

Počítačová podpora předmětu „Teorie automatického řízení I“

Computer aid of learning
„Automatic control theory I“

Pavel Růčka

Bakalářská práce
2005



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Vložit oficiální zadání diplomové/bakalářské práce

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

Souhlasím s tím, že s výsledky mé práce může být naloženo podle uvážení vedoucího bakalářské práce a ředitele ústavu. V případě publikace budu uveden jako spoluautor.

Prohlašuji, že jsem na celé bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně, 3. 6. 2005

.....

Pavel Růčka

Abstrakt

Abstrakt česky

Cílem této práce bylo vytvořit elektronickou učebnici pokrývající obsah cvičení předmětu Teorie automatického řízení I. Navrhnout strukturu této učebnice, naplnit její obsah mimo potřebné teorie zejména dostatečným množstvím názorných příkladů s využitím programového prostředí Matlabu.

Dalším cílem bylo ověřit vybrané klasické metody syntézy pro zadané proporcionální 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.

Abstrakt ve světovém jazyce

The goal of this paper work was to create electronic textbook covering the contents of the practise of the subject “Automatic control theory I” and to suggest the structure of this textbook, to fill its contents not only with necessary theory but also with enough practical examples using the program Matlab.

Next 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 and to compare these classical methods according to the quality of the regulation.

OBSAH

ÚVOD.....	7
1 E-LEARNING.....	9
1.1 OBECNĚ O E-LEARNINGU.....	9
1.2 VÝHODY A NEVÝHODY E-LEARNINGU.....	9
1.3 E-LEARNING V OBLASTI AUTOMATICKÉHO ŘÍZENÍ.....	10
2 ELEKTRONICKÁ UČEBNICE NA WWW STRÁNKÁCH.....	12
2.1 INTERNET.....	12
2.2 ZÁKLADNÍ SLUŽBA INTERNETU – WWW.....	12
2.3 TVORBA WWW.....	12
3 SYNTÉZA REGULAČNÍHO OBVODU – VYUŽITÍ KLASICKÝCH METOD SYNTÉZY.....	17
3.1 VYBRANÉ METODY SYNTÉZY.....	17
3.1.1 Z-N metoda kritického zesílení.....	17
3.1.2 Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky.....	19
3.1.3 Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky (Åströмова úprava).....	20
3.1.4 Chien, Hrones a Reswickova metoda (CHR metoda).....	20
3.1.5 Cohen-Coonova metoda.....	22
3.1.6 Fruehaufova metoda.....	23
3.1.7 Metoda vyváženého nastavení.....	24
3.1.8 Naslinova metoda.....	24
3.1.9 Whiteleyova metoda.....	25
3.2 APROXIMACE DOPRAVNÍHO ZPOŽDĚNÍ.....	28
3.3 KVALITA REGULACE.....	29
4 POPIS INTEGROVANÉHO VÝVOJOVÉHO PROSTŘEDÍ MATLAB.....	31
5 SIMULACE REGULAČNÍHO POCHODU PRO RŮZNÉ METODY NASTAVENÍ REGULÁTORU.....	34
5.1 TYP PROPORCIONÁLNÍ REGULOVANÉ SOUSTAVY BEZ DOPRAVNÍHO ZPOŽDĚNÍ (22).....	35
5.1.1 Z-N metoda kritického zesílení.....	35
5.1.2 Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky.....	36
5.1.3 Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky (Åströмова úprava).....	37
5.1.4 Chien, Hrones a Reswickova metoda (CHR metoda).....	39
5.1.5 Cohen-Coonova metoda.....	40
5.1.6 Fruehaufova metoda.....	41
5.1.7 Metoda vyváženého nastavení.....	42
5.1.8 Naslinova metoda.....	44
5.1.9 Whiteleyova metoda.....	45
5.2 TYP PROPORCIONÁLNÍ REGULOVANÉ SOUSTAVY S DOPRAVNÍM ZPOŽDĚNÍM (23).....	47
5.2.1 Z-N metoda kritického zesílení.....	47
5.2.2 Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky.....	48
5.2.3 Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky (Åströмова úprava).....	49
5.2.4 Chien, Hrones a Reswickova metoda (CHR metoda).....	50
5.2.5 Cohen-Coonova metoda.....	51
5.2.6 Fruehaufova metoda.....	52
5.2.7 Metoda vyváženého nastavení.....	53
5.2.8 Naslinova metoda.....	54
5.2.9 Whiteleyova metoda.....	55

5.3 POROVNÁNÍ VYBRANÝCH KLASICKÝCH METOD SYNTÉZY PODLE KVALITY REGULACE	57
ZÁVĚR.....	59
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	60
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	61
SEZNAM OBRÁZKŮ	63
SEZNAM TABULEK	65
SEZNAM PŘÍLOH.....	66

ÚVOD

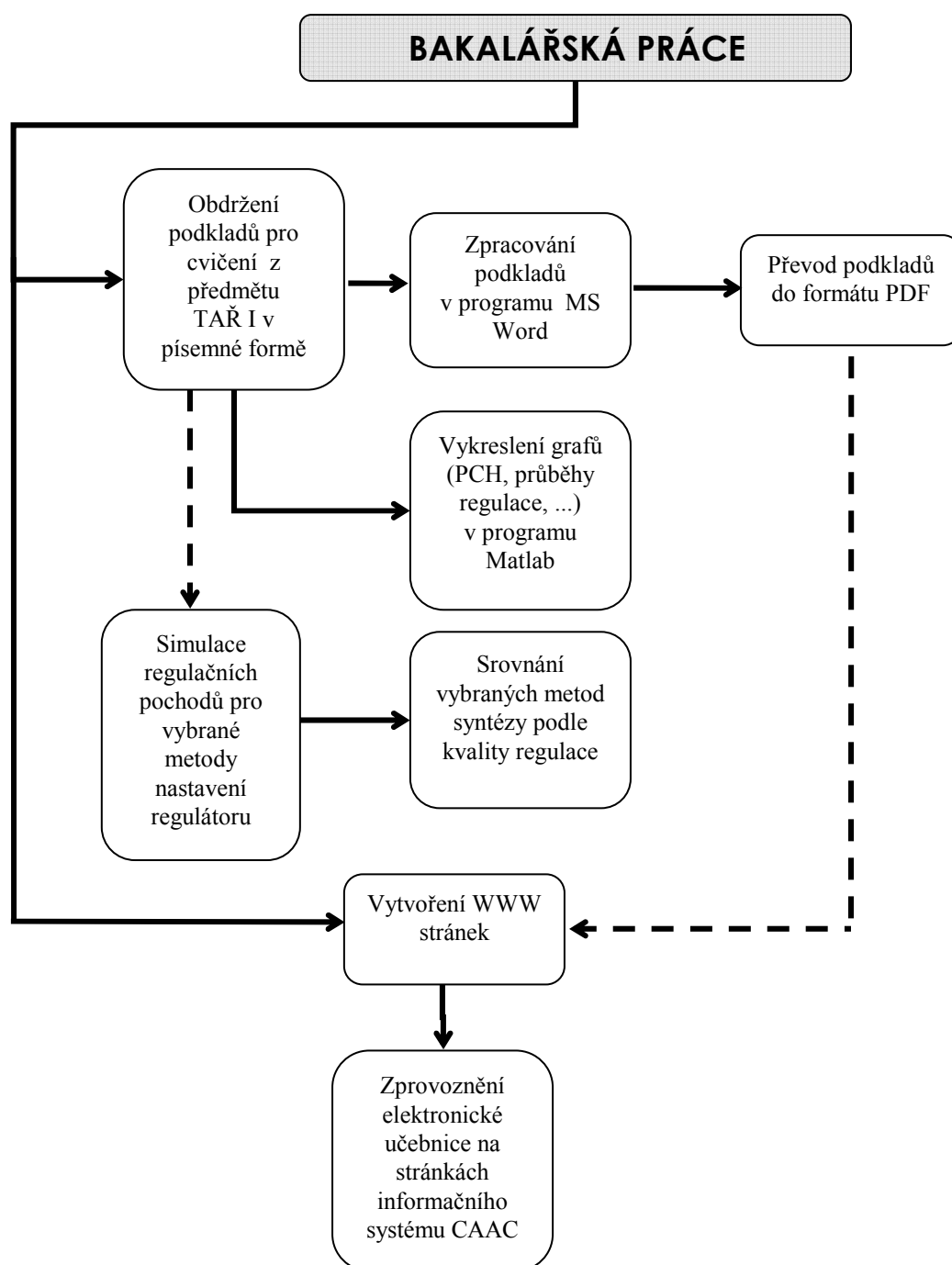
Elektronická forma výuky, tzv. E-learning, se v dnešní době rozšiřuje téměř do všech oblastí lidských činností. Výjimku tedy netvoří ani oblast automatického řízení. Tento rozvoj je způsoben jednak snadnou dostupností a efektivností této formy vzdělání, ale také prudkým vzrůstem počtu uživatelů sítě Internet. Internet vznikl v 70. letech minulého století, kdy byla propojena čtveřice počítačů amerických univerzit a dnes se odhaduje počet uživatelů Internetu na 450 milionů. Internet je tedy jedním ze způsobů, jak efektivně využívat informace pro větší množství zájemců. I proto se na Internetu stále více rozšiřují elektronické učebnice. V oblasti automatického řízení existuje celá řada takových učebnic. Jsou zaměřeny převážně na analýzu dynamických systémů a syntézu regulačních obvodů.

Náplní této bakalářské práce je vytvoření elektronické učebnice cvičení z předmětu Teorie automatického řízení I, vyučovaném na Fakultě technologické Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Tato elektronická učebnice bude začleněna na WWW stránky informačního systému CAAC.

V této práci se také budeme podrobněji zabývat tématem syntézy regulačních obvodů. Budeme porovnávat kvalitu regulace pro vybrané metody syntézy a pro dva typy přenosů regulovaných soustav. Prvním je přenos regulované soustavy bez dopravního zpoždění, tím druhým je přenos regulované soustavy s dopravním zpožděním. Pro srovnání kvality regulace jsme si vybrali metodu kvadratické regulační plochy.

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

Struktura práce



Obr. 1. Struktura bakalářské práce

1 E-LEARNING

1.1 Obecně o e-learningu

Pod pojmem e-learning, tzn. elektronická výuka, rozumíme efektivní využití moderních informačních technologií v procesu vzdělávání. Studující vstupují do jednotlivých kurzů pomocí počítačů vybavených Internetovými prohlížeči s připojením na Internet. Jednou z nejvýznamnějších složek e-learningu jsou multimediální výukové kurzy, které naleznou své využití jednak přímo ve školství a v podnicích, které chtějí vyškolit své zaměstnance pomocí moderních metod, ale informace mohou být přístupné také pro každého zájemce daného tématu výuky. Jedinou podmínkou pro možnost zúčastnit se takové formy výuky je mít počítač se základním programovým vybavením a přístup k Internetu. Tyto podmínky splňuje v dnešním moderním světě téměř každý [7].

Tato forma vzdělání klade důraz nejen na získání informací ve správný čas, ale na rozdíl od klasické výuky také na způsob předávání informací. V dnešní době nestačí informaci pouze získat, ale je nutné ji pochopit a dát do patřičných souvislostí. Právě to e-learning splňuje.

Distribuce kurzů e-learningu může být prováděna různými způsoby. Jedním z nich je kurz na CD ROMu. Uživatel si koupí CD ROM, který obsahuje daný kurz a pak již může na svém počítači studovat. Dalším způsobem je zveřejnění kurzu na Internetu. Tento způsob je finančně náročnější, ale výhodou je možnost komunikovat s dalšími účastníky kurzu nebo s lektory pomocí e-mailu, chatu, fóra nebo videokonference. Na základě zpětných informací z kurzů má lektor dostatek informací o každém studentovi. Může si zjistit, jak se mu daří v jednotlivých částech kurzu a poradit mu s probíranou látkou. Další výhodou Internetového způsobu distribuce je v případě aktualizace kurzu lektorem její okamžité poskytnutí studentům [7].

1.2 Výhody a nevýhody e-learningu

Výhody lze shrnout do následujících hlavních bodů [7]:

- zvolení času a délky trvání studia studentem a ne lektorem jako je tomu v klasické výuce
- snížení technických, organizačních a cestovních nákladů
- rychlé vyškolení většího množství i geograficky rozptýlených uživatelů
- možnost dodání téměř všech oblastí výuky (technická, humanitní, obchodní, atd.) a jejich relativně jednoduchá aktualizace
- kontrola naučených znalostí pomocí testů a jejich snadné vyhodnocování
- absence stresu při zkoušení jako tomu může být u klasické výuky
- jednotný systém výuky a testování znalostí

Nevýhody lze shrnout do následujících hlavních bodů [7]:

- nepřítomnost kolektivu jako motivujícího prostředí
- poměrně vysoké náklady na pořízení počítače a platbu Internetu

1.3 E-learning v oblasti automatického řízení

Elektronická výuka se v dnešní době rozšířila téměř do všech oblastí, tedy i do oblasti automatického řízení. Zabývají se jí jednak pracoviště ve světě (TU v Michiganu, na univerzitě v Marylandu nebo TU v Tampere), ale začíná se také prosazovat na pracovištích v České republice (UTB Zlín, TU Liberec, VŠB Ostrava, ČVUT Praha).

Na UTB ve Zlíně, Fakultě technologické existuje elektronická učebnice zabývající se analýzou dynamických systémů, syntézou regulačních obvodů a logickým řízením. Přístup je možný přes Internetové stránky <http://www.caac.zde.cz>. Mezi další aktivity UTB v této oblasti patří také modul zabývající se adaptivním řízením jednorozměrových diskrétních systémů. Jde o knihovnu samočinně se nastavujících regulátorů vytvořenou pro program Matlab/Simulink. Internetová adresa tohoto modulu je <http://www.utb.cz/stctool>.

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.), Teorie řízení II (fuzzy řízení a regulace, nelineární

systemy, diskretní parametrická identifikace, atd.), Číslicové řízení (analýza diskretních regulačních obvodů, modelování a diskretní identifikace, syntéza číslicových a diskretních 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 pro předmět Teorie řízení. Internetové stránky jsou přístupné z adresy http://www.fm.vslib.cz/~krt/krt_cz/vyuka/text.htm.

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>.

Elektronická učebnice věnovaná regulačním obvodům a syntéze regulačních obvodů je přístupná z Internetové adresy http://www.352.vsb.cz/uc_texty/welcome.htm.

Na ČVUT Praha, Fakultě elektrotechnické mají vytvořeno několik WWW stránek zabývajících se popisem dynamických systémů, regulačními obvody (včetně rozvětvených a mnohazměrových) a také teorií regulátorů. Stránky je možné navštívit na Internetové adrese <http://dce.felk.cvut.cz/sri2/ss>.

E-learning je v současné době velmi rozšiřován do mnoha oblastí a tedy i do oblasti automatického řízení. Každému umožňuje zvolit si čas, v němž chce probírat látku o kterou má v daný okamžik zájem. Je pravděpodobné, že právě e-learning se bude v blízké době neustále rozvíjet do dokonalejších podob a bude zabírat více a více oblastí ve vzdělávání. E-learning nemůže nahradit klasickou výuku, i když má oproti ní řadu výhod. Je však velmi účinný při podpoře klasické výuky.

2 ELEKTRONICKÁ UČEBNICE NA WWW STRÁNKÁCH

2.1 Internet

Internet je v současné době nejrozsáhlejší počítačovou sítí ve světě. Jednotlivé počítače jsou vzájemně propojeny (kabely nebo bezdrátově) tak, že každý může navázat spojení s libovolným jiným počítačem připojeným do této 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 450 milionů. Ti všichni mohou spolu po této síti komunikovat, nabízet informace a využívat nabízené informace. Nejvýznamnější a nejpoblárnější službou Internetu je bezesporu World Wide Web (WWW), která nabízí velmi široké spektrum nejroznějších informací. Dalšími významnými službami jsou elektronická pošta (používá se již více než 30 let), Telnet, FTP, elektronické konference, diskusní skupiny a služby umožňující komunikaci v reálném čase (CHAT, IRC, ICQ, atd.) [3], [10].

2.2 Základní služba Internetu – WWW

Služba WWW (World Wide Web), která umožňuje přenos dat a prohlížení Internetových stránek, je jednou z nejmladších služeb Internetu. Oblíbenost této služby je dána především tím, že je uživatelsky orientovaná, obsahuje multimediální prvky a velmi snadno se ovládá. WWW využívá technické struktury Internetu a zpracovává informace uložené na jednotlivých počítačích. Uživatel musí mít pro fungování této služby nainstalován speciální program – Internetový prohlížeč (Microsoft Internet Explorer, Opera, Netscape Navigator, atd.), který obstarává komunikaci se serverem [3], [10].

2.3 Tvorba WWW

Jednou z nejstarších technologií sloužící k vytváření webových stránek je HTML (HyperText Markup Language). Dnes je základem pro vytváření všech webových stránek i když existuje celá řada jeho inovací. HTML dokument sestává z textu, který si přejeme

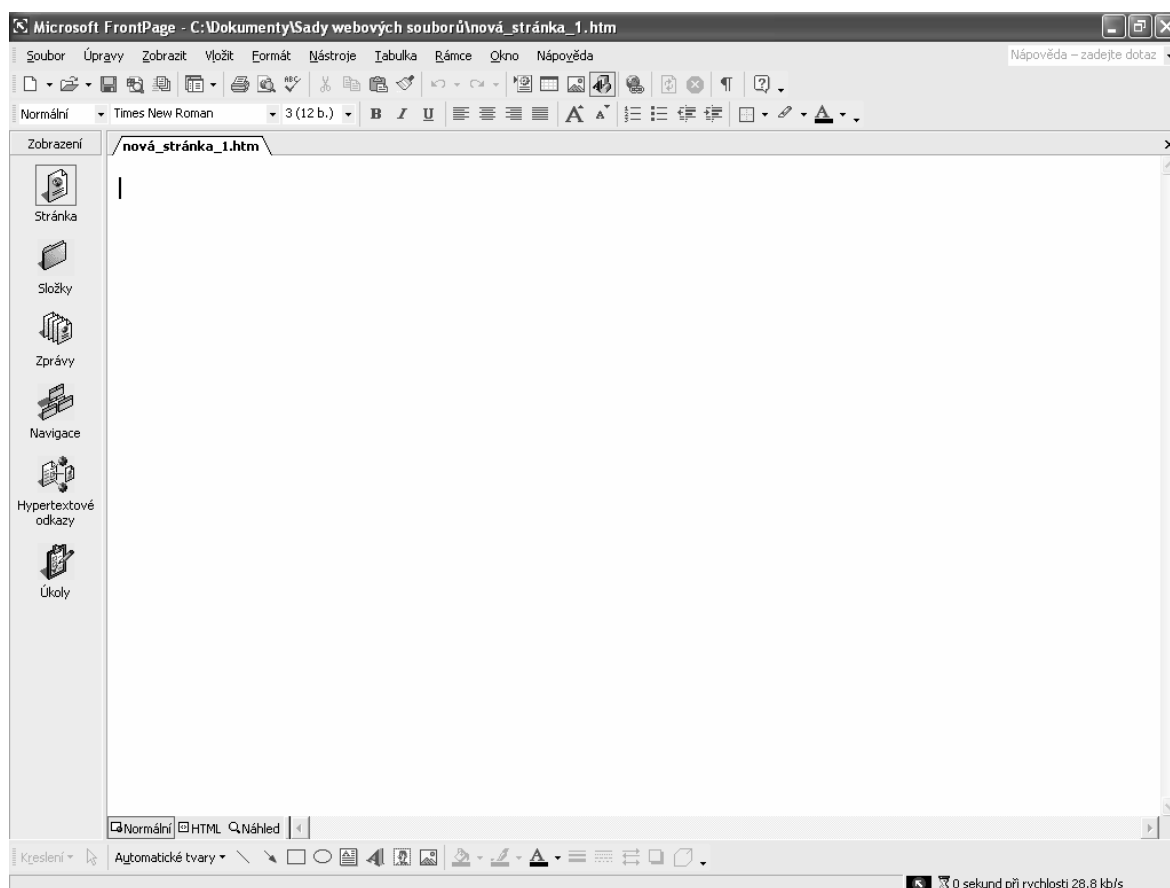
zobrazit a je umístěn mezi HTML příkazy neboli značky (tags), které informují prohlížeč o tom, jakým způsobem má text zobrazit. Každý HTML dokument musí být uvozen počáteční značkou `<html>` a ukončen odpovídající značkou `</html>`. Ta informuje prohlížeč o tom, že daný dokument je napsán v jazyce HTML. HTML dokument obsahuje dvě části – záhlaví (*head*) a tělo (*body*). Text obsažený mezi `<head>` a `</head>` se nezobrazuje na stránce prohlížeče. Tato část obsahuje informace o dokumentu (metainformace), např. jeho titulek. Na webové stránce se zobrazí text obsažený mezi `<body>` a `</body>`. HTML má také mnoho značek a atributů, které se používají pro další úpravy textu.

HTML dokumenty se můžou vytvářet několika způsoby:

- HTML editory – programy, které znají zpravidla všechny komponenty jazyka (FrontPage, HomeSite, Macromedia Dreamweaver, atd.).
- Konvertory – programy sloužící k převodu jiných typů souborů (*.doc, *.txt) do jazyka HTML (MS Word, atd.).
- Přímá editace HTML stránek – stačí jakýkoliv ASCII editor (poznámkový blok) a znalost jazyka HTML.

MS FrontPage

Microsoft FrontPage je program, který umožňuje rychlou a snadnou tvorbu a správu WWW stránek bez znalosti HTML jazyka. Zahrnuje nástroje vizuálního vytváření a úprav webových stránek, správy webů a práci s nimi. Program zobrazuje všechny součásti stránky jako je text, obrázky, tabulky a formuláře stejným způsobem, jakým se zobrazí v prohlížeči. Při tvorbě stránky tak za nás FrontPage vytváří potřebný kód HTML. Stačí tedy pouze vytvářet stránky přímo v grafickém režimu tak, jak bychom chtěli, aby vypadali na webu. Program za nás převede veškeré formátování do HTML jazyka. Ve stránkovém zobrazení můžeme používat text různých stylů jazyka HTML, formátovat odstavce, měnit barvu a velikost textu, atd. Mezi pokročilejší možnosti tvorby stránek ve FrontPage patří tvorba formulářů, tabulek, rámců a vkládání ovládacích prvků ActiveX a apletů Javy. Tento program také podporuje novější webové technologie CSS a DHTML. Do webové stránky můžeme také vkládat obrázky různých typů, které se převedou do formátu GIF nebo JPEG.



Obr. 2. Ukázka hlavního okna programu FrontPage

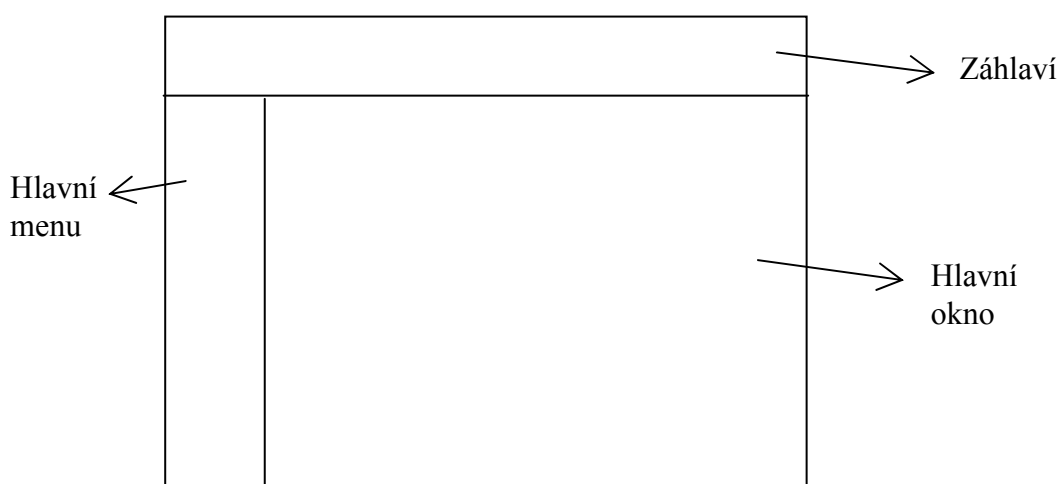
Tvorba elektronické učebnice v programu MS FrontPage

WWW stránky elektronické učebnice pokrývající obsah cvičení předmětu Teorie automatického řízení I byla vytvořena v programu MS FrontPage. Základní rozložení WWW stránek s učebnicí je vidět na Obr. 3. Umístění menu je zvoleno podél levého okraje. Na horním okraji je záhlaví s názvem a logem Institutu řízení procesů a aplikované informatiky. Menu obsahuje tyto položky:

- *Úvod* – po kliknutí na tento odkaz se v kterémkoliv místě stránek přesměrujeme na úvodní stránku
- *Obsah cvičení* – tato položka menu skrývá osnovu předmětu Teorie automatického řízení I
- *Podklady* – odkaz obsahuje zpracované učební podklady k předmětu Teorie automatického řízení I jako je:

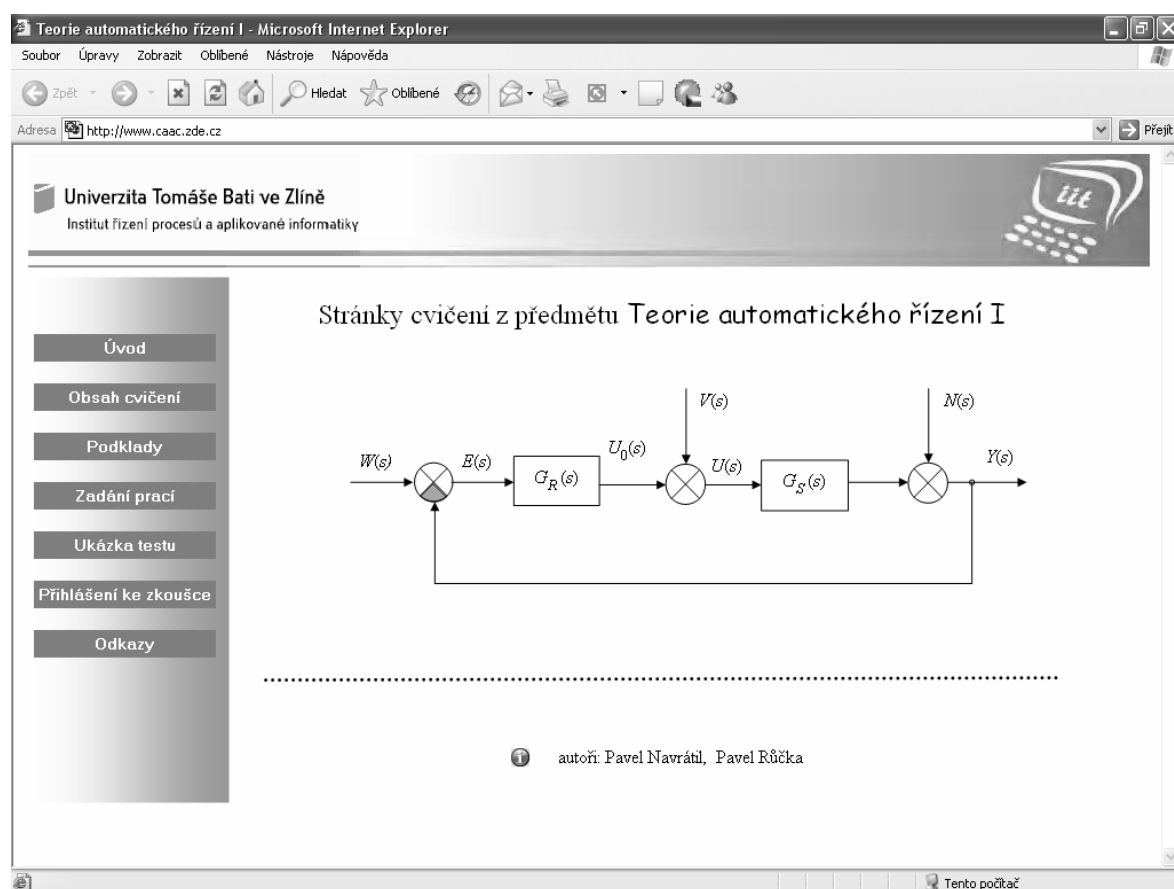
- Laplaceova transformace

- Přenos systému
 - Řešení diferenciálních rovnic
 - Přechodová, impulsní funkce a přechodová, impulsní charakteristika
 - Frekvenční přenos a frekvenční charakteristiky
 - Určení výsledného přenosu složeného systému
 - Stabilita systému
 - Syntéza regulačního obvodu
 - Popis systému ve stavovém prostoru
- *Zadání prací* – zde je uvedeno zadání dvou semestrálních prací
 - Vnější popis a analýza spojitého dynamického systému
 - Syntéza spojitého jednorozměrového regulačního obvodu a vnitřní popis systému
 - *Ukázka testu* – ukázka testových otázek s vypracovanými odpověďmi
 - *Přihlášení ke zkoušce* – odkaz pro přesměrování na stránky <http://www.portal.utb.cz>, kde je možno se přihlásit ke zkoušce
 - *Odkazy* – seznam odkazů k dalším výukovým materiálům pro předmět TAŘ I



Obr. 3. Základní rozložení WWW stránek

Ukázka úvodní stránky elektronické učebnice je na Obr. 4.



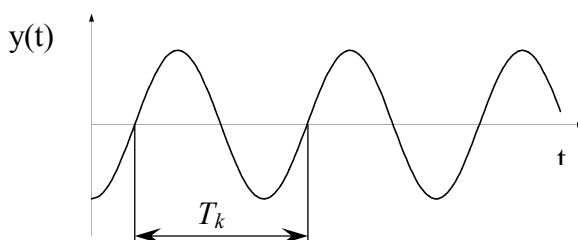
Obr. 4. Úvodní stránka elektronické učebnice

3 SYNTÉZA REGULAČNÍHO OBVODU – VYUŽITÍ KLASICKÝCH METOD SYNTÉZY

3.1 Vybrané metody syntézy

3.1.1 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 $k_R = k_{Rk}$, 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.

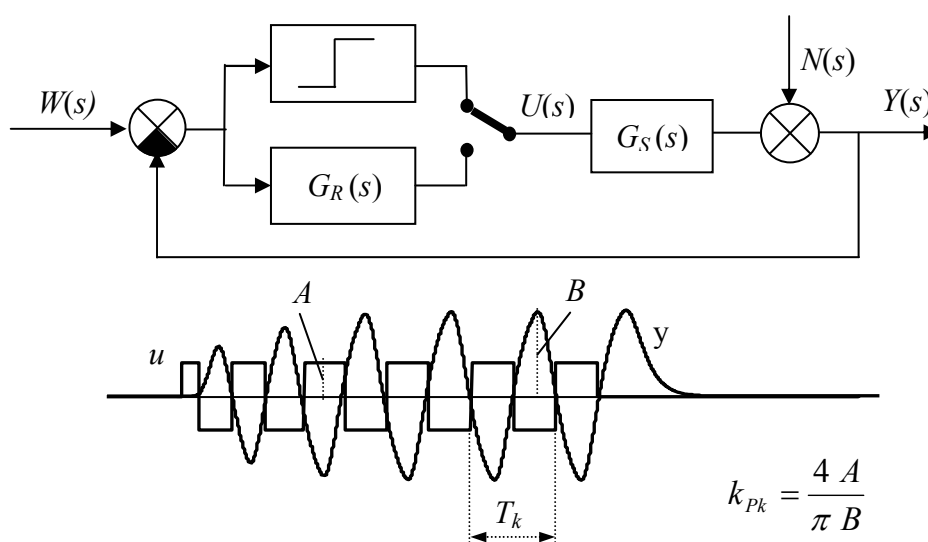


Obr. 5. Určení T_k při r_{0k}

Kritické zesílení a kritická perioda kmitů, lze určit i jiným způsobem, a to vložením nelinearity (relé) do zpětné vazby (Obr. 6). 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], [9].

Tab. 1. Nastavení parametrů regulátoru metodou Ziegler – Nichols

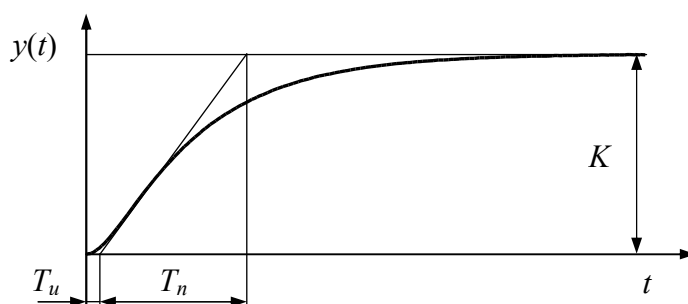
	k_P	T_I	T_D	r_0	r_{-1}	r_1
P	$0,5 k_{Pk}$	-	-	$0,5 r_{0k}$	-	-
PI	$0,45 k_{Pk}$	$0,85 T_k$	-	$0,45 r_{0k}$	$\frac{0,54 r_{0k}}{T_k}$	-
PD	$0,4 k_{Pk}$	-	$0,05 T_k$	$0,4 r_{0k}$	-	$0,02 r_{0k} T_k$
PID	$0,6 k_{Pk}$	$0,5 T_k$	$0,12 T_k$	$0,6 r_{0k}$	$\frac{1,2 r_{0k}}{T_k}$	$0,075 r_{0k} T_k$

Obr. 6. 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 $G_0(s) = G_R(s)G_S(s)$, přičemž na regulátoru $G_R(s)$ je nastavena pouze P složka, čili r_0 .

3.1.2 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 γ ; platí $\gamma = T_n / T_u$. Ze získaných parametrů vypočítáme parametry regulátoru (Tab. 2) [2], [9].



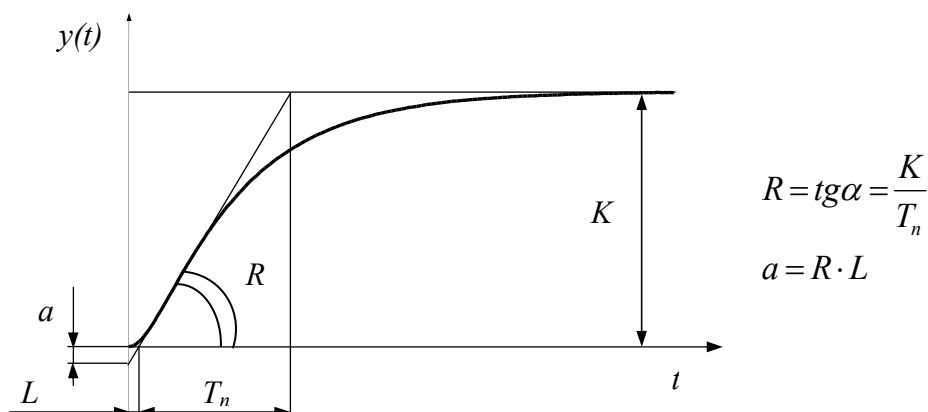
Obr. 7. Určení parametrů K , T_u a T_n z přechodové charakteristika regulované soustavy

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

	k_P	T_I	T_D
P	$\gamma \frac{1}{K}$	-	-
PI	$0,9\gamma \frac{1}{K}$	$3,5 T_u$	-
PD	$1,2\gamma \frac{1}{K}$	-	$0,25 T_u$
PID	$1,25\gamma \frac{1}{K}$	$2 T_u$	$0,5 T_u$

3.1.3 Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky (Åströмова úprava)

Jedná se o podobnou metodu jako 3.1.2, 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], [9].



Obr. 8. Určení parametrů a , L z přechodové charakteristiky regulované soustavy

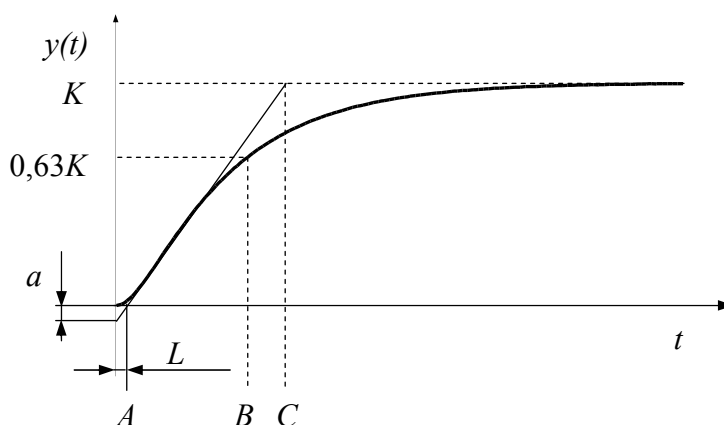
Tab. 3. Nastavení parametrů regulátoru ze získaných hodnot z přechodové charakteristiky podle Åströmovy úpravy

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

3.1.4 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 $0,63 K$ (vzdálenost AB – Obr. 9). Druhou možností je získat T z doby náběhu, potom platí $T = T_n$ (vzdálenost AC - viz. Obr. 9) [2], [9].



Obr. 9. 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
P	$\frac{0,3}{a}$			$\frac{0,7}{a}$		
PI	$\frac{0,35}{a}$	$1,2T$		$\frac{0,6}{a}$	T	
PID	$\frac{0,6}{a}$	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
P	$\frac{0,3}{a}$			$\frac{0,7}{a}$		
PI	$\frac{0,6}{a}$	$4L$		$\frac{0,7}{a}$	$2,3L$	
PID	$\frac{0,95}{a}$	$2,4L$	$0,42L$	$\frac{1,2}{a}$	$2L$	$0,42L$

3.1.5 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
P	$\frac{1}{K.r} \left(1 + \frac{r}{3} \right)$	-	-
PI	$\frac{1}{K.r} \left(0,9 + \frac{r}{12} \right)$	$\frac{30+3r}{9+20r} L$	-
PID	$\frac{1}{K.r} \left(\frac{4}{3} + \frac{r}{4} \right)$	$\frac{32+6r}{13+8r} L$	$\frac{4}{11+2r} L$

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

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

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

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

kde: $a = \frac{KL}{T}$, $\tau = \frac{L}{L+T}$

3.1.6 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 Frueaufovu metodu

	k_P	T_I	T_D
PI-A	$\frac{5T}{9KL}$	$5L$	-
PI-B	$\frac{T}{2KL}$	T	-
PID-A	$\frac{5T}{9KL}$	$5T$	$\leq 0,5L$
PID-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 $\frac{L}{T} \geq 0,33$

3.1.7 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 τ 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	$\frac{1}{K} \left[1 - \frac{2\tau}{1 + \sqrt{1 + 2\tau^2}} \right]$	$\left[\frac{1 + \sqrt{1 + 2\tau^2}}{2} - \tau \right] T_{ar}$	$\leq \frac{T_I}{4}$

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

3.1.8 Naslinova metoda

Naslin 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

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

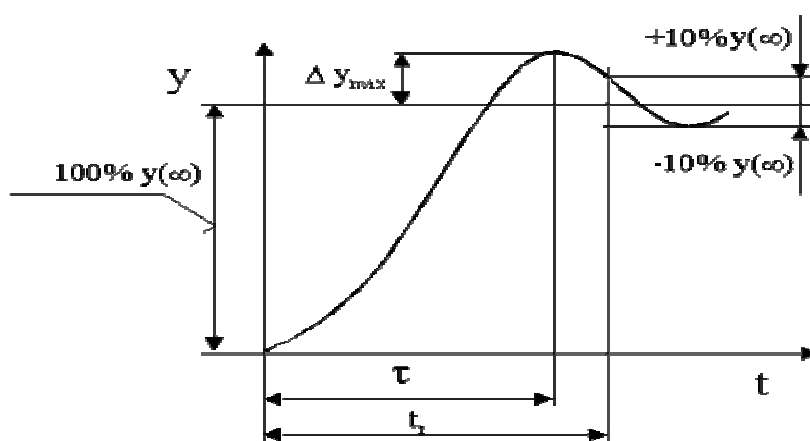
pak maximální přeregulování $\Delta y_{\max}$ [%] (překmit) závisí na hodnotě α podle Tab. 10.

Tab. 10. Závislost $\Delta y_{\max}$ [%] na α podle Naslina

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

3.1.9 Whiteleyova metoda

Metoda vychází ze vzorových typů přenosových funkcí uzavřeného regulačního obvodu, které udávají vyhovující regulační pochod a podle nich upravuje seřazením 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 standardními tvary přenosové funkce, která je poměrem obrazu veličiny výstupní a vstupní skokové funkce (řídící veličiny nebo poruchy). Standardní 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. 10. Regulační pochod odpovídající standardnímu 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 $\overline{a_i}$ standardního tvaru pro daný stupeň

$$G_{w/y}(q) = \frac{\overline{b_0}}{\overline{a_n q^n + \dots + a_1 q + a_0}} \quad (7)$$

Obecně má přenos $G_{w/y}(s)$ $a_n \neq 1$, $a_0 \neq 1$. Proto je nutno jej přetransformovat tak, aby $a_n = a_0 = 1$. Postup je takový, že nejprve podělíme čitatele i jmenovatele koeficientem a_0 a potom použijeme substituci

$$s = \left(\frac{a_0}{a_n} \right)^{\frac{1}{n}} q \quad (8)$$

a dostaneme přenos ve tvaru

$$\begin{aligned} G_{w/y}(q) &= \frac{b_0/a_0}{\frac{a_n}{a_0} \left(\frac{a_0}{a_n} \right)^{\frac{n}{n}} q^n + \dots + \frac{a_2}{a_0} \left(\frac{a_0}{a_n} \right)^{\frac{2}{n}} q^2 + \frac{a_1}{a_0} \left(\frac{a_0}{a_n} \right)^{\frac{1}{n}} q + 1} = \\ &= \frac{\beta_0}{\alpha_n q^n + \dots + \alpha_1 q + \alpha_0} \end{aligned} \quad (9)$$

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

Tabelované časy τ^{tab} , t_r^{tab} se přepočítají na skutečné dle vztahů

$$\tau = \tau^{tab} \sqrt[n]{\frac{a_n}{a_0}}, \quad t_r = t_r^{tab} \sqrt[n]{\frac{a_n}{a_0}} \quad (10)$$

Obdobným způsobem byly vypracovány tabulky koeficientů standardního tvaru pro přenosové funkce typu

$$G_{w/y}(s) = \frac{b_1 s + b_0}{a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0} \quad (11)$$

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

$$G_{w/y}(s) = \frac{b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0} \quad (12)$$

(jsou uvedeny v Tab. 13).

Tab. 11. Standardní tvary přenosové funkce typu (6)

Stupeň n	koeficienty							charakteristické hodnoty regulovaného pochodu		
	$\overline{a_6}$	$\overline{a_5}$	$\overline{a_4}$	$\overline{a_3}$	$\overline{a_2}$	$\overline{a_1}$	$\overline{a_0}$	$\tau^{tab} [s]$	$t_r^{tab} [s]$	$\Delta y_{max} [\%]$
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 (11)

Stupeň n	koeficienty							charakteristické hodnoty regulovaného pochodu		
	$\overline{a_6}$	$\overline{a_5}$	$\overline{a_4}$	$\overline{a_3}$	$\overline{a_2}$	$\overline{a_1}$	$\overline{a_0}$	$\tau^{tab} [s]$	$t_r^{tab} [s]$	$\Delta y_{max} [\%]$
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 (12)

Stupeň n	koeficienty							charakteristické hodnoty regulovaného pochodu		
	$\overline{a_6}$	$\overline{a_5}$	$\overline{a_4}$	$\overline{a_3}$	$\overline{a_2}$	$\overline{a_1}$	$\overline{a_0}$	$\tau^{tab} [s]$	$t_r^{tab} [s]$	$\Delta y_{max} [\%]$
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

3.2 Aproximace dopravního zpoždění

Protože k výpočtu parametrů regulátoru, které jsou uvedeny v kapitole 5.2, 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

$$e^{-Ls} \approx \frac{P_n(s)}{Q_n(s)} \quad (13)$$

kde značí

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

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

Volbou „ n “ lze ovlivnit přesnost aproximace, např.

pro $n = 2$ lze uspokojivě použít pro úhlový kmitočet

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

pro $n = 4$ lze uspokojivě použít pro úhlový kmitočet

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

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

$$e^{-Ts} \approx \frac{1 - \frac{sL}{2}}{1 + \frac{sL}{2}} \quad (14)$$

Taylorova aproximace čitatele

Tato aproximace je vyjádřena ve tvaru

$$e^{-Ls} = (1 - Ls + \dots) \approx \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} (Ls)^n \quad (15)$$

Pro $n = 1$ platí

$$e^{-Ls} \approx 1 - Ls \quad (16)$$

Taylorova aproximace jmenovatele

Tato aproximace je vyjádřena ve tvaru

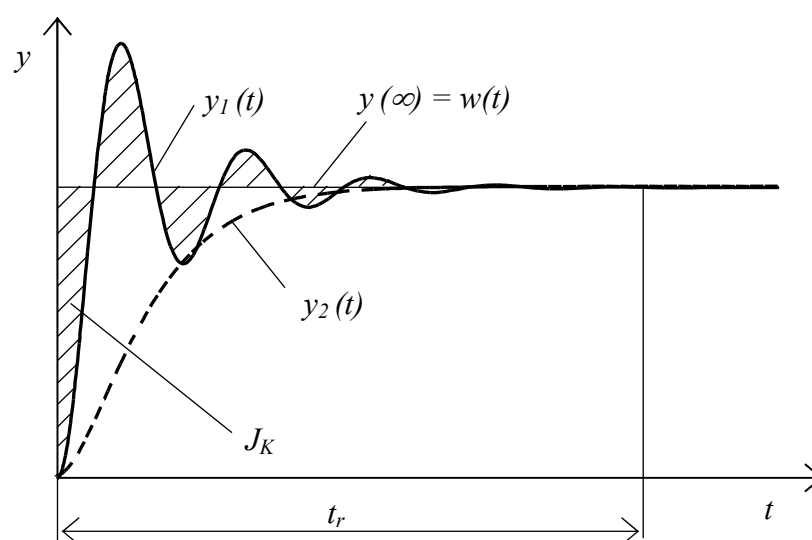
$$e^{-Ls} = \frac{1}{e^{Ls}} = \frac{1}{(1 + Ls + \dots)} \approx \frac{1}{\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} (Ls)^n} \quad (17)$$

Pro $n = 1$ platí

$$e^{-Ls} \approx \frac{1}{1 + Ls} \quad (18)$$

3.3 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 (21). Platí, že čím menší je hodnota kvadratické regulační plochy J_K , tím je kvalita regulace větší [2].



Obr. 11. Regulační pochody kmitavé – $y_1(t)$ a aperiodické – $y_2(t)$ vyvolané změnou $w(t)$ nebo vznikem poruchy $v(t)$

$$J_K = \int_0^{\infty} [e(t)]^2 dt \quad (19)$$

$$e(t) = y(t) - y(\infty) \quad (20)$$

Výpočet kvadratické regulační plochy se řídí vztahem

$$J_K = \int_0^{\infty} [y(t) - y(\infty)]^2 dt = \int_0^{\infty} [y(t) - w(t)]^2 dt \approx \int_0^{t_r} [y(t) - w(t)]^2 dt \quad (21)$$

4 POPIS INTEGROVANÉHO VÝVOJOVÉHO PROSTŘEDÍ MATLAB

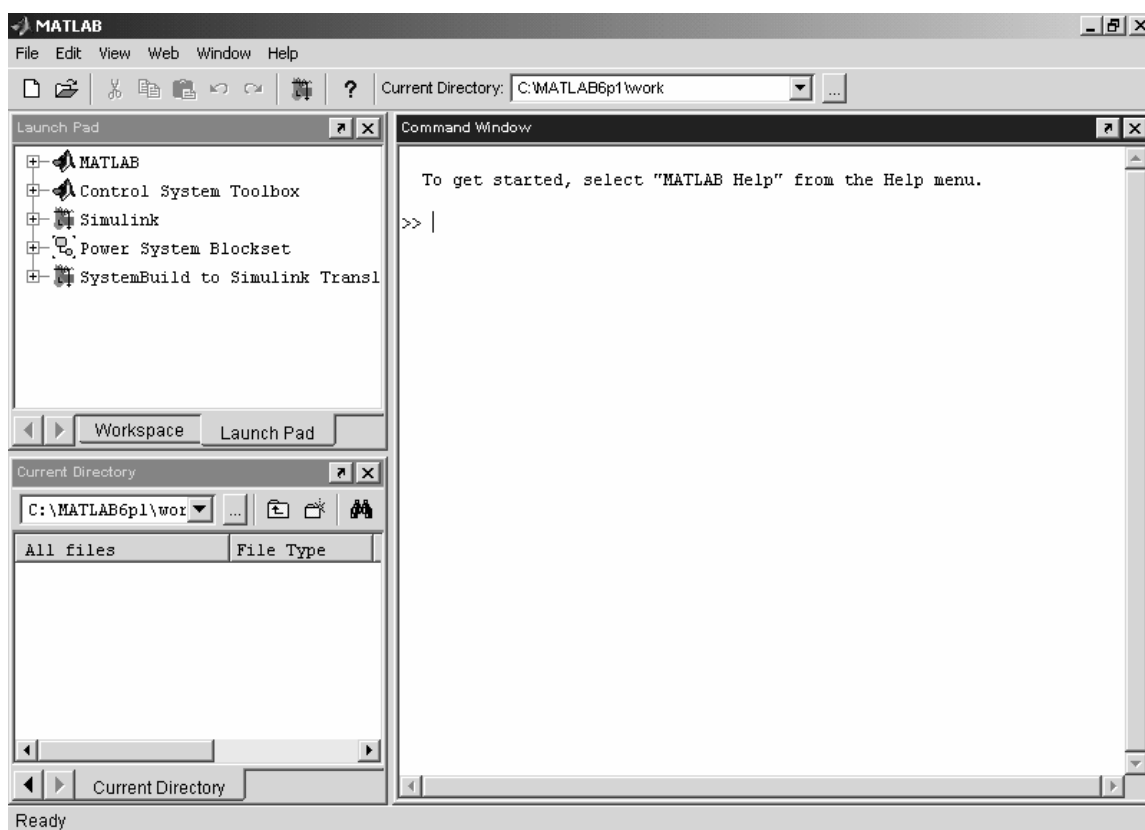
Matlab je velmi výkonný jazyk pro technické výpočty. Integruje výpočty, vizualizace a programování do jednoduše použitelného prostředí. Mezi hlavní oblasti použití patří:

- modelování a simulace
- inženýrské výpočty a grafika
- tvorba grafického uživatelského rozhraní
- analýza dat a jejich vizualizace
- atd.

Matlab obsahuje celou řadu různě složitých funkcí, které jsou součástí jádra (zabudované funkce). Skupiny takovýchto funkcí, které se hodí k řešení určitého okruhu problémů se nazývají Toolboxy. Existuje celá řada Toolboxů – Control Toolbox, System Identification Toolbox, Symbolic Math Toolbox, atd.

Příkazy se do Matlabu zadávají do okna Command Window (Obr. 12) za „>>” a ukončují se Enterem. Pokud chceme psát více příkazů na jeden řádek, musíme je oddělit čárkou či středníkem. Šipkou nahoru na klávesnici se posouváme v historii příkazů.

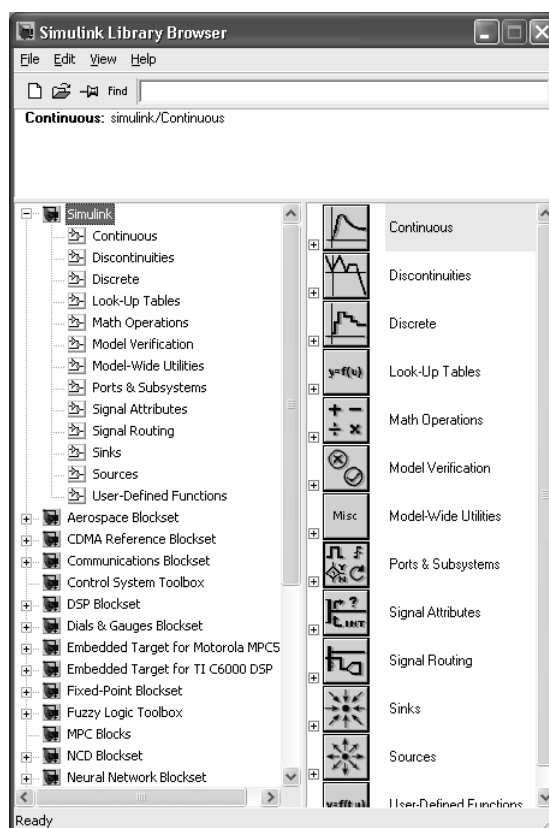
Nápověda je v Matlabu velmi propracovaná. Lze ji spustit stisknutím tlačítka F1 na klávesnici nebo napsáním příkazu *help* do příkazového řádku. Zde jsou velmi přehledným způsobem zpracována jednotlivá témata nápovědy. Pokud bychom chtěli získat nápovědu ke konkrétnímu příkazu, zadáme do příkazového řádku příkaz ***help*** *příkaz*. Po zadání se do Command Window vypíše stručná nápověda k zadanému příkazu.



Obr. 12. Hlavní okno programu Matlab

Samostatnou nadstavbu Matlabu tvoří Simulink. Ten řeší soustavy nelineárních diferenciálních rovnic s grafickým zadáváním řešené soustavy. Umožňuje graficky sledovat průběhy veličin v libovolném místě zapojení. Používá se např. pro simulaci dynamického chování systému. Můžeme ho spustit třemi způsoby: ikonou Simulink na panelu nástrojů, přes Launch Pad, napsáním Simulink v příkazovém řádku. Bloky obsahují všechny potřebné součásti (Obr. 13) k vytvoření simulačního schématu:

- Continuous – spojité funkce
- Discontinuities – nespojitosti, nelinearity
- Math – matematické funkce
- Ports & Subsystems – vstupy, výstupy, podsystémy
- Signal Routing – slučovače, rozbočovače
- Sources – vstupy
- Simulink Extras – speciální bloky



Obr. 13. Knihovna Simulinku

Pro vytvoření simulačního schématu je třeba otevřít v hlavním menu *File-New-Model* a poté vybrané bloky přenášet do nového okna. Po sestavení obvodu spustíme simulaci tlačítkem *Start Simulation*.

5 SIMULACE REGULAČNÍHO POCHODU PRO RŮZNÉ METODY NASTAVENÍ REGULÁTORU

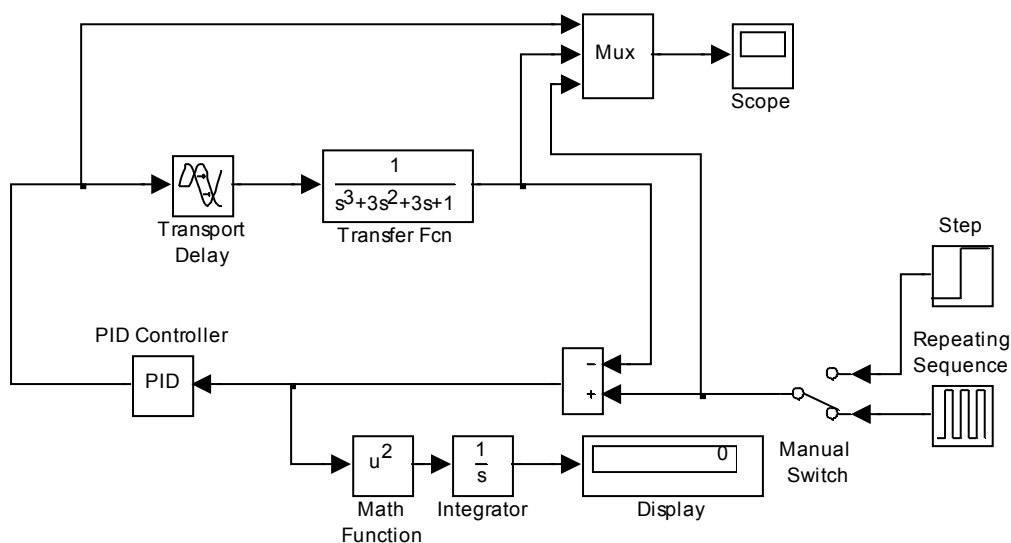
V této části práce se budeme podrobněji zabývat návrhem parametrů regulátoru pro vybrané metody syntézy (viz. kapitola 3).

Parametry regulátoru budeme dále počítat pro tyto přenosy regulované soustavy:

$$G_s(s) = \frac{1}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1} \quad (22)$$

$$G_s(s) = \frac{2}{4s + 1} e^{-2s} \quad (23)$$

Po výpočtu parametrů regulátoru k přenosům (22) i (23) pro jednotlivé metody syntézy budeme zadávat hodnoty do uzavřeného regulačního obvodu programu Matlab/Simulink, jehož schéma je na Obr. 14.



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

V jednotlivých průbězích regulace (Obr. 15 až Obr. 32) jsou v legendě uvedeny veličiny u – akční veličina, y – regulovaná veličina, w – žádaná veličina.

5.1 Typ proporcionální regulované soustavy bez dopravního zpoždění (22)

5.1.1 Z-N metoda kritického zesílení

- 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:

$$\text{přenos řízení: } G_W = \frac{G_R G_S}{1 + G_R G_S} = \frac{r_0}{s^3 + 3s^2 + 3s + (1 + r_0)} = \frac{L(s)}{F(s)}$$

$$\text{charakteristický polynom URO: } F(s) = s^3 + 3s^2 + 3s + (1 + r_0)$$

k určení r_{0k} použijeme např. Hurwitzovo kritérium

$$H_3 = \begin{vmatrix} 3 & 1+r_0 & 0 \\ 1 & 3 & s \\ 0 & 3 & 1+r_0 \end{vmatrix} \quad H_2 = \begin{vmatrix} 3 & 1+r_0 \\ 1 & 3 \end{vmatrix}$$

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

$$9 - 1 - r_0 = 0 \rightarrow r_0 = \underline{r_{0k} = 8}$$

Pro r_{0k} kmitá obvod s periodou $T_K = \frac{2\pi}{\omega_K}$, potřebujeme tedy určit úhlový kmitočet ω_K .

Použijeme nějaké frekvenční kritérium, např. Michajlovovo-Leonhardovo

$$F(j\omega_K) = F(s) \Big|_{s=j\omega_K} = (j\omega_K)^3 + 3(j\omega_K)^2 + 3(j\omega_K) + 1 + r_0 = U(\omega_K) + jV(\omega_K)$$

$$F(j\omega_K) = -j\omega_K^3 - 3\omega_K^2 + 3j\omega_K + 9 = (9 - 3\omega_K^2) + j(3\omega_K - \omega_K^3)$$

Nyní určíme buď z reálné nebo imaginární části ω_K , přičemž platí pro obvod na hranici stability $V(\omega_K) = 0$ $U(\omega_K) = 0$

$$U(\omega_K) = 0 \quad \text{tedy} \quad 9 - 3\omega_K^2 = 0 \rightarrow \omega_K = \pm\sqrt{3}$$

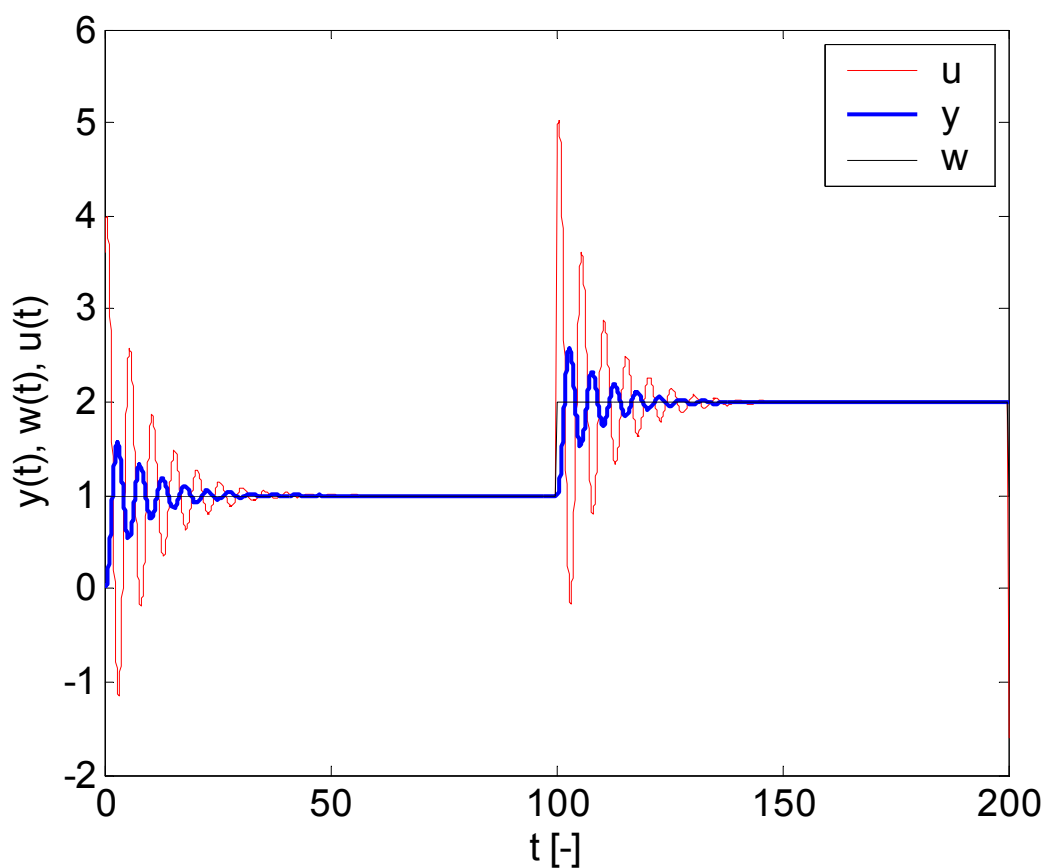
Fyzikální význam má řešení $\omega_k = \sqrt{3}$

Kritická perioda kmitů $T_k = \frac{2\pi}{\omega_k} = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} = 3,6276$

Vypočtené hodnoty: $r_{0k} = 8 \quad T_k = 3,6276$

Parametry regulátoru: $r_0 = 3,6 \quad r_{-1} = 1,1910 \quad \text{resp.} \quad k_p = 3,6 \quad T_I = 3,0835$

přenos regulátoru: $G_R(s) = 3,6 + \frac{1,1910}{s} = 3,6 \left(1 + \frac{1}{3,0835s} \right)$



Obr. 15: Průběh regulace pro přenos (22) pro nastavení parametrů regulátoru získaných Z-N metodou

5.1.2 Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky

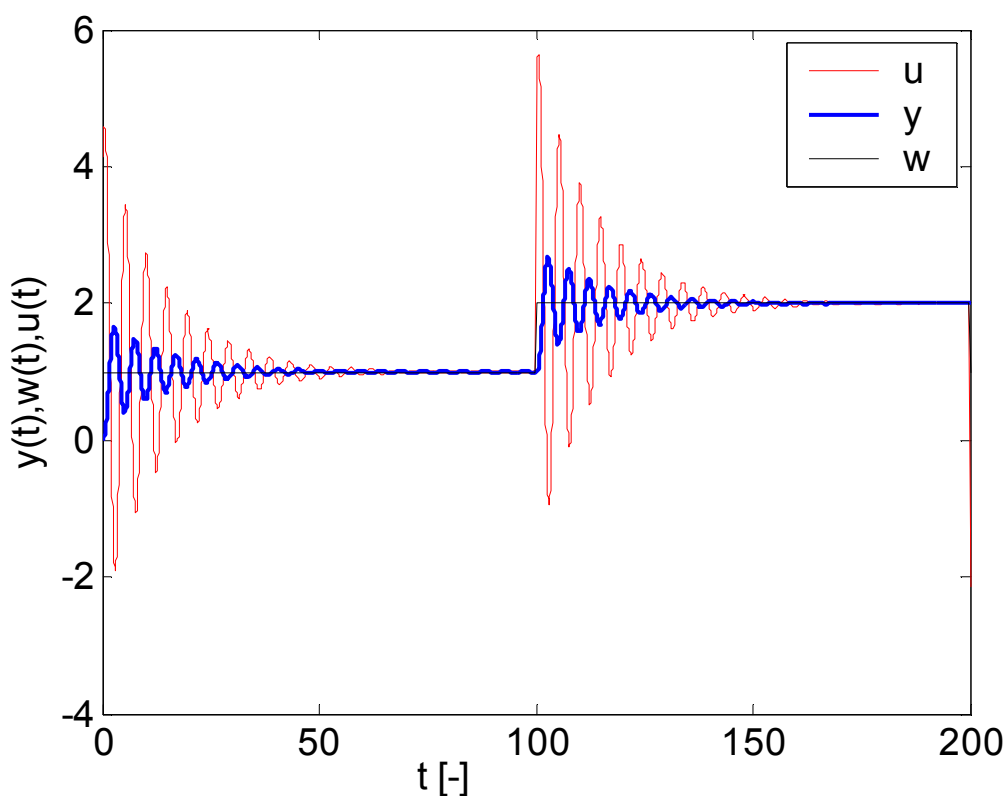
Přenos regulátoru: $G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right)$

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

Naměřené hodnoty: $T_u = 0,8051$ $T_n = 3,6957$ $K = 1 \rightarrow \gamma = \frac{T_n}{T_u} = 4,5904$

Parametry regulátoru: $k_p = 4,1314$ $T_I = 2,8179$ $r_0 = 4,1314$ $r_{-1} = \frac{k_p}{T_I} = 1,4661$

Přenos regulátoru: $G_R(s) = 4,1314 + \frac{1,4661}{s} = 4,1314 \left(1 + \frac{1}{2,8179s} \right)$



Obr. 16. Průběh regulace pro přenos (22) pro nastavení parametrů regulátoru z přechodové charakteristiky

5.1.3 Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky (Åströмова úprava)

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:

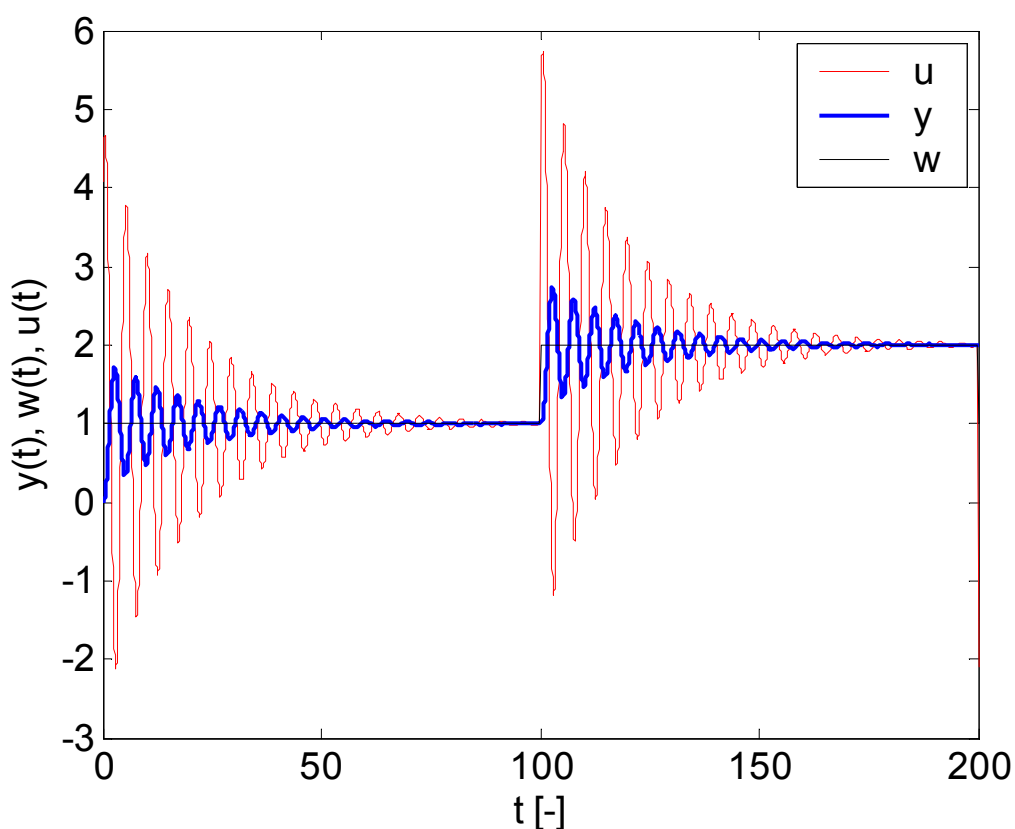
Naměřené hodnoty: $T_u = 0,8051$ $T_n = 3,6597$

$$K = 1 \rightarrow L = T_u = 0,8051 \quad a = \frac{K}{T_n} L = 0,22$$

Parametry regulátoru: $k_p = 4,0909$ $T_I = 2,4153$

$$r_0 = 4,0909 \quad r_{-1} = \frac{k_p}{T_I} = 1,6937$$

$$\text{Přenos regulátoru: } G_R(s) = 4,0909 + \frac{1,6937}{s} = 4,0909 \left(1 + \frac{1}{2,4153s} \right)$$



Obr. 17. Průběh regulace pro přenos (22) pro nastavení parametrů regulátoru z přechodové charakteristiky Åströmovou úpravou

5.1.4 Chien, Hrones a Reswickova metoda (CHR metoda)

Přenos regulátoru: $G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right)$

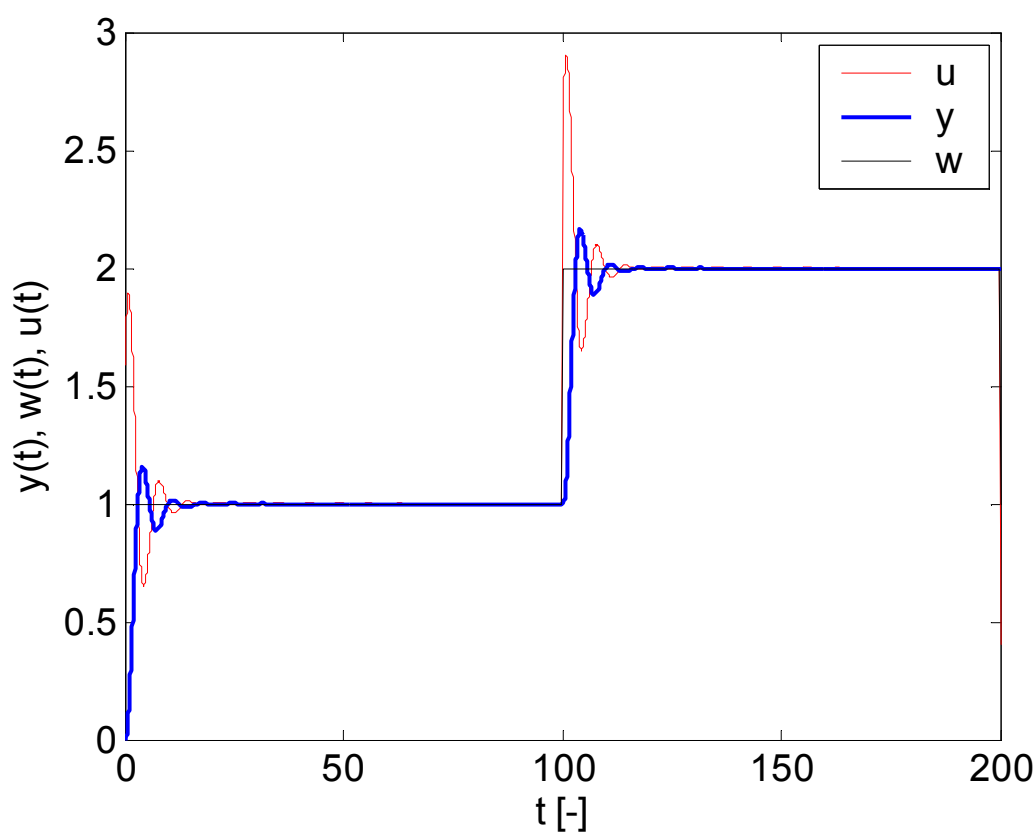
Určení požadovaných hodnot dané metody syntézy a výpočet stavitelných parametrů regulátoru:

Naměřené hodnoty: $T_u = 0,8051$ $T_n = 3,6597$ $K=1$

$\rightarrow L = T_u = 0,8051$ $a = \frac{K}{T_n} L = 0,22$ $y(T) = 0,6321K \Rightarrow T = 2,4530$

Parametry regulátoru: $k_p = 1,5909$ $T_I = 2,9436$ $r_0 = 1,5909$ $r_{-1} = \frac{k_p}{T_I} = 0,5405$

Přenos regulátoru: $G_R(s) = 1,5909 + \frac{0,5405}{s} = 1,5909 \left(1 + \frac{1}{2,9436s} \right)$



Obr. 18. Průběh regulace pro přenos (22) pro nastavení parametrů regulátoru CHR metodou

5.1.5 Cohen-Coonova metoda

Přenos regulované soustavy musíme upravit na typizovaný přenos:

$$G_s(s) = \frac{1}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1} \Rightarrow G_{upr,s}(s) = \frac{1}{2,453s + 1} e^{-0,8051}$$



určeno z $y(T) = 0,6321K$

Přenos regulátoru: $G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right)$

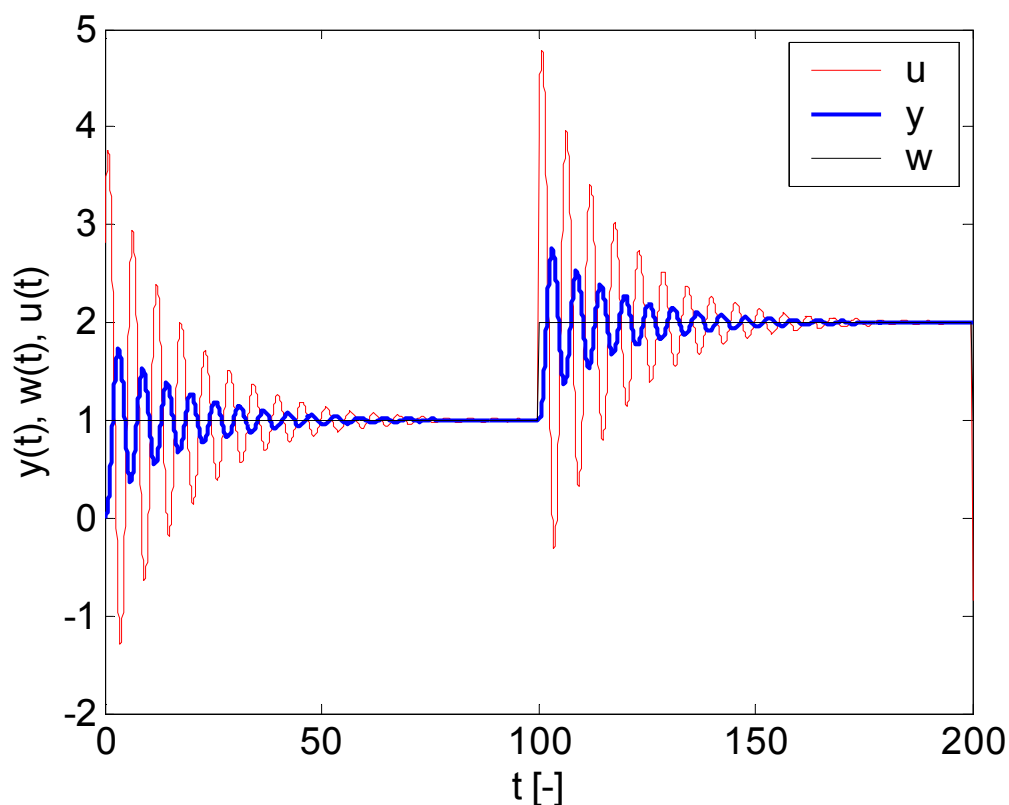
Určení požadovaných hodnot dané metody syntézy a výpočet stavitelných parametrů regulátoru:

Získané hodnoty: $K = 1 \quad T = 2,453 \quad L = 0,8051$

parametry regulátoru: $r = \frac{L}{T} = 0,3282 \quad k_p = 2,8256 \quad T_I = 1,6028$

$$r_0 = 2,8256 \quad r_{-1} = \frac{k_p}{T_I} = 1,7629$$

Přenos regulátoru: $G_R(s) = 2,8256 + \frac{1,7629}{s} = 2,8256 \left(1 + \frac{1}{1,6028s} \right)$



Obr. 19. Průběh regulace pro přenos (22) pro nastavení parametrů regulátoru Cohen-Coonovou metodou

5.1.6 Fruehaufova metoda

$$G_S(s) = \frac{1}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1} \Rightarrow G_{upr,s}(s) = \frac{1}{2,453s + 1} e^{-0,8051}$$

určeno z $y(T) = 0,6321k$

Přenos regulátoru: $G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right)$

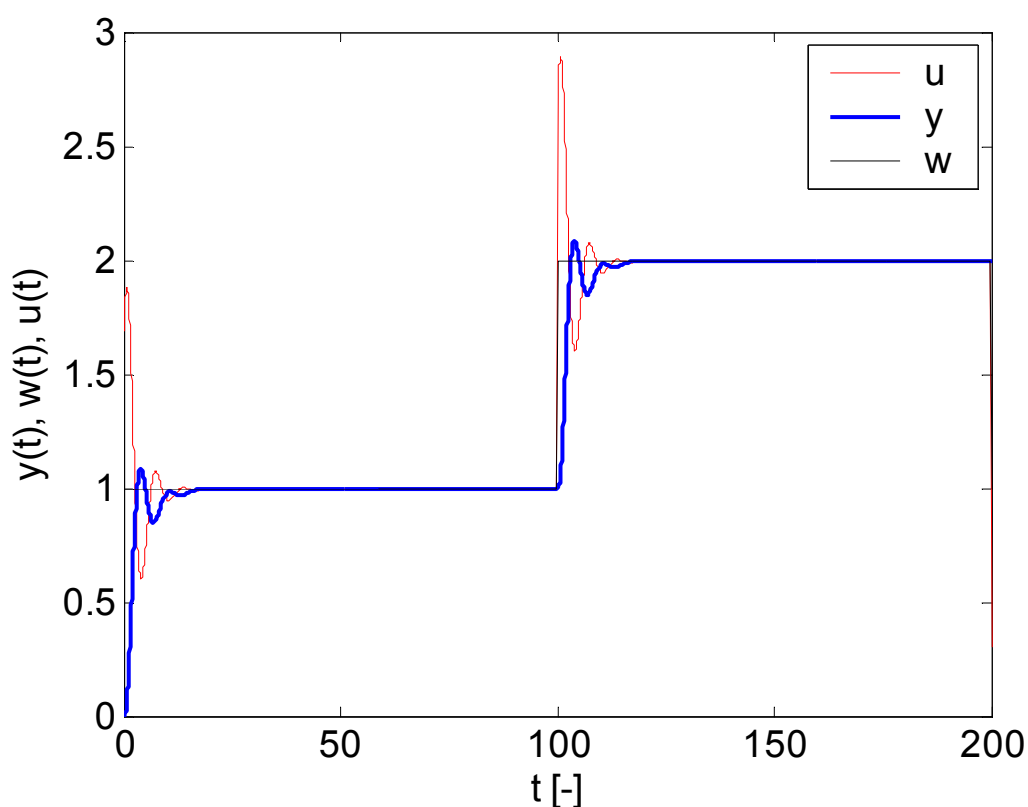
Určení požadovaných hodnot dané metody syntézy a výpočet stavitelných parametrů regulátoru:

Získané hodnoty: $K = 1$ $T = 2,453$ $L = 0,8051$

parametry regulátoru: $r = \frac{L}{T} = 0,3282 < 0,33 \rightarrow PI - A$ $k_p = 1,6927$ $T_I = 4,0255$

$$r_0 = 1,6927 \quad r_{-1} = \frac{k_p}{T_I} = 0,4205$$

Přenos regulátoru: $G_R(s) = 1,6927 + \frac{0,4205}{s} = 1,6927 \left(1 + \frac{1}{4,0255s} \right)$



Obr. 20. Průběh regulace pro přenos (22) pro nastavení parametrů regulátoru Fruehaufovou metodou

5.1.7 Metoda vyváženého nastavení

$$G_S(s) = \frac{1}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1} \Rightarrow G_{upr,s}(s) = \frac{1}{2,453s + 1} e^{-0,8051}$$

určeno z $y(T) = 0,6321k$

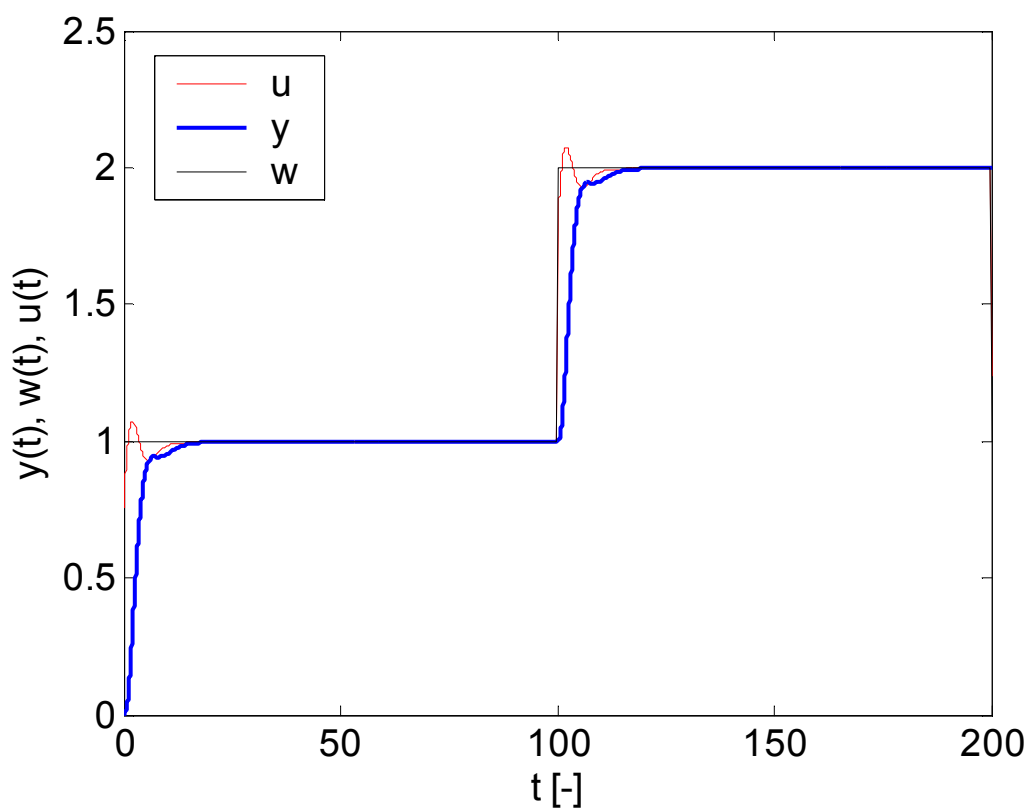
Přenos regulátoru: $G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right)$

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

Získané hodnoty: $K = 1$ $T = 2,453$ $L = 0,8051$ $T_{ar} = 3,2581$ $\tau = 0,2471$

Parametry regulátoru: $k_p = 0,76$ $T_I = 2,5496$ $r_0 = 0,76$ $r_{-1} = \frac{k_p}{T_I} = 0,2981$

Přenos regulátoru: $G_R(s) = 0,76 + \frac{0,2981}{s} = 0,76 \left(1 + \frac{1}{2,5496s} \right)$



Obr. 21. Průběh regulace pro přenos (22) pro nastavení parametrů regulátoru metodou vyváženého nastavení

5.1.8 Naslinova metoda

Přenos regulátoru: $G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right)$

- překmit maximálně 5% $\rightarrow \alpha = 2$

Přenos řízení:

$$G_w(s) = \frac{G_R(s)G_S(s)}{1 + G_R(s)G_S(s)} = \frac{\left(r_0 + \frac{r_{-1}}{s} \right) \left(\frac{1}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1} \right)}{1 + \left(r_0 + \frac{r_{-1}}{s} \right) \left(\frac{1}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1} \right)} = \frac{r_0 s + r_{-1}}{s^4 + 3s^3 + 3s^2 + (1 + r_0)s + r_{-1}}$$

Charakteristická rovnice:

$$s^4 + 3s^3 + 3s^2 + (1 + r_0)s + r_{-1} = 0$$

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

Platí:

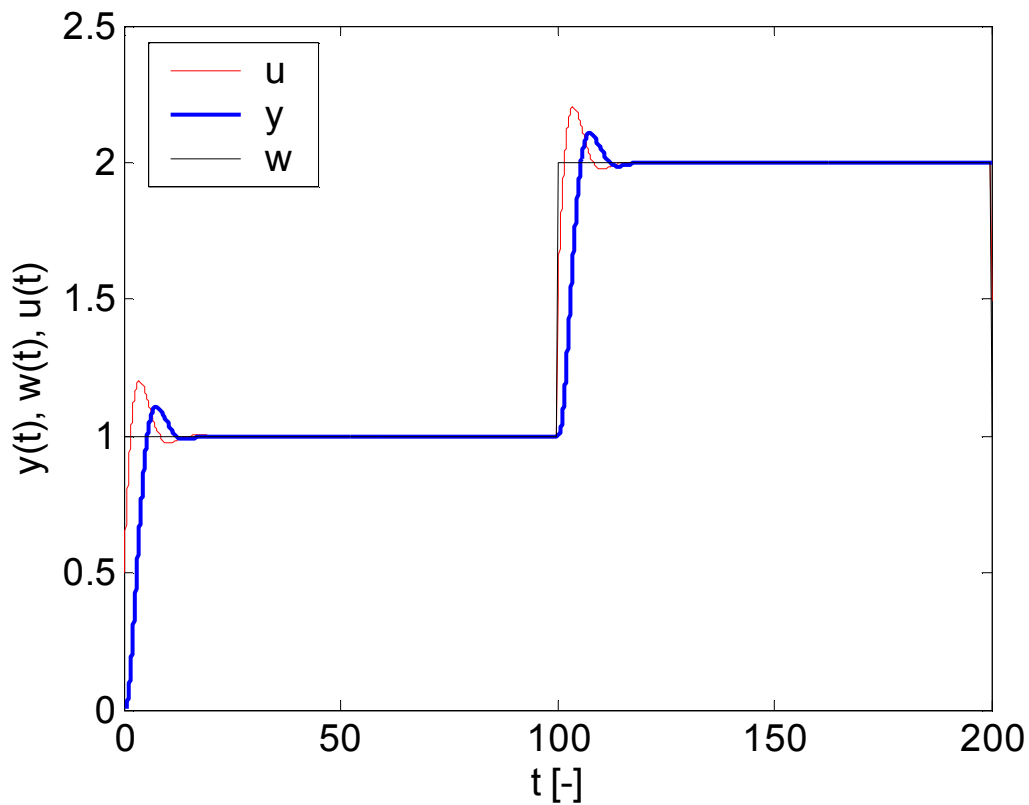
$$\text{pro } i = 1: (1 + r_0)^2 \geq 2 \cdot 3 \cdot r_{-1} \Rightarrow r_{-1} = 0,375$$

$$\text{pro } i = 2: 9 \geq 2 \cdot 3 \cdot (1 + r_0) \Rightarrow r_0 = 0,5$$

$$\text{pro } i = 3: 9 \geq 2 \cdot 1 \cdot 3 \rightarrow \text{podmínka je splněna vždy}$$

$$\text{Parametry regulátoru: } r_0 = 0,5 \quad r_{-1} = 0,375 \quad k_p = 0,5 \quad T_I = \frac{r_0}{r_{-1}} = 1,33\bar{3}$$

$$\text{Přenos regulátoru: } G_R(s) = 0,5 + \frac{0,375}{s} = 0,5 \left(1 + \frac{1}{1,333s} \right)$$



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

5.1.9 Whiteleyova metoda

Hodnota zesílení PI regulátoru r_0 vyšla záporná. Fyzikální význam nastavení záporné hodnoty nemá smysl. Nezvolili jsme správnou strukturu regulátoru. Pro nastavení parametrů regulátoru touto metodou je tedy třeba vybrat jinou strukturu regulátoru.

Proto použijeme např. regulátor I.

$$\text{Přenos regulátoru: } G_R(s) = \frac{r_{-1}}{s} = \frac{1}{T_I s}$$

$$\text{Přenos řízení: } G_w(s) = \frac{G_R(s)G_S(s)}{1 + G_R(s)G_S(s)} = \dots = \frac{r_{-1}}{s^4 + 3s^3 + 3s^2 + s + r_{-1}}$$

Postupnými úpravami dostáváme rovnice:

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

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

$$\bar{a}_2 = \alpha_2 \Rightarrow 3,4 = \frac{3}{r_{-1}} (r_{-1})^{\frac{2}{4}} = \frac{3}{r_{-1}^{\frac{1}{2}}} = \frac{3}{\sqrt{r_{-1}}}$$

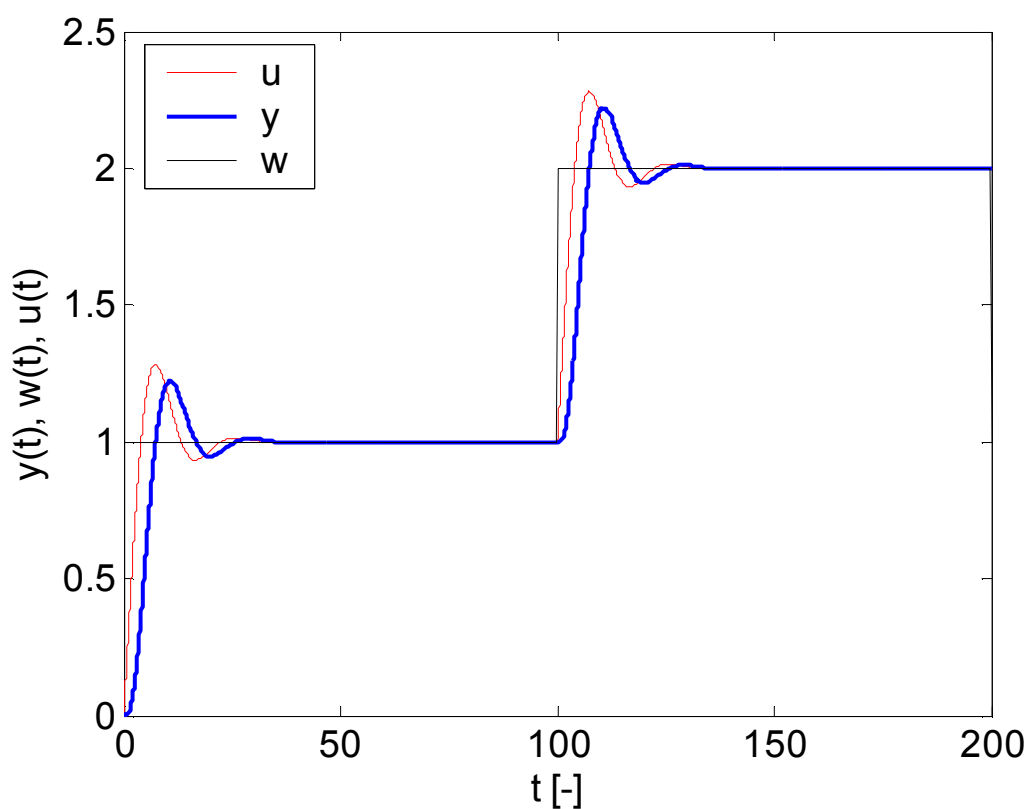
$$\bar{a}_1 = \alpha_1 \Rightarrow 2,6 = \frac{1}{r_{-1}} (r_{-1})^{\frac{1}{4}} = \frac{1}{r_{-1}^{\frac{3}{4}}} = \frac{1}{\sqrt[4]{r_{-1}^3}}$$

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

Na základě výše uvedených podmínek se určí parametr I regulátoru, tedy

$$2,6 = \frac{1}{\sqrt[4]{r_{-1}^3}} \rightarrow r_{-1} = 0,2797$$

Přenos regulátoru: $G_R(s) = \frac{0,2797}{s}$



Obr. 23. Průběh regulace pro přenos (22) pro nastavení parametrů regulátoru Whiteleyovou metodou

5.2 Typ proporcionální regulované soustavy s dopravním zpožděním (23)

5.2.1 Z-N metoda kritického zesílení

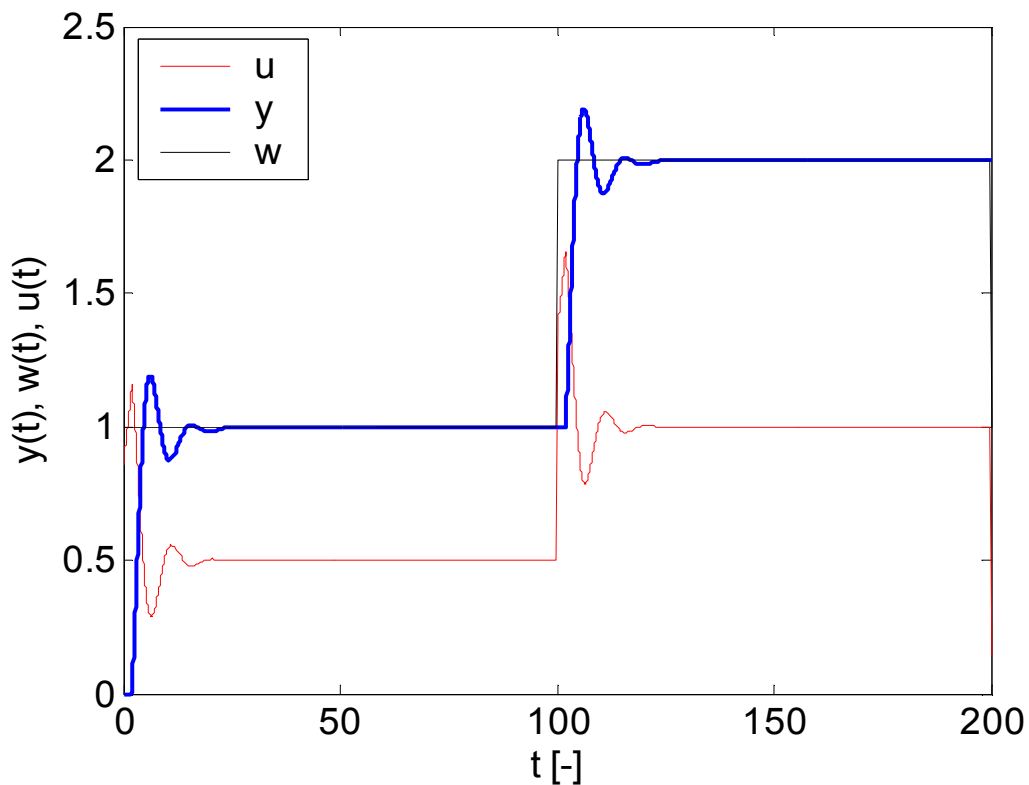
- přenos PI regulátoru $G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right)$

Určení požadovaných hodnot dané metody syntézy a výpočet stavitelných parametrů regulátoru (podrobnější výpočet je uveden v příloze P1 v poznámce u kapitoly 7.2).

Vypočtené hodnoty: $r_{0k} = 1,904$ $\omega_k = \frac{\sqrt{4r_{0k}^2 - 1}}{4} = 0,9186 \rightarrow T_k = \frac{2\pi}{\omega_k} = 6,84$

parametry regulátoru: $r_0 = 0,8568$ $r_{-1} = 0,1503$ resp. $k_p = 0,8568$ $T_I = 5,8140$

přenos regulátoru: $G_R(s) = 0,8568 + \frac{0,1503}{s} = 0,8568 \left(1 + \frac{1}{5,8140s} \right)$



Obr. 24. Průběh regulace pro přenos (23) pro nastavení parametrů regulátoru získaných Z-N metodou

5.2.2 Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky

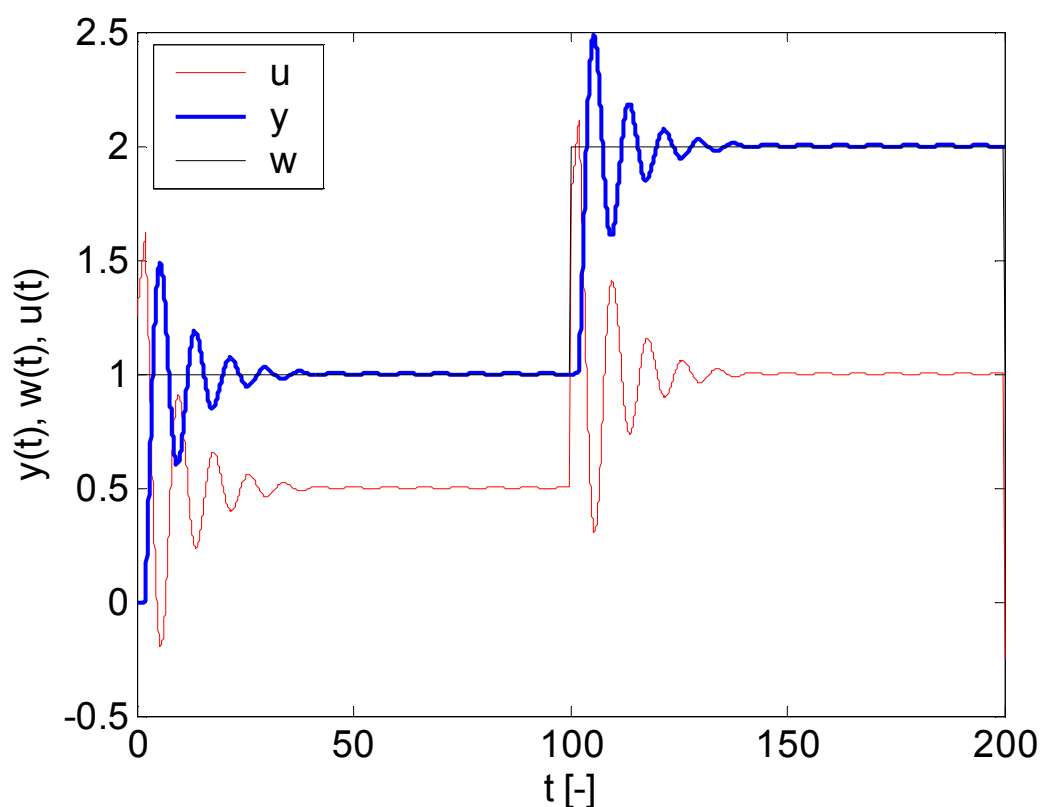
Přenos soustavy: $G_R = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right)$

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

Naměřené hodnoty: $T_u = 1,9640$ $T_n = 5,4591$ $K = 2 \rightarrow \gamma = \frac{T_n}{T_u} = 2,7796$

Parametry regulátoru: $k_p = 1,2508$ $T_I = 6,8740$ $r_0 = 1,2508$ $r_{-1} = \frac{k_p}{T_I} = 0,1820$

Přenos regulátoru: $G_R(s) = 1,2508 + \frac{0,1820}{s} = 4,1314 \left(1 + \frac{1}{2,8179s} \right)$



Obr. 25. Průběh regulace pro přenos (23) pro nastavení parametrů regulátoru z přechodové charakteristiky

5.2.3 Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky (Åströмова úprava)

Přenos regulátoru: $G_R = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right)$

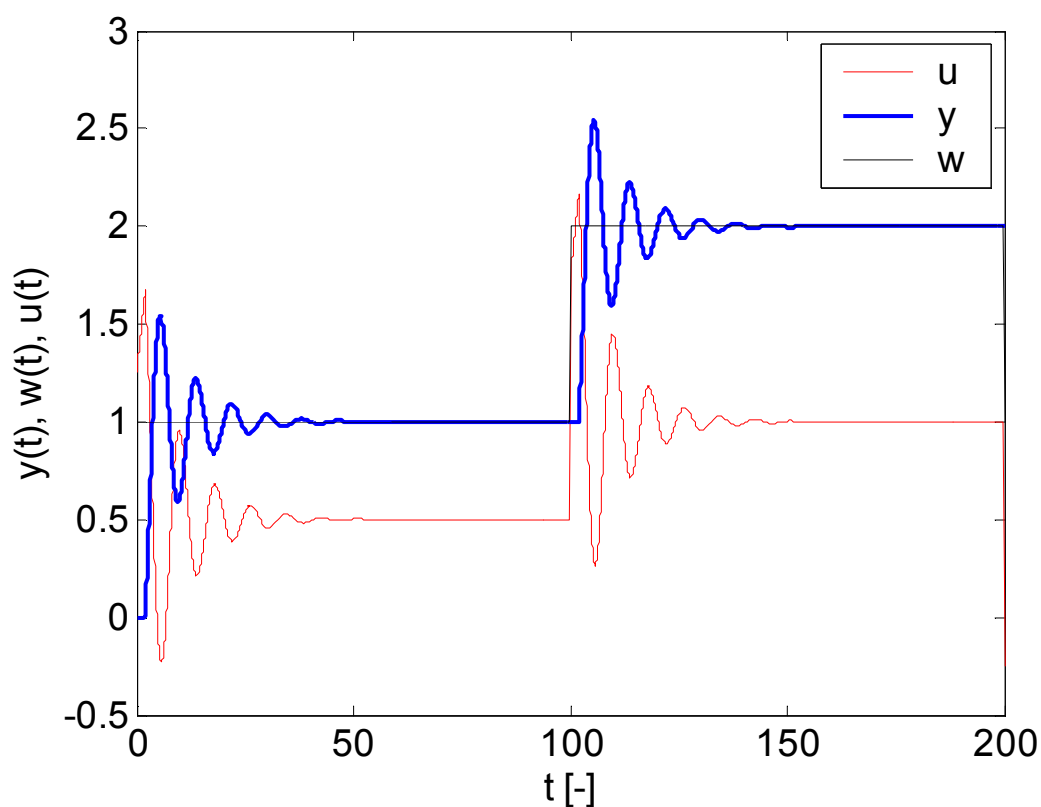
Určení požadovaných hodnot dané metody syntézy a výpočet stavitelných parametrů regulátoru:

naměřené hodnoty: $T_u = 1,9640$ $T_n = 5,4591$ $K=2$

$\rightarrow L = T_u = 1,9640$ $a = \frac{K}{T_n} L = 0,7195$

parametry regulátoru: $k_p = 1,2509$ $T_I = 5,8920$ $r_0 = 1,2509$ $r_{-1} = \frac{k_p}{T_I} = 0,2123$

Přenos regulátoru: $G_R(s) = 1,2509 + \frac{0,2123}{s} = 1,2509 \left(1 + \frac{1}{5,8920s} \right)$



Obr. 26. Průběh regulace pro přenos (23) pro nastavení parametrů regulátoru z přechodové charakteristiky Åströmovou úpravou

5.2.4 Chien, Hrones a Reswickova metoda (CHR metoda)

Přenos regulátoru: $G_R = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right)$

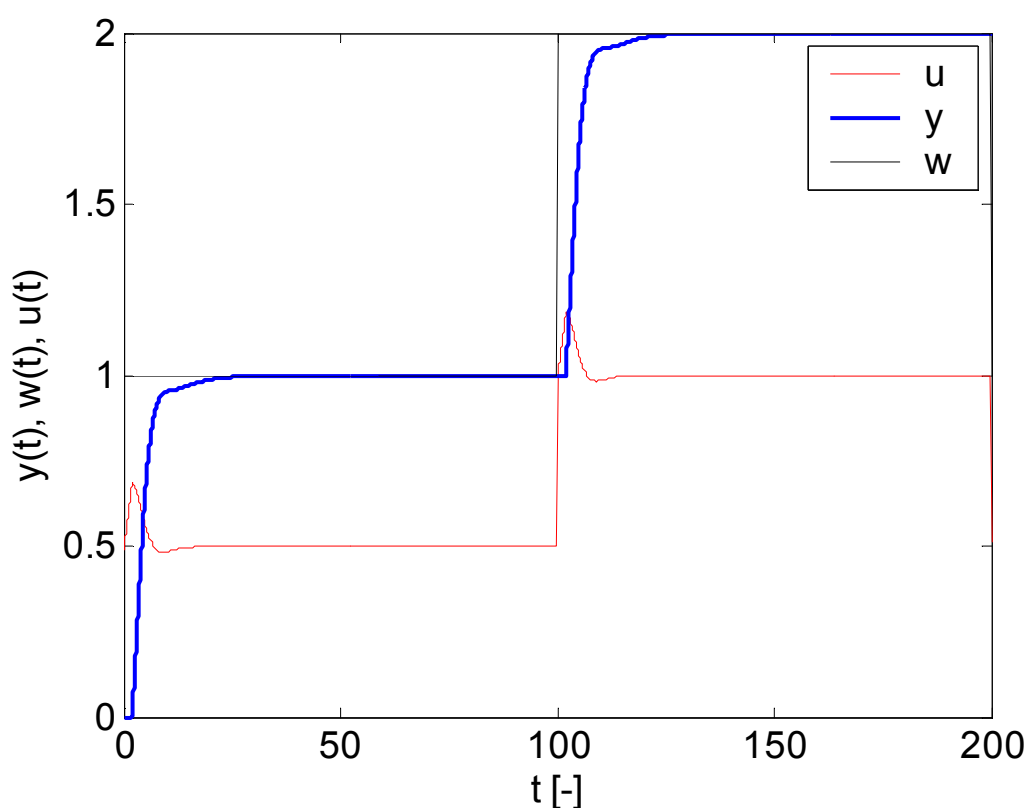
Určení požadovaných hodnot dané metody syntézy a výpočet stavitelných parametrů regulátoru:

Naměřené hodnoty: $T_u = 1,9640$ $T_n = 5,4591$ $K=2$

$\rightarrow L = T_u = 1,9640$ $a = \frac{k}{T_n} L = 0,7195$ $y(T) = 0,6321k \Rightarrow T = 4,0360$

Parametry regulátoru: $k_p = 0,4864$ $T_I = 4,8432$ $r_0 = 0,4864$ $r_{-1} = \frac{k_p}{T_I} = 0,1004$

Přenos regulátoru: $G_R(s) = 0,4864 + \frac{0,1004}{s} = 0,4864 \left(1 + \frac{1}{4,8432s} \right)$



Obr. 27. Průběh regulace pro přenos (23) pro nastavení parametrů regulátoru CHR metodou

5.2.5 Cohen-Coonova metoda

(je to již typizovaný přenos)

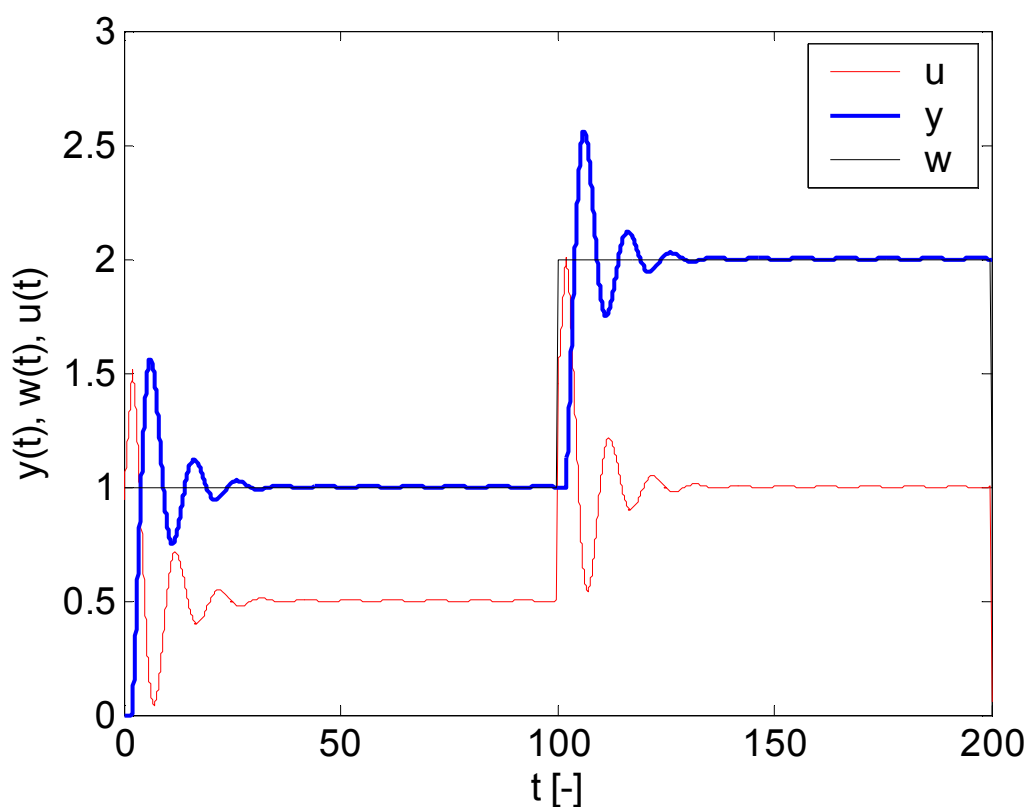
Přenos regulátoru: $G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right)$

získané hodnoty: $K = 2 \quad T = 4 \quad L = 2$

parametry regulátoru: $r = \frac{L}{T} = 0,5 \quad k_p = 0,9417 \quad T_I = 3,3158$

$$r_0 = 0,9417 \quad r_{-1} = \frac{k_p}{T_I} = 0,2840$$

Přenos regulátoru: $G_R(s) = 0,9417 + \frac{0,2840}{s} = 1,4127 \left(1 + \frac{1}{3,3158s} \right)$



Obr. 28. Průběh regulace pro přenos (23) pro nastavení parametrů regulátoru Cohen-Coonovou metodou

5.2.6 Fruehaufova metoda

(je to již typizovaný přenos)

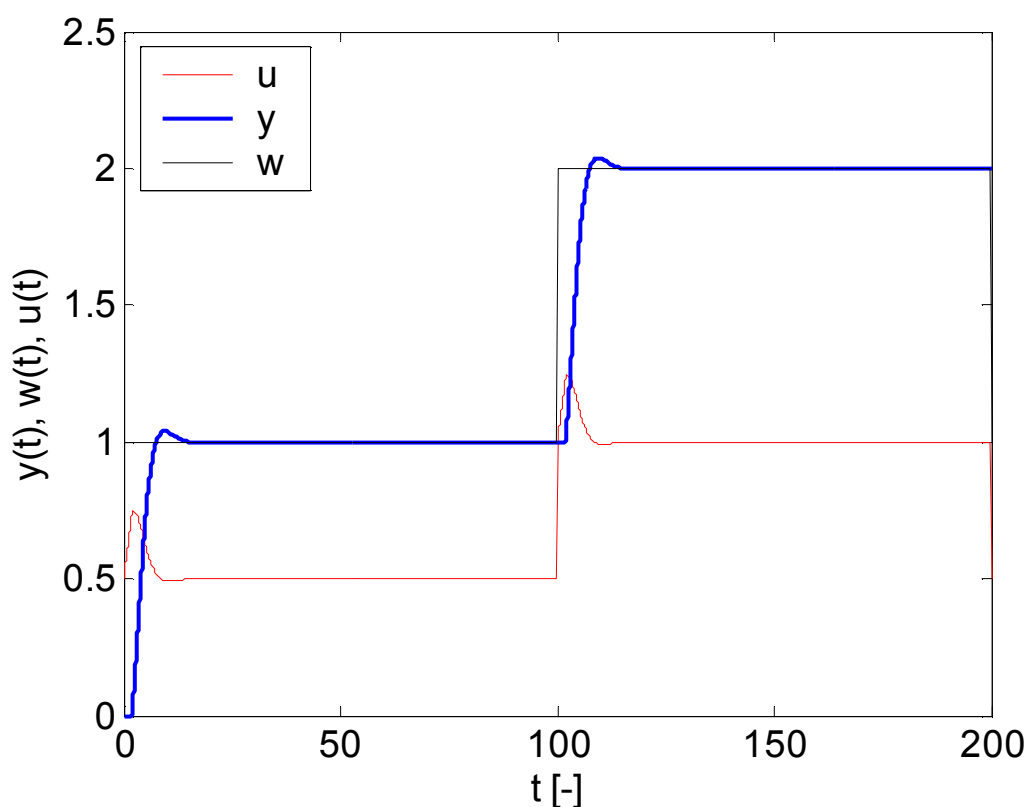
Přenos regulátoru: $G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right)$

Získané hodnoty: $K = 2 \quad T = 4 \quad L = 2$

Parametry regulátoru: $r = \frac{L}{T} = 0,5 > 0,33 \rightarrow PI - B \quad k_p = 0,5 \quad T_I = 4$

$$r_0 = 0,5 \quad r_{-1} = \frac{k_p}{T_I} = 0,125$$

Přenos regulátoru: $G_R(s) = 0,5 + \frac{0,125}{s} = 0,5 \left(1 + \frac{1}{4s} \right)$



Obr. 29. Průběh regulace pro přenos (23) pro nastavení parametrů regulátoru Fruehaufovou metodou

5.2.7 Metoda vyváženého nastavení

Přenos regulátoru: $G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right)$

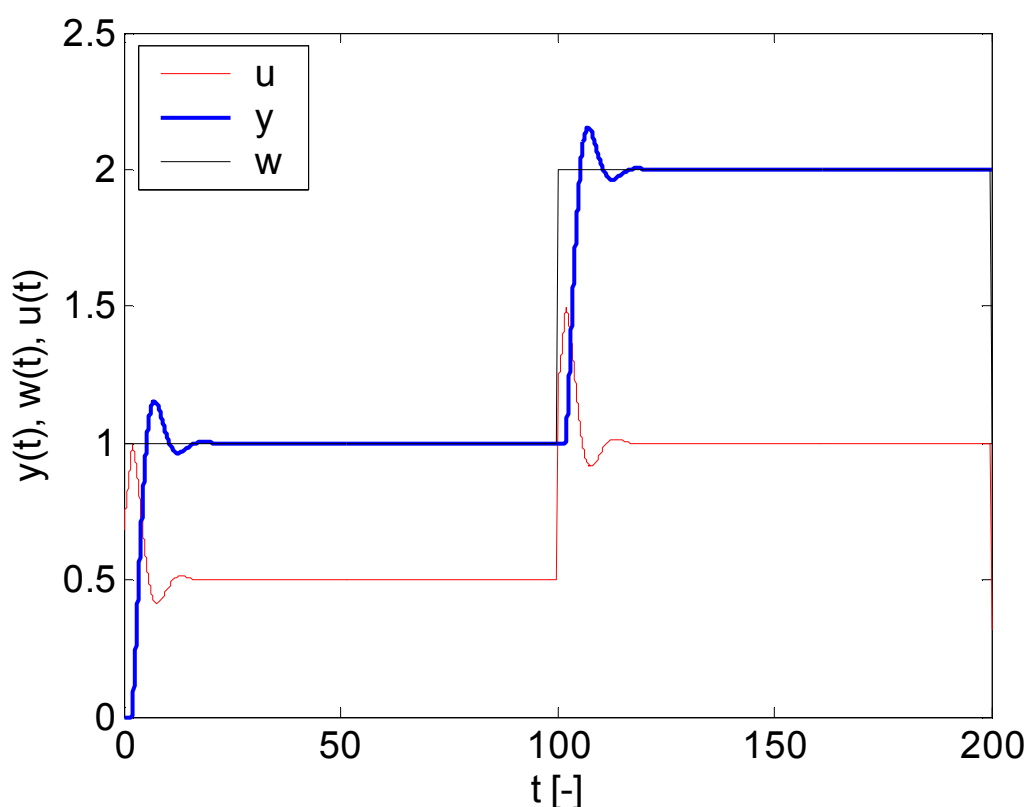
Určení požadovaných hodnot dané metody syntézy a výpočet stavitelných parametrů regulátoru:

Získané hodnoty: $K = 2$ $T = 4$ $L = 2$

Parametry regulátoru: $T_{ar} = 6$ $\tau = 0,33$ $k_p = 0,6834$ $T_I = 4,3166$

$$r_0 = 0,6834 \quad r_{-1} = \frac{k_p}{T_I} = 0,1583$$

Přenos regulátoru: $G_R(s) = 0,6834 + \frac{0,1583}{s} = 0,6834 \left(1 + \frac{1}{4,3166s} \right)$



Obr. 30. Průběh regulace pro přenos (23) pro nastavení parametrů regulátoru metodou vyváženého nastavení

5.2.8 Naslinova metoda

Provedli jsme Padého aproximaci (23) a dostali jsme aproximovaný přenos

$$G_S(s) = \frac{2 - 2s}{4s^2 + 5s + 1}$$

$$\text{Přenos regulátoru: } G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$

- překmit maximálně 5% $\rightarrow \alpha = 2$

$$\text{přenos řízení: } G_w(s) = \frac{G_R(s)G_S(s)}{1 + G_R(s)G_S(s)} = \dots = \frac{-2r_0s^2 + 2r_0s - 2r_{-1}s + 2r_{-1}}{4s^3 + (5 - 2r_0)s^2 + (2r_0 + 1 - 2r_{-1})s + 2r_{-1}}$$

Charakteristická rovnice:

$$4s^3 + (5 - 2r_0)s^2 + (2r_0 + 1 - 2r_{-1})s + 2r_{-1}$$

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

Platí:

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

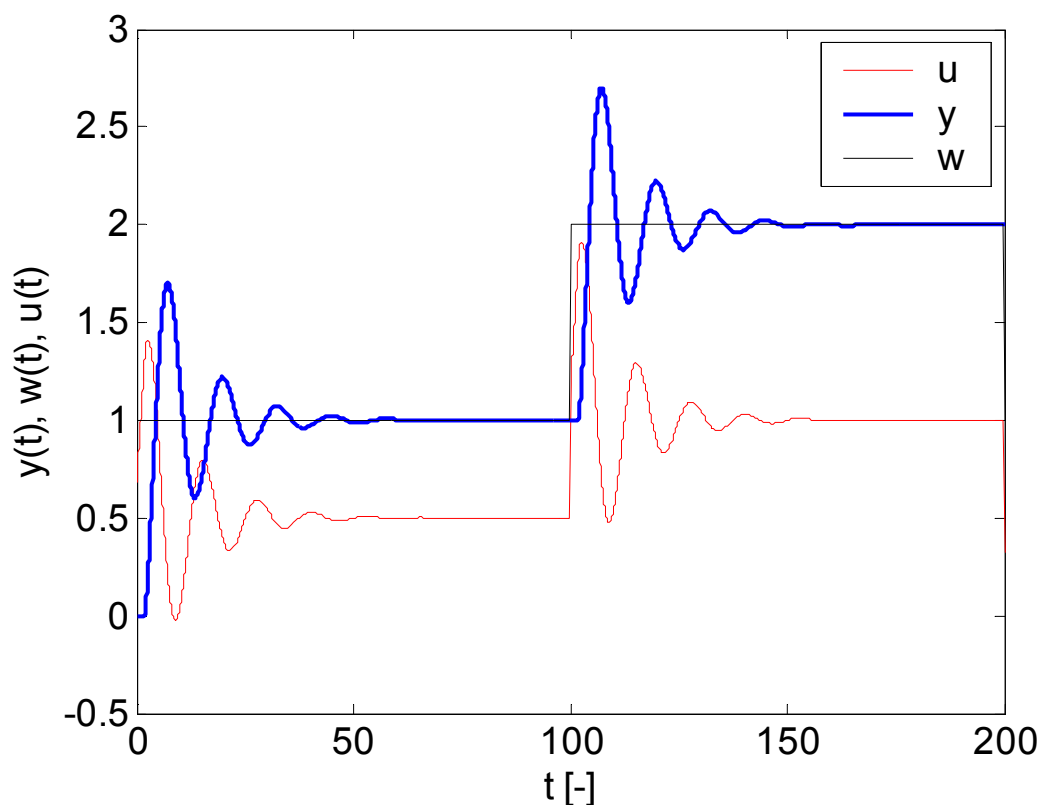
$$\text{pro } i = 2: (5 - 2r_0)^2 \geq 2 \cdot 4 \cdot (2r_0 - 2r_{-1} + 1)$$

$$r_{-1} = \frac{9}{4}r_0 - \frac{1}{4}r_0^2 - \frac{17}{16}$$

Do rovnice pro $i = 1$ dosadíme za r_{-1} $0,5 r_0$ a $8,5 r_0$. 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.

$$\text{Parametry regulátoru: } r_0 = 0,6776 \quad r_{-1} = 0,3473 \quad k_p = 0,6776 \quad T_I = \frac{r_0}{r_{-1}} = 1,9511$$

$$\text{Přenos regulátoru: } G_R(s) = 0,6776 + \frac{0,3473}{s} = 0,6776 \left(1 + \frac{1}{1,9511s} \right)$$



Obr. 31. Průběh regulace pro přenos (23) pro nastavení parametrů regulátoru Naslinovou metodou

5.2.9 Whiteleyova metoda

Hodnota zesílení PI regulátoru r_0 vyšla záporná. Fyzikální význam nastavení záporné hodnoty nemá smysl. Nezvolili jsme správnou strukturu regulátoru. Pro nastavení parametrů regulátoru touto metodou je tedy třeba vybrat jinou strukturu regulátoru.

Proto použijeme např. regulátor I.

Po Padeho aproximaci: $G_S(s) = \frac{-2s+2}{4s^2+5s+1}$

Přenos regulátoru: $G_R(s) = \frac{r_{-1}}{s} = \frac{1}{T_I s}$

Přenos řízení: $G_w(s) = \frac{G_R(s)G_S(s)}{1+G_R(s)G_S(s)} = \dots = \frac{-2r_{-1}s+2r_{-1}}{4s^3+5s^2+(1-2r_{-1})s+2r_{-1}}$

Postupnými úpravami dostáváme rovnice:

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

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

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

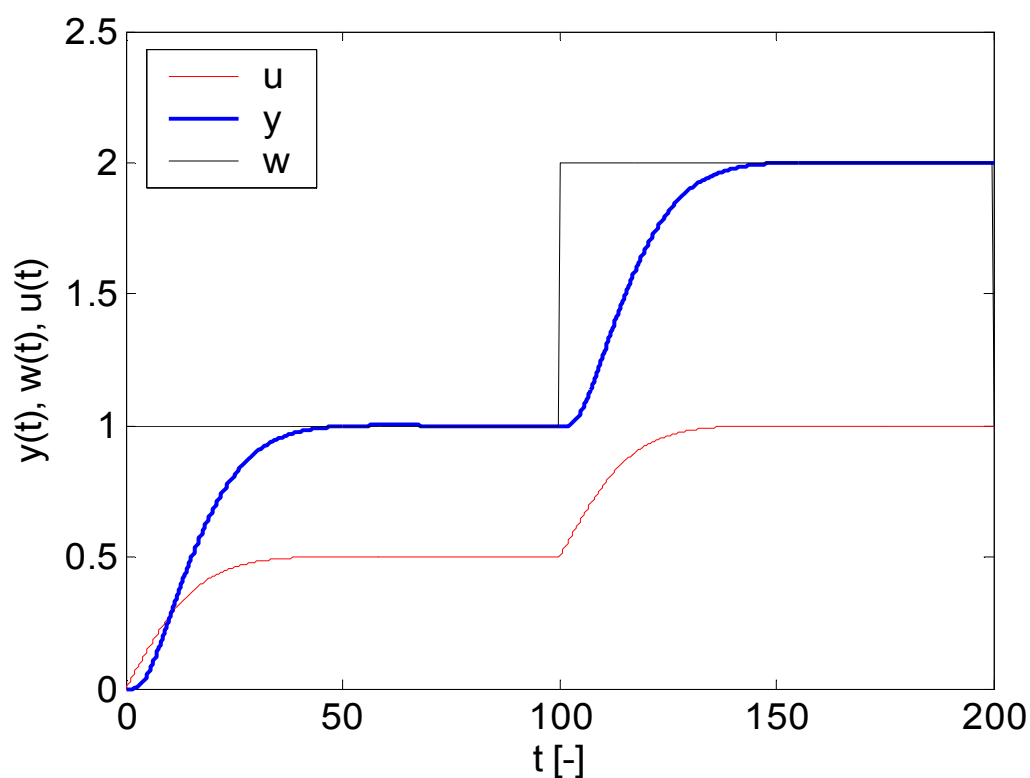
$$\bar{a}_0 = \alpha_0 \Rightarrow 1 = 1$$

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

$$5,1 = \frac{5}{2r_{-1}} \left(\frac{r_{-1}}{2} \right)^{\frac{2}{3}} \Rightarrow r_{-1} = 0,02945$$

Parametry regulátoru: $r_{-1} = 0,02945$

Přenos regulátoru: $G_R(s) = \frac{0,02945}{s}$



Obr. 32. Průběh regulace pro přenos (23) pro nastavení parametrů regulátoru Whiteleyovou metodou

5.3 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. 14). 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. 14.

Tab. 14. Srovnání metod syntézy podle kvality regulace

Druh metody syntézy	Kvadratická regulační plocha J_K pro přenos (22)	Kvadratická regulační plocha J_K pro přenos (23)
Ziegler – Nichols: Kritické zesílení	3,911	5,853
Z přechodové charakteristiky	5,817	6,948
Z přechodové charakteristiky (Åströмова úprava)	8,102	7,349
CHR	2,988	7,019
Cohen - Coonova	7,679	7,350
Fruehaufova	2,971	6,736
Vyváženého nastavení	4,288	6,105
Naslinova	4,699	10,260
Whiteleyova	7,807	23,650

Pro uvedenou metodu platí, že čím menší je hodnota kvadratické regulační plochy J_K , tím lepší je kvalita regulace. Z Tab. 14 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 (22) a Ziegler – Nicholsova metoda kritického zesílení pro přenos regulované soustavy s dopravním zpožděním (23).

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 počítačovou podporu cvičení z předmětu Teorie automatického řízení I. Po obdržení podkladů v písemné formě byly tyto podklady rozčleněny do devíti 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 MS FrontPage. Stránky obsahují vedle podkladů pro cvičení také zadání pro semestrální práce, ukázky kontrolních testů i s jejich správnými odpověďmi a odkazy na další stránky zabývající se elektronickou podporou automatizace. Stránky jsou začleněny do informačního systému CAAC a jsou zveřejněny na Internetové adrese <http://www.caac.zde.cz>. CAAC je díky Internetu nejen kdykoli dostupný komukoli, ale také si jeho uživatelé mohou zvolit téma výuky podle svého zvažení.

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 jsme použili metodu kvadratické regulační plochy. Platí pro ni, že čím menší je hodnota kvadratické regulační plochy, tím lepší je kvalita regulace. V Tab. 14 můžeme vidět srovnání vybraných metod syntézy podle kvality regulace, kde se jako nejvhodnější metoda pro přenos regulované soustavy bez dopravního zpoždění ve tvaru (22) jeví Fruehaufova metoda. Pro přenos regulované soustavy s dopravním zpožděním ve tvaru (23) se jeví jako nejvhodnější metoda syntézy Ziegler-Nicholsova metoda kritického zesílení.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Åström, K., Hägglund, T. PID Controllers: Theory, Design and Tuning. 2nd. edition, Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina, 1995
- [2] Balátě, J. Automatické řízení. 2. vyd., Praha: BEN - technická literatura, 2004.
- [3] Benda, Rosman, Sodomka. Informatika a výpočetní technika. Zlín: Ediční středisko FaME, 2000
- [4] Broža, P. Programování WWW stránek pro úplné začátečníky. 1. vyd., Praha: Computer Press, 2000.
- [5] Hlavenka, J., Sedlář, R., Holčík, T., Botík, R., Mach, J. Vytváříme WWW stránky. 1. vyd., Brno: Computer Press, 1999.
- [6] Horáček, K. Front Page 2000, tvorba dokonalých WWW stránek. Praha: Grada Publishing, 1999
- [7] Kontis, s. r. o. E-Learning. Propagační materiál firmy Kontis s. r. o., 2005 Dostupné z URL: <<http://www.e-learn.cz>>.
- [8] Kosek, J.: Téměř vše o WWW, 2001. Dostupné z URL: <<http://www.kosek.cz>>.
- [9] Prokop, R. Základy automatizace pro bakalářské studium. Zlín: Ediční středisko FT, 1998.
- [10] Renda, M. Český Internet a Internet Explorer 4. Praha: Grada, 1998

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

$\delta(t)$	Diracův jednotkový impulz
ω	úhlová frekvence
ω_k	kritická úhlová frekvence
κ	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
$G_W(s)$	přenos řízení
$g(t)$	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
L^{-1}	operátor zpětné Laplaceovy transformace
$A[\text{dB}]$	logaritmická amplituda frekvenčního přenosu

n	stupeň charakteristického mnohočlenu
P	proporcionální regulátor
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	dopravní zpoždění u spojitých systémů
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
CAAC	Computer aided automatic control (Počítačová podpora automatického řízení)
HTML	Hyper Text Markup Language
CHR	Chien, Hrones a Reswickova metoda
MS	Microsoft
WWW	World Wide Web

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Struktura bakalářské práce.....	8
Obr. 2. Ukázka hlavního okna programu FrontPage	14
Obr. 3. Základní rozložení WWW stránek	15
Obr. 4. Úvodní stránka elektronické učebnice.....	16
Obr. 5. Určení T_k při r_{0k}	17
Obr. 6. Určení T_k a k_{pk} při vložení nelinearity (relé) do zpětné vazby	18
Obr. 7. Určení parametrů K , T_u a T_n z přechodové charakteristika regulované soustavy....	19
Obr. 8. Určení parametrů a , L z přechodové charakteristiky regulované soustavy.....	20
Obr. 9. Určení parametrů a , L , T z přechodové charakteristiky regulované soustavy	21
Obr. 10. Regulační pochod odpovídající standardnímu tvaru	25
Obr. 11. Regulační pochody kmitavé – $y_1(t)$ a aperiodické – $y_2(t)$ vyvolané změnou $w(t)$ nebo vznikem poruchy $v(t)$	30
Obr. 12. Hlavní okno programu Matlab.....	32
Obr. 13. Knihovna Simulinku.....	33
Obr. 14. Schéma uzavřeného regulačního obvodu vytvořeného v programu Matlab/Simulink	34
Obr. 15: Průběh regulace pro přenos (22) pro nastavení parametrů regulátoru získaných Z- N metodou.....	36
Obr. 16. Průběh regulace pro přenos (22) pro nastavení parametrů regulátoru z přechodové charakteristiky	37
Obr. 17. Průběh regulace pro přenos (22) pro nastavení parametrů regulátoru z přechodové charakteristiky Åströmovou úpravou.....	38
Obr. 18. Průběh regulace pro přenos (22) pro nastavení parametrů regulátoru CHR metodou	39
Obr. 19. Průběh regulace pro přenos (22) pro nastavení parametrů regulátoru Cohen- Coonovou metodou.....	41
Obr. 20. Průběh regulace pro přenos (22) pro nastavení parametrů regulátoru Fruehaufovou metodou	42
Obr. 21. Průběh regulace pro přenos (22) pro nastavení parametrů regulátoru metodou vyváženého nastavení	43
Obr. 22. Průběh regulace pro přenos (22) pro nastavení parametrů regulátoru Naslinovou metodou	45
Obr. 23. Průběh regulace pro přenos (22) pro nastavení parametrů regulátoru Whiteleyovou metodou	46
Obr. 24. Průběh regulace pro přenos (23) pro nastavení parametrů regulátoru získaných Z- N metodou.....	47
Obr. 25. Průběh regulace pro přenos (23) pro nastavení parametrů regulátoru z přechodové charakteristiky	48
Obr. 26. Průběh regulace pro přenos (23) pro nastavení parametrů regulátoru z přechodové charakteristiky Åströmovou úpravou.....	49
Obr. 27. Průběh regulace pro přenos (23) pro nastavení parametrů regulátoru CHR metodou	50
Obr. 28. Průběh regulace pro přenos (23) pro nastavení parametrů regulátoru Cohen- Coonovou metodou.....	51
Obr. 29. Průběh regulace pro přenos (23) pro nastavení parametrů regulátoru Fruehaufovou metodou	52

Obr. 30. Průběh regulace pro přenos (23) pro nastavení parametrů regulátoru metodou vyváženého nastavení	53
Obr. 31. Průběh regulace pro přenos (23) pro nastavení parametrů regulátoru Naslinovou metodou	55
Obr. 32. Průběh regulace pro přenos (23) pro nastavení parametrů regulátoru Whiteleyovou metodou	56

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Nastavení parametrů regulátoru metodou Ziegler – Nichols	18
Tab. 2. Nastavení parametrů regulátoru ze získaných hodnot z přechodové charakteristiky	19
Tab. 3. Nastavení parametrů regulátoru ze získaných hodnot z přechodové charakteristiky podle Åströmovy úpravy	20
Tab. 4. Nastavení parametrů regulátoru pro CHR metodu	21
Tab. 5. Nastavení parametrů regulátoru při působení poruchy pro CHR metodu	22
Tab. 6. Parametry regulátoru pro Cohen-Coonovu metodu	22
Tab. 7. Parametry regulátoru pro Cohen-Coonovu metodu (2. způsob výpočtu)	23
Tab. 8. Parametry regulátoru pro Freufaufovu metodu	23
Tab. 9. Parametry regulátoru pro metodu vyváženého nastavení	24
Tab. 10. Závislost $\Delta y_{\max} [\%]$ na α podle Naslina	24
Tab. 11. Standardní tvary přenosové funkce typu (6)	27
Tab. 12. Standardní tvary přenosové funkce typu (11)	27
Tab. 13. Standardní tvary přenosové funkce typu (12)	27
Tab. 14. Srovnání metod syntézy podle kvality regulace	57

SEZNAM PŘÍLOH

P 1 : Podpora cvičení z předmětu Teorie automatického řízení I

P 2 : CD ROM