzu dat. Jádrem MATLABu jsou algoritmy pro operace s maticemi komplexních čísel. MATLAB umožňuje provádět běžné operace jako násobení, inverze, determinant atd. a v nejjednodušší podobě jej lze použít jako maticový kalkulátor, protože všechny tyto operace se zapisují téměř tak, jako bychom je psali na papíře. Vektor reálných čísel může v MATLABu reprezentovat i polynom a operace s polynomy jsou v programu rovněž obsaženy. Vektory také mohou reprezentovat časové řady nebo signály a MATLAB obsahuje funkce pro jejich analýzu, jako je hledání extrémů, výpočet střední hodnoty, směrodatné odchylky a korelační koeficienty nebo rychlou Fourierovu transformaci. Součástí MATLABu je i programovací jazyk, který je daleko jednodušší než např. Fortran nebo C. Tento jazyk skýtá obrovský potenciál produktivity a tvořivosti.

MATLAB má široké možnosti ve zobrazování a prezentaci výsledků. Je možné kreslit různé druhy grafů: dvourozměrné, třírozměrné, histogramy, apod. MATLAB také umožňuje otevřít více oken pro zobrazení více grafů v jednom okně. Každému objektu v okně je přiřazen identifikátor, jehož prostřednictvím je možné měnit vlastnosti objektu a tím i jeho vzhled.

Otevřená architektura MATLABu vedla ke vzniku knihoven funkcí, nazývaných toolboxy, které rozšiřují jeho použití v příslušných vědních a technických oborech. Tyto knihovny jsou napsané v převážné míře v jazyku MATLABu a nabízejí předzpracované specializované funkce, které je možno rozšiřovat, modifikovat, anebo jen čerpat informace z přehledně dokumentovaných algoritmů.

Control System Toolbox je aplikační knihovna, která rozšiřuje systém MATLAB o nástroje pro řídicí techniku a teorii systémů. Funkce z oblasti analýzy a návrhu řídicích systémů využívají jak klasické přechodové charakteristiky, tak i popisy systémů ve stavovém prostoru.

SIMULINK je program pro simulaci a modelování dynamických systémů, který využívá algoritmy MATLABu pro numerické řešení nelineárních diferenciálních rovnic. Poskytuje možnost snadno a rychle vytvářet modely dynamických soustav ve formě blokových schémat a rovnic. Pomocí SIMULINKu a jeho grafického editoru lze vytvářet modely lineárních, nelineárních, v čase diskretních nebo spojitých systémů pouhým přesouváním funkčních bloků myší. SIMULINK také umožňuje spouštět některé části simulačního schématu na základě výsledku logické podmínky. Knihovnu SIMULINKu je možno snadno rozšiřovat o uživatelské bloky. Vlastnosti bloků lze nastavovat i přímo z okna MATLABu formou volání m-funkcí, což

je zvláště vhodné při přípravě počátečních podmínek. Bloky mohou být i prosté m-funkce nebo tzv. s-funkce. Pomocí menu SIMULINKu lze nastavit parametry simulace, jako je doba simulace, algoritmus řešení diferenciálních rovnic a tedy tím ovlivňovat běh simulačního experimentu.

Vývoj simulace můžeme sledovat přímo v jejím průběhu. Výsledná data lze uložit do souboru nebo do proměnné v MATLAB Worskpace [4].

## 6. SIMULACE REGULAČNÍHO POCHODU PRO RŮZNÉ METODY NASTAVENÍ REGULÁTORU

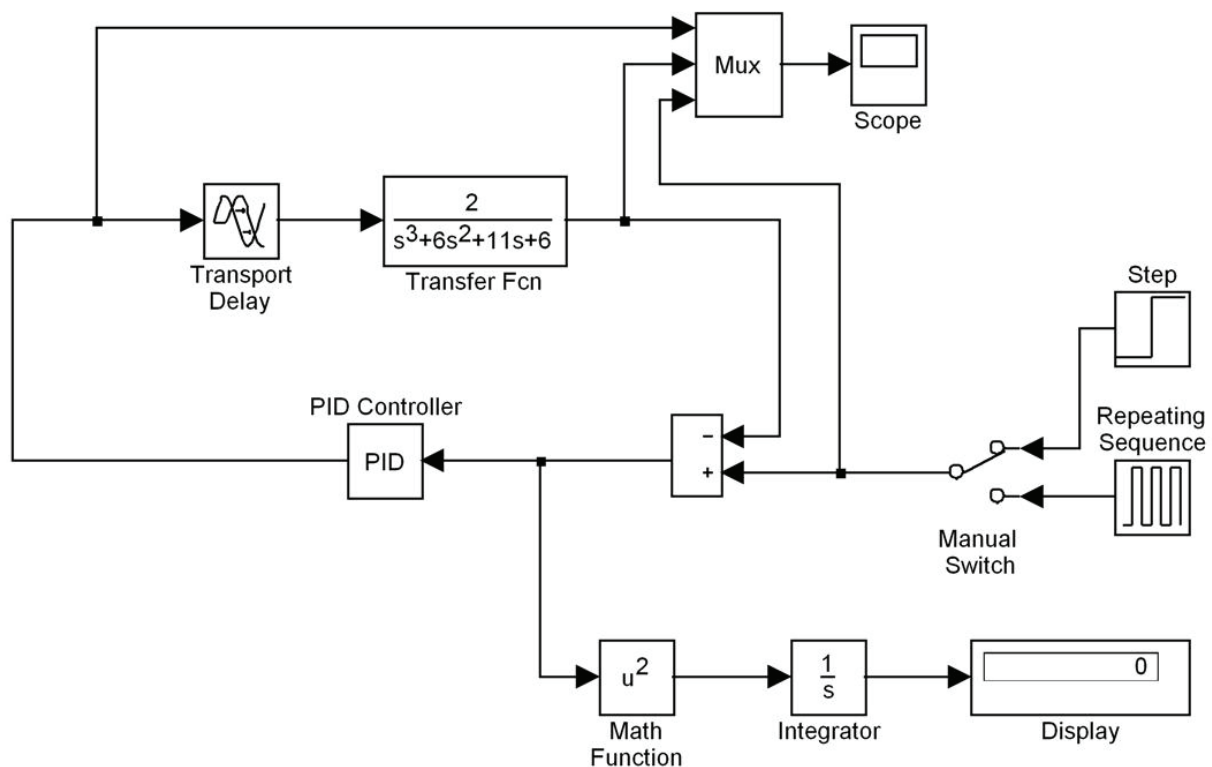
V této části práce se budeme podrobněji zabývat návrhem parametrů regulátoru pro vybrané metody syntézy (viz kapitola 4).

Parametry regulátoru budeme dále počítat pro tyto přenosy regulované soustavy:

$$1) G_S(s) = \frac{2}{s^3 + 6s^2 + 11s + 6} \quad (36)$$

$$2) G_S(s) = \frac{1}{3s + 1} e^{-5s} \quad (37)$$

Po výpočtu parametrů regulátoru k přenosům (36) i (37) pro jednotlivé metody syntézy budeme zadávat hodnoty do uzavřeného regulačního obvodu programu Matlab/Simulink, jehož schéma je na Obr. 10.



Obr. 14. - Schéma uzavřeného regulačního obvodu vytvořeného v programu Matlab/Simulink

V jednotlivých průbězích regulace (Obr. 11 až Obr. 30) jsou v legendě uvedeny veličiny  $u$  – akční veličina,  $y$  – regulovaná veličina,  $w$  – žádaná veličina.

## 6.1. Typ proporcionální regulované soustavy bez dopravního zpoždění

### 6.1.1. Z-N metoda kritického zesílení

Určeme parametry regulátoru pomocí výše uvedené metody syntézy. Uvažujme přitom přenos soustavy a regulátoru ve tvaru:

$$G_S(s) = \frac{2}{s^3 + 6s^2 + 11s + 6}$$

Přenos regulátoru:

$$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$

Při výpočtu kritických hodnot má regulátor v obvodu pouze P složku, tzn.  $r_0$ , resp.  $k_P$ .

Určení požadovaných hodnot dané metody syntézy a výpočet stavitelných parametrů regulátoru:

- přenos řízení:

$$G_{W/Y}(s) = \frac{G_R(s)G_S(s)}{1 + G_R(s)G_S(s)} = \frac{2r_0}{s^3 + 6s^2 + 11s + (6 + 2r_0)} = \frac{L(s)}{F(s)}$$

- charakteristický polynom uzavřeného regulačního obvodu (URO):

$$F(s) = s^3 + 6s^2 + 11s + (6 + 2r_0)$$

- k určení  $r_{0k}$  použijeme např. Hurwitzovo kritérium:

$$H = \begin{vmatrix} 6 & 6 + 2r_0 & 0 \\ 1 & 11 & s \\ 0 & 6 & 6 + 2r_0 \end{vmatrix} \quad H_2 = \begin{vmatrix} 6 & 6 + 2r_0 \\ 1 & 11 \end{vmatrix}$$

Aby byl obvod na hranici stability musí platit  $H_{n-1} = 0$  tedy  $H_2 = 0$

$$66 - 6 - 2r_0 = 0 \Rightarrow r_0 = r_{0k} = 30$$

Pro  $r_{0k}$  kmitá obvod s p eriodou  $T_k = \frac{2\pi}{\omega_k}$ , potřebujeme tedy určit úhlový kmitočet  $\omega_k$ .

- použijeme nějaké frekvenční kritérium, např. Michajlovovo-Leonhardovo:

$$\begin{aligned} F(j\omega_k) &= F(s)|_{s=j\omega_k} = (j\omega_k)^3 + 6(j\omega_k)^2 + 11(j\omega_k) + 6 + 2r_0 = \\ &= U(\omega_k) + jV(\omega_k) \end{aligned}$$

$$F(j\omega_k) = -j\omega_k^3 - 6\omega_k^2 + 11j\omega_k + 66 = U(66 - 6\omega_k^2) + jV(11\omega_k - \omega_k^3)$$

Nyní určíme buď z reálné nebo imaginární části  $\omega_k$ , přičemž platí pro obvod na hranici stability:

$$V(\omega_k) = 0 \quad U(\omega_k) = 0$$

$$U(\omega_k) = 0 \text{ tedy } 66 - 6\omega_k^2 = 0 \rightarrow \omega_k = \pm\sqrt{11}$$

Fyzikální význam má řešení:

$$\omega_k = \sqrt{11}$$

Kritická perioda kmitů:

$$T_k = \frac{2\pi}{\omega_k} = \frac{2\pi}{\sqrt{11}} = 1,8942$$

- vypočtené hodnoty:

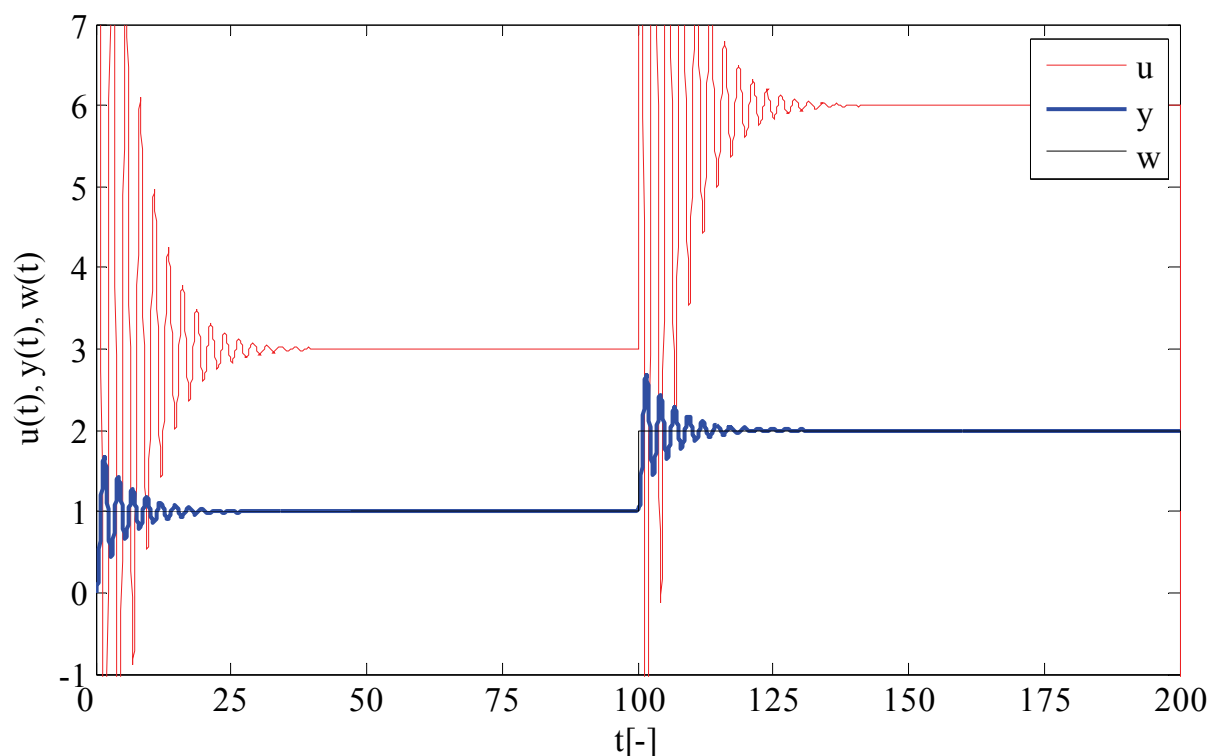
$$r_{0k} = 30; T_k = 1,8942$$

- parametry regulátoru:

$$r_0 = 13,5; r_{-1} = 8,5524, \text{ resp. } k_P = 13,5; T_I = 1,6101$$

- výsledný přenos regulátoru:

$$\underline{\underline{G_R(s) = 13,5 + \frac{8,5524}{s} = 13,5 \left(1 + \frac{1}{1,6101s}\right)}}$$



Obr. 15. - Průběh regulace pro přenos (36) pro nastavení parametrů regulátoru získaných Z-N metodou (skutečný průběh  $u$  je od  $-6,547$  do  $18,62$ )

### 6.1.2. Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky

Určeme parametry regulátoru pomocí výše uvedené metody syntézy. Uvažujme přitom přenos soustavy a regulátoru ve tvaru:

$$G_S(s) = \frac{2}{s^3 + 6s^2 + 11s + 6}$$

Přenos regulátoru:

$$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$

Určení požadovaných hodnot dané metody syntézy a výpočet stavitelných parametrů regulátoru:

- naměřené hodnoty:

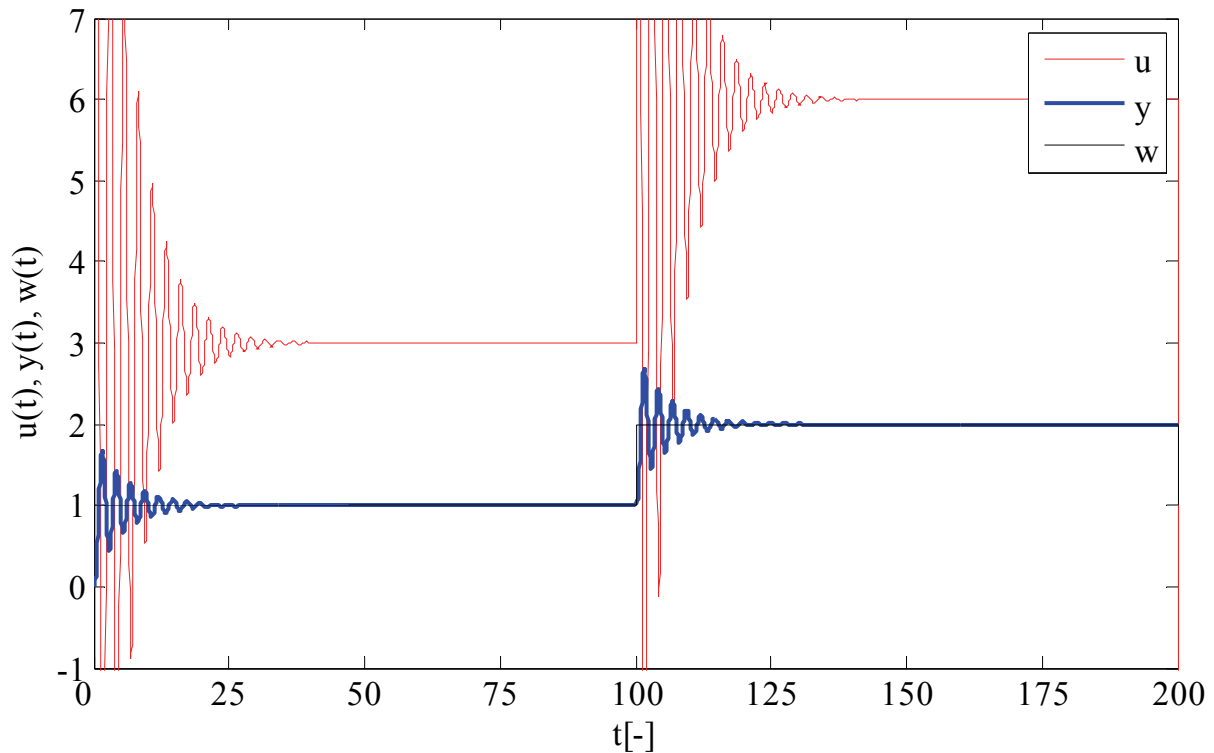
$$T_u = 0,4318; \quad T_n = 2,2495; \quad k = 0,3332 \rightarrow \gamma = \frac{T_n}{T_u} = 5,2096$$

- parametry regulátoru:

$$k_P = 14,0715; \quad T_I = 1,5113 \rightarrow r_0 = 14,0715; \quad r_{-1} = \frac{k_P}{T_I} = 9,3109$$

- výsledný přenos regulátoru:

$$\underline{\underline{G_R(s) = 14,0715 + \frac{9,3109}{s} = 14,0715 \left( 1 + \frac{1}{1,5113s} \right)}}$$



Obr. 16. - Průběh regulace pro přenos (36) pro nastavení parametrů regulátoru z přechodové charakteristiky (skutečný průběh  $u$  je od -6,547 do 18,14)

### 6.1.3. Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky (Åströмова úprava)

Určeme parametry regulátoru pomocí výše uvedené metody syntézy. Uvažujme přitom přenos soustavy a regulátoru ve tvaru:

$$G_S(s) = \frac{2}{s^3 + 6s^2 + 11s + 6}$$

Přenos regulátoru:

$$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$

Určení požadovaných hodnot dané metody syntézy a výpočet stavitelných parametrů regulátoru:

- naměřené hodnoty:

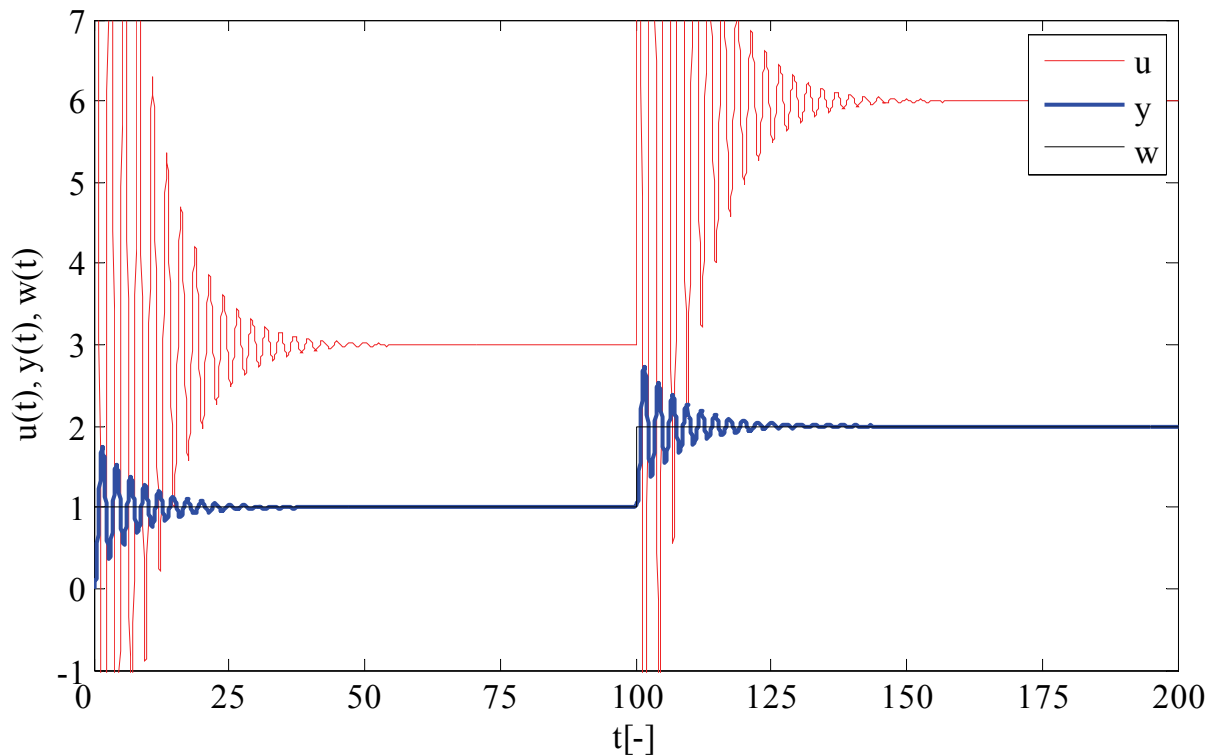
$$T_u = 0,4318; \quad T_n = 2,2495; \quad k = 0,3332 \rightarrow L = T_u = 0,4318; \quad a = \frac{k}{T_n} L = 0,064$$

- parametry regulátoru:

$$k_P = 14,0625; \quad T_I = 1,2955 \rightarrow r_0 = 14,0625; \quad r_{-1} = \frac{k_P}{T_I} = 10,8549$$

- výsledný přenos regulátoru:

$$\underline{\underline{G_R(s) = 14,0625 + \frac{10,8549}{s} = 14,0625 \left(1 + \frac{1}{1,2955s}\right)}}$$



Obr. 17. - Průběh regulace pro přenos (36) pro nastavení parametrů regulátoru z přechodové charakteristiky Åströmovou úpravou přechodové charakteristiky (skutečný průběh  $u$  je od -7,495 do 18,94)

#### 6.1.4. Chien, Hrones a Reswickova metoda (CHR metoda)

Určeme parametry regulátoru pomocí výše uvedené metody syntézy. Uvažujme přitom přenos soustavy a regulátoru ve tvaru:

$$G_S(s) = \frac{2}{s^3 + 6s^2 + 11s + 6}$$

Přenos regulátoru:

$$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_P \left(1 + \frac{1}{T_I s}\right)$$

Určení požadovaných hodnot dané metody syntézy a výpočet stavitelných parametrů regulátoru:



- naměřené hodnoty:

$$T_u = 0,4318; \quad T_n = 2,2495; \quad k = 0,3332 \rightarrow L = T_u = 0,4318; \quad a = \frac{k}{T_n}L = 0,064;$$

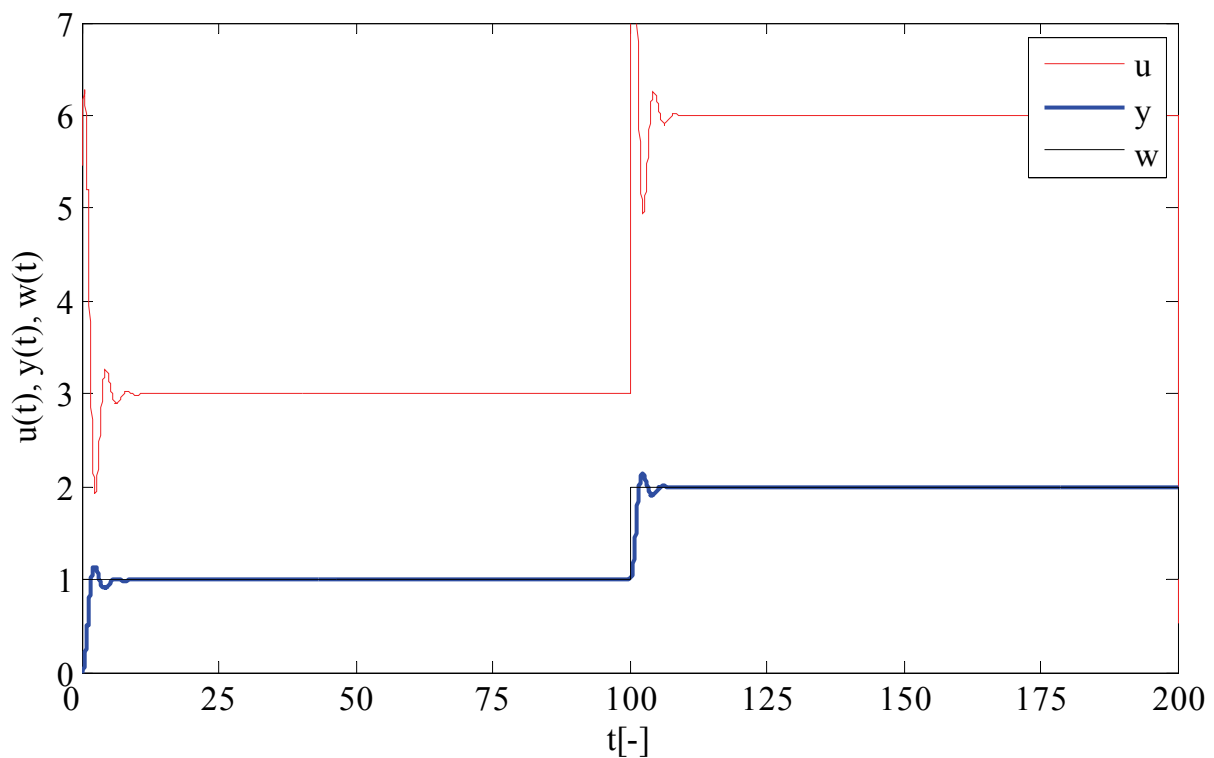
$$y(T) = 0,6321k \Rightarrow T = 1,5182$$

- parametry regulátoru:

$$k_p = 5,4688; \quad T_I = 1,8218 \rightarrow r_0 = 5,4688; \quad r_{-1} = \frac{k_p}{T_I} = 3,0019$$

- výsledný přenos regulátoru:

$$\underline{\underline{G_R(s) = 5,4688 + \frac{3,0019}{s} = 5,4688 \left(1 + \frac{1}{1,8218s}\right)}}$$



Obr. 18. - Průběh regulace pro přenos (36) pro nastavení parametrů regulátoru CHR metodou  
(skutečný průběh  $u$  je od 2,017 do 9,232)

### 6.1.5. Cohen-Coonova metoda

Určeme parametry regulátoru pomocí výše uvedené metody syntézy. Uvažujme přitom přenos soustavy a regulátoru ve tvaru:

$$G_S(s) = \frac{2}{s^3 + 6s^2 + 11s + 6}$$

Přenos regulované soustavy musíme upravit na typizovaný přenos:

$$G_S(s) = \frac{2}{s^3 + 6s^2 + 11s + 6} = G_{upr,s}(s) = \frac{0,3332}{(1,5182s+1)} e^{-0,4318}$$

určeno z PCH reg. soustavy pro  $y(T) = 0,6321k$

Přenos regulátoru:

$$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$

Určení požadovaných hodnot dané metody syntézy a výpočet stavitelných parametrů regulátoru:

- získané hodnoty:

$$k = 0,3332; \quad T = 1,5182; \quad L = 0,4318$$

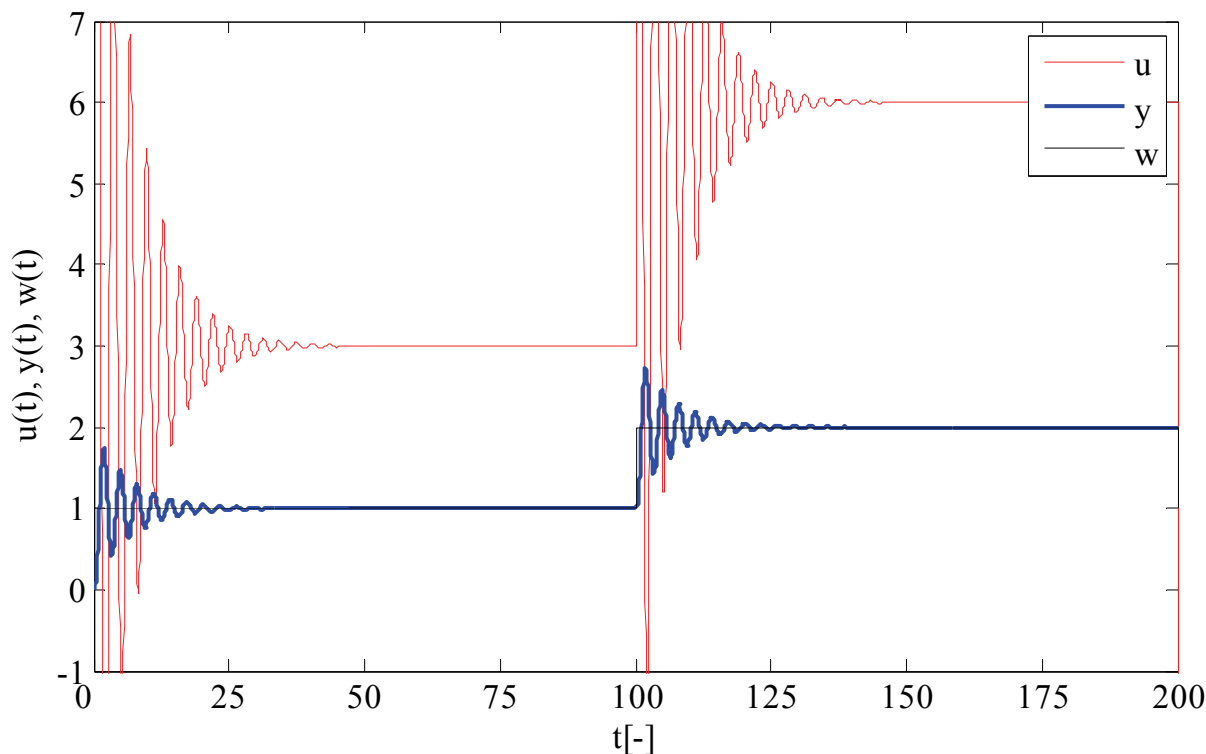
- parametry regulátoru:

$$r = \frac{L}{T} = 0,2844; \quad k_P = 9,7478; \quad T_I = 0,9070 \rightarrow r_0 = 9,7478;$$

$$r_{-1} = \frac{k_P}{T_I} = 10,7473$$

- výsledný přenos regulátoru:

$$G_R(s) = \underline{\underline{9,7478 + \frac{10,7473}{s} = 9,7478 \left( 1 + \frac{1}{0,9070s} \right)}}$$



Obr. 19. - Průběh regulace pro přenos (36) pro nastavení parametrů regulátoru Cohen-Coonovou metodou (skutečný průběh  $u$  je od  $-4,563$  do  $15,65$ )

### 6.1.6. Fruehaufova metoda

Určíme parametry regulátoru pomocí výše uvedené metody syntézy. Uvažujme přitom přenos soustavy a regulátoru ve tvaru:

$$G_S(s) = \frac{2}{s^3 + 6s^2 + 11s + 6}$$

Přenos regulované soustavy musíme upravit na typizovaný přenos:

$$G_S(s) = \frac{2}{s^3 + 6s^2 + 11s + 6} = G_{upr,s}(s) = \frac{0,3332}{(1,5182s+1)} e^{-0,4318}$$

určeno z PCH reg. soustavy pro  $y(T) = 0,6321k$

Přenos regulátoru:

$$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$

Určení požadovaných hodnot dané metody syntézy a výpočet stavitelných parametrů regulátoru:

- získané hodnoty:

$$k = 0,3332; \quad T = 1,5182; \quad L = 0,4318$$

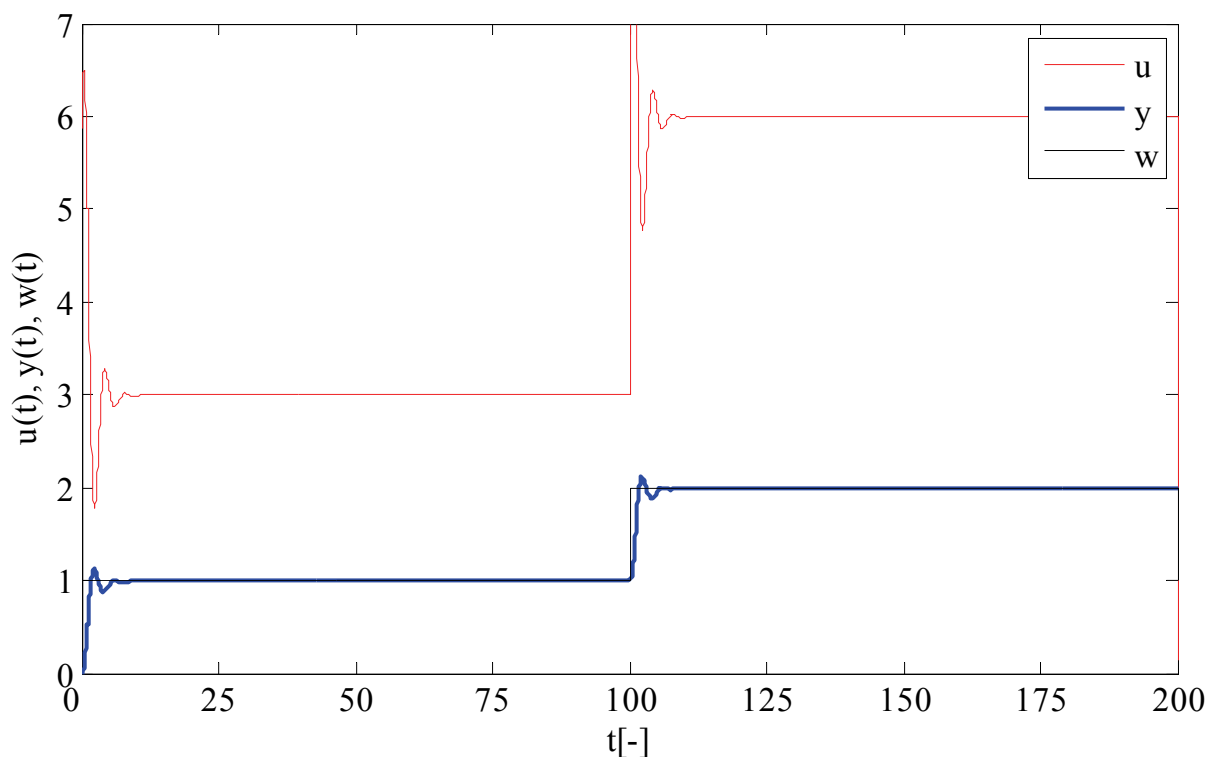
- parametry regulátoru:

$$r = \frac{L}{T} = 0,2844 < 0,33 \rightarrow PI - A; \quad k_p = 5,8622; \quad T_I = 2,159 \rightarrow r_0 = 5,8622;$$

$$r_{-1} = \frac{k_p}{T_I} = 2,7152$$

- výsledný přenos regulátoru:

$$\underline{\underline{G_R(s) = 5,8622 + \frac{2,7152}{s} = 5,8622 \left(1 + \frac{1}{2,159s}\right)}}$$



Obr. 20. - Průběh regulace pro přenos (36) pro nastavení parametrů regulátoru Fruehaufovou metodou.

### 6.1.7. Metoda vyváženého nastavení

Určeme parametry regulátoru pomocí výše uvedené metody syntézy. Uvažujme přitom přenos soustavy a regulátoru ve tvaru:

$$G_S(s) = \frac{2}{s^3 + 6s^2 + 11s + 6}$$

Přenos regulované soustavy musíme upravit na typizovaný přenos:

$$G_S(s) = \frac{2}{s^3 + 6s^2 + 11s + 6} = G_{upr,s}(s) = \frac{0,3332}{(1,5182s+1)} e^{-0,4318}$$

určeno z PCH reg. soustavy pro  $y(T) = 0,6321k$

Přenos regulátoru:

$$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$

Určení požadovaných hodnot dané metody syntézy a výpočet stavitelných parametrů regulátoru:

- získané hodnoty:

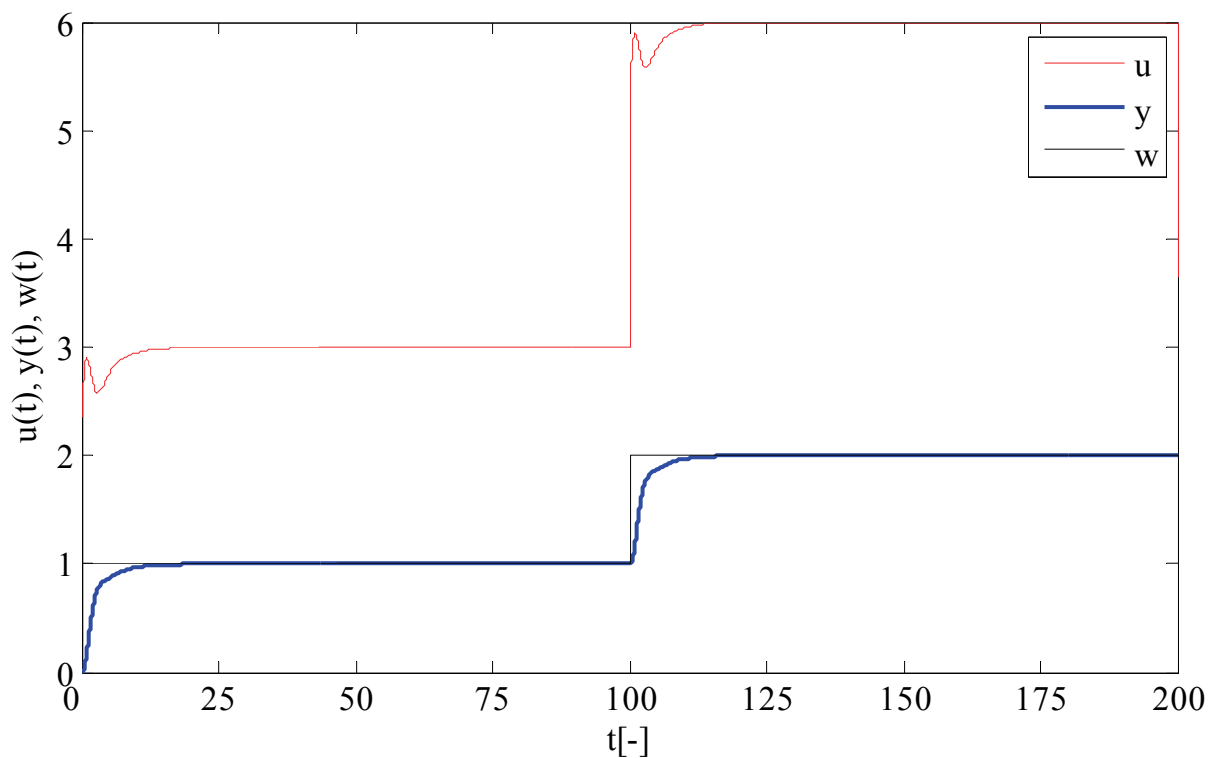
$$k = 0,3332; \quad T = 1,5182; \quad L = 0,4318; \quad T_{ar} = 1,95; \quad \tau = 0,2214$$

- parametry regulátoru:

$$k_P = 2,3523; \quad T_I = 1,565 \rightarrow r_0 = 2,3523; \quad r_{-1} = \frac{k_P}{T_I} = 1,1531$$

- výsledný přenos regulátoru:

$$\underline{\underline{G_R(s) = 2,3523 + \frac{1,1531}{s} = 2,3523 \left( 1 + \frac{1}{1,565s} \right)}}$$



Obr. 21. - Průběh regulace pro přenos (36) pro nastavení parametrů regulátoru metodou vyváženého nastavení

### 6.1.8. Naslinova metoda

Přechodová charakteristika byla získána z přenosu regulované soustavy:

$$G_S(s) = \frac{2}{s^3 + 6s^2 + 11s + 6}$$

Přenos regulátoru:

$$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$

- určíme přenos řízení:

$$\begin{aligned} G_{W/Y}(s) &= \frac{G_R(s)G_S(s)}{1 + G_R(s)G_S(s)} = \frac{\left(r_0 + \frac{r_{-1}}{s}\right) \left(\frac{2}{s^3 + 6s^2 + 11s + 6}\right)}{1 + \left(r_0 + \frac{r_{-1}}{s}\right) \left(\frac{2}{s^3 + 6s^2 + 11s + 6}\right)} = \\ &= \frac{2r_0s + 2r_{-1}}{s^4 + 6s^3 + 11s^2 + (6 + 2r_0)s + 2r_{-1}} \end{aligned}$$

- charakteristická rovnice:

$$s^4 + 6s^3 + 11s^2 + (6 + 2r_0)s + 2r_{-1}$$

$$a_i^2 \geq \alpha a_{i-1} a_{i+1} \text{ pro } i = 1, 2, \dots, (n - 1)$$

platí:

$$\text{pro } i = 1: (6 + 2r_0)^2 \geq 2 * 11 * 2r_{-1} \Rightarrow r_{-1} = 2,3108$$

$$\text{pro } i = 2: 121 \geq 2 * 6 * (6 + 2r_0) \Rightarrow r_0 = 2,0417$$

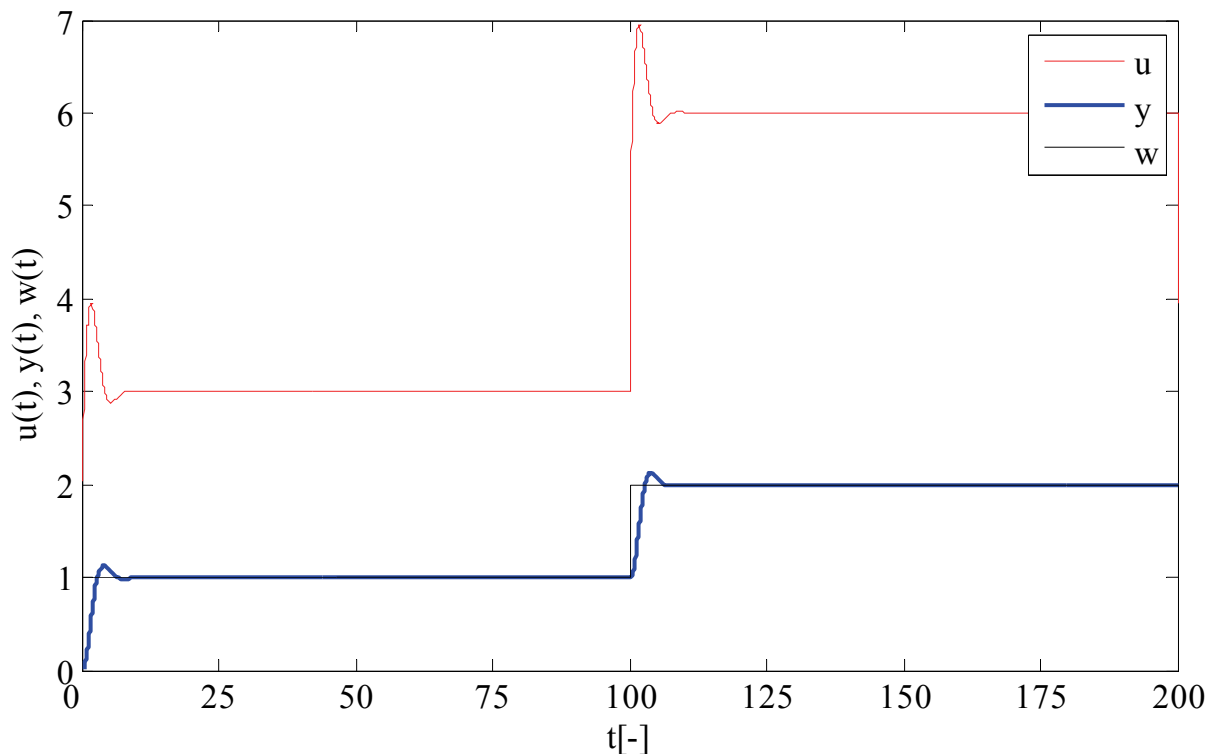
$$\text{pro } i = 3: 36 \geq 2 * 11 * 1 \rightarrow \text{podmínka je splněna vždy}$$

- parametry regulátoru:

$$r_0 = 2,0417; \quad r_{-1} = 2,3108 \rightarrow k_P = 2,0417; \quad T_I = \frac{r_0}{r_{-1}} = 0,8835$$

- výsledný přenos regulátoru:

$$\underline{\underline{G_R(s) = 2,0417 + \frac{2,3108}{s} = 2,0417 \left( 1 + \frac{1}{0,8835s} \right)}}$$



Obr. 22. - Průběh regulace pro přenos (36) pro nastavení parametrů regulátoru Naslinovou metodou

### 6.1.9. Whiteleyova metoda

Přechodová charakteristika byla získána z přenosu regulované soustavy:

$$G_S(s) = \frac{2}{s^3 + 6s^2 + 11s + 6}$$

Přenos regulátoru:

$$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$

- určíme přenos řízení:

$$G_w(s) = \frac{G_R(s)G_S(s)}{1 + G_R(s)G_S(s)} = \dots = \frac{2r_0s + 2r_{-1}}{s^4 + 6s^3 + 11s^2 + (6 + 2r_0)s + 2r_{-1}}$$

Standartní tvar přenosu získáme:

dělením všech koeficientů přenosu hodnotou  $a_0 = 2r_{-1}$ ,

zavedením a použitím substitute:

$$s = \left( \frac{a_0}{a_n} \right)^{\frac{1}{n}} q = \left( \frac{2r_{-1}}{1} \right)^{\frac{1}{4}} q$$

Postupně tedy získáme:

$$G_{W/Y}(s) = \frac{\frac{2r_0}{2r_{-1}}s + 1}{\frac{1}{2r_{-1}}s^4 + \frac{6}{2r_{-1}}s^3 + \frac{11}{2r_{-1}}s^2 + \left(\frac{6+2r_0}{2r_{-1}}\right)s + 1}$$

$$G_{W/Y}(s) = \frac{\frac{r_0}{r_{-1}}(r_{-1})^{\frac{1}{4}}q + 1}{\frac{1}{2r_{-1}}(2r_{-1})^{\frac{4}{4}}q^4 + \frac{6}{2r_{-1}}(2r_{-1})^{\frac{3}{4}}q^3 + \frac{11}{2r_{-1}}(2r_{-1})^{\frac{2}{4}}q^2 + \left(\frac{6+2r_0}{2r_{-1}}\right)(2r_{-1})^{\frac{1}{4}}q + 1}$$

Vzniklé koeficienty  $\alpha_i$  charakteristické rovnice se porovnají s koeficienty standartního tvaru v odpovídající tabulce pro čtvrtý stupeň charakteristického polynomu a dostaneme:

$$\bar{a}_4 = \alpha_4 \Rightarrow 1 = 1$$

$$\bar{a}_3 = \alpha_3 \Rightarrow 7,2 = \frac{6}{2r_{-1}}(2r_{-1})^{\frac{3}{4}} = \frac{6}{(2r_{-1})^{\frac{1}{4}}} = \frac{6}{\sqrt[4]{2r_{-1}}}$$

$$\bar{a}_2 = \alpha_2 \Rightarrow 16 = \frac{11}{2r_{-1}}(2r_{-1})^{\frac{2}{4}} = \frac{11}{(2r_{-1})^{\frac{1}{2}}} = \frac{11}{\sqrt{2r_{-1}}}$$

$$\bar{a}_1 = \alpha_1 \Rightarrow 12 = \left(\frac{6+2r_0}{2r_{-1}}\right)(2r_{-1})^{\frac{1}{4}} = \frac{6+2r_0}{(2r_{-1})^{\frac{3}{4}}} = \frac{6+2r_0}{\sqrt[4]{2r_{-1}}^3}$$

$$\bar{a}_0 = \alpha_0 \Rightarrow 1 = 1$$

Na základě výše uvedených podmínek se určí parametry PI regulátoru. Z podmínky  $\bar{a}_3$  se určí parametr  $r_{-1}$  a z podmínky  $\bar{a}_1$  se určí parametr  $r_0$ , tedy:

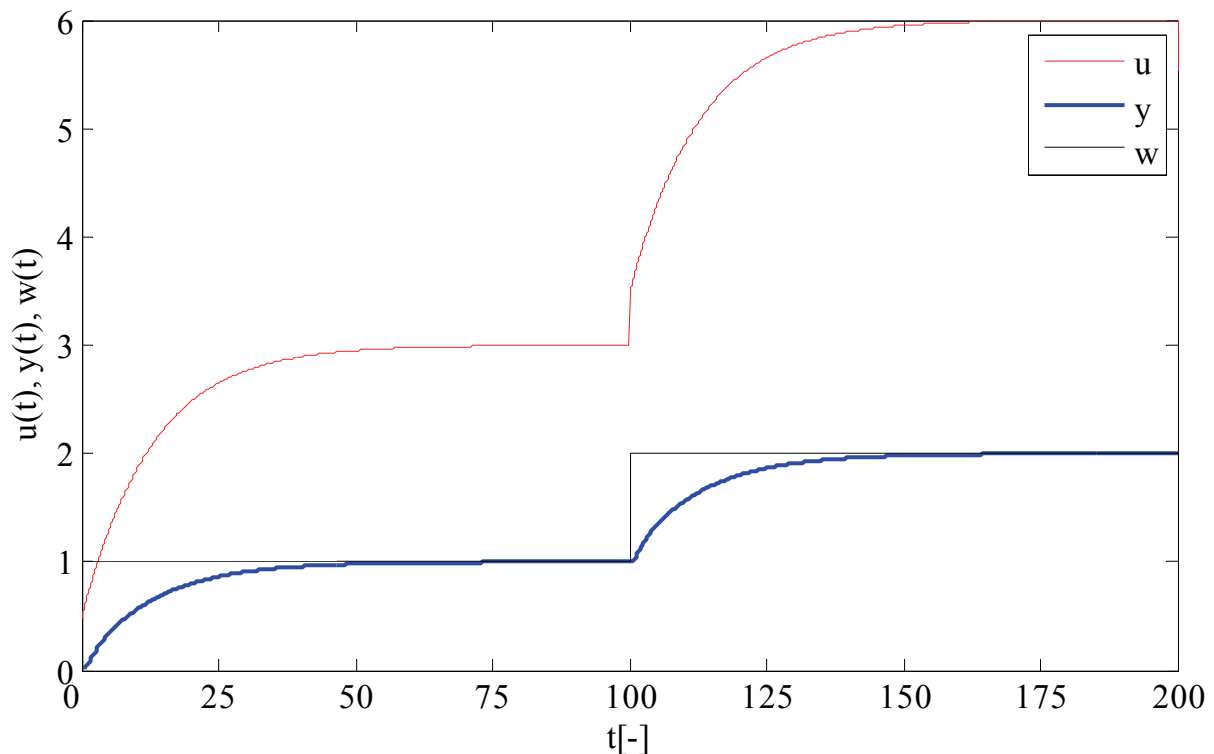
$$7,2 = \frac{6}{\sqrt[4]{2r_{-1}}} \rightarrow 2r_{-1} = \left(\frac{6}{7,2}\right)^4 \rightarrow r_{-1} = 0,2411$$

$$12 = \frac{6+2r_0}{\sqrt[4]{2r_{-1}}^3} \rightarrow r_0 = \frac{12^4 \sqrt[4]{2r_{-1}}^3 - 6}{2} = 0,4719$$

- výsledný přenos regulátoru:

$$G_R(s) = \underline{\underline{0,4719 + \frac{0,2411}{s}}}$$





Obr. 23. - Průběh regulace pro přenos (36) pro nastavení parametrů regulátoru Whiteleyovou metodou

### 6.1.10. Metoda požadovaného modelu

Určíme parametry regulátoru pomocí výše uvedené metody syntézy. Uvažujme přitom přenos soustavy a regulátoru ve tvaru:

$$G_S(s) = \frac{2}{s^3 + 6s^2 + 11s + 6}$$

Přenos regulované soustavy musíme upravit na typizovaný přenos:

$$G_S(s) = \frac{2}{s^3 + 6s^2 + 11s + 6} = G_{upr,s}(s) = \frac{0,3332}{1,5182s + 1} e^{-0,4318s}$$

určeno z PCH reg. soustavy pro  $y(T) = 0,6321k$

Tvar přenosu odpovídá přenosu (dle Tab. 16), kde je doporučen PI regulátor:

$$G_S(s) = \frac{k_1}{(T_1s + 1)} e^{-Ls}$$

kde:

$$k_1 = 0,3332, \quad T_1 = 1,5182, \quad L = 0,4318$$

Přenos regulátoru:

$$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$

Požadovaný přechod přechodové charakteristiky regulačního obvodu  $\kappa = 0,05 \rightarrow 5\%$

- parametry regulátoru:

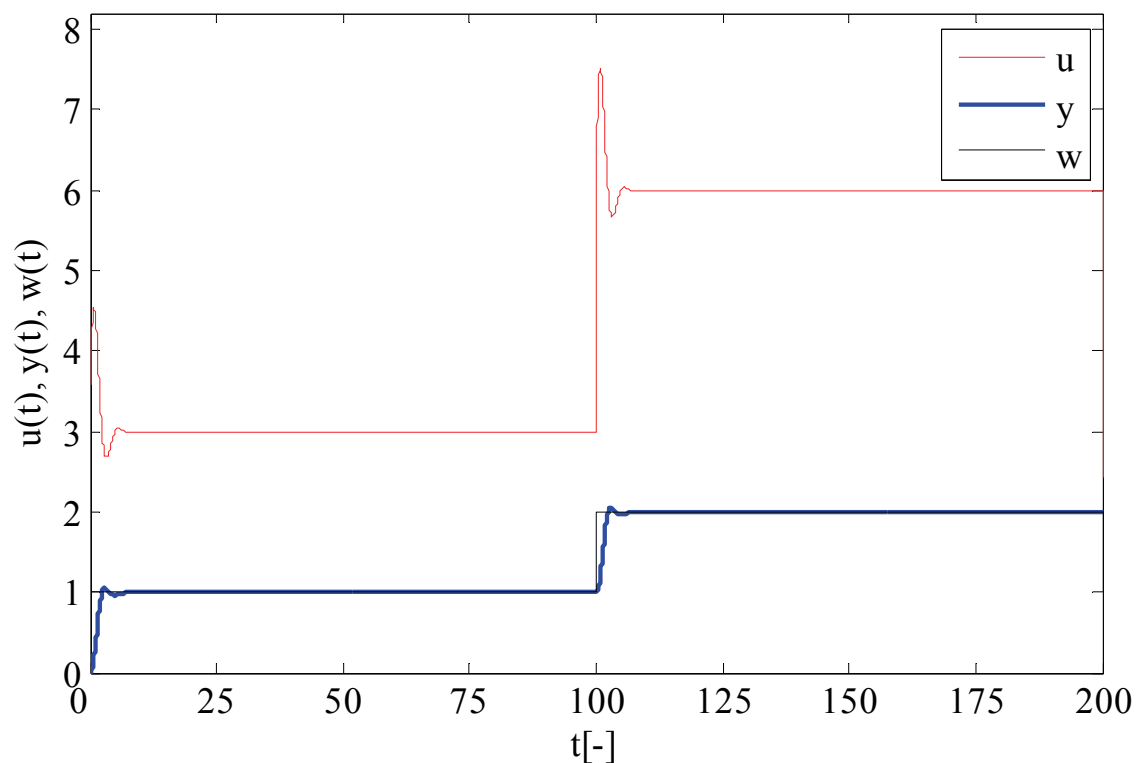
$$T_I = T_1 = 1,5182$$

$$a_o = \frac{1}{\beta L} \Rightarrow a_o = \frac{1}{1,944 * 0,4318} = 1,1913$$

$$k_P = \frac{a_o}{k_1} \Rightarrow k_P = \frac{1,1913}{0,3332} = 3,5754$$

- výsledný přenos regulátoru:

$$\underline{\underline{G_R(s) = 3,5754 \left( 1 + \frac{1}{1,5182s} \right)}}$$



Obr. 24. - Průběh regulace pro přenos (36) pro nastavení parametrů regulátoru metodou požadovaného modelu

## 6.2. Typ proporcionální regulované soustavy bez dopravního zpoždění

### 6.2.1. Z-N metoda kritického zesílení

Určíme parametry regulátoru pomocí výše uvedené metody syntézy. Uvažujme přitom přenos soustavy a regulátoru ve tvaru:

$$G_S(s) = \frac{1}{3s + 1} e^{-5s}$$

Přenos regulátoru:

$$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$

Určení požadovaných hodnot dané metody syntézy a výpočet stavitelných parametrů regulátoru (podrobnější výpočet je uveden v příloze P1 v poznámce u kapitoly 9.1).

- vypočtené hodnoty:

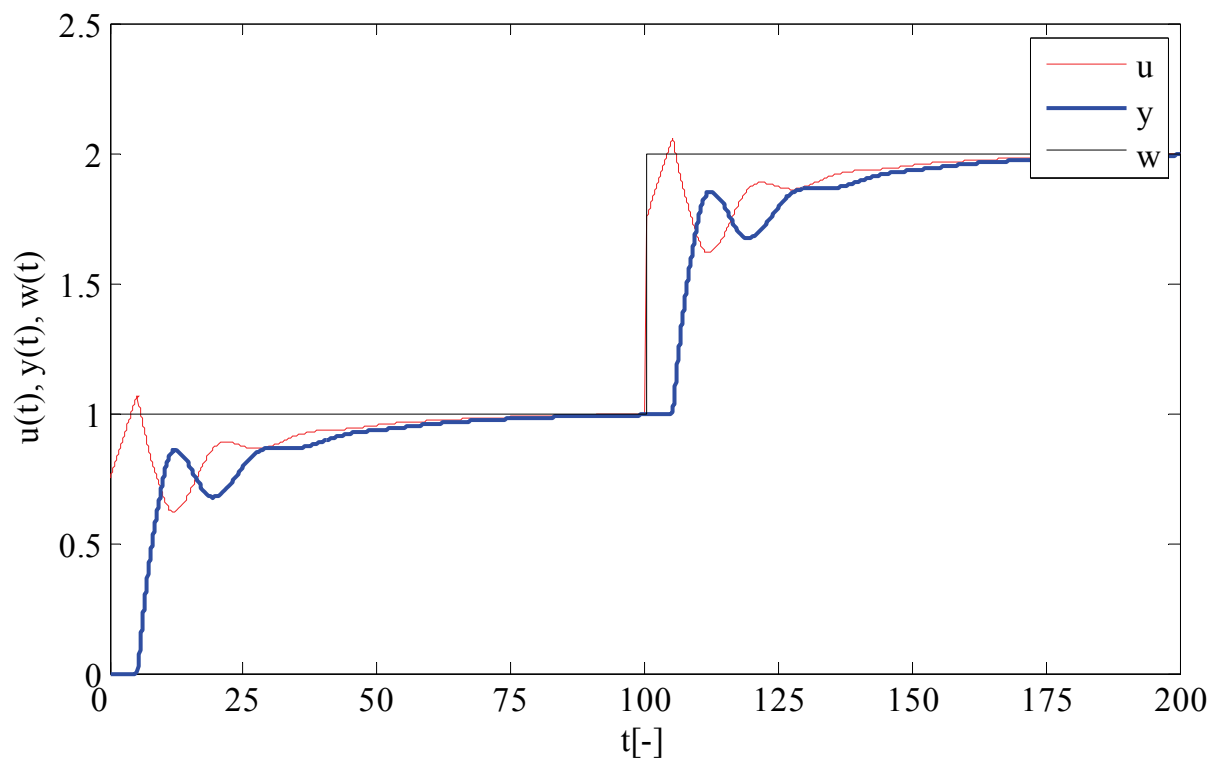
$$r_{0k} = 1,6635; \quad \omega_k = \frac{\sqrt{r_{0k}^2 - 1}}{3} = 0,4431 \rightarrow T_k = \frac{2\pi}{\omega_k} = 14,1788$$

- parametry regulátoru:

$$r_0 = 0,7486; \quad r_{-1} = 0,0634; \quad \text{resp. } k_P = 0,7486; \quad T_I = 12,052$$

- výsledný přenos regulátoru:

$$\underline{\underline{G_R(s) = 0,7486 + \frac{0,0634}{s} = 0,7486 \left( 1 + \frac{1}{12,052} \right)}}$$



Obr. 25. - Průběh regulace pro přenos (37) pro nastavení parametrů regulátoru získaných Z-N metodou

### 6.2.2. Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky

Určeme parametry regulátoru pomocí výše uvedené metody syntézy. Uvažujme přitom přenos soustavy a regulátoru ve tvaru:

$$G_S(s) = \frac{1}{3s + 1} e^{-5s}$$

Přenos regulátoru:

$$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$

Určení požadovaných hodnot dané metody syntézy a výpočet stavitelných parametrů regulátoru:

- naměřené hodnoty:

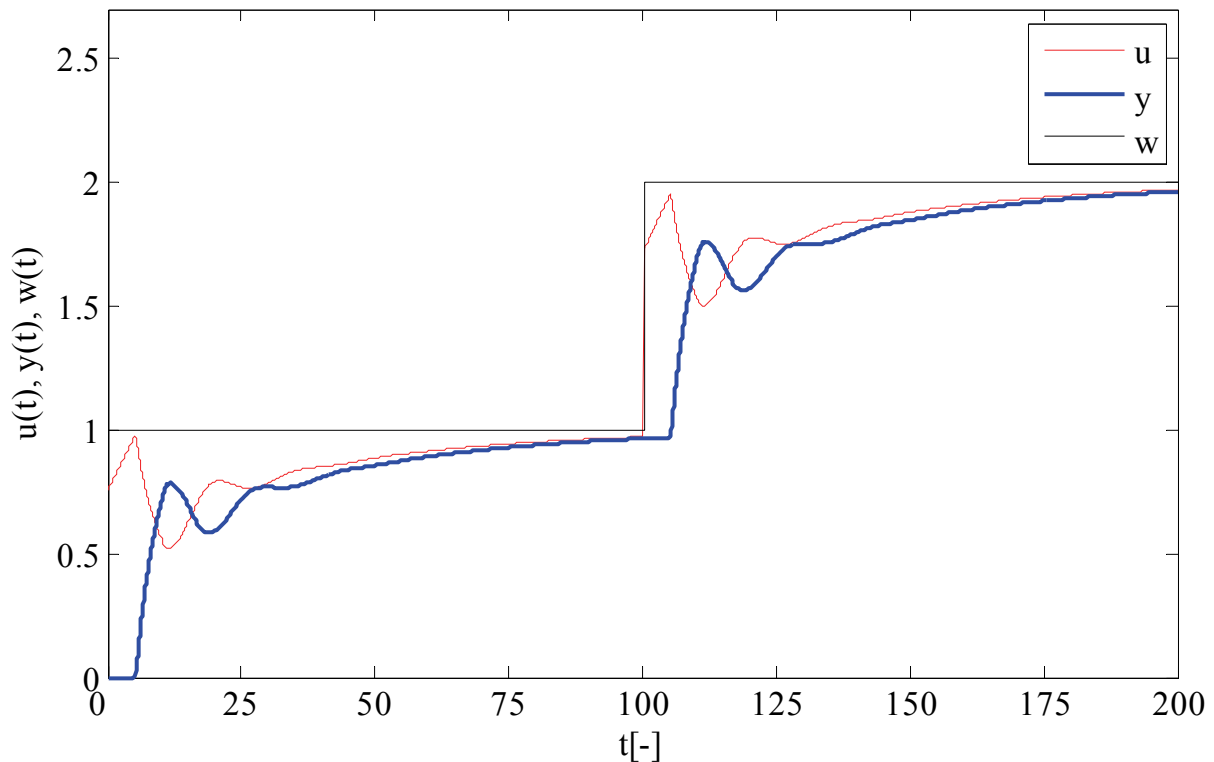
$$T_u = 4,9624; T_n = 4,1870; k = 1 \rightarrow \gamma = \frac{T_n}{T_u} = 0,8437$$

- parametry regulátoru:

$$k_P = 0,7593; T_I = 17,3684 \rightarrow r_0 = 0,7593; r_{-1} = \frac{k_P}{T_I} = 0,0437$$

- výsledný přenos regulátoru:

$$\underline{\underline{G_R(s) = 0,7593 + \frac{0,0437}{s} = 0,7593 \left( 1 + \frac{1}{17,3684s} \right)}}$$



Obr. 26. - Průběh regulace pro přenos (37) pro nastavení parametrů regulátoru z přechodové charakteristiky

### 6.2.3. Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky (Åströмова úprava)

Určeme parametry regulátoru pomocí výše uvedené metody syntézy. Uvažujme přitom přenos soustavy a regulátoru ve tvaru:

$$G_S(s) = \frac{1}{3s + 1} e^{-5s}$$

Přenos regulátoru:

$$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$

Určení požadovaných hodnot dané metody syntézy a výpočet stavitelných parametrů regulátoru:

- získané hodnoty:

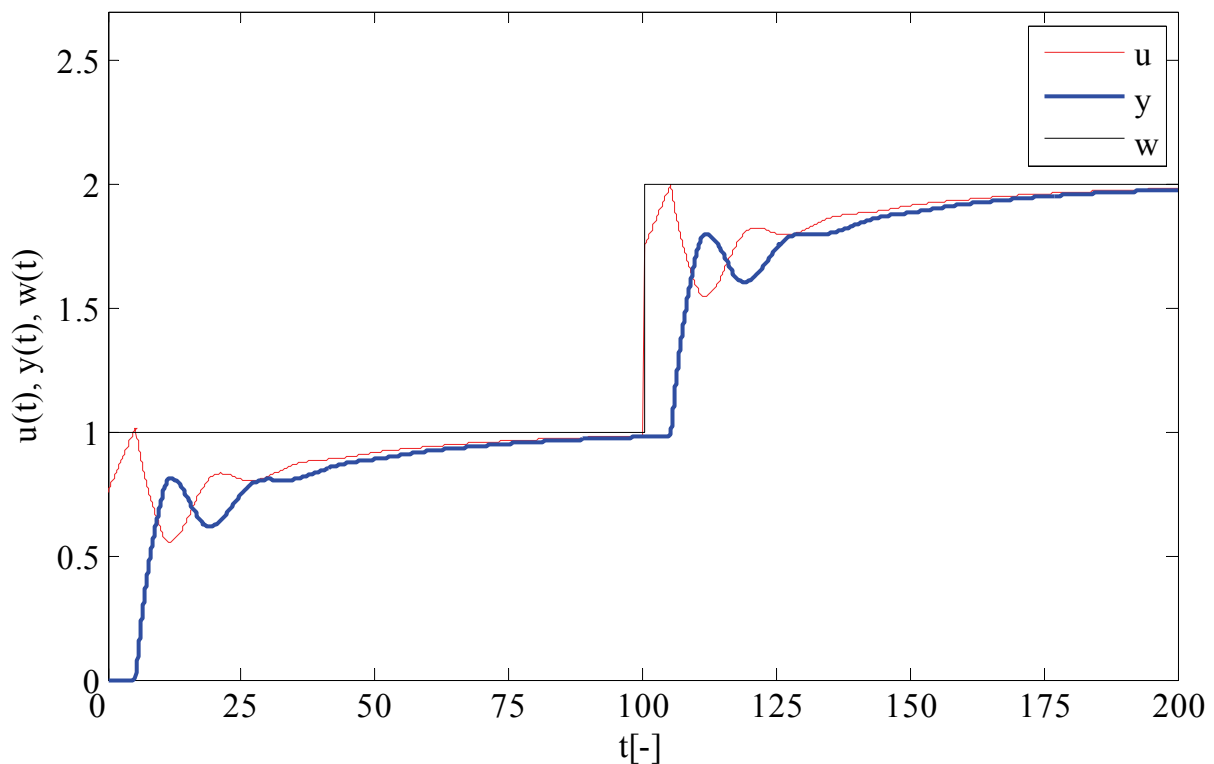
$$T_u = 4,9624; T_n = 4,1870; k = 1 \rightarrow L = T_u = 4,9624; a = \frac{k}{T_n} L = 1,1852$$

- parametry regulátoru:

$$k_P = 0,7594; T_I = 14,8872 \rightarrow r_0 = 0,7594; r_{-1} = \frac{k_P}{T_I} = 0,0510$$

- výsledný přenos regulátoru:

$$G_R(s) = 0,7594 + \frac{0,0510}{s} = 0,7594 \left( 1 + \frac{1}{14,8872s} \right)$$



Obr. 27. - Průběh regulace pro přenos (37) pro nastavení parametrů regulátoru z přechodové Åströmovou úpravou

#### 6.2.4. Chien, Hrones a Reswickova metoda (CHR metoda)

Určeme parametry regulátoru pomocí výše uvedené metody syntézy. Uvažujme přitom přenos soustavy a regulátoru ve tvaru:

$$G_S(s) = \frac{1}{3s + 1} e^{-5s}$$

Přenos regulátoru:

$$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$

Určení požadovaných hodnot dané metody syntézy a výpočet stavitelných parametrů regulátoru:

- získané hodnoty:

$$T_u = 4,9624; T_n = 4,1870; k = 1 \rightarrow L = T_u = 4,9624; a = \frac{k}{T_n} L = 1,1852$$

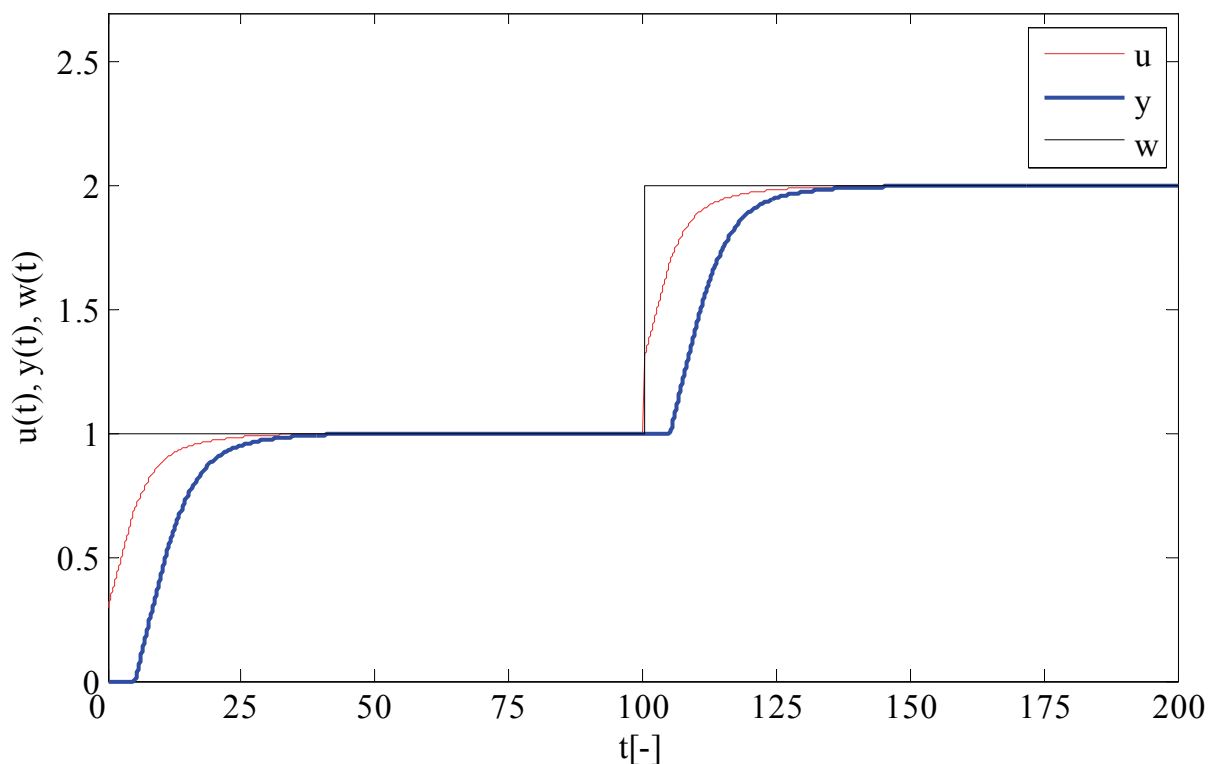
$$y(T) = 0,6321k \Rightarrow T = 3,0176$$

- parametry regulátoru:

$$k_P = 0,2953; T_I = 3,6211 \rightarrow r_0 = 0,2953; r_{-1} = \frac{k_P}{T_I} = 0,0815$$

- výsledný přenos regulátoru:

$$\underline{\underline{G_R(s) = 0,2953 + \frac{0,0815}{s} = 0,2953 \left( 1 + \frac{1}{3,6211s} \right)}}$$



Obr. 28. - Průběh regulace pro přenos (37) pro nastavení parametrů regulátoru CHR metodou

### 6.2.5. Cohen-Coonova metoda

Určeme parametry regulátoru pomocí výše uvedené metody syntézy. Uvažujme přitom přenos soustavy a regulátoru ve tvaru:

$$G_S(s) = \frac{1}{3s + 1} e^{-5s} - \text{je to již typizovaný přenos}$$

Přenos regulátoru:

$$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$

Určení požadovaných hodnot dané metody syntézy a výpočet stavitelných parametrů regulátoru:

- získané hodnoty:

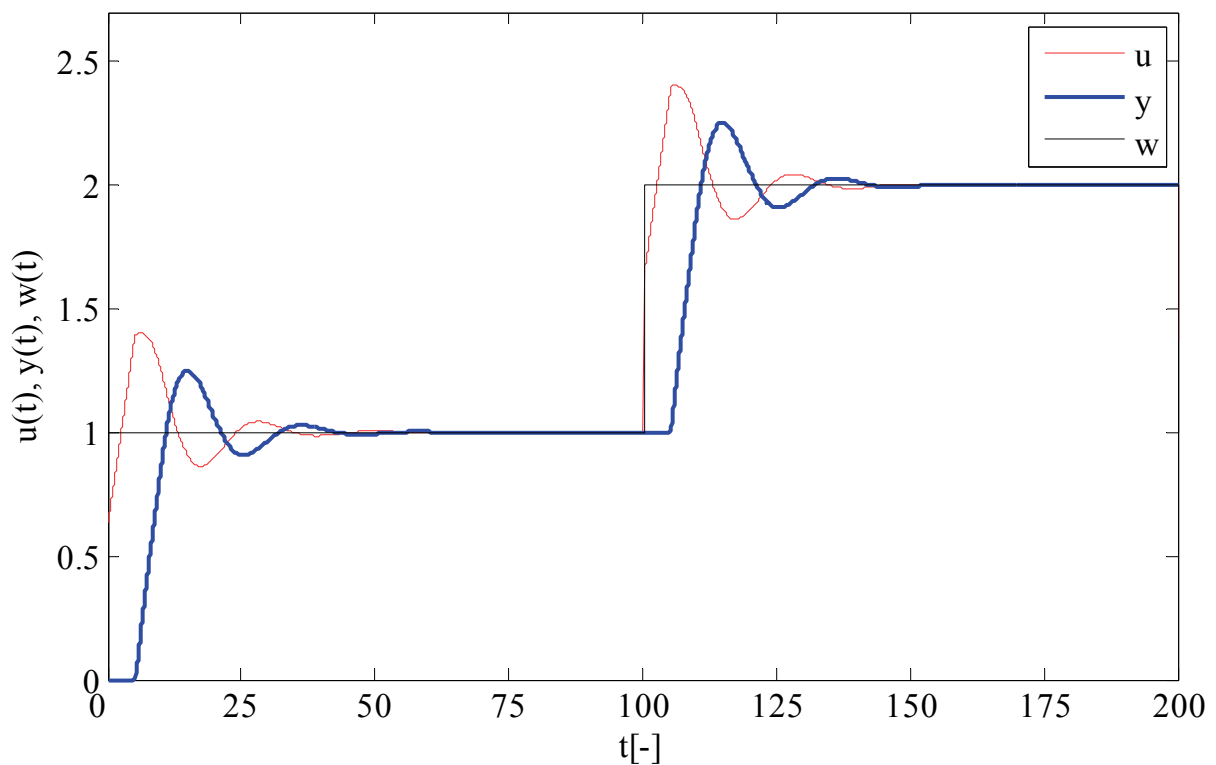
$$k = 1; \quad T = 3,0176; \quad L = 4,9624$$

- parametry regulátoru:

$$r = \frac{L}{T} = 1,6444; \quad k_P = 0,6306; \quad T_I = 4,1385 \rightarrow r_0 = 0,6306; \quad r_{-1} = \frac{k_P}{T_I} = 0,1524$$

- výsledný přenos regulátoru:

$$G_R(s) = \underline{\underline{0,6306 + \frac{0,1524}{s} = 0,6306 \left( 1 + \frac{1}{4,1385s} \right)}}$$



Obr. 29. - Průběh regulace pro přenos (37) pro nastavení parametrů regulátoru Cohen-Coonovou metodou

### 6.2.6. Fruehaufova metoda

Určeme parametry regulátoru pomocí výše uvedené metody syntézy. Uvažujme přitom přenos soustavy a regulátoru ve tvaru:

$$G_S(s) = \frac{1}{3s + 1} e^{-5s} - \text{je to již typizovaný přenos}$$



Přenos regulátoru:

$$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$

Určení požadovaných hodnot dané metody syntézy a výpočet stavitelných parametrů regulátoru:

- získané hodnoty:

$$k = 1; \quad T = 3,0176; \quad L = 4,9624$$

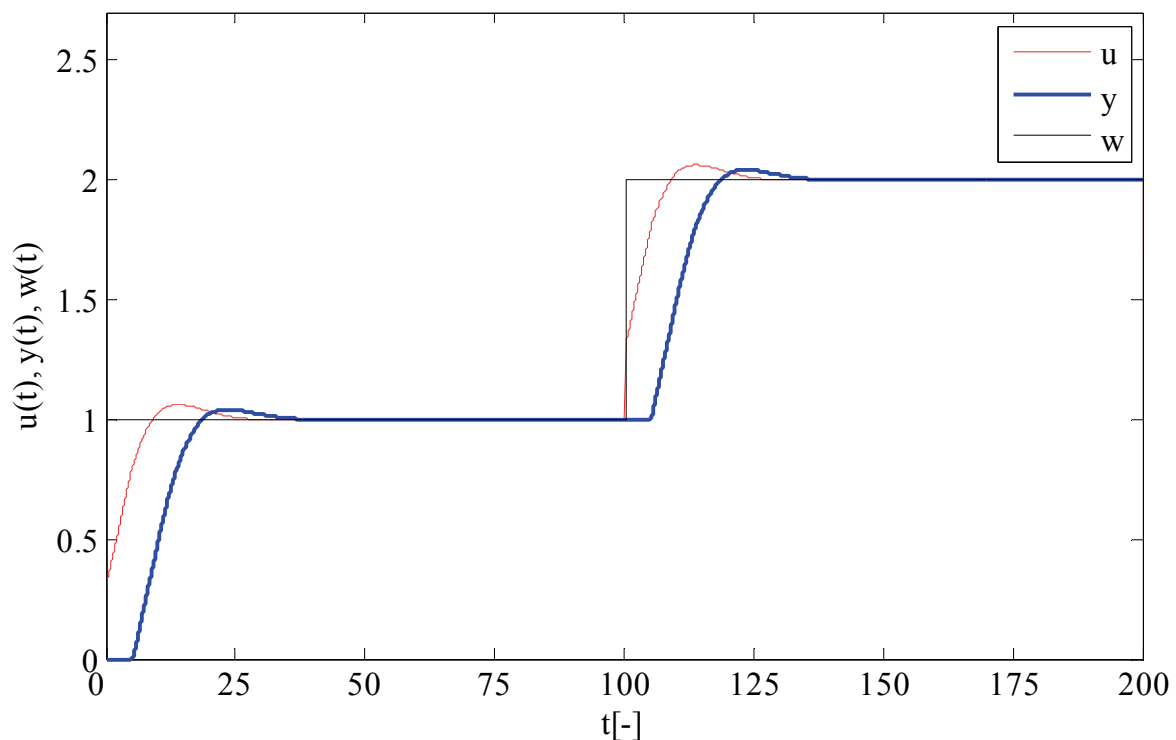
- parametry regulátoru:

$$r = \frac{L}{T} = 1,6445 > 0,33 \rightarrow PI - B; \quad k_P = 0,3040; \quad T_I = 3,0176 \rightarrow r_0 = 0,3040;$$

$$r_{-1} = \frac{k_P}{T_I} = 0,1007$$

- výsledný přenos regulátoru:

$$\underline{\underline{G_R(s) = 0,3040 + \frac{0,1007}{s} = 0,3040 \left( 1 + \frac{1}{3,0176s} \right)}}$$



Obr. 30. - Průběh regulace pro přenos (37) pro nastavení parametrů regulátoru Fruehaufovou metodou

### 6.2.7. Metoda vyváženého nastavení

Určeme parametry regulátoru pomocí výše uvedené metody syntézy. Uvažujme přitom přenos soustavy a regulátoru ve tvaru:

$$G_S(s) = \frac{1}{3s + 1} e^{-5s}$$

Přenos regulátoru:

$$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$

Určení požadovaných hodnot dané metody syntézy a výpočet stavitelných parametrů regulátoru:

- získané hodnoty:

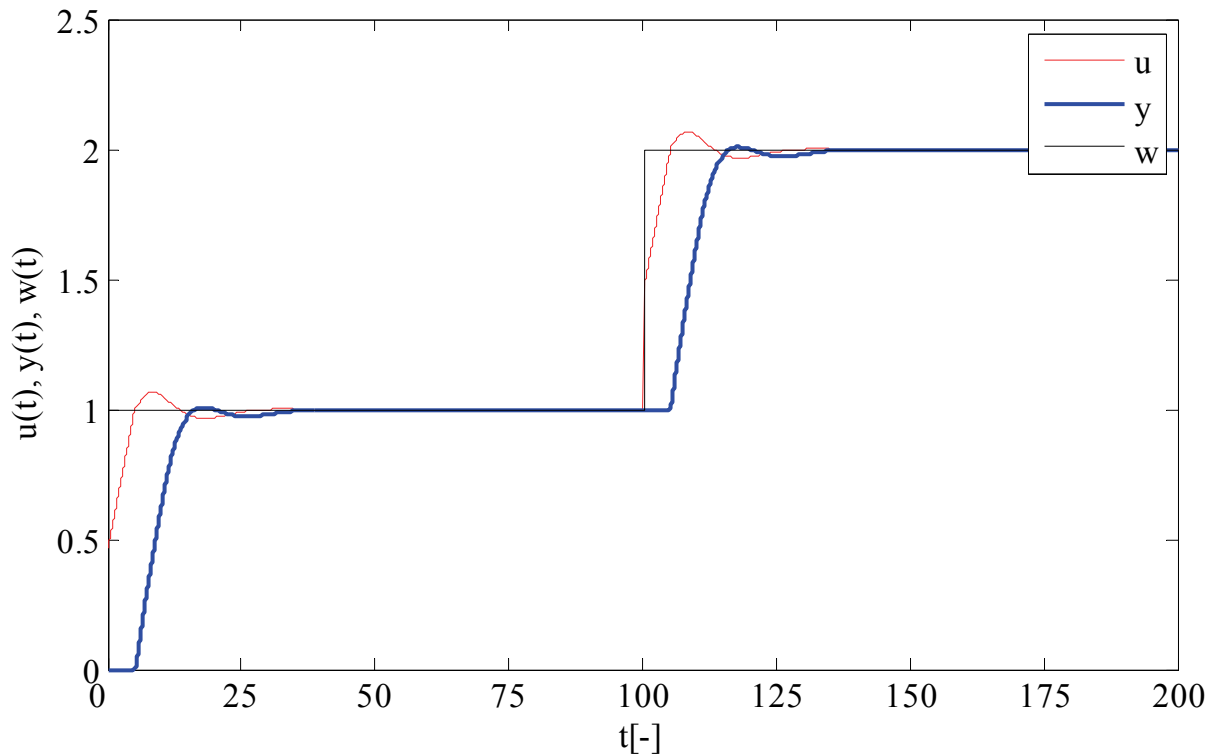
$$k = 1; \quad T = 3,0176; \quad L = 4,9624$$

- parametry regulátoru:

$$k_P = 0,4666; \quad T_I = 4,3411 \rightarrow r_0 = 0,4666; \quad r_{-1} = \frac{k_P}{T_I} = 0,1075; \quad T_{ar} = 7,98; \quad \tau = 0,6219$$

- výsledný přenos regulátoru:

$$\underline{\underline{G_R(s) = 0,4666 + \frac{0,1075}{s} = 0,4666 \left( 1 + \frac{1}{4,3411s} \right)}}$$



Obr. 31. - Průběh regulace pro přenos (37) pro nastavení parametrů regulátoru metodou vyváženého nastavení

### 6.2.8. Naslinova metoda

Určeme parametry regulátoru pomocí výše uvedené metody syntézy. Uvažujme přitom přenos soustavy a regulátoru ve tvaru:

$$G_S(s) = \frac{1}{3s + 1} e^{-5s}$$

Nejprve je nutno provést aproximaci dopravního zpoždění dané reg. soustavy, např. Padeho aproximací, dostaneme pak:

$$G_S(s) = \frac{1 - 2,5s}{7,5s^2 + 5,5s + 1} = \frac{2 - 5s}{15s^2 + 11s + 2}$$

Přenos regulátoru:

$$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$

- požadovaný maximální překmit:

$$5\% \rightarrow \alpha = 2$$

- určíme přenos řízení:

$$G_{W/Y}(s) = \frac{G_R(s)G_S(s)}{1 + G_R(s)G_S(s)} = \frac{\left(r_0 + \frac{r_{-1}}{s}\right) \left(\frac{-5s + 2}{15s^2 + 11s + 2}\right)}{1 + \left(r_0 + \frac{r_{-1}}{s}\right) \left(\frac{-5s + 2}{15s^2 + 11s + 2}\right)} =$$

$$= \frac{-5r_0s^2 + 2r_0s - 5r_{-1}s + 2r_{-1}}{15s^3 + (11 - 5r_0)s^2 + (2r_0 + 2 - 5r_{-1})s + 2r_{-1}}$$

- charakteristická rovnice:

$$15s^3 + (11 - 5r_0)s^2 + (2r_0 + 2 - 5r_{-1})s + 2r_{-1}$$

$$a_i^2 \geq \alpha a_{i-1} a_{i+1} \text{ pro } i = 1, 2, \dots, (n - 1)$$

platí:

$$\text{pro } i = 1: (2r_0 + 2 - 5r_{-1})^2 \geq 2 * 2r_{-1} * (11 - 5r_0)$$

$$\text{pro } i = 2: (11 - 5r_0)^2 \geq 2 * 15 * (2r_0 + 2 - 5r_{-1})$$

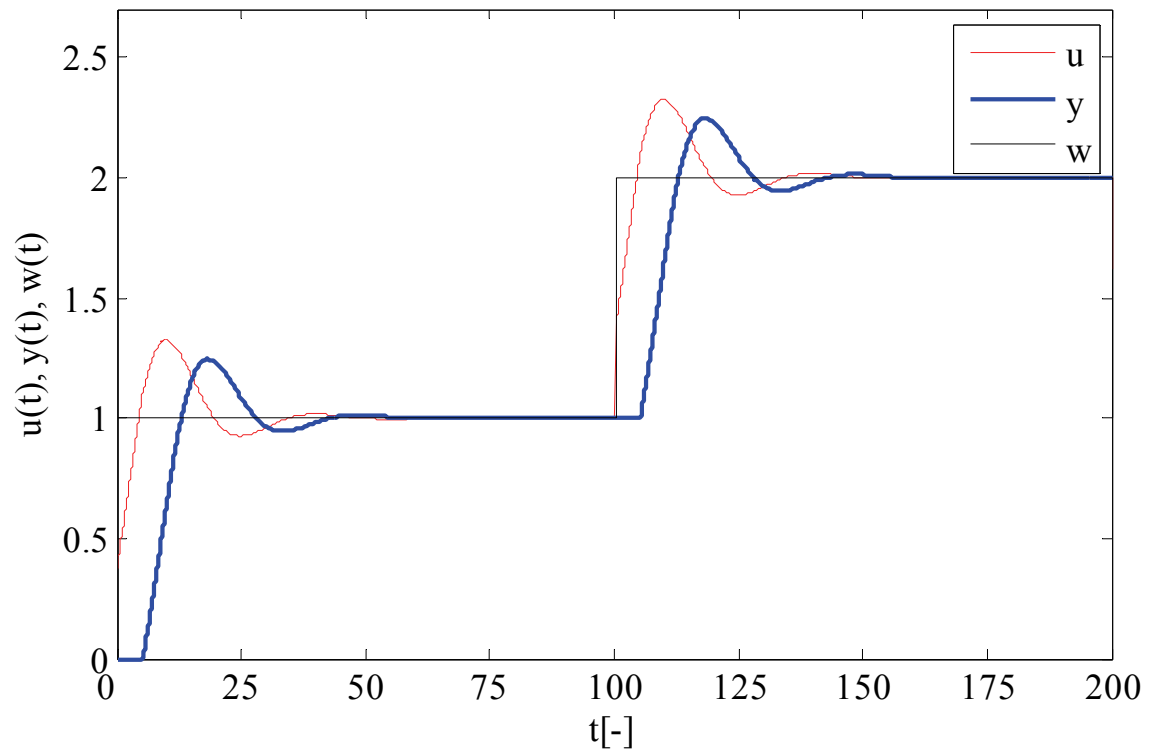
Do rovnice pro  $i = 1$  dosadíme za  $r_{-1}$   $0,3801r_0$  a  $6,4183r_0$ . Tím dostaneme parametry  $r_0$  regulátoru PI. Záporné hodnoty nemají z fyzikálního hlediska vliv, proto bereme pouze kladné hodnoty. Stabilní regulace nám vyšla pro následující parametry regulátoru.

- parametry regulátoru:

$$r_0 = 0,3794; \quad r_{-1} = 0,1442 \rightarrow k_p = 0,3794; \quad T_I = \frac{r_0}{r_{-1}} = 2,6311$$

- výsledný přenos regulátoru:

$$G_R(s) = \underline{\underline{0,3794 + \frac{0,1442}{s} = 0,3794 \left(1 + \frac{1}{2,6311s}\right)}}$$



Obr. 32. - Průběh regulace pro přenos (37) pro nastavení parametrů regulátoru Naslinovou metodou

### 6.2.9. Whiteleyova metoda

Určíme parametry regulátoru pomocí výše uvedené metody syntézy. Uvažujme přitom přenos soustavy a regulátoru ve tvaru:

$$G_S(s) = \frac{1}{3s + 1} e^{-5s}$$

Nejprve je nutno provést aproximaci dopravního zpoždění dané reg. soustavy, např. Padeho aproximací, dostaneme pak:

$$G_S(s) = \frac{1 - 2,5s}{7,5s^2 + 5,5s + 1} = \frac{2 - 5s}{15s^2 + 11s + 2}$$

Přenos regulátoru:

$$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$

- určíme přenos řízení:

$$G_W(s) = \frac{G_R(s)G_S(s)}{1 + G_R(s)G_S(s)} = \dots = \frac{-5r_{-1}s + 2r_{-1}}{15s^3 + 11s^2 + (2 - 5r_{-1})s + 2r_{-1}}$$

Standartní tvar přenosu získáme:

dělením všech koeficientů přenosu hodnotou  $a_0 = 2r_{-1}$ ,

zavedením a použitím substitute:

$$s = \left(\frac{a_0}{a_n}\right)^{\frac{1}{n}} q = \left(\frac{2r_{-1}}{15}\right)^{\frac{1}{3}} q$$

Postupně tedy získáme:

$$G_{W/Y}(s) = \frac{-\frac{5}{2}s + 1}{\frac{15}{2r_{-1}}s^3 + \frac{11}{2r_{-1}}s^2 + \left(\frac{1}{r_{-1}} - \frac{5}{2}\right)s + 1}$$

$$G_w(s) = \frac{-\frac{5}{2}\left(\frac{2r_{-1}}{15}\right)^{\frac{1}{3}} q + 1}{\frac{15}{2r_{-1}}\left(\frac{2r_{-1}}{15}\right)^{\frac{3}{3}} q^3 + \frac{11}{2r_{-1}}\left(\frac{2r_{-1}}{15}\right)^{\frac{2}{3}} q^2 + \left(\frac{1}{r_{-1}} - \frac{5}{2}\right)\left(\frac{2r_{-1}}{15}\right)^{\frac{1}{3}} q + 1}$$

Po srovnání koeficientů dostáváme:

$$\bar{a}_3 = \alpha_3 \Rightarrow 1 = 1$$

$$\bar{a}_2 = \alpha_2 \Rightarrow 5,1 = \frac{11}{2r_{-1}}\left(\frac{2r_{-1}}{15}\right)^{\frac{2}{3}}$$

$$\bar{a}_1 = \alpha_1 \Rightarrow 6,3 = \left(\frac{1}{r_{-1}} - \frac{5}{2}\right)\left(\frac{2r_{-1}}{15}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\bar{a}_0 = \alpha_0 \Rightarrow 1 = 1$$

Na základě výše uvedených podmínek se určí parametry I regulátoru tedy:

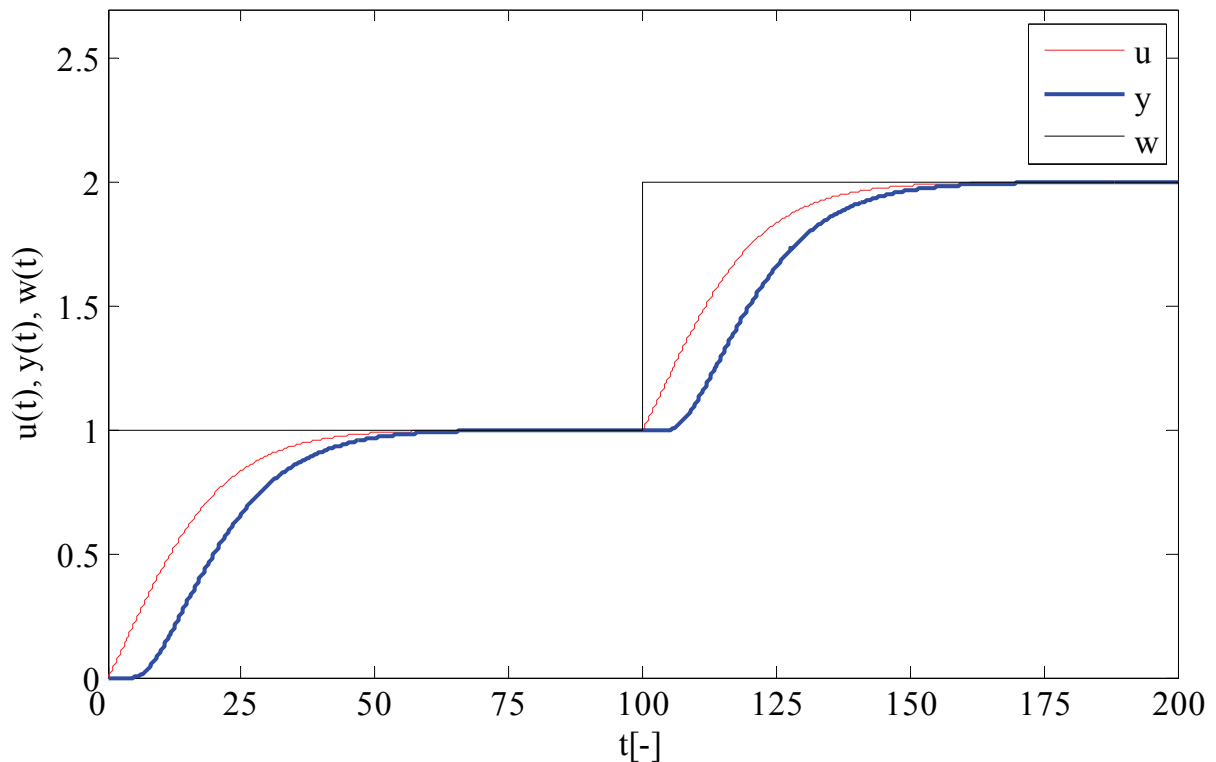
$$5,1 = \frac{11}{2r_{-1}}\left(\frac{2r_{-1}}{15}\right)^{\frac{2}{3}} \Rightarrow r_{-1} = 0,0446$$

- parametry regulátoru:

$$r_{-1} = 0,0446$$

- výsledný přenos regulátoru:

$$G_R(s) = \frac{0,0446}{\underline{\underline{s}}}$$



Obr. 33. - Průběh regulace pro přenos (37) pro nastavení parametrů regulátoru Whiteleyovou metodou

### 6.2.10. Metoda požadovaného modelu

Určeme parametry regulátoru pomocí výše uvedené metody syntézy. Uvažujme přitom přenos soustavy a regulátoru ve tvaru:

$$G_S(s) = \frac{1}{3s + 1} e^{-5s} - \text{je to již typizovaný přenos}$$

Tvar přenosu odpovídá přenosu (dle Tab. 16), kde je doporučen PI regulátor:

$$G_S(s) = \frac{k_1}{(T_1 s + 1)} e^{-Ls}$$

kde:

$$k_1 = 1, \quad T_1 = 3, \quad L = 5$$

Přenos regulátoru:

$$G_R(s) = k_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$

Požadovaný přechodový charakteristiky regulačního obvodu  $\kappa = 0,05 \rightarrow 5\%$

- parametry regulátoru:

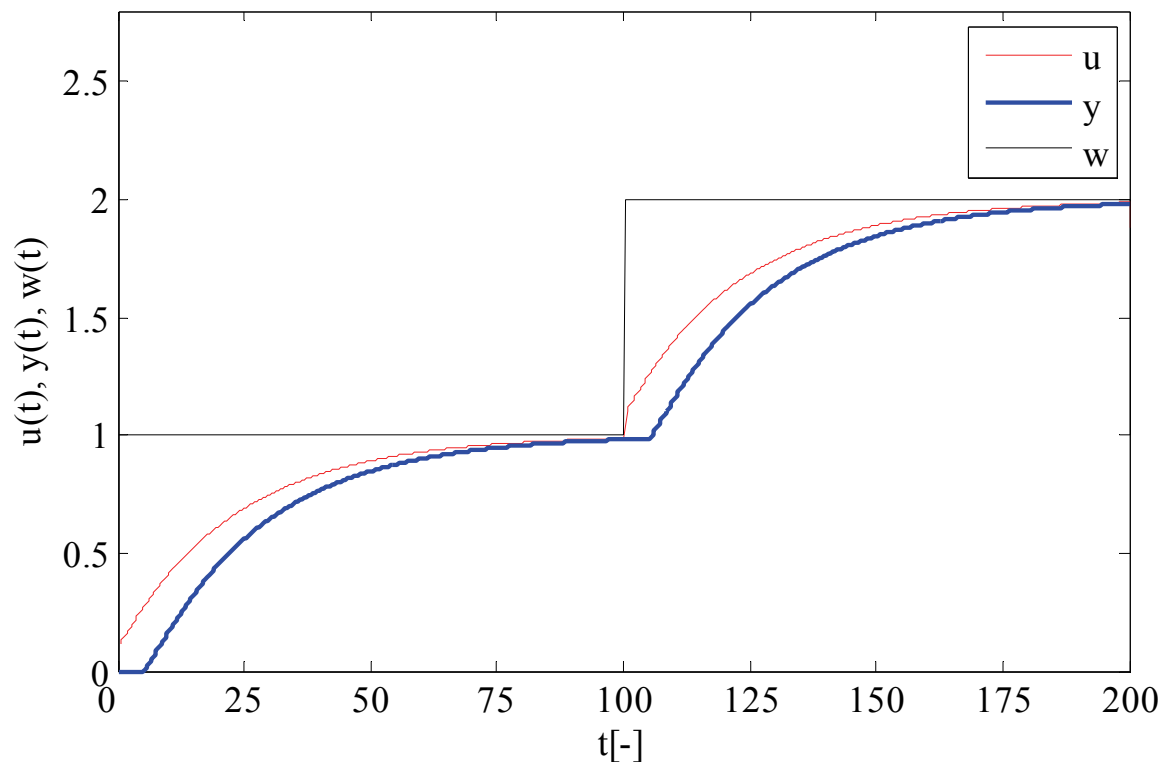
$$T_I = T_1 = 3$$

$$a_o = \frac{1}{\beta L} \Rightarrow a_o = \frac{1}{1,944 * 5} = 0,1029$$

$$k_P = \frac{a_o}{k_1} \Rightarrow k_P = \frac{0,1029}{1} = 0,1029$$

- výsledný přenos regulátoru:

$$\underline{\underline{G_R(s) = 0,1029 \left(1 + \frac{1}{3s}\right)}}$$



Obr. 34. - Průběh regulace pro přenos (37) pro nastavení parametrů regulátoru metodou požadovaného modelu

### 6.3. Porovnání vybraných klasických metod syntézy podle kvality regulace

Srovnání uvedených klasických metod syntézy bylo provedeno metodou kvadratické plochy. Výpočet byl proveden v programu Matlab/Simulink, kde byly do uzavřeného regulačního obvodu přidány bloky kvadrát regulační odchylky, integrátor a display pro zobrazení hodnoty  $J_K$  (Obr. 13). U každé z uvedených metod syntézy byl proveden výpočet jak pro přenos regulované soustavy bez dopravního zpoždění, tak i pro přenos soustavy s dopravním zpožděním. Srovnání je vidět v Tab. 17.



Tab. 17. - Srovnání metod syntézy podle kvality regulace

Druh metody syntézy	Kvadratická regulační plocha $J_K$ pro přenos (20)	Kvadratická regulační plocha $J_K$ pro přenos (21)
Ziegler – Nichols: Kritické zesílení	2,296	16,36
Z přechodové charakteristiky	2,631	20,69
Z přechodové charakteristiky (Åströмова úprava)	3,495	18,55
CHR	1,587	17,97
Cohen - Coonova	3,363	14,22
Fruehaufova	1,552	16,79
Vyváženého nastavení	2,773	15
Naslinova	2,401	15,9
Whiteleyova	12,42	31,94
Požadovaného modelu	1,9	17,32

Pro uvedenou metodu platí, že čím menší je hodnota kvadratické regulační plochy  $J_K$ , tím lepší je kvalita regulace. Z Tab. 17 je vidět, že podle metody kvadratické regulační plochy se jeví jako nejlepší z uvedených metod syntézy Fruehaufova metoda pro přenos regulované soustavy bez dopravního zpoždění (36) a Cohen-Coonova metoda pro přenos regulované soustavy s dopravním zpožděním (37).

#### Poznámka:

Jako nejdůležitější požadavek pro kvalitu regulačních pochodů u předešlých simulací byla uvažována metoda kvadratické regulační plochy  $J_K$ . Ve skutečnosti může být požadavek na kvalitu regulačního pochodu jiný (regulační pochod bez překmitů, co nejrychlejší ustálení průběhu regulace na žádané hodnotě). Toto jsou však protichůdné požadavky a proto je optimální seřízení regulátoru vždy kompromisem mezi nimi.

## ZÁVĚR

Náplní této bakalářské práce bylo vytvořit podporu cvičení z předmětu Teorie automatického řízení I. Po obdržení podkladů v písemné formě byly tyto podklady rozčleněny do osmi kapitol podle osnovy předmětu, zpracovány v programu MS Word a dále převedeny do formátu PDF. Tyto podklady byly doplněny o grafy vykreslené v programu Matlab. Nezbytným předpokladem pro vytvoření a zprovoznění elektronické učebnice je zveřejnit ji na Internetu. Proto byly vytvořeny WWW stránky v programu Poznámkový blok. Stránky obsahují vedle podkladů pro cvičení také zadání pro semestrální práce, ukázky kontrolních testů a laboratorních protokolů a odkazy na další stránky zabývající se elektronickou podporou automatizace.

Součástí této práce bylo také porovnat vybrané metody syntézy pro dva typy přenosů z hlediska kvality regulace. Jednalo se o přenosy regulované soustavy jak bez dopravního zpoždění, tak i s dopravním zpožděním. Pro porovnání byla použita metoda kvadratické regulační plochy. Platí pro ni, že čím menší je hodnota kvadratické regulační plochy, tím lepší je kvalita regulace. V Tab. 17 můžeme vidět srovnání vybraných metod syntézy podle kvality regulace, kde se jako nejvhodnější metoda pro přenos regulované soustavy bez dopravního zpoždění ve tvaru (36) jeví Fruehaufova metoda. Pro přenos regulované soustavy s dopravním zpožděním ve tvaru (37) se jeví jako nejvhodnější metoda syntézy Cohen-Coonova metoda kritického zesílení.

## CONCLUSION

The purpose of this work was a creation of an support for the practise part of the subject: „Automatic control theory I“. The basis was received in written form. It was divided into 8 chapters according the subject curricullum. It was processed into MS word document and then transformed to PDF format. Graphs depiceted in Matlab program were added. The essention prerequisite for creation and lunching of an electronical textbook is its publishing on the Internet. Therefore a web pages were created using Notepad. Among subject basis, the web pages contains assignments for student's semestral works, demonstrations of control tests and laboratory protocols and references to other pages related to electronical support of automatization.

A comparison of chosen synthesis methods for 2 transfer types from regulation quality point of view was a part of this work as well. Systems with and without a transportation delay were compared. The quadratic regularized surface method was used for the comparison. The smaller is the value of quadratic regularized surface, the better is quality of regulation. We can see comparison of chosen synthesis methods according quality of regulation in Tab. 17. The most suitable method for transfer of regulated system without transportation delay in form (36) seems to be Fruehauf method. Cohen-Coon seems to be the most suitable method for transfer of regulated system without transportation delay in form (37).

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] ÅSTRÖM, K., HÄGGLUND, T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. USA : Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina, 1995. b
- [2] BALÁTĚ, J. Automatické řízení. 2. přeprac. vyd. Praha : BEN - technická literatura, Praha, 2004
- [3] Prokop, R. Základy automatizace pro bakalářské studium. Zlín: Ediční středisko FT, 1998
- [4] NAVRÁTIL, P. *Informační systém CAAC – počítačová podpora automatického řízení*. Zlín, 2004. 133 s., 1 CD-ROM. Vedoucí dizertační práce Jaroslav Balátě
- [5] RŮČKA, P. *Počítačová podpora předmětu „Teorie automatického řízení I“*. Zlín, 2005. 66 s., P 1 : Podpora cvičení z předmětu Teorie automatického řízení I, CD-ROM. UTB ve Zlíně, Fakulta technologická. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Navrátil, Ph. D.
- [6] Benda, Rosman, Sodomka. Informatika a výpočetní technika. Zlín: Ediční středisko FaMe, 2000
- [7] Renda, M. Český Internet a Internet Explorer 4. Praha: Grada, 1998
- [8] Wempen, F. HTML a CSS krok za krokem, Brono: Computer Press, 2007. 324 s, 1 CD-ROM
- [9] KOSEK, J. Téměř vše o WWW [online]. c1999-2006 , 13.12.2006 [cit. 2007-01-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.kosek.cz/>>
- [10] BROŽA, P. Programování WWW stránek pro úplné začátečníky. Praha: Computer Press, 2000. 200 s
- [11] PROKOP, R., MATUŠŮ, R., PROKOPOVÁ, Z.: Teorie automatického řízení - lineární spjité dynamické systémy. Zlín: UTB Zlín, 2006
- [12] GERLICH, V. *Podpora cvičení z předmětu „Teorie automatického řízení II“*. Zlín, 2006. 85 s., CD-ROM. UTB ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Navrátil, Ph. D.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

$\delta(t)$	Diracův jednotkový impulz
$\omega$	úhlová frekvence
$\omega_k$	kritická úhlová frekvence
$\kappa$	relativní překmit
$A(\omega) =  G(j\omega) $	amplituda frekvenčního přenosu
$a_i$	koeficienty levé strany lineární diferenciální rovnice, koeficienty mnohočlenu ve jmenovateli přenosu
$b_i$	koeficienty pravé strany lineární diferenciální rovnice, koeficienty mnohočlenu v čitateli přenosu
$e$	regulační odchylka
$G(s)$	Laplaceův přenos, L-obraz spojité impulzní funkce
$G(j\omega)$	frekvenční přenos
$G_R(s)$	přenos regulátoru
$G_S(s)$	přenos soustavy
$G_{W/Y}(s)$	přenos řízení
$i(t)$	impulsní funkce
$H(s)$	L-obraz (spojité) přechodové funkce
$h(t)$	přechodová funkce
$j = \sqrt{-1}$	imaginární jednotka
$J_K$	kvadratická regulační plocha
$k_P, k_R, r_0$	zesílení analogového regulátoru
$k_{Pk}, k_{Rk}, r_{0k}$	kritické zesílení analogového regulátoru
$L$	operátor přímé Laplaceovy transformace, dopravní zpoždění u spojitých systémů
$L^{-1}$	operátor zpětné Laplaceovy transformace
$A[dB]$	logaritmická amplituda frekvenčního přenosu
$n$	stupeň charakteristického mnohočlenu
P	proporcionální regulátoru
PI	proporcionálně integrační regulátor
PD	proporcionálně derivační regulátor

---

PID	proporcionálně integračně derivační regulátor
$r_0, k_P$	proporcionální konstanta (váha proporcionální složky, zesílení) analogového regulátoru
$r_{-1}, k_I$	integrační konstanta (váha integrační složky) analogového regulátoru
$r_1, k_D$	derivační konstanta (váha derivační složky) analogového regulátoru
$t$	(spojitý) čas
$T_D$	derivační časová konstanta
$T_I$	integrační časová konstanta
$T_k$	kritická perioda
$T_n$	doba náběhu
$T_u$	doba průtahu
$u$	akční veličina
$v$	poruchová veličina
$w$	žádaná veličina
$y$	regulovaná veličina
HTML	Hyper Text Markup Language
CHR	Chien, Hrones a Reswickova metoda
MS	Microsoft
WWW	World Wide Web

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Struktura bakalářské práce .....	9
Obr. 2. Úvodní stránka elektronické učebnice .....	14
Obr. 3. - Určení $T_k$ . při $r_{ok}$ .....	16
Obr. 4. - Určení $T_k$ a $k_{pk}$ při vložení nelinearity (relé) do zpětné vazby .....	17
Obr. 5. - Určení parametrů $k$ , $T_n$ a $T_u$ z přechodové charakteristik regulované soustavy ...	18
Obr. 6. - Určení parametrů $a$ , $L$ z přechodové charakteristiky regulované soustavy .....	18
Obr. 7. - Určení parametrů $a$ , $L$ , $T$ z přechodové charakteristiky regulované soustavy .....	19
Obr. 8. - Regulační pochod odpovídající standartnímu tvaru .....	23
Obr. 9. - Schéma regulačního obvodu k metodě požadovaného modelu .....	25
Obr. 10. - Rozložení pólů přenosu řízení v komplexní rovině .....	27
Obr. 11. - Přechodová charakteristika uzavřeného obvodu s dopravním zpožděním .....	28
Obr. 12. - Přechodová charakteristika uzavřeného obvodu bez dopravního zpoždění .....	29
Obr. 13. - Regulační pochody kmitavé ( $y_1(t)$ ) a periodické ( $y_2(t)$ ) vyvolané změnou žádané hodnoty $w$ nebo vznikem poruchy $v$ .....	32
Obr. 14. - Schéma uzavřeného regulačního obvodu vytvořeného v programu Matlab/Simulink .....	35
Obr. 15. - Průběh regulace pro přenos (36) pro nastavení parametrů regulátoru získaných Z-N metodou (skutečný průběh $u$ je od -6,547 do 18,62) .....	37
Obr. 16. - Průběh regulace pro přenos (36) pro nastavení parametrů regulátoru z přechodové charakteristiky (skutečný průběh $u$ je od -6,547 do 18,14) .....	39
Obr. 17. - Průběh regulace pro přenos (36) pro nastavení parametrů regulátoru z přechodové charakteristiky Åströmovou úpravou přechodové charakteristiky (skutečný průběh $u$ je od -7,495 do 18,94) .....	40
Obr. 18. - Průběh regulace pro přenos (36) pro nastavení parametrů regulátoru CHR metodou (skutečný průběh $u$ je od 2,017 do 9,232) .....	41
Obr. 19. - Průběh regulace pro přenos (36) pro nastavení parametrů regulátoru Cohen- Coonovou metodou (skutečný průběh $u$ je od -4,563 do 15,65) .....	43
Obr. 20. - Průběh regulace pro přenos (36) pro nastavení parametrů regulátoru Fruehaufovou metodou .....	44
Obr. 17. - Průběh regulace pro přenos (36) pro nastavení parametrů regulátoru metodou vyváženého nastavení .....	45

---

Obr. 22. - Průběh regulace pro přenos (36) pro nastavení parametrů regulátoru Naslinovou metodou.....	47
Obr. 23. - Průběh regulace pro přenos (36) pro nastavení parametrů regulátoru Whiteleyovou metodou.....	49
Obr. 24. - Průběh regulace pro přenos (36) pro nastavení parametrů regulátoru metodou požadovaného modelu .....	50
Obr. 25. - Průběh regulace pro přenos (37) pro nastavení parametrů regulátoru získaných Z-N metodou.....	51
Obr. 26. - Průběh regulace pro přenos (37) pro nastavení parametrů regulátoru z přechodové charakteristiky .....	53
Obr. 23. - Průběh regulace pro přenos (37) pro nastavení parametrů regulátoru z přechodové Åströmovou úpravou.....	54
Obr. 24. - Průběh regulace pro přenos (37) pro nastavení parametrů regulátoru CHR metodou .....	55
Obr. 25. - Průběh regulace pro přenos (37) pro nastavení parametrů regulátoru Cohen- Coonovou metodou.....	56
Obr. 26. - Průběh regulace pro přenos (37) pro nastavení parametrů regulátoru Fruehaufovou metodou.....	57
Obr. 27. - Průběh regulace pro přenos (37) pro nastavení parametrů regulátoru metodou vyváženého nastavení .....	59
Obr. 28. - Průběh regulace pro přenos (37) pro nastavení parametrů regulátoru Naslinovou metodou.....	61
Obr. 29. - Průběh regulace pro přenos (37) pro nastavení parametrů regulátoru Whiteleyovou metodou.....	63
Obr. 30. - Průběh regulace pro přenos (37) pro nastavení parametrů regulátoru metodou požadovaného modelu .....	64



**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1. - Nastavení parametrů regulátoru metodou Ziegler-Nichols .....	16
Tab. 2. - Nastavení parametrů regulátoru ze získaných hodnot z přechodové charakteristiky .....	18
Tab. 3. - Nastavení parametrů regulátoru ze získaných hodnot podle Åströmovy úpravy ..	19
Tab. 4. - Nastavení parametrů regulátoru pro CHR metodu .....	20
Tab. 5. - Nastavení parametrů regulátoru při působení poruchy pro CHR metodu .....	20
Tab. 6. - Parametry regulátoru pro Cohen-Coonovu metodu.....	20
Tab. 7. - Parametry regulátoru pro Cohen-Coonovu metodu (2. způsob výpočtu).....	21
Tab. 8. - Parametry regulátoru pro Fruehaufovu metodu.....	21
Tab. 9. - Parametry regulátoru pro metodu vyváženého nastavení .....	22
Tab. 10. - Závislost $\Delta y_{max}$ % na $\alpha$ podle Naslima .....	22
Tab. 11. - Standartní tvary přenosové funkce typu (6).....	24
Tab. 12. - Standartní tvary přenosové funkce typu (12).....	25
Tab. 13. - Standartní tvary přenosové funkce typu (13).....	25
Tab. 14. - Přenosy konvenčních regulátorů použitých u metody požadovaného modelu....	26
Tab. 15. - Koeficient $\beta$ pro výpočet zesílení otevřeného regulačního obvodu .....	29
Tab. 16. - Určení nastavitelných parametrů regulátoru pro metodu požadovaného modelu .....	30
Tab. 17. - Srovnání metod syntézy podle kvality regulace .....	65

## SEZNAM PŘÍLOH

P 1 : Podpora cvičení z předmětu Teorie automatického řízení I

P 2 : CD ROM