

Počítačová podpora automatického řízení – Informační systém CAAC; Tématický okruh SYNTÉZA

Jiří Marholt

Bakalářská práce
2006



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav automatizace a řídicí techniky
akademický rok: 2005/2006

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Jiří MARHOLT
Studijní program: B 3902 Inženýrská informatika
Studijní obor: Automatické řízení a informatika

Téma práce: Počítačová podpora automatického řízení-
Informační systém CAAC; Tématický okruh
SYNTÉZA

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte literární rešerši na problematiku týkající se podpory elektronické formy výuky v oblasti automatické řízení. Zaměřte se zejména na tématický okruh SYNTÉZA.
2. Převezměte již existující návrh informačního systému CAAC. Naplňte vybrané základní submoduly, příp. upravte stávající základní submoduly, subsystému SYNTÉZA informačního systému CAAC v prostředí WWW stránek.
3. Vytvořte výpočtový program v programovém prostředí MATLABu pro syntézu vybraných typů regulovaných soustav. Při návrhu parametrů regulátoru využijte různé metody syntézy. Ilustrujte výpočtový program příklady, srovnajte jednotlivé metody syntézy a zařadte tento program včetně informační WWW stránky vytvořené k tomuto programu do subsystému KNIHOVNA HOTOVÝCH PROGRAMŮ informačního systému CAAC.
4. Zprovozněte vytvořené WWW stránky informačního systému CAAC na Internetu.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

[1] BALÁTĚ, J. Automatické řízení. 2.přeprac. vyd. Praha: BEN-technická literatura, Praha, 2004.

[2] HLAVENKA, J., et al. Vytváříme WWW stránky. BRNO: Computer Press, 1999.

[3] KOSEK, J. Téměř vše o WWW [online].c1999, 2005/11/07 [cit.2006-01-18].

Dostupný z WWW: <http://www.kosek.cz/>.

[4] KOZÁK, Š. Lineární číslicové systémy I. Bratislava: STU v Bratislave 1993.

[5] VAŠEK, V. Teorie automatického řízení II. Brno: VUT v Brně, 1990.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavel Navrátil, Ph.D.

Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání bakalářské práce:

14. února 2006

Termín odevzdání bakalářské práce:

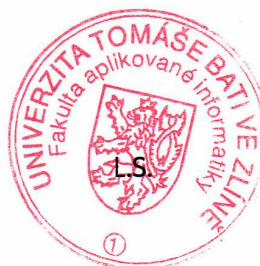
16. června 2006

Ve Zlíně dne 14. února 2006



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

pověřený děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

ředitel ústavu

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

Ve Zlíně, 16. 6. 2006

.....

Jiří Marholt

ABSTRAKT

Abstrakt česky

Prvním cílem této bakalářské práce bylo naplnění vybraných základních submodulů zadaného tématického okruhu tzv. subsystému „Syntéza“ informačního systému CAAC.

Dalším cílem bylo poté zpracovat podklady pro tvorbu vybraných základních submodulů subsystému „Syntéza“ informačního systému CAAC v programu MS WORD a převést je do prostředí WWW stránek. Součástí bylo také doplnění vybraných již existujících základních submodulů subsystému „Syntéza“ o vytvořené výpočetní programy. Dále byl vytvořen výpočtový program pro návrh diskrétního regulátoru, který byl zpracován v prostředí MATLAB/Simulink. Vytvořené WWW stránky včetně výpočtového programu vytvořeného v programovém prostředí MATLABu, byly po té začleněny do informačního systému CAAC.

Posledním z cílů bylo ověřit ve výpočetním programu vytvořeném v programu MATLABu vybrané diskrétní metody syntézy pro zadané proporcionální přenosy regulovaných soustav se setrvačností prvního a druhého řádu a to jak pro přenos bez dopravního zpoždění, tak i pro přenos s dopravním zpožděním. Dané diskrétní metody byly poté srovnány podle metody kvadratické regulační plochy.

Abstrakt ve světovém jazyce

The first goal of this bachelor work was to load the chosen fundamental submodules of the defined subsystem „Synthesis“ of the CAAC information system.

The next goal was to create grounds for production of chosen fundamental submodules of the subsystem, „Synthesis“ of CAAC information system in MS WORD programme and to transfer them into WWW pages environment. A part of the work was also completion of the already existing, chosen fundamental submodules of the subsystem, „Synthesis“ by newly created computer program. Further was a computational programme for a tactful controller design was created and processed in MATLAB/Simulink environment. The created WWW pages together with the computational programme in MATLAB programmatic environment, were then incorporated into the CAAC information system.

The last goal was to verify using the computer programme created in MATLAB the selected discreet methods of synthesis for the specifed proportional transfers functions controlled systems with inertia of the 1st and the 2nd order, both for the transfer without transport delay and for the transfer with transport delay. These discreet methods were then compared using the method of quadratic regulation surface.

OBSAH

ÚVOD	7
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY	9
2 DISKRÉTNÍ REGULAČNÍ OBVOD	11
2.1 POPIS DISKRÉTNÍHO REGULAČNÍHO OBVODU	11
2.2 DISKRÉTNÍ REGULÁTORY - MODIFIKACE SPOJITÝCH REGULÁTORŮ	12
2.3 POLOHOVÝ A PŘÍRŮSTKOVÝ ČÍSLICOVÝ PID ALGORITMUS	15
2.4 MODIFIKACE PSD ALGORITMU.....	16
3 SYNTÉZA DISKRÉTNÍHO REGULAČNÍHO OBVODU	19
3.1 VYBRANÉ METODY SYNTÉZY	19
3.1.1 Nastavení parametrů regulátoru metodou vycházející z přechodové charakteristiky regulované soustavy	19
3.1.2 Metoda kritického zesílení regulátoru (Ziegler-Nichols).....	20
3.1.3 Metoda požadovaného modelu (metoda inverze dynamiky)	22
3.1.4 Metoda konečný počet kroků	25
3.2 APROXIMACE DOPRAVNÍHO ZPOŽDĚNÍ.....	30
3.3 KVALITA REGULACE.....	32
4 POPIS INTEGROVANÉHO VÝVOJOVÉHO PROSTŘEDÍ MATLAB	33
5 SIMULACE DISKRÉTNÍHO REGULAČNÍHO POCHODU PRO VYBRANÉ METODY NASTAVENÍ PARAMETRŮ REGULÁTORU	35
5.1 VYBRANÉ METODY SYNTÉZY	36
5.1.1 Nastavení parametrů regulátoru metodou vycházející z přechodové charakteristiky regulované soustavy	36
5.1.2 Metoda kritického zesílení regulátoru (Ziegler-Nichols).....	41
5.1.3 Metoda požadovaného modelu (Inverze dynamiky).....	47
5.1.4 Metoda konečný počet kroků bez omezení počáteční hodnoty akční veličiny	53
5.1.5 Metoda konečného počtu kroků s omezením počáteční hodnoty akční veličiny	57
5.2 POROVNÁNÍ VYBRANÝCH METOD SYNTÉZY PODLE KVALITY REGULACE	63
5.3 ZHODNOCENÍ POUŽITÝCH METOD SYNTÉZY PŘI NÁVRHU PARAMETRŮ REGULÁTORŮ	65
ZÁVĚR	67
A POPIS PROGRAMU PRO NÁVRH DISKRÉTNÍHO REGULÁTORU	68
A.1 OBECNÝ POPIS MOŽNOSTÍ PROGRAMU	68
A.2 POŽADAVKY NA SPUŠTĚNÍ PROGRAMU.....	69
A.3 STRUČNÝ POPIS MOŽNOSTÍ JEDNOTLIVÝCH POLOŽEK MENU.....	69
B WWW STRÁNKY INFORMAČNÍHO SYSTÉMU CAAC	70
B.1 UKÁZKA VÝSTUPU WWW STRÁNEK VYBRANÝCH ZÁKLADNÍCH SUBMODULŮ INFORMAČNÍHO SYSTÉMU CAAC.....	71
B.1.1 Ukázky úvodních WWW stránek.....	72
B.1.2 Ukázka WWW stránky subsystému „Syntéza“ informačního systému CAAC	73
B.1.3 Ukázky WWW stránek vztahujících se k subsystému „Syntéza“ WWW stránka.....	75
C OBSAH VLOŽENÉHO CD-ROMU	82
SEZNAM OBRÁZKŮ	83
SEZNAM TABULEK.....	85
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	86
SEZNAM POUŽITÉ LITERARURY.....	88

ÚVOD

Automatické řízení se stalo jednou z nejdůležitější součástí v oblasti průmyslové automatizace. V dnešní době existuje velké množství literatury, která se zabývá tímto vědním oborem, který je i prezentovaný na Internetu pro odborníky, ale i pro širší veřejnost. Internet vznikl v 70. letech minulého století a dnes se odhaduje počet jeho uživatelů na 450 miliónů. Internet je tedy jednou z možností, jak efektivně využívat informace pro větší množství zájemců. Proto také na Internetu stále vznikají nové elektronické učebnice. Elektronické učebnice, které se vyskytují na Internetu se zabývají také syntézou spojitých i diskrétních regulačních obvodů. Při návrhu regulátoru hraje velkou roli výpočetní technika, protože značně usnadňuje práci při výpočtu parametrů regulátoru, simulaci systémů, zpracování experimentálně zjištěných hodnot apod.

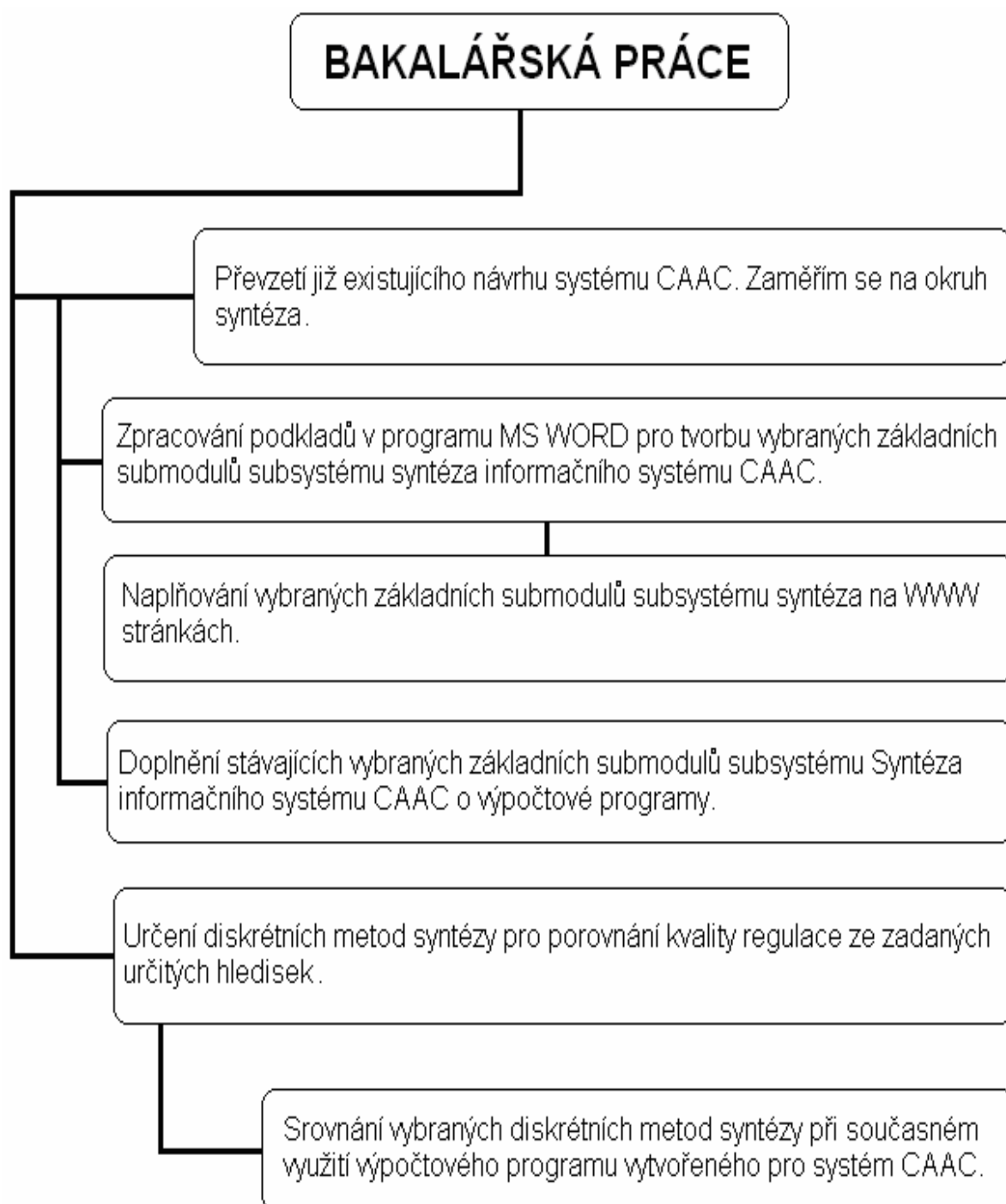
V dnešní době existuje velké množství programů určených k regulaci, simulaci apod. Mezi nejvíce známé programy patří MATLAB, InTouch, Control panel. Pro tuto práci se jako nejlepší prostředek hodilo programové prostředí MATLABu, neboť má velmi mnohostranné využití.

Tato práce se zmiňuje o jednom ze způsobů elektronické podpory výuky pro oblasti automatického řízení při současném využitím WWW stránek Internetu. Jedná se o informační systém CAAC, který představuje určitou formu eLearningu.

Tento informační systém je velmi rozsáhlý, proto se v této práci zabývám pouze určitou částí, Věnuji se pouze vybranému okruhu tzv. subsystému „Seřízení diskrétního regulačního obvodu“. Vytvořil jsem několik výpočtových programů pro nastavení diskrétních a spojitých regulátorů, které pokrývají vybranou část subsystému CAAC. Dále jsem porovnával vybrané diskrétní metody syntézy regulátorů pomocí metody kvadratické regulační plochy. K porovnání jednotlivých návrhů regulátorů nám pomůže program, který jsem vytvořil v MATLAB/Simulink.

CAAC informační systém by měl pomoci jako podpora výuky automatického řízení nebo těm, kteří mají zájem se něco dozvědět o tomto vědním oboru.

Na následujícím obrázku (obr. 1) je zobrazena základní struktura bakalářské práce, kde jsou zobrazeny cíle práce.



Obr. 1 Struktura bakalářské práce

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY

Elektronická podpora výuky

V dnešní době se počítačová podpora výuky rozšířila téměř do všech oblastí lidské činnosti, mezi niž patří například automatizace, lékařství, chemie, energetika, stavebnictví, atd., zahrnuje pod pojem eLearning nebo také e-learning, tzn. elektronická výuka. Moderní způsob studia, který ohromuje svojí rozsáhlostí, přitahuje množstvím technických možností. Šetří náš čas i peníze. Kurzy obsahují multimediální lekce, tj. kombinace textového výkladu s animacemi, grafikou, schémata, videa a elektronickými testy. Studující přistupují ke svým kurzům pomocí zakoupených CD ROMU nebo elektronických učebnic. Není zde možnost komunikovat s dalšími členy kurzu nebo s lektorem. Další možnost je vyhledat kurz na Internetu. Tento způsob studia je dražší. Na Internetu se vyskytuje více kurzů se stejnou problematikou ale liší se např. množstvím testů nebo stylem vysvětlení učiva, proto si můžeme vybrat ten, co nám bude nejvíce vyhovovat.

Mezi známé zahraniční univerzity, které se zabývají elektronickou výukou v oblasti automatického řízení patří např.: univerzita v Marylandu, v Linköpingu a další. V České republice je také několik univerzit mezi nimiž jsou např. UTB Zlín, TU Liberec VŠB Ostrava, ČVUT Praha.

Na univerzitě v Marylandu je vytvořeno okolo dvaceti menších modulů zabývajících se analýzou systémů, robustním řízením a zejména pak zpracováním signálů. Internetová adresa těchto WWW stránek je <http://www.jhu.edu/~signals> .

Na univerzitě v Linköpingu jsou vytvořeny WWW stránky zabývajících se teorií automatického řízení konkrétně analýzou, syntézou a identifikací. Tyto WWW stránky lze nalézt na internetové adrese <http://www.control.isy.liu.se/research> .

Na UTB ve Zlíně, Fakultě aplikované informatiky, Ústavu řízení procesů je vytvořen modul zabývajících se adaptivním řízením jednorozměrových diskrétních systémů.. Internetová adresa tohoto modulu je <http://www.utb.cz/stctool> .dále je vytvořena WWW stránka CAAC zabývajících se podporou automatického řízení. Je rozdělena do 15 modulů konkrétně syntéza, analýza, knihovna hotových programů a další. Internetová adresa tohoto modulu je <http://www.caac.zde.cz>

Na TU v Libereci, Fakultě mechatroniky, Katedře řídicí techniky mají vytvořenou elektronickou učebnici, která se jmenuje Stručný manuál MATLABU pro předměty teorie řízení. Tuto elektronickou učebnici lze nalézt na internetové adrese http://www.fm.tul.cz/~krt/krt_cz/vyuka/text/matlab/html.htm

Dále má tato univerzita má vytvořeno několik simulačních programů pro spojité i číslicové regulátory. Tyto programy a studijní materiály týkající se automatického řízení lze nalézt na internetové adrese <http://krt32.krt.vslib.cz/uvod.html#seznam>

Na VŠB-TU Ostrava, Fakultě strojní, Katedře automatizační techniky a řízení mají vytvořeno několik elektronických učebnic zaměřených na teorii automatického řízení, konkrétně na analýzu regulačních obvodů, syntézu regulačních obvodů a na matematické metody používané v automatickém řízení. Tyto elektronické učebnice lze nalézt na internetové adrese http://www.352.vsb.cz/uc_texty/Welcome.htm.

Na ČVUT v Praze, Fakultě elektrotechnické, Katedře řídicí techniky mají vytvořeno několik WWW stránek zabývajících se analýzou systémů a syntézou regulačního obvodu. Tyto WWW stránky lze nalézt na internetové adrese <http://dce.felk.cvut.cz/sri2/ss>.

Programy pro automatické řízení

V dnešní době existuje mnoho programů pomocí nichž můžeme sledovat chování navržených regulátorů. Z nejvíce používaných, je zejména na vysokých školách program MATLAB/Simulink. Tento program popisuje řada publikací a návodů na WWW stránkách. např. na <http://www.engin.umich.edu/group/ctm/>, se nachází kurz zaměřený na využití MATLABu v automatizaci.

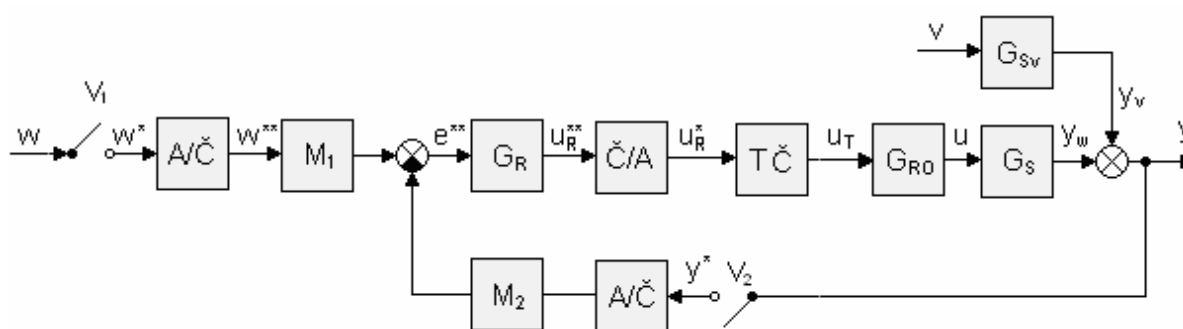
Mezi další programy, které slouží pro simulaci regulátorů patří například InTouch, Control panel, atd. VŠB-TU Ostrava vytvořila simulační program SIPRO na internetové adrese http://www.352.vsb.cz/uc_texty/Welcome.htm je k nahlédnutí uživatelská příručka a vyřešené příklady pomocí tohoto programu.

Ve světě i u nás existují univerzity a pracoviště, které se zabývají automatickým řízením. Výše jsou uvedené univerzity, které tvoří jen mizivou část toho co můžeme dále najít na Internetu. Jednotlivé WWW stránky poskytující elektronický způsob výuky jsou zpracovány většinou na vysoké úrovni.

2 DISKRÉTNÍ REGULAČNÍ OBVOD

2.1 Popis diskretního regulačního obvodu

Diskretní regulační obvod je míněn obvod, ve kterém alespoň jedna veličina má tvar posloupnosti diskretních hodnot vytvářených v určitých pravidelně se opakujících okamžicích T . Diskretní regulační obvod zpravidla využívá k výpočtu akční veličiny číslicový počítač. Existují i regulační obvody (tzv. impulzní), které nepoužívají číslicový počítač a přesto je lze považovat za obvody diskretní. Dále se budeme zabývat obvody, které používají číslicový počítač



Obr. 2 Podrobné blokové schéma diskretního regulačního obvodu

Do obvodu vstupuje žádaná hodnota w a poruchová veličina v . Z obvodu vystupuje regulovaná veličina y . Regulovaná veličina y a žádaná veličina w se vzorkují vzorkovacími členy V_1 a V_2 a posloupnost vzorků y^* a w^* se převádí analogově číslicovými převodníky (A/Č) na posloupnost číselných hodnot y^{**} a w^{**} . Jednotlivé hodnoty y^{**} a w^{**} se zapisují postupně do určených paměťových míst M_1 a M_2 počítače a postupně se počítají hodnoty regulační odchylky e^{**} . Ty se v číslicovém regulátoru G_R transformují na základě regulačního algoritmu na posloupnost číselných hodnot akční veličiny u_R^{**} . V číslicově analogovém převodníku (Č/A) se vytváří posloupnost impulsů u_R^* , která se v tvarovacím členu TČ tvaruje na akční veličinu u_T vstupující do regulačního orgánu RO. Jeho výstupem je akční veličina u působící na regulovanou soustavu G_S a ovlivňující průběh regulované veličiny y . [1], [8]

Na regulovanou soustavu může působit několik poruchových veličin v_i , $i = 1, 2, \dots$. Regulovaná veličina y se vytváří superpozicí složek y_{v_i} a y_w

$$y = y_w + \sum_i y_{v_i} \quad (1)$$

Jednotlivé části diskrétního regulačního obvodu

Spojité pracující člen převádí vstupní spojitý signál na výstupní spojitý signál. Způsob transformace je vyjádřen některým ze způsobů popisu dynamických vlastností spojitých členů regulačního obvodu např. diferenciální rovnicí, impulsní funkcí apod.

Vzorkovací člen vzorkuje v předem určených časových okamžicích vstupní spojitý signál. Výstupním signálem je pak posloupnost impulsů velmi malé šířky δ , jejichž výška je rovna hodnotám vstupního spojitého signálu v okamžicích vzorkování.

Tvarovací člen tvaruje vstupní impuls šířky δ a výšky dané funkční hodnotou na signál trvající jednu periodu vzorkování.

Diskrétně pracující lineární člen převádí posloupnost diskrétních hodnot vstupního signálu na posloupnost diskrétních hodnot výstupního signálu. Způsob transformace je dán např. diferenční rovnicí, diskrétním přenosem, diskrétní impulsovou funkcí apod.

Analogově-číslicový převodník převádí posloupnost impulsů na posloupnost číselných hodnot, přičemž tyto hodnoty jsou v normovaném dvojkovém kódu vhodném pro další zpracování číslicovým počítačem. A/Č převodník je umístěn na vstupu číslicového regulátoru.

Číslicově analogový převodník převádí posloupnost výstupních číselných hodnot z počítače na posloupnost impulsů, které jsou dále zpracovávány tvarovacím členem. Č/A převodník je umístěn na výstupní straně číslicového regulátoru.

Paměťový člen vloženou číslicovou vstupní hodnotu zaznamenává a říditelným způsobem ji opět vydává k dalšímu zpracování. Mezi záznamem a čtením pamatované hodnoty může uplynout nezanedbatelně dlouhý interval času. [8]

2.2 Diskrétní regulátory - modifikace spojitých regulátorů

Rovnice spojitého *PID* regulátoru má tvar

$$u(t) = k_p \cdot e(t) + \frac{k_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + k_p T_D \frac{de(\tau)}{dt} \quad (2)$$

a definuje hodnotu akční veličiny $u(t)$ v libovolném časovém okamžiku $t > t_0$, kde čas počátku činnosti regulátoru $t_0 = 0$. Pro okamžik $t = kT$, kde k představuje libovolný vzorkovací okamžik pro periodu vzorkování T , dostaneme rovnici do tvaru

$$u(kT) = k_P e(kT) + \frac{k_P}{T_I} \int_0^{kT} e(\tau) d\tau + k_P T_D \left. \frac{de(\tau)}{dt} \right|_{t=kT} \quad (3)$$

$$u(kT) = k_P e_k + \frac{k_P}{T_I} I_k + k_P T_D D_k \quad (4)$$

kde

k_P – zesílení regulátoru

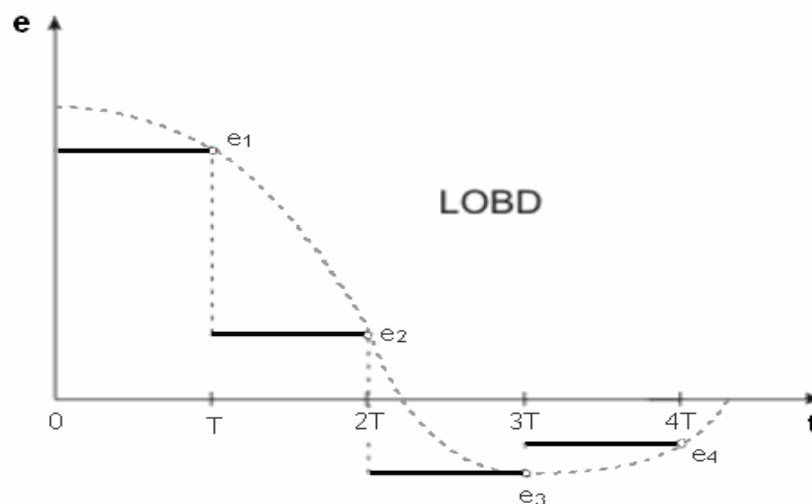
T_I – integrační časová konstanta

T_D - derivační časová konstanta

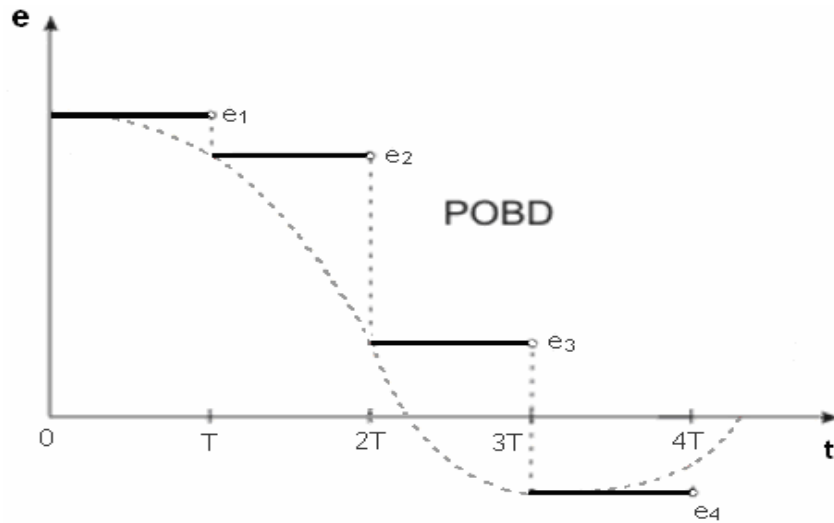
I_k a D_k - hodnoty integrálu a derivace průběhu regulační odchylky $e(t)$ v okamžiku $t = kT$.

Průběh regulační odchylky $e(t)$ v diskretním regulačním obvodu se redukuje na znalost hodnot vzorků posloupnosti $\{e_0, e_1, \dots, e_k\}$. Pomocí toho můžeme vypočítat I_k a D_k prostřednictvím numerických metod, založených na rekonstrukci skutečného průběhu regulační odchylky $e(t)$. Využívá pouze jednoduchých způsobů rekonstrukce:

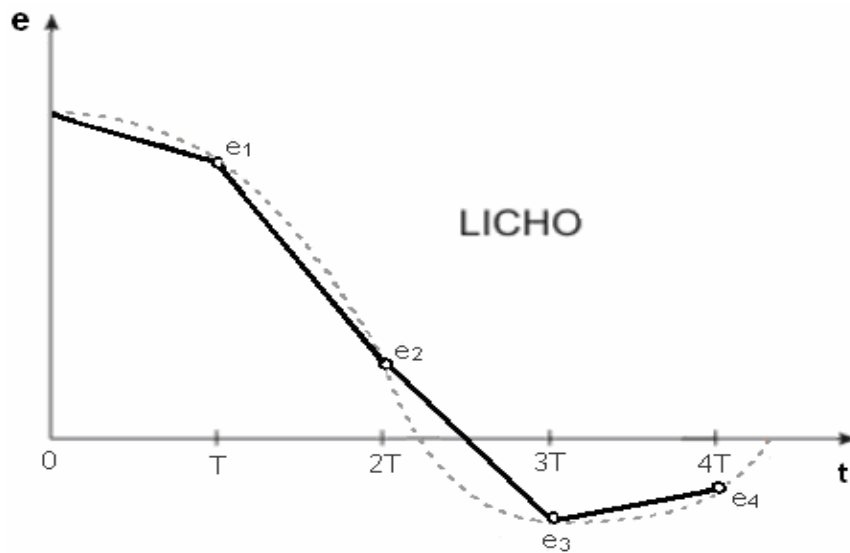
- stupňovitá náhrada zleva (levá obdélníková LOBD), zpětná obdélníková metoda (ZOBD)
- stupňovitá náhrada zprava (pravá obdélníková POBD), dopředná obdélníková metoda (DOBD)
- sečnová náhrada (lichoběžníková LICH)



Obr. 3 Stupňovitá náhrada zleva (levá obdélníková LOBD)



Obr. 4 Stupňovitá náhrada zprava (pravá obdélníková POBD)



Obr. 5 Sečnová náhrada (lichoběžníková LICHŮ)

Určení hodnoty integrálu I_k a derivace D_k odvozeny pro jednotlivé metody rekonstrukce náhradního průběhu $e(t)$ jsou uvedeny v tab. č.1.[8]

Tab. 1 Přehled možností určení hodnoty integrálu I_k a derivace D_k u číslicových PID regulátorů

náhrada	LOBD	POBD	LICHŮ
I_k	$T \cdot \sum_{i=1}^k e_i$	$T \cdot \sum_{i=0}^{k-1} e_i$	$T \cdot \sum_{i=1}^k \frac{e_i + e_{i-1}}{2}$
D_k	není definováno	není definováno	$\frac{e_k - e_{k-1}}{T}$

2.3 Polohový a přírůstkový číslicový PID algoritmus

Nahrazením integrálu I_k z tab. 1 a dosazením do rovnice (3) dostaneme polohový algoritmus diskrétního *PSD* regulátoru. Protože se hodnota I_k získává sumací ploch pod křivkou a derivace D_k je definovaná pomocí diference, jsou tyto regulátory označovány jako *PSD* (proporcionálně-sumačně-diferenční regulátory). Polohový algoritmus výpočtu akční veličiny má nevýhodu v tom, že vyžaduje inicializaci při přepínání regulované veličiny z ručního řízení na automatické. Aby bylo zajištěno beznárazové přepnutí, musí počáteční hodnota akční veličiny odpovídat poloze akčního členu v okamžiku přepnutí. Toho je možno dosáhnout:

- a) ručním nastavením počáteční hodnoty akční veličiny
- b) automatickým nastavením na základě měření polohy akčního členu

Druhou variantou řídicího algoritmu je přírůstkový algoritmus. Podle něj se neurčuje celá hodnota akční veličiny u_k , ale pouze změna vztážená k minulému okamžiku vzorkování, tedy přírůstek

$$\nabla u_k = u_k - u_{k-1} \quad (5)$$

Po úpravě rovnice pro obě hodnoty u_k , u_{k-1} , bude platit pro přírůstek akční veličiny platit

$$\nabla u_k = u_k - u_{k-1} = k_p(e_k - e_{k-1}) + \frac{k_p}{T_I}(I_k - I_{k-1}) + k_p T_D(D_k - D_{k-1}) = k_p \nabla e_k + \frac{k_p}{T_I} \nabla I_k + k_p T_D \nabla D_k \quad (6)$$

Pro hodnoty ∇I_k a ∇D_k je možno odvodit pro jednotlivé způsoby rekonstrukce průběhu regulační odchylky vztahy, které jsou uvedeny v tab. 2. U metod LOBD a POBD pro určení ∇D_k byl použit vztah z metody LICH0. Dosazením ∇D_k a ∇I_k podle tab. 2 do rovnice (6) dostaneme konkrétní varianty přírůstkového algoritmu. Ve všech případech je přírůstek ∇u_k funkcí posledních tří hodnot vzorku regulační odchylky e_k , e_{k-1} , e_{k-2} což můžeme vyjádřit zápisem

$$\nabla u_k = u_k - u_{k-1} = q_0 e_k + q_1 e_{k-1} + q_2 e_{k-2} \quad (7)$$

Jednotlivé alternativy se liší pouze hodnotami parametrů q_0 , q_1 , q_2 . Výpočty těchto hodnot jsou uvedeny v tab. č.3. [8]

Tab. 2 Možností určení ∇I_k a ∇D_k u číslicových přírůstkových PID regulátorů

náhrada	LOBD	POBD	LICHO
$\nabla I_k = I_k - I_{k-1}$	$T e_k$	$T e_{k-1}$	$T \frac{e_k + e_{k-1}}{2}$
$\nabla D_k = D_k - D_{k-1}$	$\frac{e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}}{T}$	$\frac{e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}}{T}$	$\frac{e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}}{T}$

Tab. 3 Varianty přepočtu parametrů k_P , T_I , T_D spojitého PID regulátoru na parametry q_0 , q_1 , q_2 přírůstkového číslicového PSD regulátoru

varianta	q_0	q_1	q_2
LOBD	$k_P + \frac{k_P T}{T_I} + \frac{k_P T_D}{T}$	$-k_P - 2 \frac{k_P T_D}{T}$	$\frac{k_P T_D}{T}$
POBD	$k_P + \frac{k_P T_D}{T}$	$-k_P + \frac{k_P T}{T_I} - 2 \frac{k_P T_D}{T}$	$\frac{k_P T_D}{T}$
LICHO	$k_P + \frac{k_P T}{2T_I} + \frac{k_P T_D}{T}$	$-k_P + \frac{k_P T}{2T_I} - 2 \frac{k_P T_D}{T}$	$\frac{k_P T_D}{T}$

2.4 Modifikace PSD algoritmu

Nevýhoda přírůstkového algoritmu je, že při malé periodě vzorkování T dostáváme parametry q_0 , q_1 , q_2 v poměrně vysokých hodnotách. To se negativně projeví při náhlých a rychlých změnách žádané hodnoty w . Na začátku regulačních pochodů se generují velké akční zásahy. Modifikace PSD algoritmu umožňuje větší tlumení akční veličiny u . Přírůstkový algoritmus PSD regulátoru je ve tvaru

$$\nabla u_k = k_P \nabla e_k + \frac{k_P}{T_I} \nabla I_k + k_P T_D \nabla D_k \quad (8)$$

a) omezení vlivu změn akční veličiny u P a D složky PSD algoritmu

uvažujeme

$$w_k = w_{k-1} = w_{k-2} = \text{konst} \quad (9)$$

$$\nabla e_k = e_k - e_{k-1} = w - y_k - w + y_{k-1} = y_{k-1} - y_k \quad (10)$$

$$\nabla D_k = \frac{e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}}{T} = \frac{-y_k + 2y_{k-1} - y_{k-2}}{T} \quad (11)$$

Provedeme-li toto opatření pouze u derivační složky, dostaneme přírůstkový algoritmus ve tvaru (po rekonstrukci LOBD)

$$\nabla u_k = u_k - u_{k-1} = k_P (e_k - e_{k-1}) + \frac{k_P T}{T_I} e_k + \frac{k_P T_D}{T} (-y_k + 2y_{k-1} - y_{k-2}) \quad (12)$$

Potlačíme-li i okamžitou reakci proporcionální složky na změnu řídicí veličiny, získáme modifikaci přírůstkového PSD algoritmu ve tvaru

$$\nabla u_k = u_k - u_{k-1} = k_P (-y_k + y_{k-1}) + \frac{k_P T}{T_I} e_k - \frac{k_P T_D}{T} (-y_k + 2y_{k-1} - y_{k-2}) \quad (13)$$

b) úprava derivačního členu - průměrná diference

Přírůstek průměrné rychlosti pro přírůstkový algoritmus bude ve tvaru:

$$\nabla D_k = \frac{e_k + 2e_{k-1} - 6e_{k-2} + 2e_{k-3} + e_{k-4}}{6T} \quad (14)$$

Pro LOBD platí:

$$\nabla u_k = k_P [e_k - e_{k-1}] + k_P \frac{T}{T_I} e_k + k_P \frac{T_D}{T} \nabla D_k = q_0 e_k + q_1 e_{k-1} + q_2 e_{k-2} + q_3 e_{k-3} + q_4 e_{k-4} \quad (15)$$

kde

$$q_0 = k_P + \frac{k_P T}{T_I} + \frac{k_P T_D}{6T} \quad q_1 = -k_P + \frac{k_P T_D}{3T} \quad q_2 = -\frac{k_P T_D}{T} \quad q_3 = \frac{k_P T_D}{3T} \quad q_4 = \frac{k_P T_D}{6T} \quad (16)$$

c) Zavedení dopředné vazby

Dopředná regulace je vhodná při řízení takových procesů, při kterých je požadováno, aby změny řídicí proměnné se “dopředně“ co nejdříve zohlednili v řídicím zásahu PSD regulátoru.

d) Omezení řídicího zásahu

Diskrétní regulátory mohou dávat řídicí zásahy, které nejdou z technické hlediska realizovat. To znamená, že akční zásah nemůže dále růst nebo klesat a drží se na maximální horní nebo minimální dolní hranici. Vypočítaný akční zásah se liší od skutečného akčního zásahu, který realizuje akční člen. Z lineárního obvodu se tak stává nelineární obvod, čímž vzniká neřízené chování v regulačním obvodě. Tento jev se nazývá “wind – up“ je způsoben zejména integrační složkou PSD regulátoru. Tato složka je stále v činnosti, čímž může vzniknout velké přeregulování a čas regulace bude delší.

U polohových algoritmů se integrace zastaví zavedením nulové regulační odchylky

$$u(t) > u_{\max} \quad a \quad e(t) > 0 \Rightarrow \text{zavést } e(t) = 0 \quad (17)$$

$$u(t) < u_{\min} \quad a \quad e(t) < 0 \Rightarrow \text{zavést } e(t) = 0 \quad (18)$$

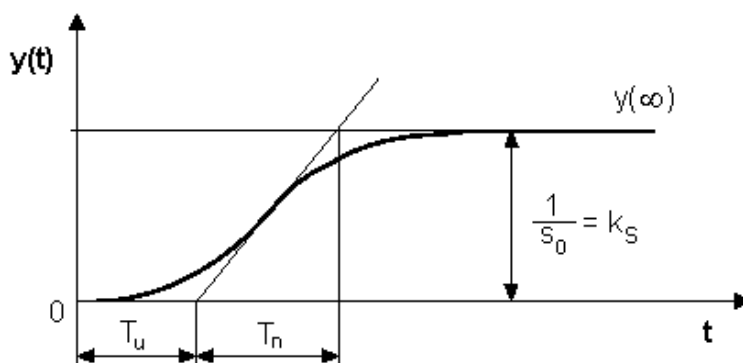
Omezení vypočtené hodnoty akční veličiny lze provést na intervalu (u_{min}, u_{max}) a v čase u_{k-1} uchovávat hodnoty pouze z tohoto intervalu. Je-li u_k rovno některé mezní hodnotě setrvá na této hodnotě, dokud se nezmění znaménko přírůstku. Protože změna znaménka je závislá na změně znaménka regulační odchylky, změní se hodnota u_k od mezní hodnoty v tom kroku, ve kterém dojde ke změně regulační odchylky.

3 SYNTÉZA DISKRÉTNÍHO REGULAČNÍHO OBVODU

3.1 Vybrané metody syntézy

3.1.1 Nastavení parametrů regulátoru metodou vycházející z přechodové charakteristiky regulované soustavy

Tato metoda vychází ze známého průběhu přechodové charakteristiky regulované soustavy. Je možné přímo volit jednoduché relace mezi přechodovou charakteristikou regulované soustavy a stavitelnými parametry regulátoru takové, aby regulační pochod byl blízký optimálnímu.



Obr. 6 Přechodová charakteristika

Z určených hodnot z přechodové charakteristiky T_u , T_n , k_s a zvolené periody vzorkování T určíme optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru pomocí následující tabulky. [8]

Tab. 4 Seřízení PSD regulátoru z průběhu přechodové charakteristiky

Typ regulátoru	k_p	$\frac{T}{T_i}$	$\frac{T_D}{T}$
P	$\frac{T_n}{T_u + T}$	-	-
PS	$\frac{0,9T_n}{T_u + 0,5T} - \frac{0,135T_n T}{(T_u + 0,5T)^2}$	$\frac{1}{k_s \cdot k_p} \frac{0,27T_n T}{(T_u + 0,5T)^2}$	-
PSD	$\frac{1,2T_n}{T_u + T} - \frac{0,3T_n T}{(T_u + 0,5T)^2}$	$\frac{1}{k_s \cdot k_p} \frac{0,67T_n T}{(T_u + 0,5T)^2}$	$\frac{1}{k_s \cdot k_p} \frac{0,5T_n}{T}$

Tabulku je možno použít pro seřízení PSD regulátoru, když $\frac{T_u}{T}$ není rovno 0.

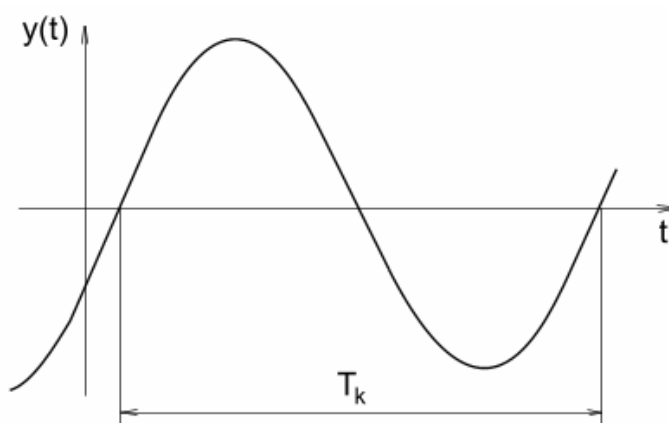
3.1.2 Metoda kritického zesílení regulátoru (Ziegler-Nichols)

U této metody musíme přivést regulační obvod na hranici stability, přičemž regulátor pracuje pouze s proporcionalní složkou a tedy integrační a derivační složka jsou vyřazeny nastavením.

$$T_I = \infty \quad \text{a} \quad T_D = 0 \quad (19)$$

Hodnotu kritického zesílení $k_P = k_{Pk}$ resp. $r_0 = r_{0k}$ a periodu kritického zesílení T_k zjistíme při odstranění derivační a integrační složky PID regulátoru, zvyšujeme zesílení proporcionalní složky k_P , resp. r_0 do okamžiku kdy regulační obvod kmitá netlumeně. Na obrázku je vykreslené kritické zesílení a jeho perioda T_k .

Tyto tzv. kritické hodnoty dosadíme do empirických vztahů pro použitý typ regulátoru a vypočítáme doporučené seřízení (viz. tab. 5).

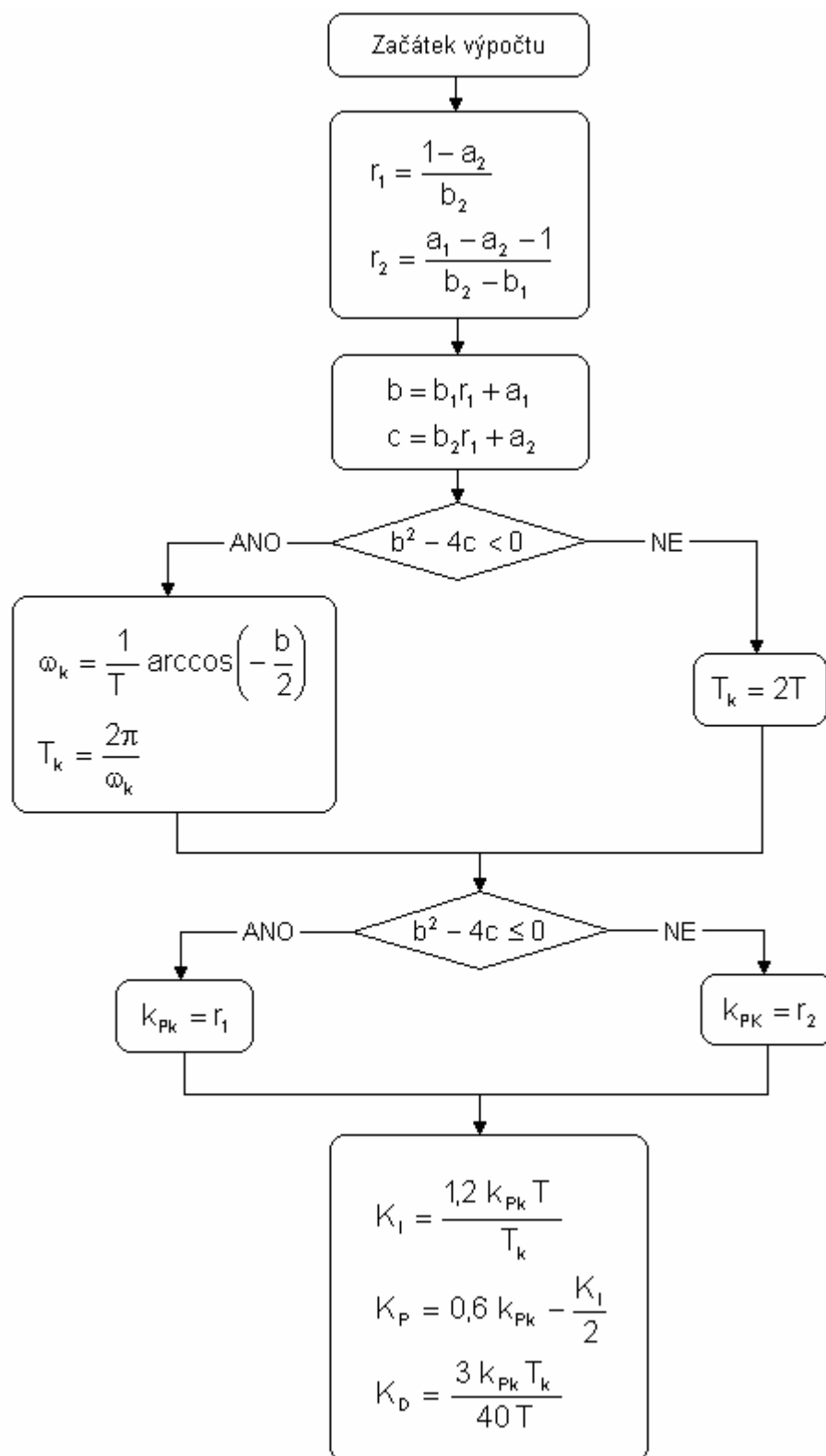


Obr. 7 Určení kritických hodnot regulátoru

Tab. 5 Seřízení PSD regulátoru z kritických hodnot regulátoru

Typ regulátoru	k_P	$\frac{T}{T_I}$	$\frac{T_D}{T}$
P	$0,5k_{Pk}$	-	-
PS	$0,45k_{Pk} \frac{T}{T_k}$	$\frac{1}{k_P} 0,54k_{Pk} \frac{T}{T_k}$	-
PSD	$0,6K_{Pk} \frac{T}{T_k}$	$\frac{1}{k_P} 1,2k_{Pk} \frac{T}{T_k}$	$\frac{1}{k_P} k_{Pk} \frac{3T_k}{40T}$

U soustav druhého řádu můžeme kritické zesílení regulátoru k_{Pk} a kritickou periodu T_k , určit výpočtem pomocí následujícího obrázku. Pomocí něho můžeme taky určit konstanty K_P , K_I a K_D Takahashiho modifikovaného PSD algoritmu.



Obr. 8 Schéma výpočtu parametrů PSD regulátoru pro Takahashiho algoritmus

3.1.3 Metoda požadovaného modelu (metoda inverze dynamiky)

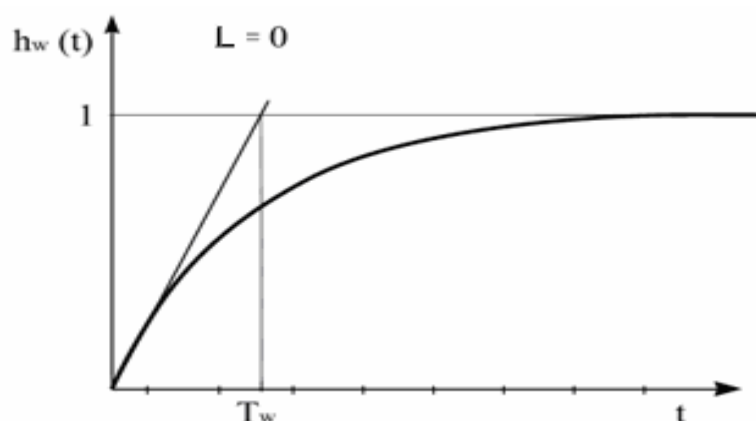
Tato metoda umožňuje snadné a rychlé seřízení číslicových regulátorů pro základní druhy regulovaných soustav i s dopravním zpožděním (viz.tab. 7). Je uvažován regulační obvod, ve kterém je použit regulátor s přenosem $G_R(z)$ (viz.tab. 6). Aby bylo možno použít tuto metodu, musí být zajištěno, aby přenos regulované soustavy $G_S(s)$ byl jedním ze základních tvarů uvedených v tab. 7.

Tab. 6 Přenos konvenčních regulátorů

Typ regulátoru	P	PS	PD	PSD
Přenos regulátoru	k_P	$k_P \left(1 + \frac{T}{T_I} \frac{z}{z-1} \right)$	$k_P \left(1 + \frac{T_D}{T} \frac{z-1}{z} \right)$	$k_P \left(1 + \frac{T}{T_I} \frac{z}{z-1} + \frac{T_D}{T} \frac{z-1}{z} \right)$

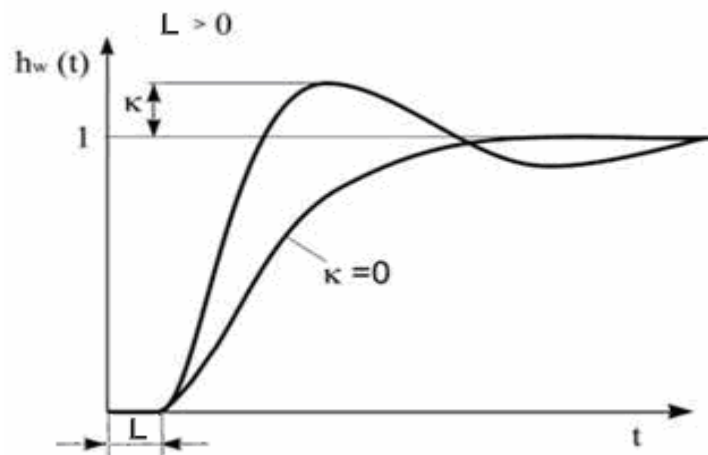
Pro regulované soustavy bez dopravního zpoždění ($L=0$) se předpokládá požadovaný aperiodický průběh přechodové charakteristiky $h_w(t)$ uzavřeného regulačního obvodu, viz. obrázek 2. Časová konstanta T_w musí být zvolena s ohledem na omezení akční veličiny a maximální nastavitelnou hodnotou zesílení regulátoru k_{Pmax} .

$$T_w > (2 \div 3)T \quad (20)$$



Obr. 9 Předpokládaný průběh přechodové charakteristiky pro regulované soustavy bez dopravního zpoždění

Pro regulované soustavy s dopravním zpožděním ($L>0$) zvolíme požadovaný překmit κ ($0 \leq \kappa \leq 0,5$) z přechodové charakteristiky $h_w(t)$ uzavřeného regulačního obvodu (viz. obrázek 3).



Obr. 10 Předpokládaný průběh přechodové charakteristiky pro regulované soustavy s dopravním zpožděním

V tab. 8 získáme z určeného požadovaného překmitu hodnoty parametrů α a β .

Periodu vzorkování zvolíme pomocí vztahu:

pro soustavy s dopravním zpožděním $T \leq 0,314L$

pro soustavy bez dopravního zpožděním $T \leq 0,286T_w$

Pokud dopravní zpoždění L je velmi malé, hodnotu určeného koeficientu a je třeba vhodně snížit s ohledem na omezení akční veličiny a maximální nastavitelnou hodnotu zesílení regulátoru k_{Pmax} .

Pro přesnější určení parametrů regulátoru použijeme následující vztahy, které jsou v sudých řádcích v tab.7.

Zesílení otevřeného regulačního obvodu a pro relativní překmit κ se určí ze vztahu:

$$a = \frac{1}{\alpha T + \beta L} \quad (21)$$

$$c_i = e^{-\frac{T}{T_i}} \quad (22)$$

$$c = e^{-\xi_0 \frac{T}{T_0}} \quad (23)$$

ξ_0 -koeficient poměrného tlumení regulované soustavy

$$b = \cos \frac{\sqrt{1 - \xi_0^2}}{T_0} T \quad (24)$$

Tab. 7 Doporučené typy regulátorů a výpočet jejich stavitelných parametrů

Regulovaná soustava	Typ	K _p		T _i	T _D
		L = 0	L > 0		
$\frac{c_s}{s} e^{-Ls}$	P	$\frac{2}{c_s(2T_w + T)}$	$\frac{a}{c_s}$	-	-
	P	$\frac{(1-c_w)}{c_s T}$	$\frac{a}{c_s}$	-	-
$\frac{k_s}{(T_1 s + 1)} e^{-Ls}$	PI	$\frac{2T_i}{k_s(2T_w + T)}$	$\frac{a T_i}{k_s}$	$T_1 - \frac{T}{2}$	-
	PI	$\frac{(1-c_w)T_i}{k_s T}$	$\frac{a T_i}{k_s}$	$\frac{c_1}{1-c_1} T$	-
$\frac{c_s}{s(T_1 s + 1)} e^{-Ls}$	PD	$\frac{2}{c_s(2T_w + T)}$	$\frac{a}{c_s}$	-	$T_1 - \frac{T}{2}$
	PD	$\frac{(1-c_w)}{c_s T}$	$\frac{a}{c_s}$	-	$\frac{c_1}{1-c_1} T$
$\frac{k_s}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-Ls}; T_1 \geq T_2$	PID	$\frac{2T_i}{k_s(2T_w + T)}$	$\frac{a T_i}{k_s}$	$T_1 + T_2 - T$	$\frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2} - \frac{T}{4}$
	PID	$\frac{(1-c_w)T_i}{k_s T}$	$\frac{a T_i}{k_s}$	$\frac{c_1 + c_2 - 2c_1 c_2 T}{1 - c_1 - c_2 + c_1 c_2}$	$\frac{c_1 c_2 T}{c_1 + c_2 - 2c_1 c_2}$
$\frac{k_s}{(T_0^2 s^2 + 2\xi_0 T_0 s + 1)} e^{-Ls}; 0,5 < \xi_0 \leq 1$	PID	$\frac{2T_i}{k_s(2T_w + T)}$	$\frac{a T_i}{k_s}$	$2\xi_0 T_0 - T$	$\frac{T_0}{2\xi_0} - \frac{T}{4}$
	PID	$\frac{(1-c_w)T_i}{k_s}$	$\frac{a T_i}{k_s}$	$\frac{2c(b-c)}{1-bc+c^2}$	$\frac{(2T_0 - \xi_0 T)T_0}{4\xi_0 T_0 - 2(1-\xi_0^2)T}$

kde : T_i - časové konstanty ($i = 0, 1, 2$), ξ - poměrné tlumení, k_s - koeficient zesílení, c_s - statický činitel rychlosti

Tab. 8 Určení koeficientů pro daný překmit

κ	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
α	1,282	0,984	0,884	0,832	0,763	0,697	0,669	0,640	0,618	0,599	0,577
β	2,718	1,944	1,720	1,561	1,437	1,337	1,248	1,172	1,104	1,045	0,992

3.1.4 Metoda konečný počet kroků

Tato metoda je často označována jako časově optimální řízení. Princip spočívá v tom, že po určitém počtu kroků regulace k bude regulační odchylka nulová. Tzn. Pro $k \geq k_{\min}$ bude $E(z)=0$

Pro regulační odchylku platí:

$$E(z^{-1}) = (1 - G_{wv}(z^{-1})) W(z^{-1}) \quad (25)$$

Aby byl splněn požadavek na konečný počet kroků regulace, musí být polynom $E(z)$ s konečným počtem členů. Je-li stupeň polynomu $E(z)$ označován jako δE , pak konečný počet kroků řízení bude:

$$k = \delta E(z) + 1 \quad (26)$$

Z-obraz žádané veličiny předpokládáme ve tvaru $w(k) = 1$, potom jeho Z-obraz $W(z)$ je

$$W(z) = \frac{1}{1 - z^{-1}} \quad (27)$$

Výstupní regulovaná veličina je vyjádřena posloupností

$$\begin{aligned} Y(z) &= y(1)z^{-1} + y(2)z^{-2} + \dots + y(k_{\min})z^{-k_{\min}} + y(k_{\min} + 1)z^{-(k_{\min}+1)} + \dots \\ &= y(1)z^{-1} + y(2)z^{-2} + \dots + 1z^{-k_{\min}} + 1z^{-(k_{\min}+1)} + \dots \end{aligned} \quad (28)$$

a akční zásah $U(z)$

$$\begin{aligned} U(z) &= u(0) + u(1)z^{-1} + \dots + u(k_{\min})z^{-k_{\min}} + u(k_{\min} + 1)z^{-(k_{\min}+1)} + \dots = \\ &= u(0) + u(1)z^{-1} + \dots + u(k_{\min})z^{-k_{\min}} + u(k_{\min} + 1)z^{-(k_{\min}+1)} + \dots \end{aligned} \quad (29)$$

Podělením $Y(z)$ a $W(z)$ dostaneme

$$\frac{Y(z)}{W(z)} = y(1)z^{-1} - y(1)z^{-2} + y(2)z^{-2} - y(2)z^{-3} + \dots = p_1z^{-1} + p_2z^{-2} + \dots + p_{k_{\min}}z^{-k_{\min}} = P(z) \quad (30)$$

Srovnáním koeficientů levé a pravé strany této rovnice dostaneme

$$\begin{aligned} p_1 &= y(1) \\ p_2 &= y(2) - y(1) \\ &\vdots \\ p_{k_{\min}} &= y(k_{\min}) - y(k_{\min} - 1) = 1 - y(k_{\min} - 1) \end{aligned} \quad (31)$$

Platí

$$\sum_{i=1}^{k_{\min}} p_i = p_1 + p_2 + \dots + p_{k_{\min}} = 1 \quad (32)$$

Podělením $U(z)$ a $W(z)$ dostaneme

$$\frac{U(z)}{W(z)} = u(0) - u(0)z^{-1} + u(1)z^{-1} - u(1)z^{-2} + \dots = q_0 + q_1z^{-1} + \dots + q_{k_{\min}}z^{-k_{\min}} = Q(z) \quad (33)$$

Srovnáním koeficientů levé a pravé strany této rovnice dostaneme

$$\begin{aligned} q_0 &= u(0) \\ q_1 &= u(1) - u(0) \\ &\vdots \\ q_{k_{\min}} &= u(k_{\min}) - u(k_{\min} - 1) \end{aligned} \quad (34)$$

Platí

$$\sum_{i=1}^{k_{\min}} q_i = q_1 + q_2 + \dots + q_{k_{\min}} = u(k_{\min}) = \frac{1}{K} \quad (35)$$

kde k_P je zesílení soustavy pro nějž platí

$$k_P = \frac{y(k_{\min})}{u(k_{\min})} = \frac{1}{u(k_{\min})} \quad (36)$$

Přenosová funkce uzavřeného regulačního obvodu je

$$G_{W/Y}(z) = \frac{G_R(z)G_S(z)}{1 + G_R(z)G_S(z)} = \frac{Y(z)}{W(z)} \quad (37)$$

Srovnáním (36) a (30) je zřejmé, že

$$G_{W/Y}(z) = p_1z^{-1} + p_2z^{-2} + \dots + p_{k_{\min}}z^{-k_{\min}} = P(z) \quad (38)$$

Přenos diskrétního regulátoru bude

$$G_R(z) = \frac{1}{G_S(z)} \frac{G_{W/Y}(z)}{1 - G_{W/Y}(z)} \quad (39)$$

Přenos regulované soustavy

$$G_S(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{k_{\min}} z^{-k_{\min}}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{k_{\min}} z^{-k_{\min}}} = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{W(z)}{U(z)} = \frac{P(z)}{Q(z)} \quad (40)$$

Dosazením za $P(z)$ a $Q(z)$ z rovnice (30) a (33) dostaneme

$$G_S(z) = \frac{P(z)}{Q(z)} = \frac{p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} + \dots + p_{k_{\min}} z^{-k_{\min}}}{q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_{k_{\min}} z^{-k_{\min}}} = \frac{(p_1 z^{-1} + \dots + p_{k_{\min}} z^{-k_{\min}}) \cdot \frac{1}{q_0}}{1 + \frac{q_1}{q_0} z^{-1} + \dots + \frac{q_{k_{\min}}}{q_0} z^{-k_{\min}}} \quad (41)$$

Srovnáním čitatele a jmenovatele rovnic (40) a (41) dostaneme

$$\begin{aligned} q_1 &= a_1 q_0 & p_1 &= b_1 q_0 \\ q_2 &= a_2 q_0 & p_2 &= b_2 q_0 \\ \vdots & & \vdots & \\ q_{k_{\min}} &= a_{k_{\min}} q_0 & p_{k_{\min}} &= b_{k_{\min}} q_0 \end{aligned} \quad (42)$$

s využitím rovnice (32) určíme člen q_0

$$\sum_{i=1}^{k_{\min}} p_i = 1 \Rightarrow \sum_{i=1}^{k_{\min}} b_i q_0 = 1 \Rightarrow q_0 = \frac{1}{\sum_{i=1}^{k_{\min}} b_i} = \frac{1}{b_1 + b_2 + \dots + b_{k_{\min}}} = u(0) \quad (43)$$

Přenos diskretního regulátoru (39) bude po úpravě s využitím rovnic (30), (33), (40) v tomto tvaru

$$G_R(z) = \frac{1}{P(z)/Q(z)} \frac{P(z)}{1-P(z)} = \frac{Q(z)}{1-P(z)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_{k_{\min}} z^{-k_{\min}}}{1 - (p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} + \dots + p_{k_{\min}} z^{-k_{\min}})} \quad (44)$$

Přenosová funkce uzavřeného regulačního obvodu (38) bude po úpravě ve tvaru

$$G_{W/Y}(z) = p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} + \dots + p_{k_{\min}} z^{-k_{\min}} = \frac{p_1 z^{k_{\min}-1} + p_2 z^{k_{\min}-2} + \dots + p_{k_{\min}} z^0}{z^{k_{\min}}} \quad (45)$$

kde $z^{k_{\min}}$ je charakteristická rovnice uzavřeného diskretního obvodu, tj. k_{\min} pólů je v počátku Z -roviny. Regulovaná veličina dosáhne tedy žádanou hodnotu za k_{\min} kroků, kde k_{\min} je řád soustavy.

První vypočítaná hodnota řídicího zásahu má největší hodnotu, je však možno její velikost výpočtově ovlivnit a zmenšit. Ukončení regulačního pochodu pak nebude za k_{\min} kroků, ale za $k_{\min}+1$ kroků.

V souladu s výše uvedeným i polynom $P(z)$ a $Q(z)$ bude mít $k_{\min}+1$ členů, tedy

$$\begin{aligned} P(z) &= p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} + \dots + p_{k_{\min}+1} z^{-(k_{\min}+1)} \\ Q(z) &= q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_{k_{\min}+1} z^{-(k_{\min}+1)} \end{aligned} \quad (46)$$

Diskrétní přenos regulované soustavy bude

$$G_S(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{k_{\min}} z^{-k_{\min}}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{k_{\min}} z^{-k_{\min}}} = \frac{p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} + \dots + p_{k_{\min}+1} z^{-(k_{\min}+1)}}{q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_{k_{\min}+1} z^{-(k_{\min}+1)}} = \frac{P(z)}{Q(z)} \quad (47)$$

Uvedená rovnost však platí pouze tehdy, pokud čítecitel a jmenovatel polynomu $P(z)$ a $Q(z)$ má ten samý kořen $z=z_1^{-1}$ (tedy můžeme krátit čítecitele a jmenovatele výrazem $(z_1 z^{-1})$).

$$\frac{P(z)}{Q(z)} = \frac{(p'_1 z^{-1} + p'_2 z^{-2} + \dots + p'_{k_{\min}} z^{-k_{\min}})(z_1 z^{-1})}{(q'_0 + q'_1 z^{-1} + \dots + q'_{k_{\min}} z^{-k_{\min}})(z_1 z^{-1})} = \frac{(p'_1 z^{-1} + p'_2 z^{-2} + \dots + p'_{k_{\min}} z^{-k_{\min}}) \frac{1}{q'_0}}{\left(1 + \frac{q'_1}{q'_0} z^{-1} + \dots + \frac{q'_{k_{\min}}}{q'_0} z^{-k_{\min}}\right)} \quad (48)$$

Srovnáním čítecitele a jmenovatele rovnic (47) a (48) dostaneme

$$\begin{aligned} q'_1 &= a_1 q'_0 & p'_1 &= b_1 q'_0 \\ q'_2 &= a_2 q'_0 & p'_2 &= b_2 q'_0 \\ \vdots & & \vdots & \\ q'_{k_{\min}} &= a_{k_{\min}} q'_0 & p'_{k_{\min}} &= b_{k_{\min}} q'_0 \end{aligned} \quad (49)$$

Dalším srovnáním vztahů (47) a (48) se získá přepoččet koeficientů $p'_i \rightarrow p_i$, $q'_i \rightarrow q_i$, tedy

$$\begin{aligned} q_0 &= z_1 q'_0 & p_1 &= z_1 p'_1 \\ q_1 &= (z_1 q'_1 - q'_0) & p_2 &= (z_1 p'_2 - p'_1) \\ \vdots & & \vdots & \\ q_{k_{\min}} &= (z_1 q'_{k_{\min}} - q'_{k_{\min}-1}) & p_{k_{\min}} &= (z_1 p'_{k_{\min}} - p'_{k_{\min}-1}) \\ q_{k_{\min}+1} &= -q'_{k_{\min}} & p_{k_{\min}+1} &= p'_{k_{\min}} \end{aligned} \quad (50)$$

Velikost první hodnoty řízení $u(0)$ bude menší o součin

$$q_0 = z_1 q'_0 \quad (51)$$

Další postup je pak takový, že první hodnota řízení $u(0)$ se volí $u(0)=q_0$, kde q_0 se určí ze vztahu

$$q'_0 = q_0 - \frac{1}{b_1 + b_2 + \dots + b_{k_{\min}}} = q_0 - \frac{1}{\sum_{i=1}^{k_{\min}} b_i} \quad (52)$$

Dosazením rovnic (52) a (49) do rovnice (50) dostaneme modifikované hodnoty koeficientů regulátoru vzhledem k omezení první hodnoty $u(0)$, tedy

$$\begin{aligned}
q_0 &= u(0) \text{ (} u(0) \text{ se volí)} \\
q_1 &= z_1 q'_1 - q'_0 = z_1 a_1 q'_0 - q'_0 = a_1 q_0 - q_0 + 1/\sum b_i = (a_1 - 1)q_0 + 1/\sum b_i \\
q_2 &= z_1 q'_2 - q'_1 = z_1 a_2 q'_0 - a_1 q'_0 = (a_2 - a_1)q_0 + a_1 \cdot 1/\sum b_i \\
&\vdots \\
q_{k_{\min}} &= (a_{k_{\min}} - a_{k_{\min}-1})q_0 + a_{k_{\min}-1} \cdot 1/\sum b_i \\
q_{k_{\min}+1} &= a_{k_{\min}} (-q_0 + 1/\sum b_i)
\end{aligned} \tag{53}$$

Koeficienty jmenovatele diskrétního regulátoru

$$\begin{aligned}
p_1 &= z_1 p'_1 = z_1 b_1 q'_0 = z_1 b_1 q_0 / z_1 = b_1 q_0 \\
p_2 &= z_1 p'_2 - p'_1 = z_1 b_2 q'_0 - b_1 q'_0 = z_1 b_2 q_0 / z_1 - b_1 (q_0 - 1/\sum b_i) = q_0 (b_2 - b_1) + b_1 \cdot 1/\sum b_i \\
&\vdots \\
p_{k_{\min}} &= q_0 (b_{k_{\min}} - b_{k_{\min}-1}) + b_{k_{\min}-1} \cdot 1/\sum b_i \\
p_{k_{\min}+1} &= -b_{k_{\min}} (-q_0 - 1/\sum b_i)
\end{aligned} \tag{54}$$

Přenos diskrétního regulátoru bude ve tvaru

$$G_R(z) = \frac{Q(z)}{1-P(z)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_{k_{\min}+1} z^{-(k_{\min}+1)}}{1 - (p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} + \dots + p_{k_{\min}+1} z^{-(k_{\min}+1)})} \tag{55}$$

Z rovnice plyne, že regulátor pro řízení s minimálním počtem kroků k_{\min} vypočítáme pomocí této metody snadno z koeficientů Z-přenosu regulované soustavy. Počet kroků regulace bude tolik, kolikátého je polynom regulované soustavy stupně. Nevýhoda těchto regulátorů je, že vytváří velké akční zásahy na začátku přechodového děje a nulová regulační odchylka platí jen pro okamžiky vzorkování. [5]

Vztahy pro výpočet parametrů regulátoru metodou konečného počtu kroků řízení bez omezení počáteční hodnoty akční veličiny

Přenos soustavy lze pro daný případ rozepsat následujícím způsobem

$$G_S(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{k_{\min}} z^{-k_{\min}}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{k_{\min}} z^{-k_{\min}}} = \frac{p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} + \dots + p_{k_{\min}} z^{-k_{\min}}}{q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_{k_{\min}} z^{-k_{\min}}} = \frac{P(z)}{Q(z)} \tag{56}$$

Přenos regulátoru $G_R(z)$ je uvažován ve tvaru

$$G_R(z) = \frac{Q(z)}{1-P(z)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_{k_{\min}} z^{-k_{\min}}}{1 - (p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} + \dots + p_{k_{\min}} z^{-k_{\min}})} \tag{57}$$

Parametry regulátoru $G_R(z)$ se pak určí následujícím způsobem:

parametr q_0

$$\sum_{i=1}^{k_{\min}} p_i = 1 \Rightarrow \sum_{i=1}^{k_{\min}} b_i q_0 = 1 \Rightarrow q_0 = \frac{1}{\sum_{i=1}^{k_{\min}} b_i} = \frac{1}{b_1 + b_2 + \dots + b_{k_{\min}}} = u(0) \quad (58)$$

- ostatní parametry

$$\begin{aligned} q_1 &= a_1 q_0 & p_1 &= b_1 q_0 \\ q_2 &= a_2 q_0 & p_2 &= b_2 q_0 \\ &\vdots & &\vdots \\ q_{k_{\min}} &= a_{k_{\min}} q_0 & p_{k_{\min}} &= b_{k_{\min}} q_0 \end{aligned} \quad (59)$$

Vztahy pro výpočet parametrů regulátoru metodou konečného počtu kroků řízení s omezením počáteční hodnoty akční veličiny

Přenos soustavy lze pro daný případ rozepsat následujícím způsobem

$$G_S(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{k_{\min}} z^{-k_{\min}}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{k_{\min}} z^{-k_{\min}}} = \frac{p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} + \dots + p_{k_{\min}+1} z^{-(k_{\min}+1)}}{q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_{k_{\min}+1} z^{-(k_{\min}+1)}} = \frac{P(z)}{Q(z)} \quad (60)$$

Přenos regulátoru $G_R(z)$ je uvažován ve tvaru

$$G_R(z) = \frac{Q(z)}{1-P(z)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_{k_{\min}+1} z^{-(k_{\min}+1)}}{1 - (p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} + \dots + p_{k_{\min}+1} z^{-(k_{\min}+1)})} \quad (61)$$

Parametry regulátoru $G_R(z)$ se pak určí následujícím způsobem:

$$\begin{aligned} q_0 &= u(0) \text{ (} u(0) \text{ se volí)} \\ q_1 &= (a_1 - 1)q_0 + 1/\sum b_i & p_1 &= b_1 q_0 \\ q_2 &= (a_2 - a_1)q_0 + a_1 \cdot 1/\sum b_i & p_2 &= q_0(b_2 - b_1) + b_1 \cdot 1/\sum b_i \\ &\vdots & &\vdots \\ q_{k_{\min}} &= (a_{k_{\min}} - a_{k_{\min}-1})q_0 + a_{k_{\min}-1} \cdot 1/\sum b_i & p_{k_{\min}} &= q_0(b_{k_{\min}} - b_{k_{\min}-1}) + b_{k_{\min}-1} \cdot 1/\sum b_i \\ q_{k_{\min}+1} &= a_{k_{\min}}(-q_0 + 1/\sum b_i) & p_{k_{\min}+1} &= -b_{k_{\min}}(q_0 - 1/\sum b_i) \end{aligned} \quad (62)$$

3.2 Aproximace dopravního zpoždění

Při výpočtu parametrů regulátoru, používáme přenosy regulovaných soustav s dopravním zpožděním, proto je nutné tento přenos nejprve aproximovat pomocí některé z metod aproximace dopravního zpoždění.

Taylorova aproximace čitatele

Tato aproximace je vyjádřena ve tvaru

$$e^{-Ls} = (1 - Ls + \dots) \approx \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} (Ls)^n \quad (63)$$

Pro $n = 1, 2, 3, \dots$

Kde volbou „ n “ ovlivníme přesnost aproximace

Taylorova aproximace jmenovatele

Tato aproximace je vyjádřena ve tvaru

$$e^{-Ls} = \frac{1}{e^{Ls}} = \frac{1}{(1 + Ls + \dots)} \approx \frac{1}{\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} (Ls)^n} \quad (64)$$

Pro $n = 1, 2, 3, \dots$

Kde volbou „ n “ ovlivníme přesnost aproximace

Padeho aproximace

Tato aproximace je vyjádřena poměrem

$$e^{-Ls} \approx \frac{P_n(s)}{Q_n(s)} \quad (65)$$

kde značí

$$P_n(s) = 1 - \frac{sL}{2} + \frac{n(n-1)}{2n(2n-1)} \frac{s^2 L^2}{2!} - \dots + \frac{(-1)^n n!}{(2n)!} s^n L^n \quad (66)$$

$$Q_n(s) = 1 + \frac{sL}{2} + \frac{n(n-1)}{2n(2n-1)} \frac{s^2 L^2}{2!} + \dots + \frac{n!}{(2n)!} s^n L^n \quad (67)$$

Volbou „ n “ lze ovlivnit přesnost aproximace, např.

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

$$0 \leq \omega \leq \frac{2}{L} \quad (68)$$

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

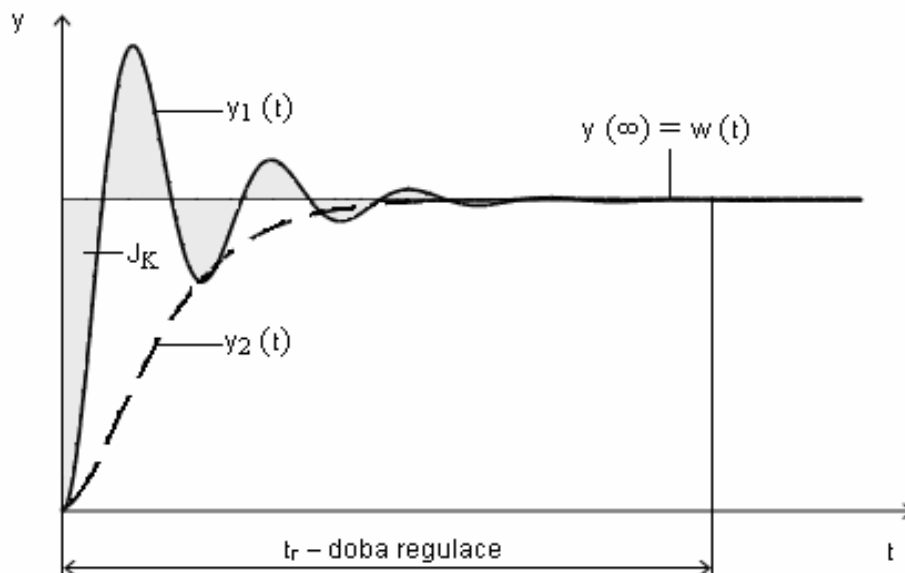
$$0 \leq \omega \leq \frac{6}{L} \quad (69)$$

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

$$e^{-Ts} \approx \frac{1 - \frac{sL}{2}}{1 + \frac{sL}{2}} \quad (70)$$

3.3 Kvalita regulace

Jednotlivé regulační pochody jsou porovnány metodou kvadratické regulační plochy. Tato metoda určuje kvalitu regulace z kvadratické regulační plochy, která leží mezi přechodovou charakteristikou a žádanou hodnotou regulačního obvodu. Platí, že čím menší je hodnota kvadratické regulační plochy J_K , tím je kvalita regulace větší. [6]



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

Výpočet kvadratické regulační plochy je definovaný vztahem

$$J_K = \int_0^{\infty} [y(t) - y(\infty)]^2 dt = \int_0^{\infty} [y(t) - w(t)]^2 dt \approx \int_0^{t_r} [y(t) - w(t)]^2 dt \quad (71)$$

4 POPIS INTEGROVANÉHO VÝVOJOVÉHO PROSTŘEDÍ MATLAB

MATLAB je integrované prostředí pro vědeckotechnické výpočty, modelování, návrhy algoritmů, simulace, analýzu a prezentaci dat, měření a zpracování signálů, návrhy řídicích a komunikačních systémů.

Program existuje řadu let a prošel dlouhým vývojem. Vlastní MATLAB není jen v jedné linii základního programu, ale používá se spousta rozšíření (toolbox). Nejznámější a asi nejpoužívanější je Simulink.

Simulink je program pro simulaci a modelování dynamických systémů, který využívá algoritmy MATLAB pro numerické řešení nelineárních diferenciálních rovnic. Poskytuje uživateli možnost rychle a snadno vytvářet modely dynamických soustav ve formě blokových schémat a rovnic.

MATLAB je velmi mocný nástroj pro řešení a analýzu technické problematiky. Integruje výpočty, vizualizaci a programování do jednoduše ovladatelného prostředí, kde problémy a řešení jsou vyjádřeny pomocí dobře známých matematických vztahů. Typické použití zahrnuje:

- Matematiku a výpočty
- Tvorba algoritmů
- Získávání dat
- Modelování a simulace
- Analýza dat, výzkum a vizualizace
- Vědecká a inženýrská grafika
- Tvorba aplikací, včetně grafického rozhraní

Systém MATLAB se skládá z pěti hlavních částí:

Vývojové prostředí. Tato sada nástrojů a prostředků pomáhá v práci s funkcemi a soubory. Mnoho těchto nástrojů má grafické uživatelské prostředí. To zahrnuje plochu MATLABu, příkazové okno, historii příkazů, editor, ladící software a prohlížeč helpu, plochy, souborů a vyhledávací cesty.

Knihovna matematických funkcí MATLABu je obrovská sada výpočetních algoritmů v rozsahu od elementárních funkcí jako suma, sin, cos a komplexní aritmetika k více sofistikovaným funkcím jako je inverze matice, vlastní čísla matice, Besselovy funkce a rychlá Fourierova transformace.

Jazyk MATLAB je pokročilý jazyk pro práci s maticemi a poli s možností řízení výpočtu. Jazyk umožňuje práci s datovými strukturami, s vstupem a výstupem. Je zahrnuta podpora objektového programování. To umožňuje dvě věci, jak velmi rychle udělat jednoduchý program tak vytvářet složité komplexní aplikace.

Grafika v MATLABu má rozsáhlé prostředky pro zobrazení vektorů a matic jako grafy, právě tak jako možnosti popisu a tisku těchto grafů. MATLAB má mnoho funkcí pro 2D a 3D vizualizaci dat, zpracování obrazu, animací a prezentací grafiky.

Rozhraní MATLABu pro aplikační programy (API) tato knihovna nám umožňuje psát programy v C a ve Fortranu, které komunikují s MATLABem. To zahrnuje prostředky pro volání podprogramů z MATLABu (dynamické linky), volání výpočetního jádra MATLABu, a umožňuje čtení a zápis MAT souborů.

Výhoda MATLAB je nejen v jeho velkých možnostech, ale i v tom, jak je široce rozšířen v průmyslu a jeho verze existují pro řadu operačních systémů (Unix, Linux, Windows, Open VMS, IRIX, Solaris, Macintosh, HP-UX a další). MATLAB je komerční software, ale existuje i jeho GNU (general public license) varianta Octave. Není to samozřejmě to samé, ale syntaxe příkazů a práce s tímto produktem je stejná jako v MATLABu, chybí další nadstavby a vylepšení, ale pro samotné výpočty je to velmi zajímavý nástroj. Hlavně je zdarma a tak přístupnější studentům i pro domácí použití.

5 SIMULACE DISKRÉTNÍHO REGULAČNÍHO POCHODU PRO VYBRANÉ METODY NASTAVENÍ PARAMETRŮ REGULÁTORU

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

Pro níže uvedené typy regulovaných soustav bude proveden návrh parametrů regulátoru s využitím vybraných diskrétních metod syntézy.

$$\text{č.1} \quad G_s(s) = \frac{2}{s^2 + 5s + 4}$$

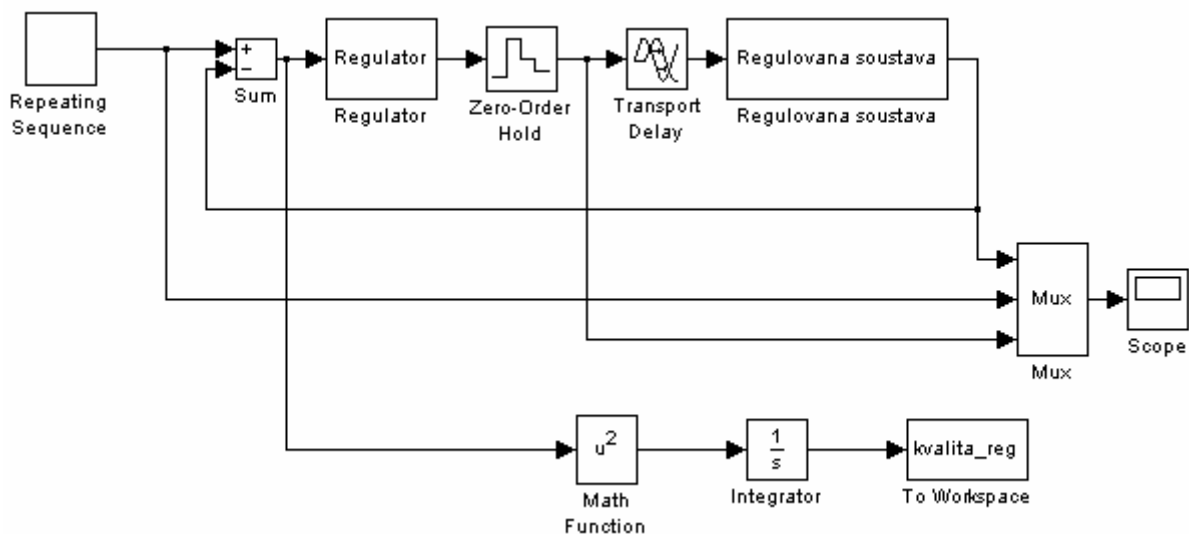
$$\text{č.2} \quad G_s(s) = \frac{2}{s^2 + 5s + 4} e^{-0,5s}$$

$$\text{č.3} \quad G_s(s) = \frac{2}{6s + 1}$$

$$\text{č.4} \quad G_s(s) = \frac{2}{6s + 1} e^{-2s}$$

Pro regulovanou soustavu druhého řádu, tedy soustava č.1, č.2 budou určeny parametry pro *PSD* regulátor. Pro regulovanou soustavu prvního řádu, tedy soustava č.3, č.4 budou určeny parametry pro *PS* regulátor.

Vypočtené parametry regulátoru budeme simulovat v programu synteza, který byl vytvořen v prostředí MATLAB/Simulink. Schéma regulačního obvodu je uvedeno na obrázku níže.



Obr. 12 Schéma regulačního obvodu vytvořeného v programu MATLAB/Simulink

5.1 Vybrané metody syntézy

5.1.1 Nastavení parametrů regulátoru metodou vycházející z přechodové charakteristiky regulované soustavy

Výpočet PSD regulátoru pro regulovanou soustavu č.1

$$G_s(s) = \frac{2}{s^2 + 5s + 4}$$

Z přechodové charakteristiky bylo určeno: $T_u = 0,1246$; $T_n = 1,5878$; $k_S = 0,5$

Perioda vzorkování byla určena z rovnice:

$$T = \left(\frac{1}{6} \div \frac{1}{15} \right) T_{95} = \left(\frac{1}{6} \div \frac{1}{15} \right) \cdot 3 = \frac{3}{6} = 0,5$$

Podle tab. 4 byly nastaveny parametry PSD regulátoru.

$$k_P = \frac{1,2T_n}{T_u + T} - \frac{0,3T_n T}{(T_u + 0,5T)^2} = \frac{1,2 \cdot 1,5878}{0,1246 + 0,5} - \frac{0,3 \cdot 1,5878 \cdot 0,5}{(0,1246 + 0,5 \cdot 0,5)^2} = 1,5829$$

$$\frac{T}{T_I} = \frac{1}{k_S \cdot k_P} \frac{0,67T_n T}{(T_u + 0,5T)^2} = \frac{1}{0,5 \cdot 1,5829} \frac{0,67 \cdot 1,5878 \cdot 0,5}{(0,1246 + 0,5 \cdot 0,5)^2} = 5,6054$$

$$\frac{T_D}{T} = \frac{1}{k_S \cdot k_P} \frac{0,5T_n}{T} = \frac{1}{0,5 \cdot 1,5829} \frac{0,5 \cdot 1,5878}{0,5} = 2,3474$$

Pro určení koeficientů q_0 , q_1 a q_2 byly použity vztahy pro zpětnou obdélníkovou metodu

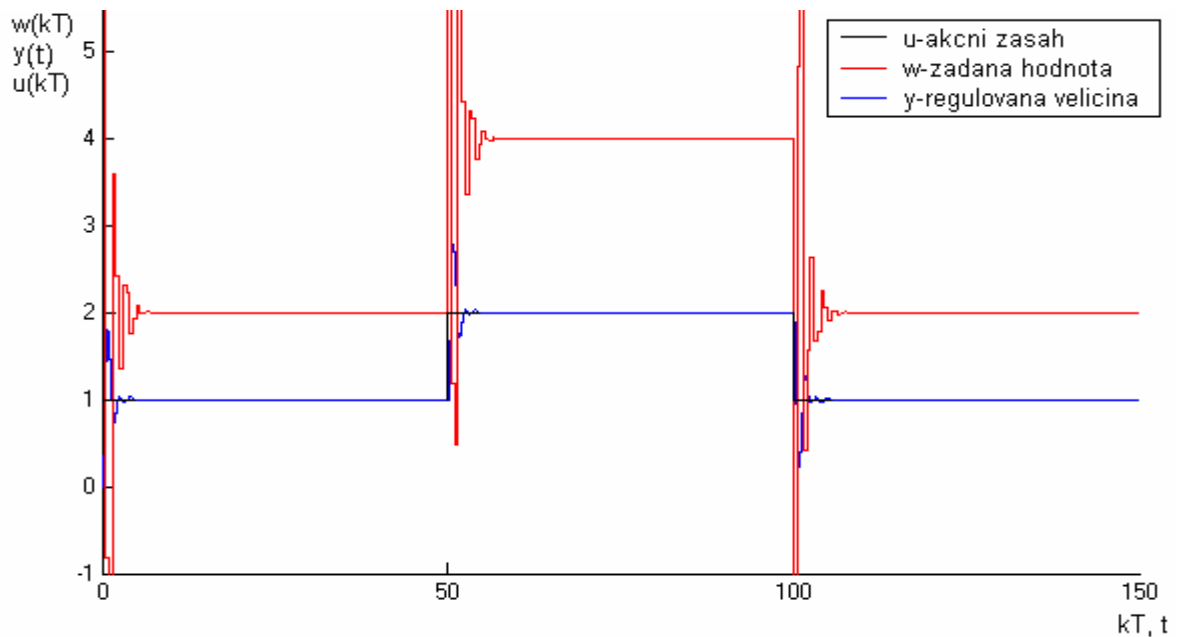
$$q_0 = k_P \left(1 + \frac{T_D}{T} + \frac{T}{T_I} \right) = 1,5829 \cdot (1 + 2,3474 + 5,6054) = 12,1138$$

$$q_1 = -k_P \left(1 + 2 \frac{T_D}{T} \right) = -1,5829 \cdot (1 + 2 \cdot 2,3474) = -7,7054$$

$$q_2 = k_P \frac{T_D}{T} = 1,5829 \cdot 2,3474 = 3,1762$$

Přenos regulátoru $G_R(z)$:

$$G_R(z) = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} = \frac{12,1138 - 7,7054 z^{-1} + 3,1762 z^{-2}}{1 - z^{-1}}$$



Obr. 13 Průběh regulace pro PSD regulátor nastavený metodou vycházející z přechodové charakteristiky pro regulovanou soustavu č.1

Výpočet PSD regulátoru pro regulovanou soustavu č.2

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

Z přechodové charakteristiky bylo určeno: $T_u = 0,6245$; $T_n = 1,5883$; $k_S = 0,5$

Perioda vzorkování byla určena z rovnice:

$$T \approx \left(\frac{1}{4} \div \frac{1}{2} \right) \sum_i \tau_i = \frac{1,25}{2} = 0,625$$

Podle tab. 4 byly nastaveny parametry PSD regulátoru.

$$k_P = \frac{1,2T_n}{T_u + T} - \frac{0,3T_n T}{(T_u + 0,5T)^2} = \frac{1,2 \cdot 1,5883}{0,6245 + 0,625} - \frac{0,3 \cdot 1,5883 \cdot 0,625}{(0,6245 + 0,5 \cdot 0,625)^2} = 1,1041$$

$$\frac{T}{T_i} = \frac{1}{k_S \cdot k_P} \frac{0,67T_n T}{(T_u + 0,5T)^2} = \frac{1}{0,5 \cdot 1,1041} \frac{0,67 \cdot 1,5883 \cdot 0,625}{(0,6245 + 0,5 \cdot 0,625)^2} = 1,2774$$

$$\frac{T_D}{T} = \frac{1}{k_S \cdot k_P} \frac{0,5T_n}{T} = \frac{1}{0,5 \cdot 1,1041} \frac{0,5 \cdot 1,5883}{0,625} = 2,1425$$

Pro určení koeficientů q_0 , q_1 a q_2 byly použity vztahy pro zpětnou obdélníkovou metodu

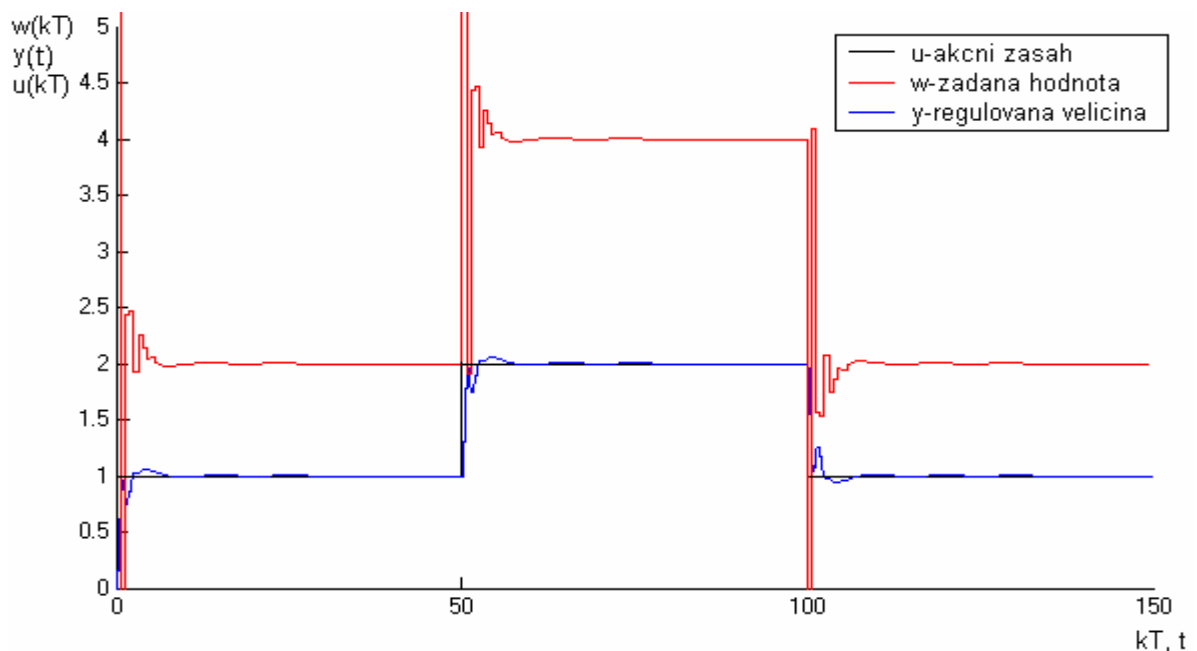
$$q_0 = k_P \left(1 + \frac{T_D}{T} + \frac{T}{T_I} \right) = 1,1041 \cdot (1 + 2,1425 + 1,2774) = 5,2427$$

$$q_1 = -k_P \left(1 + 2 \frac{T_D}{T} \right) = -1,1041 \cdot (1 + 2 \cdot 2,1425) = -6,2689$$

$$q_2 = k_P \frac{T_D}{T} = 1,1041 \cdot 2,1425 = 2,5414$$

Přenos regulátoru $G_R(z)$:

$$G_R(z) = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} = \frac{5,2427 - 6,2689 z^{-1} + 2,5414 z^{-2}}{1 - z^{-1}}$$



Obr. 14 Průběh regulace pro PSD regulátor nastavený metodou vycházející z přechodové charakteristiky pro regulovanou soustavu č.2

Výpočet PS regulátoru pro regulovanou soustavu č.3

$$G_S(s) = \frac{2}{6s + 1}$$

Z přechodové charakteristiky bylo určeno: $T_u = 0,01$; $T_n = 6,0338$; $k_S = 2$

Perioda vzorkování byla určena z rovnice:

$$T \approx \left(\frac{1}{4} \div \frac{1}{2} \right) \sum_i \tau_i = \frac{6}{3} = 2$$

Podle tab. 4 byly nastaveny parametry PSD regulátoru.

$$k_P = \frac{0,9T_n}{T_U + 0,5T} - \frac{0,135T_nT}{(T_U + 0,5T)^2} = \frac{0,9 \cdot 6,0338}{0,01 + 0,5 \cdot 2} - \frac{0,135 \cdot 6,0338 \cdot 1}{(0,01 + 0,5 \cdot 2)^2} = 3,7790$$

$$\frac{T}{T_i} = \frac{1}{k_S \cdot k_P} \frac{0,27T_nT}{(T_U + 0,5T)^2} = \frac{1}{2 \cdot 1,0918} \frac{0,27 \cdot 6,0338 \cdot 2}{(0,01 + 0,5 \cdot 2)^2} = 0,4229$$

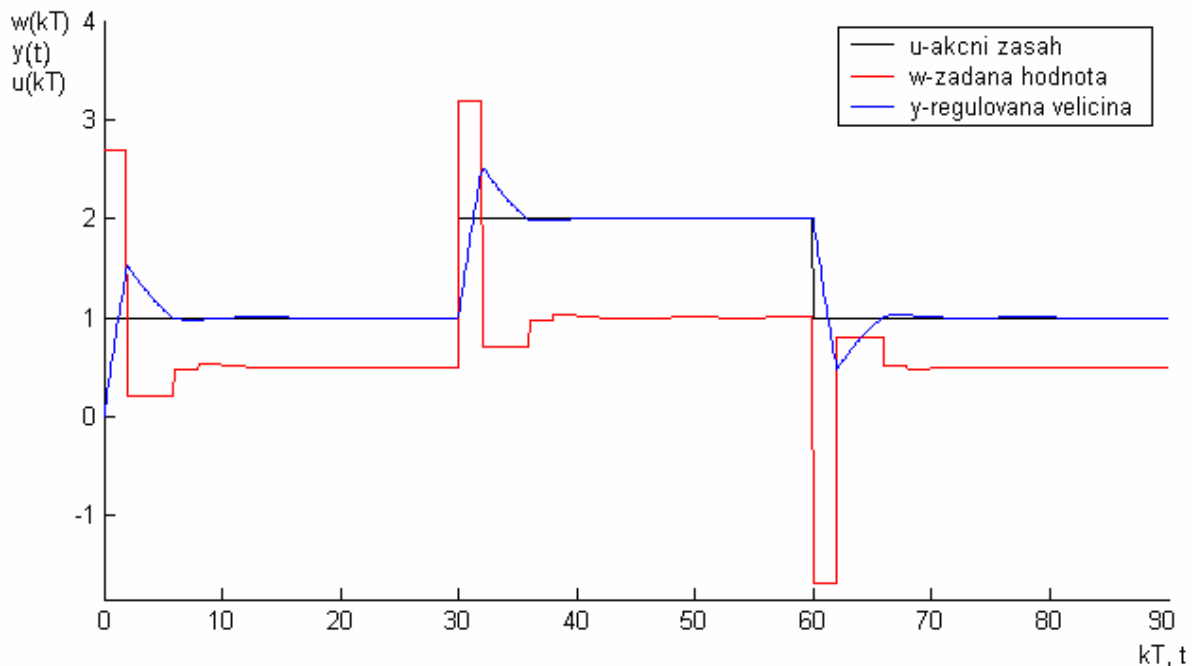
Pro určení koeficientů q_0 a q_1 byly použity vztahy pro zpětnou obdélníkovou metodu

$$q_0 = k_P \left(1 + \frac{T}{T_i} \right) = 1,0918 \cdot (1 + 0,4229) = 5,3770$$

$$q_1 = -k_P = -3,7790$$

Přenos regulátoru $G_R(z)$:

$$G_R(z) = \frac{q_0 + q_1 z^{-1}}{1 - z^{-1}} = \frac{5,3770 - 3,7790 z^{-1}}{1 - z^{-1}}$$



Obr. 15 Průběh regulace pro PS regulátor nastavený metodou vycházející z přechodové charakteristiky pro regulovanou soustavu č.3

Výpočet PS regulátoru pro regulovanou soustavu č.4

$$G_S(s) = \frac{2}{6s+1} e^{-2s}$$

Z přechodové charakteristiky bylo určeno: $T_u = 1,9379$; $T_n = 8,4399$; $k_S = 2$

Perioda vzorkování byla určena z rovnice:

$$T \approx \left(\frac{1}{4} \div \frac{1}{2} \right) \sum_i \tau_i = \frac{6}{3} = 2$$

Podle tab. 4 byly nastaveny parametry PSD regulátoru.

$$k_P = \frac{0,9T_n}{T_u + 0,5T} - \frac{0,135T_nT}{(T_u + 0,5T)^2} = \frac{0,9 \cdot 8,4399}{1,9379 + 0,5 \cdot 2} - \frac{0,135 \cdot 8,4399 \cdot 2}{(1,9379 + 0,5 \cdot 2)^2} = 2,3215$$

$$\frac{T}{T_i} = \frac{1}{k_S \cdot k_P} \frac{0,67T_nT}{(T_u + 0,5T)^2} = \frac{1}{2 \cdot 1,0288} \frac{0,67 \cdot 8,4399 \cdot 2}{(1,9379 + 0,5 \cdot 2)^2} = 0,1137$$

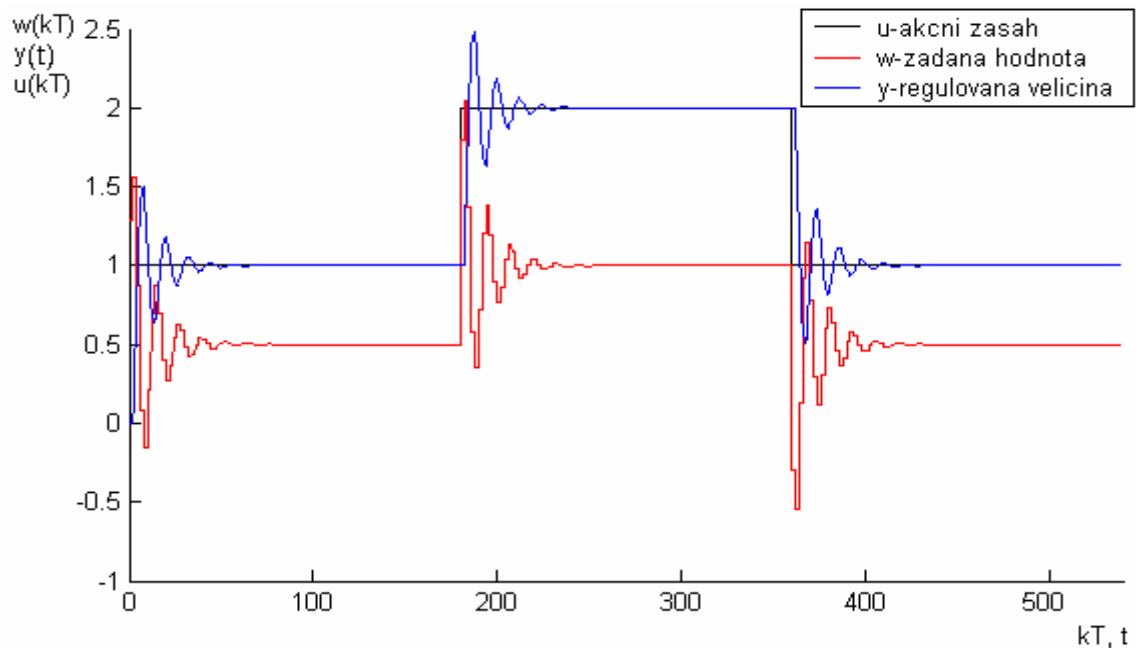
Pro určení koeficientů q_0 a q_1 byly použity vztahy pro zpětnou obdélníkovou metodu

$$q_0 = k_P \left(1 + \frac{T}{T_i} \right) = 1,0288 \cdot (1 + 0,1137) = 2,5855$$

$$q_1 = -k_P = -2,3215$$

Přenos regulátoru $G_R(z)$:

$$G_R(z) = \frac{q_0 + q_1 z^{-1}}{1 - z^{-1}} = \frac{2,5855 - 2,3215 z^{-1}}{1 - z^{-1}}$$



Obr. 16 Průběh regulace pro PS regulátor nastavený metodou vycházející z přechodové charakteristiky pro regulovanou soustavu č.4

5.1.2 Metoda kritického zesílení regulátoru (Ziegler-Nichols)

Výpočet PSD regulátoru pro regulovanou soustavu č.1

$$G_s(s) = \frac{2}{s^2 + 5s + 4}$$

Perioda vzorkování byla určena z rovnice:

$$T = \left(\frac{1}{6} \div \frac{1}{15} \right) T_{95} = \left(\frac{1}{6} \div \frac{1}{15} \right) \cdot 3 = \frac{3}{6} = 0,5$$

Zadané soustavě a vypočítané periodě vzorkování odpovídá Z-přenos:

$$G_s(z) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} = \frac{0,1182z^{-1} + 0,0519z^{-2}}{1 - 0,7419z^{-1} + 0,0821z^{-2}}$$

Byla určena hodnota kritického zesílení k_{pk} a kritická perioda T_k

$$r_1 = \frac{1 - a_2}{b_2} = \frac{1 - 0,0821}{0,0519} = 17,6837$$

$$r_2 = \frac{a_1 - a_2 - 1}{b_2 - b_1} = \frac{-0,7419 - 0,0821 - 1}{0,0519 - 0,1182} = 27,5128$$

$$b = b_1 \cdot r_1 + a_1 = 0,1182 \cdot 17,6837 - 0,7419 = 1,3484$$

$$c = b_2 \cdot r_1 + a_2 = 0,0519 \cdot 17,6837 + 0,0821 = 0,9998$$

$$d = b^2 - 4c = 1,3484^2 - 4 \cdot 0,9998 = -2,1819$$

Pro výpočet T_k a k_{pk} byly použity následující vztahy, protože $d < 0$.

$$\bar{\omega}_k = \frac{1}{T} \arccos\left(-\frac{b}{2}\right) = \frac{1}{0,5} \arccos\left(-\frac{1,3484}{2}\right) = 4,6213$$

$$T_k = \frac{2\pi}{\bar{\omega}_k} = \frac{2\pi}{4,6213} = 1,3596$$

$$k_{pk} = r_1 = 17,6837$$

Pomocí vztahů uvedených v tab. 5 byly vypočítány parametry PSD regulátoru pomocí metody kritického zesílení regulátoru (Ziegler-Nichols).

$$k_P = 0,6 k_{pk} \frac{T}{T_k} = 0,6 \cdot 17,6837 \cdot \frac{0,5}{1,3596} = 3,9002$$

$$\frac{T}{T_I} = \frac{1}{k_P} 1,2 k_{PK} \frac{T}{T_k} = \frac{1}{3,9002} 1,2 \cdot 17,6837 \cdot \frac{0,5}{1,3596} = 2$$

$$\frac{T_D}{T} = \frac{1}{k_P} k_{PK} \frac{3T_k}{40T} = \frac{1}{3,9002} \cdot 17,6837 \cdot \frac{3 \cdot 1,3596}{40 \cdot 0,5} = 0,9243$$

Pro určení koeficientů q_0 , q_1 a q_2 byly použity vztahy pro zpětná-ZOBD transformace.

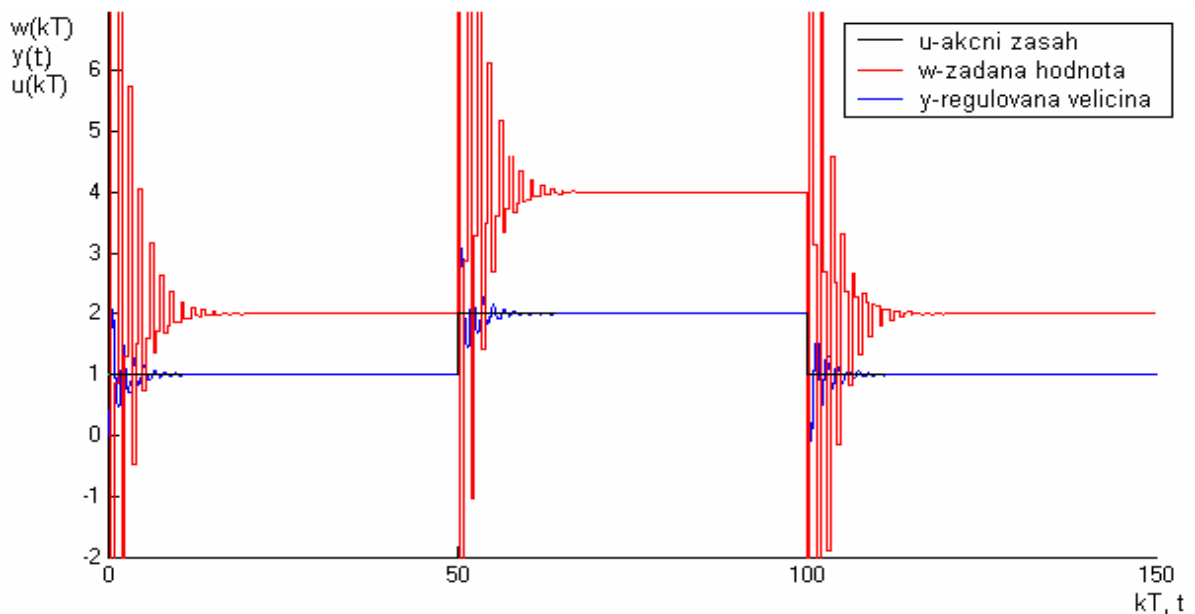
$$q_0 = k_P \cdot \left(1 + \frac{T_D}{T} + \frac{T}{T_I}\right) = 3,9002 \cdot (1 + 0,9243 + 2) = 15,3123$$

$$q_1 = -k_P \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{T_D}{T}\right) = -3,9002 \cdot (1 + 2 \cdot 0,9243) = -11,1148$$

$$q_2 = k_P \cdot \frac{T_D}{T} = 3,9002 \cdot 0,9243 = 3,6064$$

Přenos regulátoru $G_R(z)$:

$$G_R(z) = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} = \frac{15,3123 - 11,1148 z^{-1} + 3,6064 z^{-2}}{1 - z^{-1}}$$



Obr. 17 Průběh regulace pro PSD regulátor nastavený metodou kritického zesílení regulátoru (Ziegler-Nichols) pro regulovanou soustavu č.1

Výpočet PSD regulátoru pro regulovanou soustavu č.2

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

Perioda vzorkování byla určena z rovnice:

$$T \approx \left(\frac{1}{4} \div \frac{1}{2} \right) \sum_i \tau_i = \frac{1,25}{2} = 0,625$$

Byla provedena aproximace dopravního zpoždění pomocí Taylora v čitateli

$$G_s(s) = \frac{2}{s^2 + 5s + 4} e^{-0,5s} = \frac{2}{6s + 1} \cdot (0,5s + 1) = \frac{s + 2}{s^2 + 5s + 4}$$

Zadané soustavě a vypočítané periodě vzorkování odpovídá Z-přenos:

$$G_s(z) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} = \frac{0,2943z^{-1} - 0,0027z^{-2}}{1 - 0,2779z^{-1} + 0,0067z^{-2}}$$

Byla určena hodnota kritického zesílení k_{Pk} a kritická perioda T_k

$$r_1 = \frac{1 - a_2}{b_2} = \frac{1 - 0,0067}{-0,0027} = -361,8214$$

$$r_2 = \frac{a_1 - a_2 - 1}{b_2 - b_1} = \frac{-0,2779 - 0,0067 - 1}{-0,0027 - 0,2943} = 4,3252$$

$$b = b_1 \cdot r_1 + a_1 = 0,2943 \cdot (-361,8214) + 0,0067 = -106,7520$$

$$c = b_2 \cdot r_1 + a_2 = -0,0027 \cdot (-361,8214) + 0,0067 = 1$$

$$d = b^2 - 4c = (-106,7520)^2 - 4 \cdot 1 = 11392$$

Pro výpočet T_k a k_{Pk} byly použity následující vztahy, protože $d > 0$.

$$T_k = 2T = 1,25$$

$$k_{Pk} = r_2 = 4,3252$$

Pomocí vztahů uvedených v tab. 5 byly vypočítány parametry PSD regulátoru pomocí metody kritického zesílení regulátoru (Ziegler-Nichols).

$$k_P = 0,6 k_{Pk} \frac{T}{T_k} = 0,6 \cdot 4,3252 \cdot \frac{0,625}{1,25} = 1,414$$

$$\frac{T}{T_i} = \frac{1}{k_P} 1,2 k_{Pk} \frac{T}{T_k} = \frac{1}{1,4144} 1,2 \cdot 4,3252 \cdot \frac{0,625}{1,25} = 1,9514$$

$$\frac{T_D}{T} = \frac{1}{k_P} k_{Pk} \frac{3T_k}{40T} = \frac{1}{1,414} \cdot 4,3252 \cdot \frac{3 \cdot 1,25}{40 \cdot 0,625} = 0,4896$$

Pro určení koeficientů q_0 , q_1 a q_2 byly použity vztahy pro zpětná-ZOBD transformace.

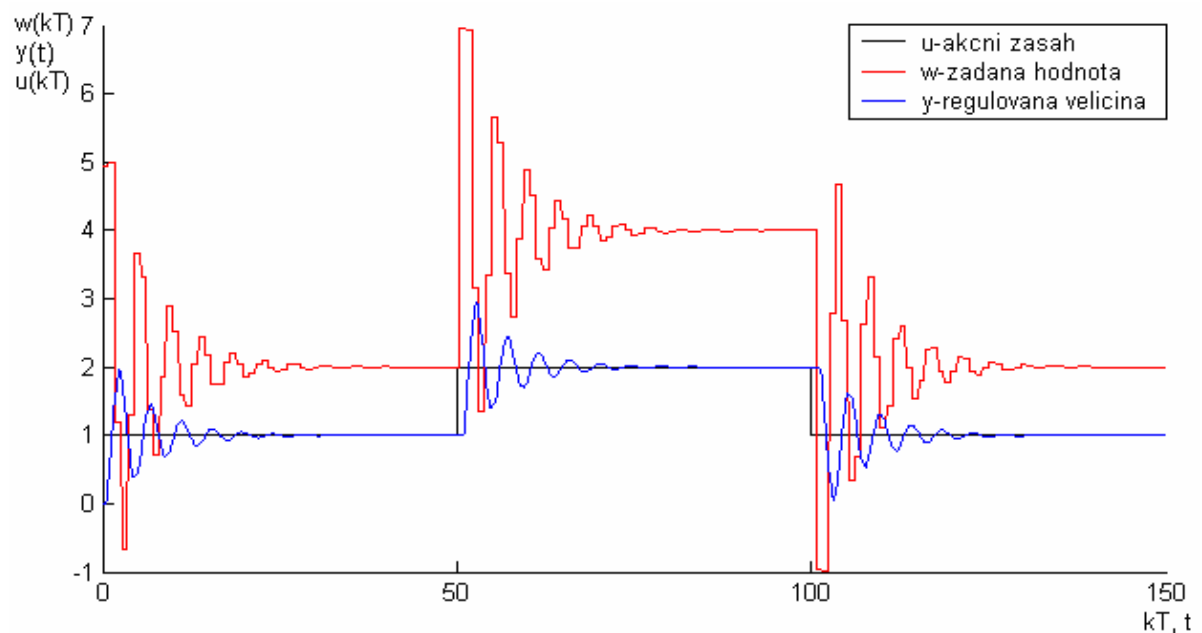
$$q_0 = k_p \cdot \left(1 + \frac{T_D}{T} + \frac{T}{T_I}\right) = 1,414 \cdot (1 + 0,4896 + 1,9514) = 4,9491$$

$$q_1 = -k_p \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{T_D}{T}\right) = -1,414 \cdot (1 + 2 \cdot 0,4896) = -2,8280$$

$$q_2 = k_p \cdot \frac{T_D}{T} = 1,414 \cdot 0,4896 = 0,6923$$

Přenos regulátoru $G_R(z)$:

$$G_R(z) = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} = \frac{4,9491 - 2,8280 z^{-1} + 0,6923 z^{-2}}{1 - z^{-1}}$$



Obr. 18 Průběh regulace pro PSD regulátor nastavený metodou kritického zesílení regulátoru (Ziegler-Nichols) pro regulovanou soustavu č.2

Výpočet PS regulátoru pro regulovanou soustavu č.3

$$G_s(s) = \frac{2}{6s + 1}$$

Perioda vzorkování byla určena z rovnice:

$$T \approx \left(\frac{1}{4} \div \frac{1}{2}\right) \sum_i \tau_i = \frac{6}{3} = 2$$

Zadané soustavě a vypočítané periodě vzorkování odpovídá Z-přenos:

$$G_s(z) = \frac{b_1 z^{-1}}{1 - a_1 z^{-1}} = \frac{0,5669 z^{-1}}{1 - 0,7165 z^{-1}}$$

Byla určena hodnota kritického zesílení k_{pk} a kritická perioda T_k

$$k_{pk} = \frac{1 - a_1}{b_1} = \frac{1 + 0,7165}{0,5669} = 3,0277$$

$$T_k = 2T = 2 \cdot 2 = 4$$

Podle tab. 5 byly nastaveny parametry PSD regulátoru pomocí metody kritického zesílení regulátoru (Ziegler-Nichols).

$$k_p = 0,45k_{pk} \frac{T}{T_k} = 0,45 \cdot 3,0277 \frac{2}{4} = 0,6812$$

$$\frac{T}{T_i} = \frac{1}{k_p} 0,54k_{pk} \frac{T}{T_k} = \frac{1}{0,6812} 0,54 \cdot 3,0277 \frac{2}{4} = 1,2$$

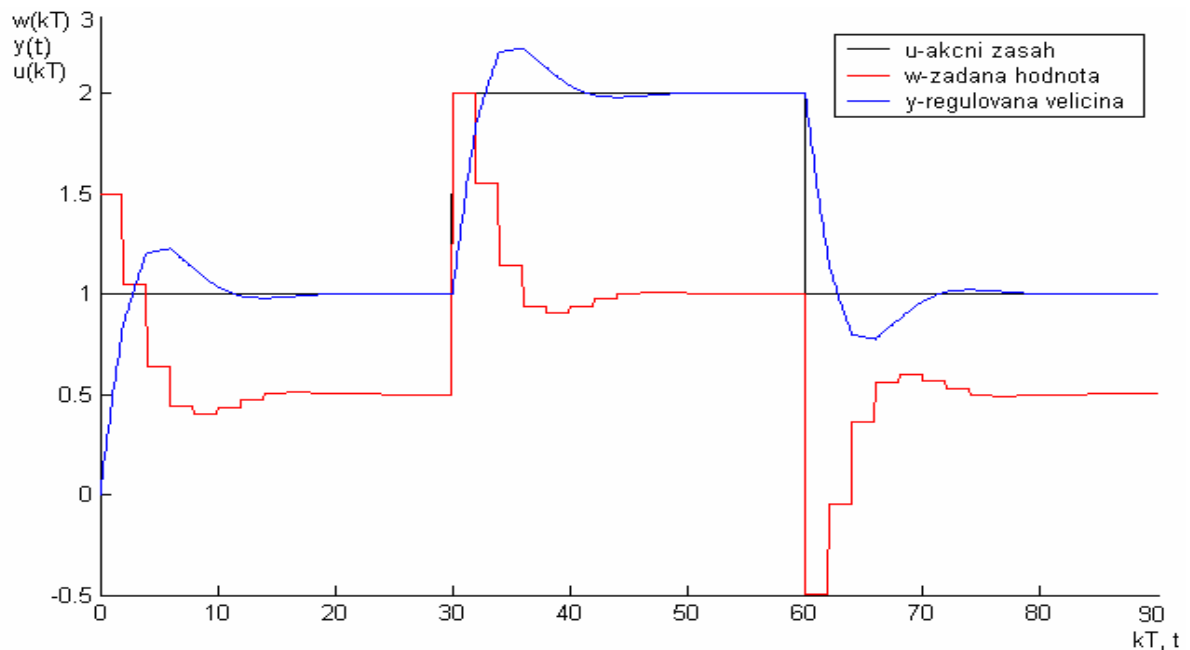
Pro určení koeficientů q_0 a q_1 byly použity vztahy pro zpětnou obdélníkovou metodu

$$q_0 = k_p \left(1 + \frac{T}{T_i} \right) = 0,6812 \cdot (1 + 1,2) = 1,4987$$

$$q_1 = -k_p = -0,6812$$

Přenos regulátoru $G_R(z)$:

$$G_R(z) = \frac{q_0 + q_1 z^{-1}}{1 - z^{-1}} = \frac{1,4987 - 0,6812 z^{-1}}{1 - z^{-1}}$$



Obr. 19 Průběh regulace pro PS regulátor nastavený metodou kritického zesílení regulátoru (Ziegler-Nichols) pro regulovanou soustavu č.3

Výpočet PS regulátoru pro regulovanou soustavu č.4

$$G_s(s) = \frac{2}{6s+1} e^{-2s}$$

Perioda vzorkování byla určena z rovnice:

$$T \approx \left(\frac{1}{4} \div \frac{1}{2} \right) \sum_i \tau_i = \frac{6}{3} = 2$$

Byla provedena aproximace dopravního zpoždění pomocí Taylora ve jmenovateli

$$G_s(s) = \frac{2}{6s+1} e^{-2s} = \frac{2}{6s+1} \cdot \frac{1}{2s+1} = \frac{2}{12s^2 + 8s + 1}$$

Zadané soustavě a vypočítané periodě vzorkování odpovídá Z-přenos:

$$G_s(z) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} = \frac{2,6194z^{-1} + 1,6810z^{-2}}{1 - 1,0844z^{-1} + 0,2636z^{-2}}$$

Byla určena hodnota kritického zesílení k_{Pk} a kritická perioda T_k

$$r_1 = \frac{1 - a_2}{b_2} = \frac{1 - 2636}{1,6810} = 0,4381$$

$$r_2 = \frac{a_1 - a_2 - 1}{b_2 - b_1} = \frac{-1,0844 - 0,2636 - 1}{1,6810 - 2,6194} = 2,5022$$

$$b = b_1 \cdot r_1 + a_1 = 2,6194 \cdot 0,4381 - 1,0844 = 0,0631$$

$$c = b_2 \cdot r_1 + a_2 = 1,6810 \cdot 0,4381 + 0,2636 = 1$$

$$d = b^2 - 4c = 0,0631^2 - 4 \cdot 1 = -3,9960$$

Pro výpočet T_k a k_{Pk} byly použity následující vztahy, protože $d < 0$.

$$\varpi_k = \frac{1}{T} \arccos\left(-\frac{b}{2}\right) = \frac{1}{2} \arccos\left(-\frac{0,0631}{2}\right) = 0,8012$$

$$T_k = \frac{2\pi}{\varpi_k} = \frac{2\pi}{0,8012} = 7,8426$$

$$k_{Pk} = r_1 = 0,4381$$

Podle tab. 5 byly nastaveny parametry PSD regulátoru pomocí metody kritického zesílení regulátoru (Ziegler-Nichols).

$$k_P = 0,45k_{PK} \frac{T}{T_k} = 0,45 \cdot 0,4381 \frac{2}{7,8426} = 0,0503$$

$$\frac{T}{T_I} = \frac{1}{k_P} 0,54k_{PK} \frac{T}{T_k} = \frac{1}{0,4381} 0,54 \cdot 0,4381 \frac{2}{7,8426} = 1,2$$

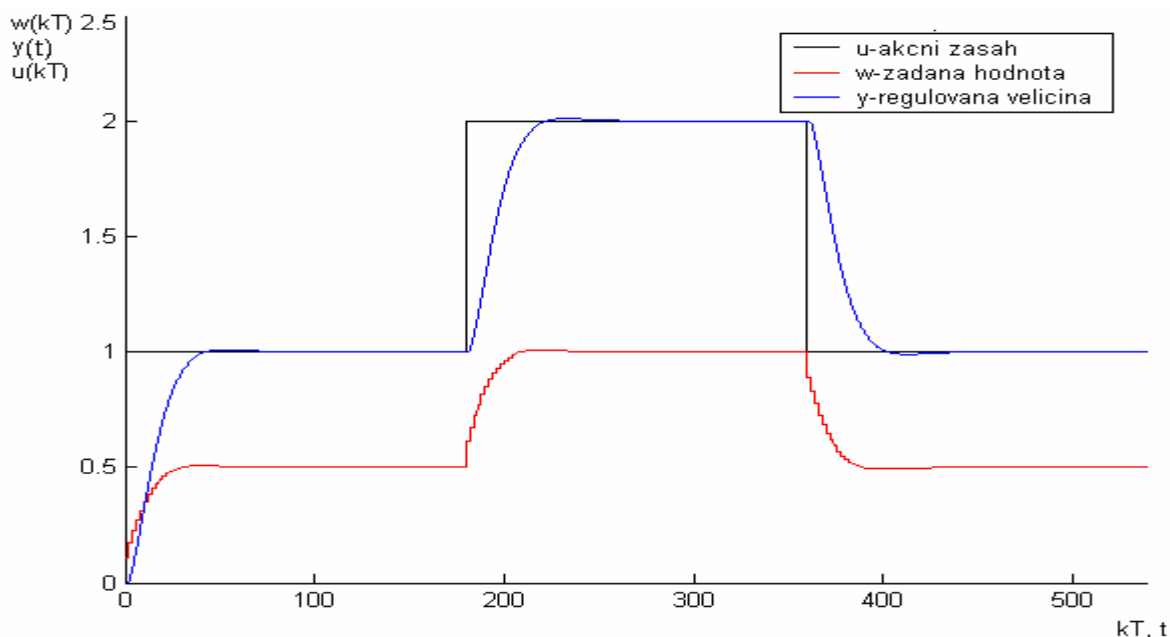
Pro určení koeficientů q_0 a q_1 byly použity vztahy pro zpětnou obdélníkovou metodu

$$q_0 = k_P \left(1 + \frac{T}{T_I} \right) = 0,0503 \cdot (1 + 1,2) = 0,1106$$

$$q_1 = -k_P = -0,0503$$

Přenos regulátoru $G_R(z)$:

$$G_R(z) = \frac{q_0 + q_1 z^{-1}}{1 - z^{-1}} = \frac{0,1106 - 0,0503 z^{-1}}{1 - z^{-1}}$$



Obr. 20 Průběh regulace pro PS regulátor nastavený metodou kritického zesílení regulátoru (Ziegler-Nichols) pro regulovanou soustavu č.4

5.1.3 Metoda požadovaného modelu (Inverze dynamiky)

Výpočet PSD regulátoru pro regulovanou soustavu č.1

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

Perioda vzorkování byla určena z rovnice:

$$T = \left(\frac{1}{6} \div \frac{1}{15} \right) T_{95} = \left(\frac{1}{6} \div \frac{1}{15} \right) \cdot 3 = \frac{3}{6} = 0,5$$

Časová konstanta T_w byla určena následujícím způsobem

$$T_w \geq \text{round} \left(\frac{0,5}{0,286} \right)$$

$$2 \geq \text{round} \left(\frac{0,5}{0,286} \right)$$

Pomocné vztahy pro výpočet stavitelných parametrů regulátoru.

$$c_1 = e^{-\frac{T}{T_1}} = e^{-\frac{0,5}{0,25}} = 0,1353$$

$$c_2 = e^{-\frac{T}{T_2}} = e^{-\frac{0,5}{1}} = 0,6065$$

$$c_w = e^{-\frac{T}{T_w}} = e^{-\frac{0,5}{2}} = 0,7788$$

V tab. 7 v sudém řádku byly nalezeny vztahy pro určení přesnějších stavitelných parametrů regulátoru.

$$T_1 = \frac{c_1 + c_2 - 2c_1c_2}{1 - c_1 - c_2 + c_1c_2} \cdot T = \frac{0,1353 + 0,6065 - 2 \cdot 0,1353 \cdot 0,6065}{1 - 0,1353 - 0,6065 + 0,1353 \cdot 0,6065} \cdot 0,5 = 0,8490$$

$$k_P = \frac{(1 - c_w)T_1}{kT} = \frac{(1 - 0,7788) \cdot 0,8490}{2 \cdot 0,5} = 0,1878$$

$$T_D = \frac{c_1c_2}{c_1 + c_2 - 2c_1c_2} \cdot T = \frac{0,1353 \cdot 0,6065}{0,1353 + 0,6065 - 2 \cdot 0,1353 \cdot 0,6065} \cdot 0,5 = 0,0710$$

Pro určení koeficientů q_0 , q_1 a q_2 byly použity vztahy pro zpětnou obdélníkovou metodu

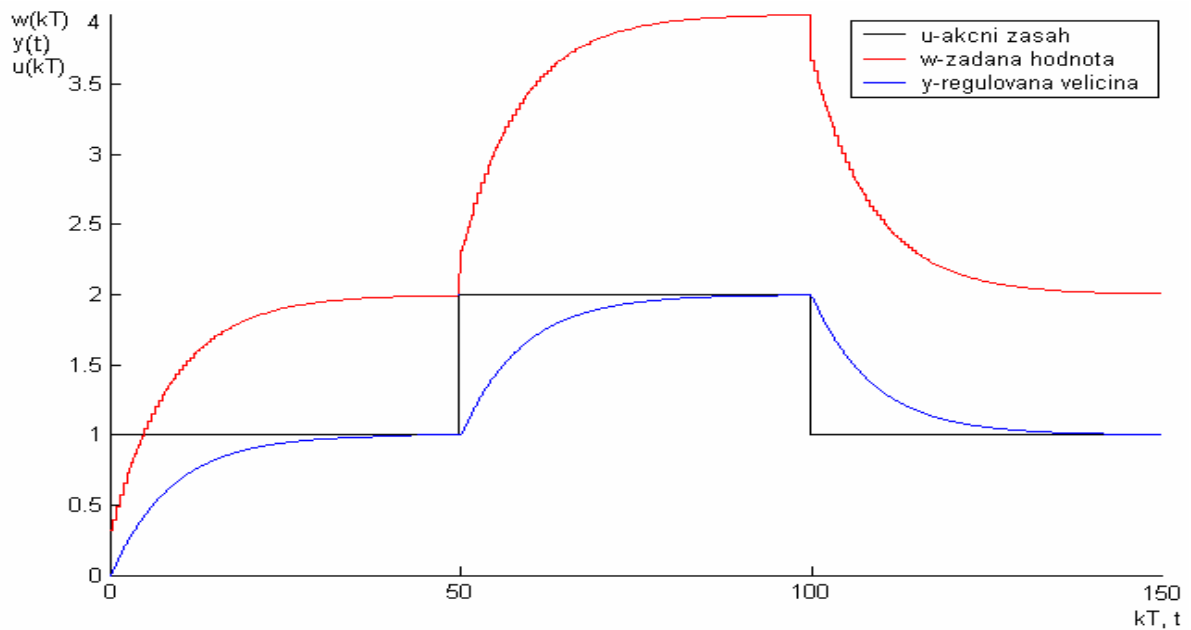
$$q_0 = k_P \left(1 + \frac{T_D}{T} + \frac{T}{T_1} \right) = 0,1878 \cdot \left(1 + \frac{0,0710}{0,5} + \frac{0,5}{0,8490} \right) = 0,3251$$

$$q_1 = -k_P \left(1 + 2 \frac{T_D}{T} \right) = -0,1878 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{0,0710}{0,5} \right) = -0,2412$$

$$q_2 = k_P \frac{T_D}{T} = 0,1878 \cdot \frac{0,0710}{0,5} = 0,0267$$

Přenos regulátoru $G_R(z)$:

$$G_R(z) = \frac{q_0 + q_1z^{-1} + q_2z^{-2}}{1 - z^{-1}} = \frac{0,3251 - 0,2412z^{-1} + 0,0267z^{-2}}{1 - z^{-1}}$$



Obr. 21 Průběh regulace pro PSD regulátor nastavený metodou požadovaného modelu (Inverze dynamiky) pro regulovanou soustavu č.1

Výpočet PSD regulátoru pro soustavu č.2

$$G_S(s) = \frac{2}{s^2 + 5s + 4} e^{-0,5s}$$

Perioda vzorkování byla určena z rovnice:

$$T \approx \left(\frac{1}{4} \div \frac{1}{2} \right) \sum_i \tau_i = \frac{1,25}{2} = 0,625$$

Relativní překmit $\kappa=0$, proto $\alpha=1,282$ $\beta=2,718$. Zesílení otevřeného regulačního obvodu bylo určeno ze vztahu.

$$a = \frac{1}{\alpha T + \beta L} = \frac{1}{1,282 \cdot 0,625 + 2,718 \cdot 0,5} = 0,4629$$

V tab. 7 v sudém řádku byly nalezeny vztahy pro určení přesnějších stavitelných parametrů regulátoru.

$$k_P = \frac{aT_1}{k_S} = \frac{0,4629 \cdot 0,625}{0,5} = 0,0578$$

$$T_I = T_1 - \frac{T}{2} = 1 - \frac{0,625}{2} = 0,6250$$

$$T_D = \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2} - \frac{T}{4} = \frac{1 \cdot 0,25}{1 + 0,25} - \frac{0,625}{4} = 0,0438$$

Pro určení koeficientů q_0 , q_1 a q_2 byly použity vztahy pro zpětnou obdélníkovou metodu

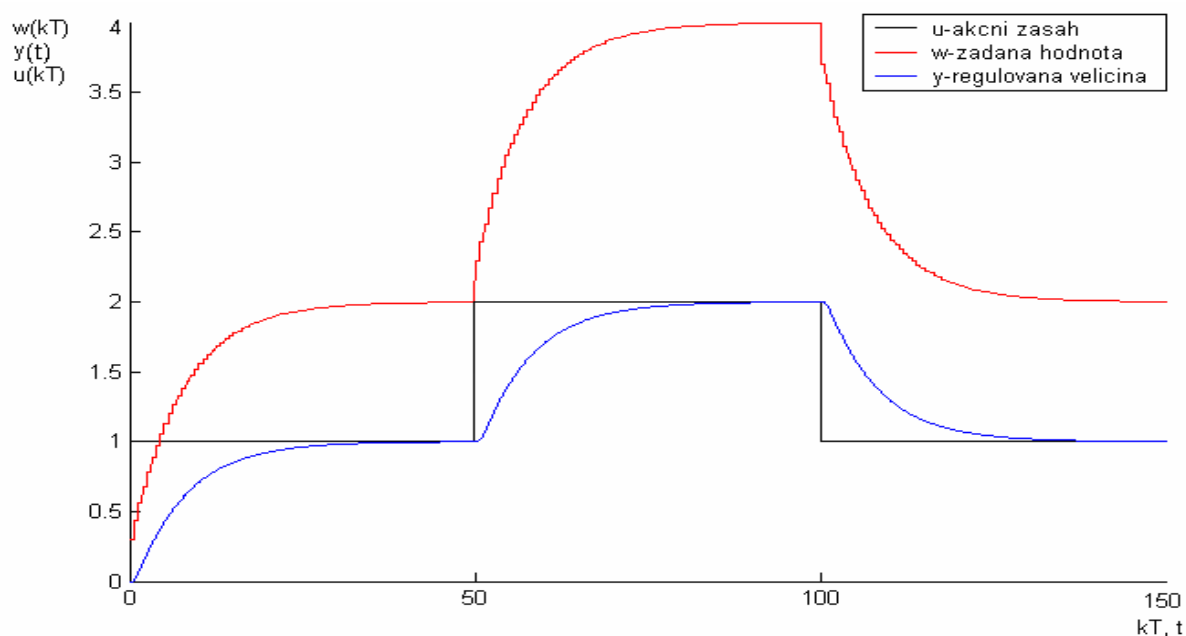
$$q_0 = k_P \left(1 + \frac{T_D}{T} + \frac{T}{T_I} \right) = 0,0578 \cdot \left(1 + \frac{0,0438}{0,625} + \frac{0,625}{0,6250} \right) = 0,2944$$

$$q_1 = -k_P \left(1 + 2 \frac{T_D}{T} \right) = -0,0578 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{0,0438}{0,625} \right) = -0,1649$$

$$q_2 = k_P \frac{T_D}{T} = 0,0578 \cdot \frac{0,0438}{0,625} = 0,0101$$

Přenos regulátoru $G_R(z)$:

$$G_R(z) = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} = \frac{0,2944 - 0,1649 z^{-1} + 0,0101 z^{-2}}{1 - z^{-1}}$$



Obr. 22 Průběh regulace pro PSD regulátor nastavený metodou požadovaného modelu (Inverze dynamiky) pro regulovanou soustavu č.2

Výpočet PS regulátoru pro regulovanou soustavu č.3

$$G_S(s) = \frac{2}{6s+1}$$

Perioda vzorkování byla určena z rovnice:

$$T \approx \left(\frac{1}{4} \div \frac{1}{2} \right) \sum_i \tau_i = \frac{6}{3} = 2$$

Časová konstanta T_w byla určena následujícím způsobem

$$T_w \geq \text{round}\left(\frac{T}{0,286}\right)$$

$$7 \geq \text{round}\left(\frac{2}{0,286}\right)$$

V tab. 7 v sudém řádku byly nalezeny vztahy pro určení přesnějších stavitelných parametrů regulátoru.

$$T_I = T_1 - \frac{T}{2} = 6 - \frac{2}{2} = 5$$

$$k_P = \frac{2T_I}{k_S(2T_w + T)} = \frac{2 \cdot 5}{2(2 \cdot 7 + 2)} = 0,3125$$

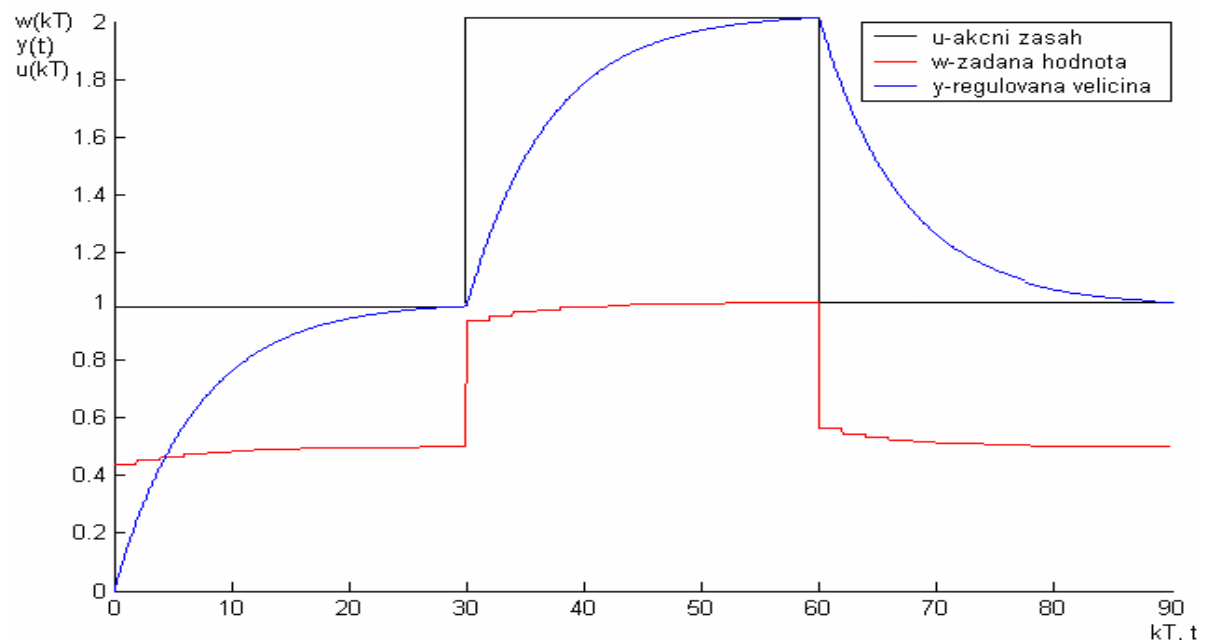
Pro určení koeficientů q_0 , q_1 a q_2 byly použity vztahy pro zpětnou obdélníkovou metodu

$$q_0 = k_P \left(1 + \frac{T}{T_I}\right) = 0,3571 \cdot \left(1 + \frac{1}{2,5}\right) = 0,5$$

$$q_1 = -k_P = -0,3571$$

Přenos regulátoru $G_R(z)$:

$$G_R(z) = \frac{q_0 + q_1 z^{-1}}{1 - z^{-1}} = \frac{0,5 - 0,3571 z^{-1}}{1 - z^{-1}}$$



Obr. 23 Průběh regulace pro PS regulátor nastavený metodou požadovaného modelu (Inverze dynamiky) pro regulovanou soustavu č.3

Výpočet PS regulátoru pro regulovanou soustavu č.4

$$G_S(s) = \frac{2}{6s+1} e^{-2s}$$

Perioda vzorkování byla určena z rovnice:

$$T \approx \left(\frac{1}{4} \div \frac{1}{2} \right) \sum_i \tau_i = \frac{6}{3} = 2$$

Relativní překmit $\kappa=0$, proto $\alpha=1,282$ $\beta=2,718$. Zesílení otevřeného regulačního obvodu bylo určeno ze vztahu.

$$a = \frac{1}{\alpha T + \beta L} = \frac{1}{1,282 \cdot 2 + 2,718 \cdot 2} = 0,1250$$

V tab. 7 v sudém řádku byly nalezeny vztahy pro určení přesnějších stavitelných parametrů regulátoru.

$$T_I = T_1 - \frac{T}{2} = 6 - \frac{2}{2} = 5$$

$$k_P = \frac{a T_I}{k_S} = \frac{0,125 \cdot 5}{2} = 0,3125$$

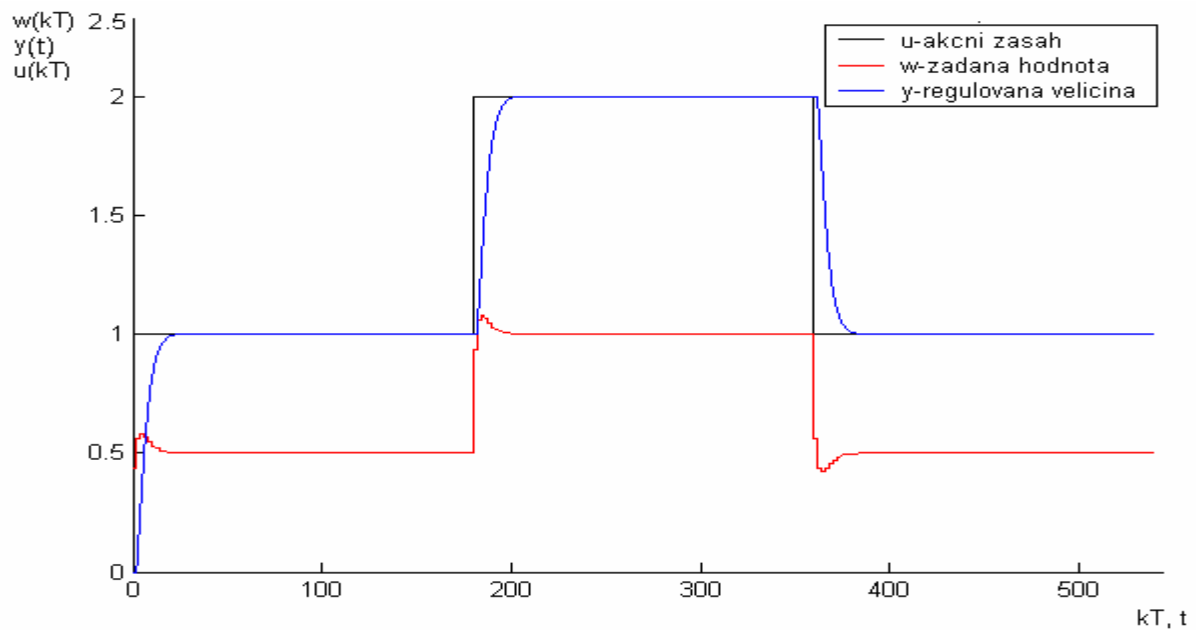
Pro určení koeficientů q_0 , q_1 a q_2 byly použity vztahy pro zpětnou obdélníkovou metodu

$$q_0 = k_P \left(1 + \frac{T}{T_I} \right) = 0,3125 \cdot \left(1 + \frac{2}{5} \right) = 0,4375$$

$$q_1 = -k_P = -0,3125$$

Přenos regulátoru $G_R(z)$:

$$G_R(z) = \frac{q_0 + q_1 z^{-1}}{1 - z^{-1}} = \frac{0,4375 - 0,3125 z^{-1}}{1 - z^{-1}}$$



Obr. 24 Průběh regulace pro PS regulátor nastavený metodou požadovaného modelu (Inverze dynamiky) pro regulovanou soustavu č.4

5.1.4 Metoda konečný počet kroků bez omezení počáteční hodnoty akční veličiny

Výpočet regulátoru pro regulovanou soustavu č.1

$$G_s(s) = \frac{2}{s^2 + 5s + 4}$$

Perioda vzorkování byla určena z rovnice:

$$T = \left(\frac{1}{6} \div \frac{1}{15} \right) T_{95} = \left(\frac{1}{6} \div \frac{1}{15} \right) \cdot 3 = \frac{3}{6} = 0,5$$

Zadané soustavě a vypočítané periodě vzorkování odpovídá Z přenos:

$$G_s(z) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} = \frac{0,1182z^{-1} + 0,0519z^{-2}}{1 - 0,7419z^{-1} + 0,0821z^{-2}}$$

Výpočet parametrů regulátoru:

$$q_0 = \frac{1}{\sum_{i=1}^{k_{\min}} b_i} = \frac{1}{0,1182 + 0,0519} = 5,8786$$

$$q_1 = q_0 \cdot a_1 = 5,8786 \cdot (-0,7419) = -4,3611$$

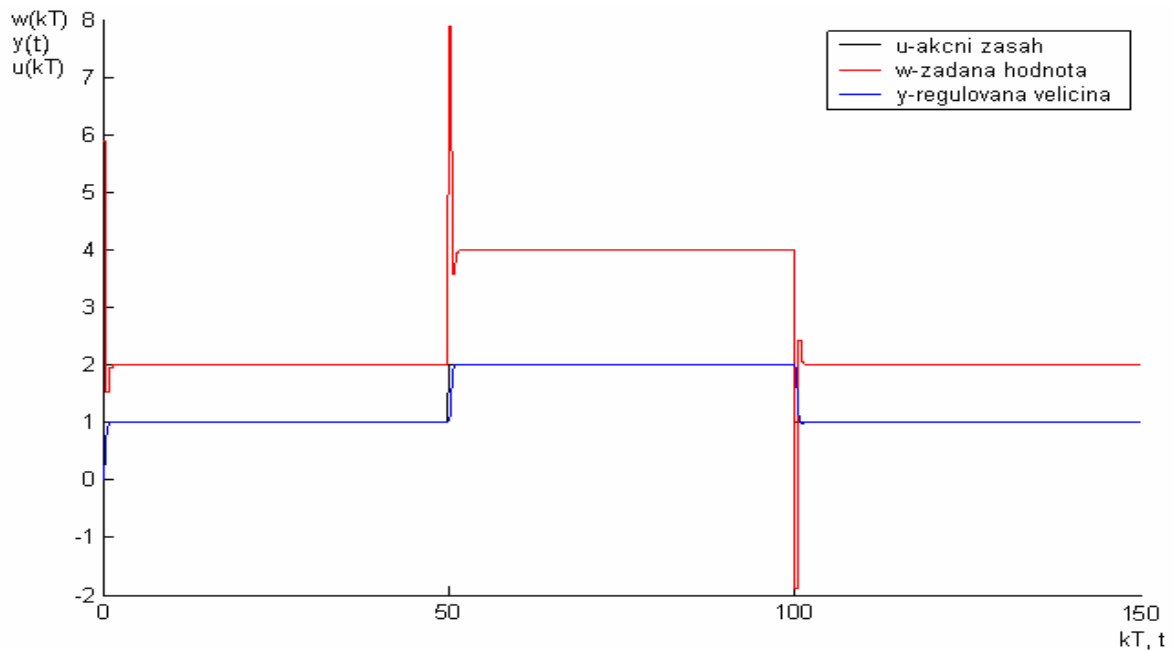
$$q_2 = q_0 \cdot a_2 = 5,8786 \cdot 0,0821 = 0,4825$$

$$p_1 = b_1 \cdot q_0 = 0,1182 \cdot 5,8786 = 0,6949$$

$$p_2 = b_2 \cdot q_0 = 0,0519 \cdot 5,8786 = 0,3051$$

Přenos regulátoru $G_R(z)$:

$$G_R(z) = \frac{5,8786 - 4,3611z^{-1} + 0,4825z^{-2}}{1 - 0,6949z^{-1} - 0,3051z^{-2}}$$



Obr. 25 Průběh regulace pro regulátor nastavený metodou konečný počet kroků bez omezení počáteční hodnoty akční veličiny pro regulovanou soustavu č.1

Výpočet regulátoru pro regulovanou soustavu č.2

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

Perioda vzorkování byla určena z rovnice:

$$T \approx \left(\frac{1}{4} \div \frac{1}{2} \right) \sum_i \tau_i = \frac{1,25}{2} = 0,625$$

Byla provedena aproximace dopravního zpoždění pomocí Taylora v čitateli

$$G_s(s) = \frac{2}{s^2 + 5s + 4} e^{-0,5s} = \frac{2}{6s + 1} \cdot (0,5s + 1) = \frac{s + 2}{s^2 + 5s + 4}$$

Zadané soustavě a vypočítané periodě vzorkování odpovídá Z přenos:

$$G_s(z) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3}} = \frac{0,05914z^{-1} + 0,08636z^{-2} + 0,006685z^{-3}}{1 - 0,9039z^{-1} + 0,2208z^{-2} - 0,01259z^{-3}}$$

Výpočet parametrů regulátoru:

$$q_0 = \frac{1}{\sum_{i=1}^{k_{\min}} b_i} = \frac{1}{0,05914 + 0,08636 + 0,006685} = 6,5709$$

$$q_1 = q_0 \cdot a_1 = 6,5709 \cdot (-0,9039) = -5,9032$$

$$q_2 = q_0 \cdot a_2 = 6,5709 \cdot 0,2208 = 1,4509$$

$$q_3 = q_0 \cdot a_3 = 6,5709 \cdot (-0,01259) = -0,0827$$

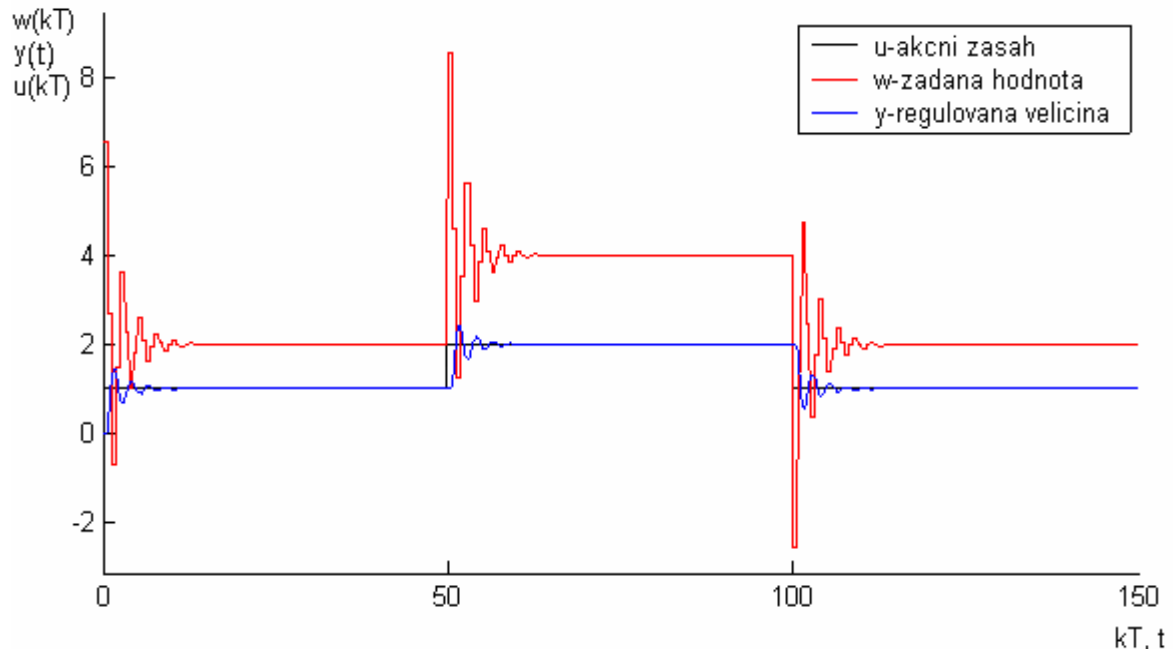
$$p_1 = b_1 \cdot q_0 = 0,05914 \cdot 6,5709 = 0,3886$$

$$p_2 = b_2 \cdot q_0 = 0,08636 \cdot 6,5709 = 0,5675$$

$$p_3 = b_3 \cdot q_0 = 0,006685 \cdot 6,5709 = 0,0439$$

Přenos regulátoru $G_R(z)$:

$$G_R(z) = \frac{6,5709 - 5,9032z^{-1} + 1,4509z^{-2} - 0,0827z^{-2}}{1 - 0,3886z^{-1} - 0,5675z^{-2} - 0,0439z^{-2}}$$



Obr. 26 Průběh regulace pro regulátor nastavený metodou konečný počet kroků bez omezení počáteční hodnoty akční veličiny pro regulovanou soustavu č.2

Výpočet PSD regulátoru pro regulovanou soustavu č.3

$$G_s(s) = \frac{2}{6s + 1}$$

Perioda vzorkování byla určena z rovnice:

$$T \approx \left(\frac{1}{4} \div \frac{1}{2} \right) \sum_i \tau_i = \frac{6}{3} = 2$$

Zadané soustavě a vypočítané periodě vzorkování odpovídá Z-přenos:

$$G_s(z) = \frac{b_1 z^{-1}}{1 - a_1 z^{-1}} = \frac{0,5669 z^{-1}}{1 - 0,7165 z^{-1}}$$

Výpočet parametrů regulátoru:

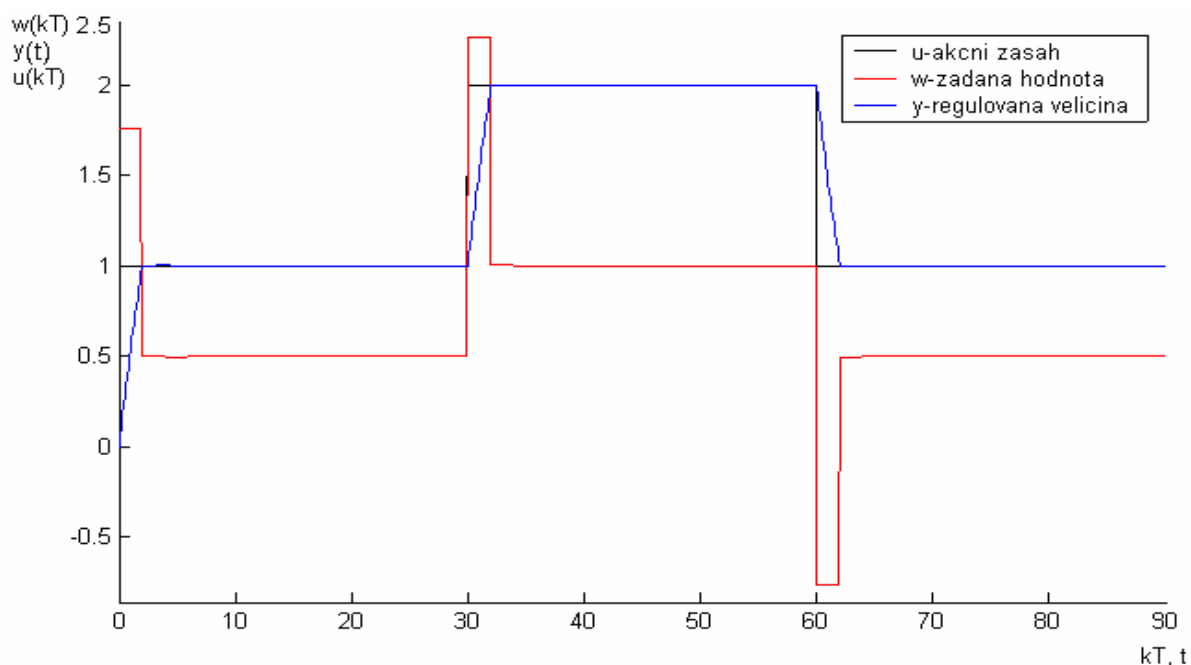
$$q_0 = \frac{1}{\sum_{i=1}^{k_{\min}} b_i} = \frac{1}{0,56669} = 1,7639$$

$$q_1 = q_0 \cdot a_1 = 1,7639 \cdot (-0,7165) = -1,2639$$

$$p_1 = b_1 \cdot q_0 = 0,5669 \cdot 1,7639 = 1$$

Přenos regulátoru $G_R(z)$:

$$G_R(z) = \frac{1,7639 - 1,2639z^{-1}}{1 - z^{-1}}$$



Obr. 27 Průběh regulace pro regulátor nastavený metodou konečný počet kroků bez omezení počáteční hodnoty akční veličiny pro regulovanou soustavu č.3

Výpočet PSD regulátoru pro regulovanou soustavu č.4

$$G_s(s) = \frac{2}{6s+1} e^{-2s}$$

Perioda vzorkování byla určena z rovnice:

$$T \approx \left(\frac{1}{4} \div \frac{1}{2} \right) \sum_i \tau_i = \frac{6}{3} = 2$$

Byla provedena aproximace dopravního zpoždění pomocí Taylora ve jmenovateli

$$G_s(s) = \frac{2}{6s+1} e^{-2s} = \frac{2}{6s+1} \cdot \frac{1}{2s+1} = \frac{2}{12s^2 + 8s + 1}$$

Provedli jsme aproximaci dopravního zpoždění pomocí Taylora ve jmenovateli

$$G_s(s) = \frac{2}{6s+1} e^{-2s} = \frac{2}{6s+1} \cdot \frac{1}{2s+1} = \frac{2}{12s^2 + 8s + 1}$$

Zadané soustavě a vypočítané periodě vzorkování odpovídá Z-přenos:

$$G_s(z) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} = \frac{2,6194 z^{-1} + 1,6810 z^{-2}}{1 - 1,0844 z^{-1} + 0,2636 z^{-2}}$$

Výpočet parametrů regulátoru:

$$q_0 = \frac{1}{\sum_{i=1}^{k_{\min}} b_i} = \frac{1}{0,2194 + 1,6810} = 0,2325$$

$$q_1 = q_0 \cdot a_1 = 0,2325 \cdot (-1,0844) = -0,2522$$

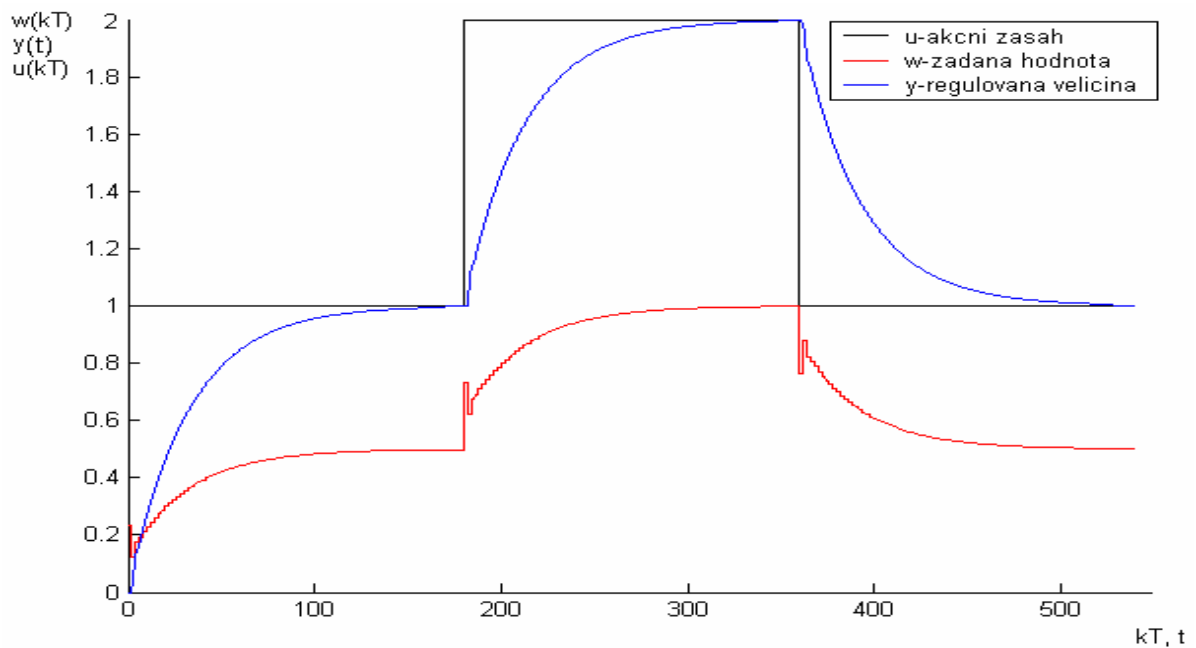
$$q_2 = q_0 \cdot a_2 = 0,2325 \cdot 0,2636 = 0,0613$$

$$p_1 = b_1 \cdot q_0 = 2,6194 \cdot 0,2325 = 0,6091$$

$$p_2 = b_2 \cdot q_0 = 1,6810 \cdot 0,2325 = 0,3909$$

Přenos regulátoru $G_R(z)$:

$$G_R(z) = \frac{0,2325 - 0,2522 z^{-1} + 0,0613 z^{-2}}{1 - 0,6091 z^{-1} - 0,3909 z^{-2}}$$



Obr.k 28 Průběh regulace pro regulátor nastavený metodou konečný počet kroků bez omezení počáteční hodnoty akční veličiny pro regulovanou soustavu č.4

5.1.5 Metoda konečného počtu kroků s omezením počáteční hodnoty akční veličiny

Výpočet regulátoru pro regulovanou soustavu č.1

$$G_s(s) = \frac{2}{s^2 + 5s + 4}$$

Perioda vzorkování byla určena z rovnice:

$$T = \left(\frac{1}{6} \div \frac{1}{15} \right) T_{95} = \left(\frac{1}{6} \div \frac{1}{15} \right) \cdot 3 = \frac{3}{6} = 0,5$$

Zadané soustavě a vypočítané periodě vzorkování odpovídá Z přenos:

$$G_s(z) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} = \frac{0,1182z^{-1} + 0,0519z^{-2}}{1 - 0,7419z^{-1} + 0,0821z^{-2}}$$

Výpočet parametrů regulátoru:

$$q_0 = 0,85 \cdot 5,8786 = 4,9968$$

$$q_1 = (a_1 - 1)q_0 + \frac{1}{\sum b_i} = (-0,7419 - 1) \cdot 4,9968 + \frac{1}{0,1182 + 0,0519} = -2,8225$$

$$q_2 = (a_2 - a_1)q_0 + a_1 \frac{1}{\sum b_i} = (0,0821 + 0,7419) \cdot 4,9968 - 0,7419 \cdot \frac{1}{0,1182 + 0,0519} = -0,2499$$

$$q_3 = a_2(-q_0 + \frac{1}{\sum b_i}) = 0,0821 \cdot (-4,9968 + \frac{1}{0,1182 + 0,0519}) = 0,0724$$

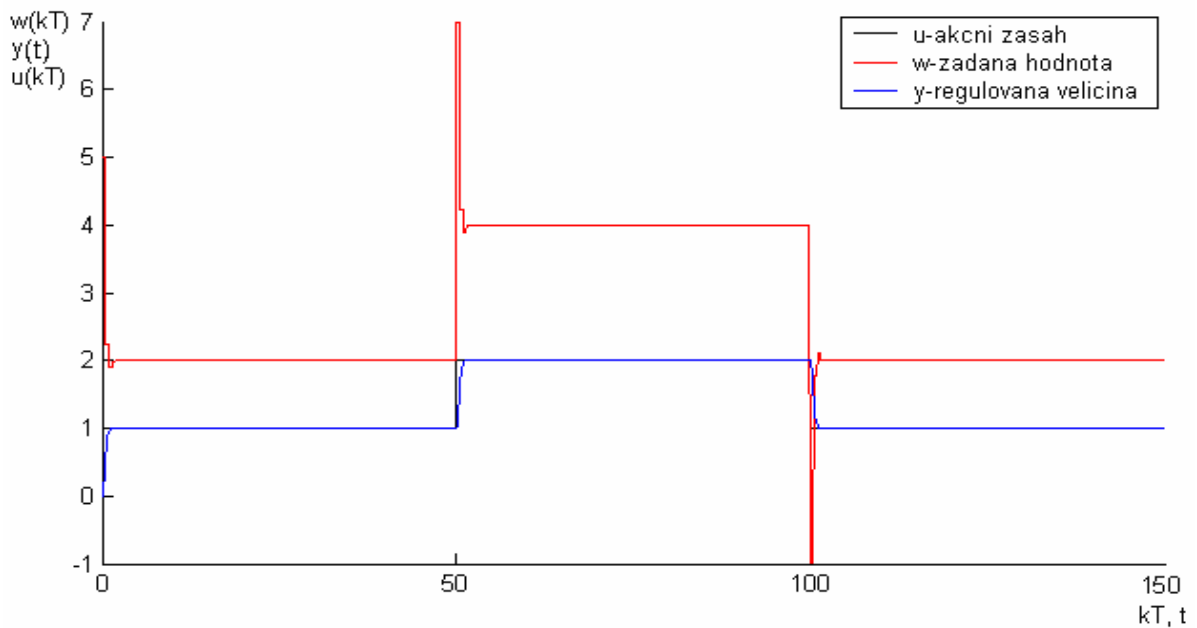
$$p_1 = b_1 \cdot q_0 = 0,1182 \cdot 4,9968 = 0,5906$$

$$p_2 = q_0(b_2 - b_1) + \frac{b_1}{\sum b_i} = 4,9968(0,0519 - 0,1182) + \frac{0,1182}{0,1182 + 0,0519} = 0,3636$$

$$p_3 = -b_2(q_0 - \frac{1}{\sum b_i}) = -0,0519(4,9968 - \frac{1}{0,1182 + 0,0519}) = 0,0458$$

Přenos regulátoru $G_R(z)$:

$$G_R(z) = \frac{4,9968 - 2,8225z^{-1} - 0,2499z^{-2} + 0,0724z^{-3}}{1 - 0,5906z^{-1} - 0,3636z^{-2} - 0,0458z^{-3}}$$



Obr. 29 Průběh regulace pro regulátor nastavený metodou konečný počet kroků s omezením počáteční hodnoty akční veličiny pro regulovanou soustavu č.1

Výpočet regulátoru pro regulovanou soustavu č.2

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

Perioda vzorkování byla určena z rovnice:

$$T \approx \left(\frac{1}{4} \div \frac{1}{2} \right) \sum_i \tau_i = \frac{1,25}{2} = 0,625$$

Byla provedena aproximace dopravního zpoždění pomocí Taylora v čitateli

$$G_s(s) = \frac{2}{s^2 + 5s + 4} e^{-0,5s} = \frac{2}{6s + 1} \cdot (0,5s + 1) = \frac{s + 2}{s^2 + 5s + 4}$$

Zadané soustavě a vypočítané periodě vzorkování odpovídá Z přenos:

$$G_s(z) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3}} = \frac{0,05914z^{-1} + 0,08636z^{-2} + 0,006685z^{-3}}{1 - 0,9039z^{-1} + 0,2208z^{-2} - 0,01259z^{-3}}$$

Výpočet parametrů regulátoru:

$$q_0 = 0,85 \cdot 6,5709 = 5,5853$$

$$q_1 = (a_1 - 1)q_0 + \frac{1}{\sum b_i} = (-0,9039 - 1) \cdot 5,5853 + \frac{1}{0,1522} = -4,0636$$

$$q_2 = (a_2 - a_1)q_0 + a_1 \frac{1}{\sum b_i} = (0,2208 + 0,9039) \cdot 5,5853 - 0,9039 \cdot \frac{1}{0,1522} = 0,3429$$

$$q_3 = (a_3 - a_2)q_0 + a_2 \frac{1}{\sum b_i} = (-0,01259 - 0,2208) \cdot 5,5853 + 0,2208 \cdot \frac{1}{0,1522} = 0,1472$$

$$q_4 = a_3 \left(-q_0 + \frac{1}{\sum b_i} \right) = -0,01259 \cdot \left(-5,5853 + \frac{1}{0,1522} \right) = -0,0124$$

$$p_1 = b_1 \cdot q_0 = 0,05914 \cdot 5,5853 = 0,3303$$

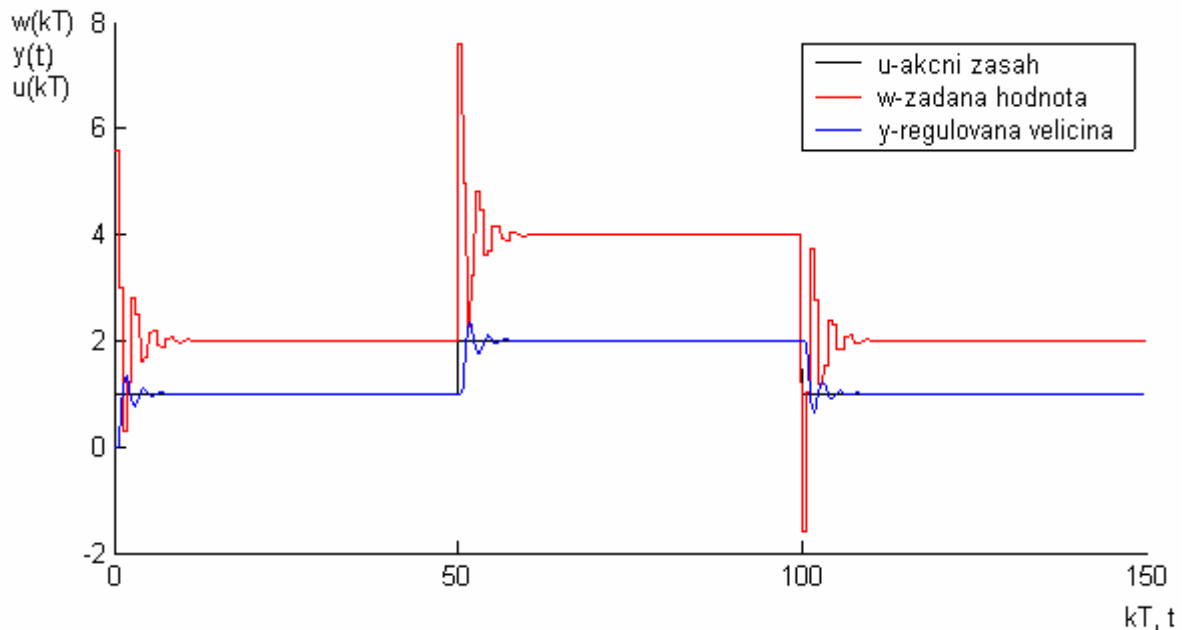
$$p_2 = q_0 (b_2 - b_1) + \frac{b_1}{\sum b_i} = 5,5853(0,08636 - 0,05914) + \frac{0,05914}{0,1522} = 0,5406$$

$$p_3 = q_0 (b_3 - b_2) + \frac{b_2}{\sum b_i} = 5,5853(0,006685 - 0,08636) + \frac{0,08636}{0,1522} = 0,1224$$

$$p_4 = -b_3 \left(q_0 - \frac{1}{\sum b_i} \right) = -0,006685 \left(5,5853 - \frac{1}{0,1522} \right) = 0,0066$$

Přenos regulátoru $G_R(z)$:

$$G_R(z) = \frac{5,5853 - 4,0636z^{-1} + 0,3429z^{-2} + 0,1479z^{-3} - 0,0124z^{-4}}{1 - 0,3303z^{-1} - 0,5406z^{-2} - 0,1224z^{-3} - 0,0066z^{-4}}$$



Obr. 30 Průběh regulace pro regulátor nastavený metodou konečný počet kroků s omezením počáteční hodnoty akční veličiny pro regulovanou soustavu č.2

Výpočet PSD regulátoru pro regulovanou soustavu č.3

$$G_s(s) = \frac{2}{6s+1}$$

Perioda vzorkování byla určena z rovnice:

$$T \approx \left(\frac{1}{4} \div \frac{1}{2} \right) \sum_i \tau_i = \frac{6}{3} = 2$$

Zadané soustavě a vypočítané periodě vzorkování odpovídá Z-přenos:

$$G_s(z) = \frac{b_1 z^{-1}}{1 - a_1 z^{-1}} = \frac{0,5669 z^{-1}}{1 - 0,7165 z^{-1}}$$

$$q_0 = 0,85 \cdot 1,7639 = 1,4943$$

$$q_1 = (a_1 - 1)q_0 + \frac{1}{\sum b_i} = (-0,7165 - 1) \cdot 1,4943 + \frac{1}{0,5669} = -0,8096$$

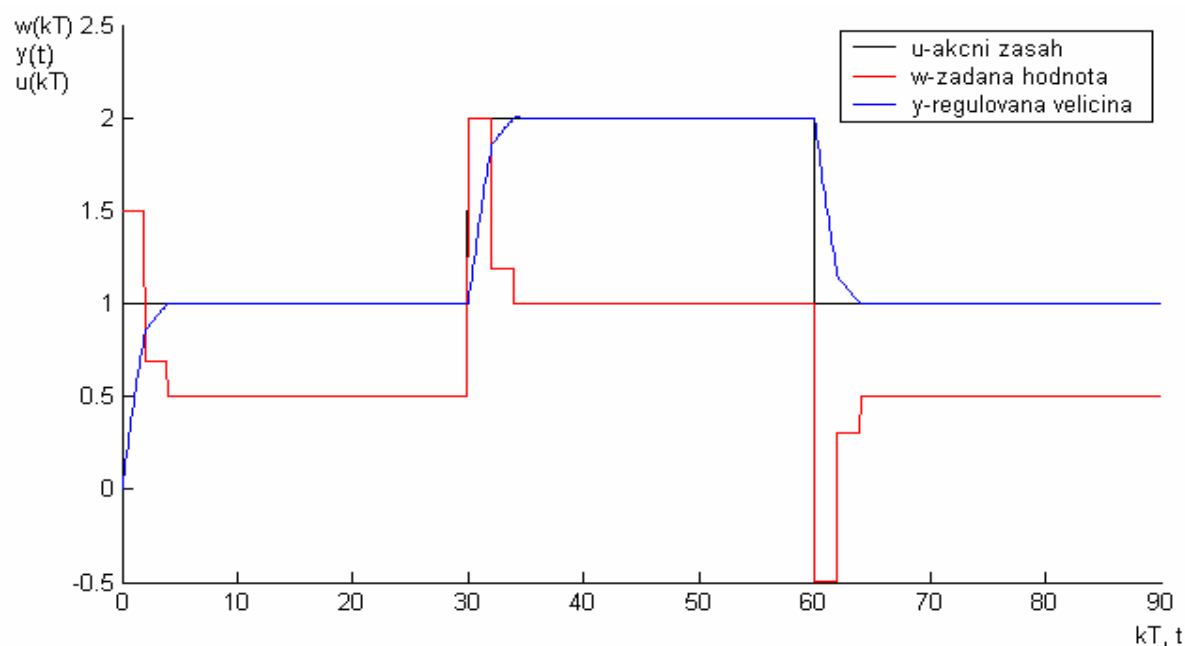
$$q_2 = a_1(-q_0 + \frac{1}{\sum b_i}) = -0,7165 \cdot (-1,4943 + \frac{1}{0,5669}) = -0,1894$$

$$p_1 = b_1 \cdot q_0 = 0,1182 \cdot 1,4943 = 0,8496$$

$$p_3 = -b_1(q_0 - \frac{1}{\sum b_i}) = -0,5669 \cdot (1,4943 - \frac{1}{0,5669}) = 0,15$$

Přenos regulátoru $G_R(z)$:

$$G_R(z) = \frac{1,4993 - 1,8096z^{-1} - 0,1894z^{-2}}{1 - 0,8496z^{-1} - 0,15z^{-2}}$$



Obr. 31 Průběh regulace pro regulátor nastavený metodou konečný počet kroků s omezením počáteční hodnoty akční veličiny pro regulovanou soustavu č.3

Výpočet PSD regulátoru pro regulovanou soustavu č.4

$$G_s(s) = \frac{2}{6s + 1} e^{-2s}$$

Perioda vzorkování byla určena z rovnice:

$$T \approx \left(\frac{1}{4} \div \frac{1}{2} \right) \sum_i \tau_i = \frac{6}{3} = 2$$

Byla provedena aproximace dopravního zpoždění pomocí Taylora ve jmenovateli

$$G_s(s) = \frac{2}{6s+1} e^{-2s} = \frac{2}{6s+1} \cdot \frac{1}{2s+1} = \frac{2}{12s^2 + 8s + 1}$$

Zadané soustavě a vypočítané periodě vzorkování odpovídá Z-přenos:

$$G_s(z) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} = \frac{2,6194z^{-1} + 1,6810z^{-2}}{1 - 1,0844z^{-1} + 0,2636z^{-2}}$$

Výpočet parametrů regulátoru:

$$q_0 = 0,85 \cdot 0,2325 = 0,1976$$

$$q_1 = (a_1 - 1)q_0 + \frac{1}{\sum b_i} = (-1,0844 - 1) \cdot 0,1976 + \frac{1}{2,6194 + 1,681} = -0,1794$$

$$q_2 = (a_2 - a_1)q_0 + a_1 \frac{1}{\sum b_i} = (0,2636 + 1,0844) \cdot 0,1976 - 1,0844 \cdot \frac{1}{2,6194 + 1,681} = -0,0143$$

$$q_3 = a_2 \left(-q_0 + \frac{1}{\sum b_i} \right) = 0,2636 \cdot \left(-0,1976 + \frac{1}{2,6194 + 1,681} \right) = 0,0092$$

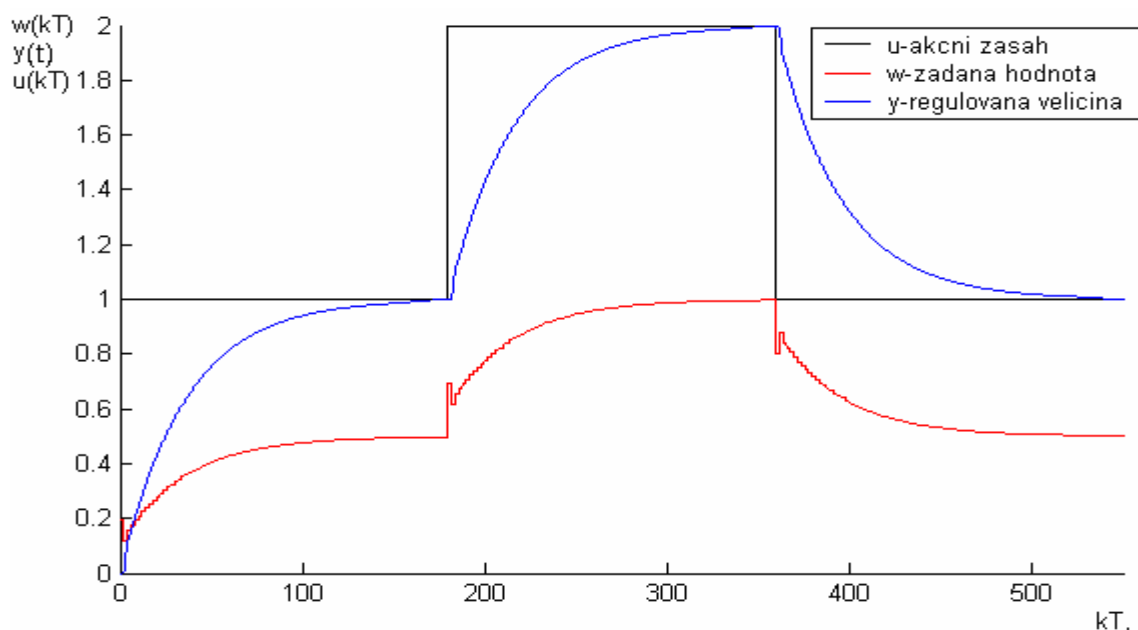
$$p_1 = b_1 \cdot q_0 = 2,6194 \cdot 0,1976 = 0,5176$$

$$p_2 = q_0(b_2 - b_1) + \frac{b_1}{\sum b_i} = 0,1976(1,681 - 2,6194) + \frac{1}{2,6194 + 1,681} = 0,4237$$

$$p_3 = -b_2 \left(q_0 - \frac{1}{\sum b_i} \right) = -1,681 \cdot \left(0,1976 - \frac{1}{2,6194 + 1,681} \right) = 0,0587$$

Přenos regulátoru $G_R(z)$:

$$G_R(z) = \frac{0,1976 - 0,1794z^{-1} + 0,0143z^{-2} + 0,0092z^{-3}}{1 - 0,5176z^{-1} - 0,4237z^{-2} + 0,0587z^{-3}}$$



Obr. 32 Průběh regulace pro regulátor nastavený metodou konečný počet kroků s omezením počáteční hodnoty akční veličiny pro regulovanou soustavu č.4

5.2 Porovnání vybraných metod syntézy podle kvality regulace

Srovnání uvedených diskrétních metod syntézy bylo provedeno metodou kvadratické plochy. Výpočet byl proveden v programu MATLAB/Simulink. 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.

Tab. 9 Srovnání metod syntézy podle kvality regulace pro soustavy druhého řádu

Vybrané metody	Přenos soustavy	
	$G_s(s) = \frac{2}{s^2 + 5s + 4}$	$G_s(s) = \frac{2}{s^2 + 5s + 4} e^{-0,5s}$
	Kvadratická regulační plocha J_K	
Metoda vycházející z přechodové charakteristiky regulované soustavy	1,5829	1,0263
Metoda kritického zesílení regulátoru (Ziegler-Nichols)	2,6734	8,9134
Metoda požadovaného modelu	13,4643	13,8033
Metoda konečný počet kroků bez omezení počáteční hodnoty akční veličiny	0,8963	2,9078
Metoda konečný počet kroků s omezením počáteční hodnoty akční veličiny	1,0109	2,7362

Tab. 10 Srovnání metod syntézy podle kvality regulace pro soustavy prvního řádu

	Přenos soustavy	
	$G_s(s) = \frac{2}{6s+1}$	$G_s(s) = \frac{2}{6s+1} e^{-2s}$
Vybrané metody	Kvadratická regulační plocha J_K	
Metoda vycházející z přechodové charakteristiky regulované soustavy	2,3058	12,3009
Metoda kritického zesílení regulátoru (Ziegler-Nichols)	2,8053	31,8354
Metoda požadovaného modelu	10,4999	14,4983
Metoda konečný počet kroků bez omezení počáteční hodnoty akční veličiny	1,8631	48,9794
Metoda konečný počet kroků s omezením počáteční hodnoty akční veličiny	2,2502	54,4666

Z tab. 9 je vidět, že podle metody kvadratické regulační plochy se jeví jako nejlepší z uvedených metod pro nastavení regulátoru metoda konečný počet kroků pro soustavu(6) a z přechodové charakteristiky pro soustavu(7). Z tab. 10 je vidět, že podle metody kvadratické regulační plochy se jeví jako nejlepší z uvedených metod pro nastavení regulátoru metoda konečný počet kroků pro soustavu(8) a z přechodové charakteristiky pro soustavu(9).

Poznámka:

Na kvalitu regulace má vliv mnoho aspektů mezi něž patří volba vzorkovací periody. Při simulaci je použita stejná perioda vzorkování pro jednotlivé soustavy. K porovnání regulátorů jsme stanovili metodu kvadratické regulační plochy J_K . Kvalitu regulačního pochodu můžeme posuzovat i z jiných hledisek např. regulační pochod bez překmitů, co nejrychlejší ustálení průběhu regulace na žádané hodnotě.

5.3 Zhodnocení použitých metod syntézy při návrhu parametrů regulátorů

Metoda nastavení regulátoru metodou vycházející z přechodové charakteristiky regulované soustavy

- pomocí této metody můžeme navrhnout spojitý i diskrétní regulátor
- tuto metodu lze použít k nastavení regulátoru jak pro soustavy bez dopravního zpoždění, tak i pro soustavy s dopravním zpožděním
- dopravní zpoždění u této metody neaproximujeme, protože vycházíme z hodnot určených z přechodové charakteristiky regulované soustavy
- průběh regulace je charakteristický poměrně velkým počátečním překmitem
- při výpočtu parametrů regulátoru vycházíme z hodnot T_u , T_n a k_S , resp. c_S , které určíme z přechodové charakteristiky regulované soustavy

Metoda kritického zesílení regulátoru (Ziegler-Nichols)

- pomocí této metody můžeme navrhnout spojitý i diskrétní regulátor
- tuto metodu lze použít k nastavení regulátoru jak pro soustavy bez dopravního zpoždění, tak i pro soustavy s dopravním zpožděním, kde bylo uvažováno, že toto dopravní zpoždění bude aproximováno jednou z výše uvedených metod viz kapitola 3.2
- průběh regulace je charakteristický poměrně velkým počátečním překmitem
- při výpočtu parametrů regulátoru vycházíme z hodnot k_{PK} a T_k , které lze určit i výpočtem, např. pro soustavu se setrvačností druhého řádu pomocí schématu na obr. 8

Metoda požadovaného modelu (metoda inverze dynamiky)

- pomocí této metody můžeme navrhnout spojitý i diskrétní regulátor
- tuto metodu lze použít k nastavení regulátoru jak pro soustavy bez dopravního zpoždění, tak i pro soustavy s dopravním zpožděním
- dopravní zpoždění u této metody neaproximujeme, vycházíme z tab. 7, kde je určen postup výpočtu
- tato metoda se dá použít jen pro pět typů regulovaných soustav, které jsou uvedeny v tab. 7

- u výpočtu parametrů regulátoru bez dopravního zpoždění má velký vliv na průběh regulace parametr T_w , který ovlivňuje celkovou dobu regulace. Čím menší je T_w tím kratší doba regulace, ale velký akční zásah a naopak
- u výpočtu parametrů regulátoru s dopravním zpožděním má velký vliv na průběh regulace parametr κ : Ovlivňuje dobu regulace (κ se pohybuje v rozmezí 0 - 50%). Čím větší je parametr κ tím kratší doba regulace, ale je velký akční zásah a naopak.

Metoda konečný počet kroků

- pomocí této metody můžeme navrhnout diskrétní regulátor
- tuto metodu lze použít k nastavení regulátoru jak pro soustavy bez dopravního zpoždění, tak i pro soustavy s dopravním zpožděním, kde bylo uvažováno, že toto dopravní zpoždění bude aproximováno jednou z výše uvedených metod viz kapitola 3.2
- výpočet parametrů regulátoru vychází z určeného Z-přenosu spojité regulované soustavy
- při seřízení regulátoru s omezením počáteční hodnoty akční veličiny se zvětší doba regulace ve srovnání s původní hodnotou akční veličiny

Poznámka:

Z výše uvedených popisů jednotlivých metod syntézy, které byly použity při návrhu parametrů regulátorů je možno zkonstatovat, že každá zde uvedená metoda má svůj rozsah využití.

ZÁVĚR

Náplní této bakalářské práce bylo naplnit vybrané základní submoduly a případně upravit již existující základní submoduly, subsystému „Syntéza” informačního systému CAAC. Byly zpracovány podklady pro tvorbu vybraných základních submodulů subsystému „Syntéza” v programu MS WORD a převedeny do prostředí WWW stránek. Součástí této práce bylo také doplnění již existujících základních submodulů, příp. nově vytvořených základních submodulů subsystému „Syntéza” o vytvořené výpočtové programy. Dalším úkolem v této práci poté bylo vytvořit výpočtový program, který by sloužil pro návrh parametrů diskrétních regulátorů. Tento výpočtový program byl vytvořen v programovém prostředí MATLAB/Simulink a dále pak začleněn, včetně vytvořené tzv. informační WWW stránky, do subsystému "Knihovna hotových programů" informačního systému CAAC.

WWW stránky vybraných základních submodulů informačního systému CAAC jsou v současné době zprovozněny na Internetové adrese <http://www.caac.zde.cz>. Tento informační systém by měl soužit jako elektronická podpora k získání informací v oblasti automatického řízení.

Součástí této práce bylo také porovnat vybrané diskrétní metody návrhů regulátorů pro vybrané typy přenosů soustav z hlediska kvality regulace. Přenosy regulované soustavy byly uvažovány jak bez dopravního zpoždění, tak i s dopravním zpožděním. Pro porovnání metod syntézy byla použita metoda kvadratické regulační plochy.

A POPIS PROGRAMU PRO NÁVRH DISKRÉTNÍHO REGULÁTORU

A.1 Obecný popis možností programu

Popisovaný program je začleněn do informačního systému CAAC, konkrétně subsystému „Knihovna hotových programů“. Program byl vytvořen v programovém prostředí MATLAB/Simulink pro simulační ověřování použitých metod syntézy. Program slouží především pro syntézu diskrétního regulačního obvodu. Umožňuje nastavení parametrů regulátoru, vybranou metodou syntézy, pro jeden ze zadaných přenosů regulované soustavy a pro zadanou periodu vzorkování. Po určení parametrů regulátoru je pak možno provést simulaci regulačního obvodu a určit kvalitu regulace, pomocí metody kvadratické regulační plochy. Průběh simulace je možné vytisknout.

V programu je možné navrhnout diskrétní regulátor pro čtyři typy regulovaných soustav:

$$G_s(s) = \frac{b_0}{s} e^{-Ls}$$

$$G_s(s) = \frac{b_0}{a_1s + 1} e^{-Ls}$$

$$G_s(s) = \frac{b_0}{s(a_1s + 1)} e^{-Ls}$$

$$G_s(s) = \frac{b_0}{a_2s^2 + a_1s + 1} e^{-Ls}$$

V programu je možné navrhnout diskrétní regulátor pomocí těchto metod:

- 1) Metoda vycházející z přechodové charakteristiky regulované soustavy
- 2) Metoda kritického zesílení regulátoru (Ziegler-Nichols)
- 3) Takahashiho modifikace PSD algoritmu
- 4) Inverze dynamiky
- 5) Konečný počet kroků

V programu můžeme také zadat vypočítané hodnoty regulátoru do:

- 1) Obecný lineární regulátor

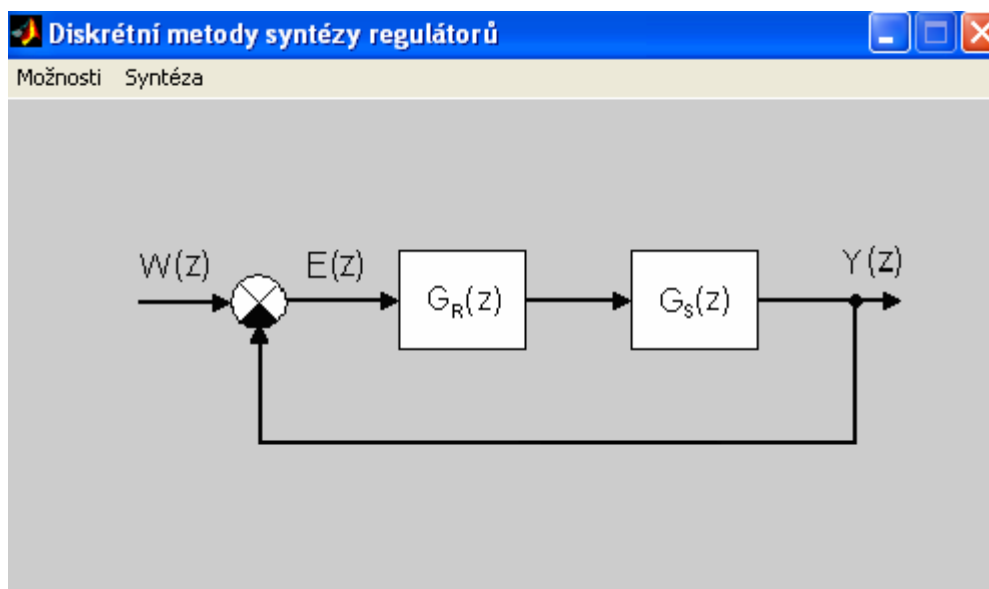
Po výpočtu parametrů regulátoru je možno provést simulaci pro zadaný vektor žádané hodnoty a času. V okně, kde je vykreslen simulační pochod, je zobrazena hodnota kvality regulace.

A.2 Požadavky na spuštění programu

- program byl vytvořen v programu MATLAB verze 6.5.
- po zkopírování adresářů a souborů v jednotlivých podadresářích na pevný disk se program spustí napsáním **synteza** v prostředí MATLABu z adresáře, ve kterém se soubor „synteza.m“ nachází.

A.3 Stručný popis možností jednotlivých položek menu

Po spuštění programu se zobrazí hlavní okno. Zde se nachází dvě menu, konkrétně menu **Možnosti** a **Syntéza**.



Obr. 33 Úvodní okno programu

V menu **Možnosti**:

Zde je volba **Parametry simulace**, po stisknutí se zobrazí následující okno, kde se zadává vektor žádané hodnoty a času. Pomocí těchto vektorů stanovíte průběh žádané hodnoty. Délky vektorů musí mít stejnou délku.

Dále je zde volba **Nápověda**:

Zde se dozvíte mnohem podrobnější informace o tomto programu.

V menu **Syntéza**:

Zde jsou na výběr možné metody syntézy diskrétního regulátoru tohoto programu. Po označení vybrané metody syntézy se zobrazí jaký regulátor chcete vypočítat P, PS nebo PSD U Ziegler-Nicholsovy metody je ještě možné zvolit Takahashiho modifikaci PSD algoritmu.

B WWW STRÁNKY INFORMAČNÍHO SYSTÉMU CAAC

Byly naplněny vybrané základních submoduly zadaného tématického okruhu tzv. subsystému „Syntéza“ informačního systému CAAC, které jsou uvedeny v tab. 12.

V tab. 12 je uvedena položka „Naplnění“, která značí do jaké míry je daný základní submodul naplněn.. Jednotlivé uvedené hodnoty znamenají:

- 1 > základní submodul obsahuje text, který popisuje daný problém
- 2 > základní submodul obsahuje ukázkový příklad
- X > základní submodul nebude obsahovat danou část
- > základní submodul zatím neobsahuje danou část

Byly také doplněny vybrané již existující, ale i nové základní submoduly subsystému „Syntéza“ o vytvořené výpočetní programy, které jsou uvedeny v tab. 13.

Tab. 11 Vytvořené výpočetní programy

	Základní submodul	HTML soubor	Datum	Autor programu	Autor stránky
1	Metoda čtvrtinového tlumení	14tlum_pj.htm	15.2.2006	Marholt Jiří	Navrátil Pavel
2	Kritérium optimálního modulu	koptmod_pj.htm	15.2.2006	Marholt Jiří	Navrátil Pavel
3	Metoda kritického zesílení regulátoru (metoda Ziegler-Nichols)	d_ziegler_pj.htm	10.2.2006	Marholt Jiří	Marholt Jiří
4	Seřazení regulátoru na základě znalosti přechodové charakteristiky regulované soustavy	d_prechar_pj.htm	10.2.2006	Marholt Jiří	Marholt Jiří

Tab. 12 Naplněné vybrané základní submoduly

	Základní submodul	HTML soubor	Naplnění	Datum	Autor stránky
1	Diskrétní regulátory - modifikace spojitých regulátorů	d_reg.htm	1,X	23.5.2006	Marholt Jiří
2	Volba periody vzorkování	TvzVolba.htm	1,X	3.5.2006	Marholt Jiří
3	Malá perioda vzorkování	Tmala.htm	1,2	10.4.2006	Marholt Jiří
4	Střední perioda vzorkování	Tstredni.htm	1,-	25.4.2006	Marholt Jiří
5	Velká perioda vzorkování	Tvelka.htm	1,X	15.4.2006	Marholt Jiří
6	Metoda kritického zesílení regulátoru (metoda Ziegler-Nichols)	d_ziegler.htm	1,2	30.4.2006	Marholt Jiří
7	Seřízení regulátoru na základě znalosti přechodové charakteristiky regulované soustavy	d_prechar.htm	1,2	1.4.2006	Marholt Jiří
8	Metoda požadovaného modelu (metoda inverze dynamiky)	d_mpm.htm	1,2	10.3.2006	Marholt Jiří
9	Metoda konečného počtu kroků	deadbeat.htm	1,2	20.4.2006	Marholt Jiří
10	Metoda hodnotového přizpůsobení	mhp.htm	1,-	17.3.2006	Marholt Jiří

Na následujících stránkách jsou zobrazeny ukázky konkrétních WWW stránek informačního systému CAAC.

Ukázky konkrétních WWW stránek jsou rozděleny třetí částí. V první části jsou zobrazeny ukázky úvodních WWW stránek. V druhé části je zobrazena ukázka WWW stránky subsystému „Syntéza“. V třetí části jsou zobrazeny ukázky WWW stránek vybraných základních submodulů subsystému „Syntéza“.

B.1 Ukázka výstupu WWW stránek vybraných základních submodulů Informačního systému CAAC

Na následujících stránkách jsou zobrazeny jako ukázky tištěné WWW stránky (bez vytištěného pozadí WWW stránky) informačního systému CAAC. Konkrétně se jedná o subsystém „Syntéza“. Dále je zobrazen základní submodul „Volba periody vzorkování“, o základní submodul „Seřízení regulátoru na základě znalosti přechodové charakteristiky regulované soustavy“ a výpočetní program patřící k tomuto základnímu submodulu ze subsystému „Syntéza“.

B.1.1 Ukázky úvodních WWW stránek

Úvodní WWW stránka se základními informacemi o informačním systému CAAC

UTB ve Zlíně

CAAC

Computer Aided Automatic Control

Počítačová podpora automatického řízení

Informace o informačním systému CAAC:

Autoři: Balátě Jaroslav, Navrátil Pavel

Kontakt: e-mail

Aktualizace: 17.8.2005

Počet přístupů: 1218

Ke správnému zobrazení a běhu všech stránek

START

WWW stránka s výběrem požadovaného subsystému

Počítačová podpora automatického řízení

Metody numerické matematiky	Zpracování signálů	Analýza	Syntéza
Identifikace	Simulace	Optimalizace	Technické prostředky automatizace
Prognózování	Adaptivní řízení	Robustní řízení	Logické řízení
Umělá inteligence	Zvláštní případy	Knihovna hotových programů	CAAC

B.1.2 Ukázka WWW stránky subsystému „Syntéza“ informačního systému CAAC**WWW stránka subsystému „Syntéza“ (první část)****Syntéza****JEDNOROZMĚROVÉ REGULAČNÍ OBVODY****Způsob popisu**

Diskrétní

Jednoduché**Volba typu regulátoru**

Spojité

Diskrétní modifikace spojitých

Seřízení spojitého regulačního obvodu

Podle kritického zesílení

Metoda kritického zesílení regulátoru (metoda Ziegler-Nichols)

Metoda čtvrtinového tlumení

Seřízení regulátoru na základě znalosti přechodové charakteristiky regulované soustavy

Funkce standardního tvaru

Naslinova metoda

Whiteleyho metoda

Integrální kritérium

Podle minima lineární regulační plochy

Podle minima kvadratické regulační plochy

Kritérium optimálního modulu

Metoda umístění pólů

Metoda požadovaného modelu (metoda inverze dynamiky)

Frekvenční metody

Amplitudová a fázová bezpečnost

Brown-Cambellova konstrukce

Metoda požadované amplitudové frekvenční charakteristiky v logaritmických souřadnicích

Ze stavového popisu

Zpětnovazební stavový regulátor

Polynomiální metoda

Systém řízení se zpětnovazebním regulátorem (1DOF konfigurace)

Systém řízení se zpětnovazebním a přímovazebním regulátorem (2DOF konfigurace)

Seřízení diskrétního regulačního obvodu

Volba periody vzorkování

Velikost periody vzorkování

Malá

Střední

Velká

Dvoupolohová regulace

Bez penalizace

S penalizací

WWW stránka subsystému „Syntéza“ (druhá část)

Podle kritického zesílení

Ziegler-Nichoslova metoda kritického zesílení regulátoru

Z přechodové charakteristiky

Metoda umístění polů

Metoda požadovaného modelu (metoda inverze dynamiky)

Metoda konečného počtu kroků

Metoda hodnotového přizpůsobení

Metoda optimálního seřízení

Stabilní časově optimální řízení

Konečné časově optimální řízení

Časově optmální řízení s omezenou velikostí

Rozvětvené regulační obvody

s pomocnou regulovanou veličinou

s pomocnou akční veličinou

s měřením poruchy

s modelem regulované soustavy

sdužené

MNOHORozměrové regulační obvody

Způsob popisu

Spojité

Diskrétní

Autonomnost a invariantnost

Seřízení mnohorozměrových obvodů

ODBORNÁ LITERATURA

Seznam odborné literatury subsystému SYNTÉZA

B.1.3 Ukázky WWW stránek vztahujících se k subsystému „Syntéza“ WWW stránka

Základního submodulu „Volba periody vzorkování“ (první část)

Volba periody vzorkování

Popis řešeného problému:

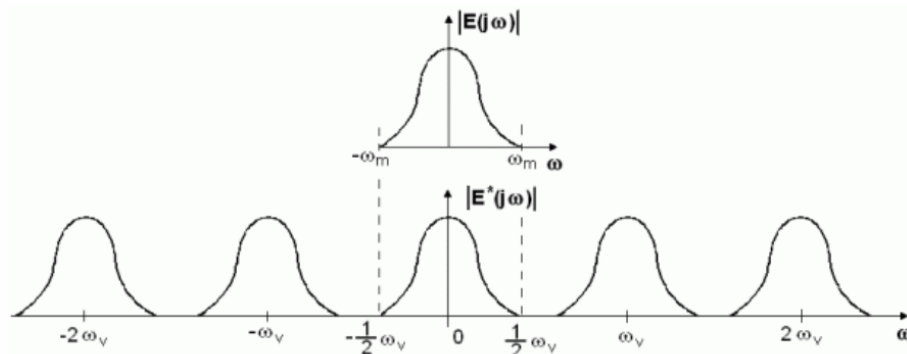
Vzorkovací perioda je časová konstanta, která rozděluje spojitou část obvodu na hodnoty dané v časových intervalech touto konstantou určené. Velikost vzorkovací periody má podstatný vliv na stabilitu diskrétního regulačního obvodu i na jeho další vlastnosti. Její periodu T a kmitočet ω_v nemůžeme volit libovolně dlouhý.

Shannon-Kotelníkův teorém

Základní podmínkou správného vzorkování je požadavek, aby vzorkovací průběh bylo možno převést zpět, tedy rekonstruovat jej na původní průběh bez ztráty informace. Tuto podmínku vyjadřuje tzv. Shannon-Kotelníkův vzorkovací teorém, kterým určuje potřebný vzorkovací kmitočet vzhledem k nejvyššímu kmitočtu spektra vzorkovacího signálu.

$$\omega_v \geq 2 \cdot \omega_m$$

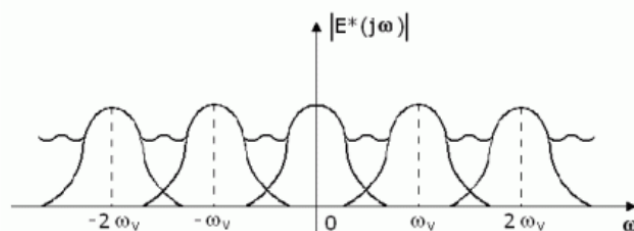
Vzorkovací kmitočet ω_v musí být roven nejméně dvojnásobku nejvyššího kmitočtu spektra vzorkovacího kmitočtu ω_m .



Obrázek 1: Amplitudové kmitočtové spektrum pro $\omega_v \geq 2\omega_m$

Není-li podmínka splněna dochází k překrytí sousedních period spektra, což má za následek znehodnocení vzorkovacího signálu.

$$\omega_v < 2 \cdot \omega_m$$



Obrázek 2: Amplitudové kmitočtové spektrum pro $\omega_v < 2\omega_m$

Při volbě periody vzorkování je nutno brát v úvahu aspekty:

- Pomocí simulace je možno zjistit kdy se začne zhoršovat regulace.
- Dynamika regulované soustavy má zásadní vliv na volbu periody vzorkování a většina pravidel pro

WWW stránka základního submodulu „Volba periody vzorkování“ (druhá část)

její volbu vychází z dynamických vlastností jako např. doba průtahu, dopravní zpoždění apod.

- Frekvenční spektrum poruchové veličiny – poruchová veličina se vyskytuje ve spektru nízkofrekvenčního až středofrekvenčního pásma. Můžeme odstranit vliv poruch až do frekvence ω_m = požadovaná hranice pásma.

$$T \leq \frac{\pi}{\omega_m}$$

- Výpočetní nároky a časová náročnost komunikace-omezení dolní hranice periody vzorkování z důvodu doby potřebné na výpočet pouze u extrémně složitých regulačních algoritmů a jsou v případě nutnosti řešitelné použitím speciálních rychlých procesů.

Pro regulaci obvyklých fyzikálních veličin v technologických procesech jsou uváděny následující typické hodnoty vzorkovací periody T.

Tabulka 1: Hodnoty vzorkovací periody pro používané fyzikální veličiny

Fyzikální veličina	Perioda vzorkování T
průtok	1s
tlak	5s
výška hladiny	10s
teplota	20s

Pro přibližné určení vzorkovací periody lze použít některý ze vztahů, které uvádí následující tabulka 2. Tyto vztahy byly ověřeny simulací a praxí

Tabulka 2: Vztahy pro určení přibližné hodnoty periody vzorkování

Hledisko volby periody vzorkování	určující vztah	pozn.
-	$T = \left(\frac{1}{8} + \frac{1}{16}\right)f$ $T = \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{8}\right)T_d$	soustavy s dominantním dopravním zpožděním
Hledisko volby periody vzorkování	$T = (1,2 + 0,35)T_u$ $T = (0,35 + 0,22)T_u$	$0,1 \leq \frac{T_u}{T} \leq 1,0$ $1,0 \leq \frac{T_u}{T} \leq 10$
vyregulování poruchy do ω_m jako u spojitého regulačního obvodu	$T = \frac{\pi}{\omega_m}$	$ S(j\omega_m) = 0,01 + 0,1$
výsledky simulace	$T = \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{15}\right)T_{95}$	-

Další vztahy pro určení přibližné hodnoty periody vzorkování:

WWW stránka základního submodulu „Volba periody vzorkování“ (třetí část)

$$T \approx \frac{T_1}{10}$$

$$T \approx \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{2} \right) \sum_i \tau_i$$

f – vlastní frekvence uzavřené smyčky [Hz]

T_d – periodu vzorkování T volíme u regulovaných soustav s dopravním zpožděním v závislosti na dopravním zpožděním

T_u – doba průtahu

T_{95} – čas, kdy přechodová charakteristika regulované soustavy dosáhne 95% své ustálené hodnoty

T_1 – největší časová konstanta regulované soustavy

$\sum_i \tau_i$ – součet časových konstant regulované soustavy

Z podstaty odvození číslicových PSD algoritmů je zřejmé, že zmenšováním vzorkovací periody dochází k přiblížení spojité PID regulační funkce. Se zvětšující se periodou vzorkování roste vliv zpoždění v realizaci změny akční veličiny na spojitě probíhající změny regulační odchylky. Při překročení vzorkovací periody do jisté velikosti dojde ke ztrátě stability.

Použitá, případně doporučená literatura:

1. Balátě, J.: Automatické řízení. BEN - technická literatura, 2. přepracované vydání, Praha, 2004.
2. Vašek, V.: Teorie automatického řízení II. VUT v Brně, Brno, 1990.

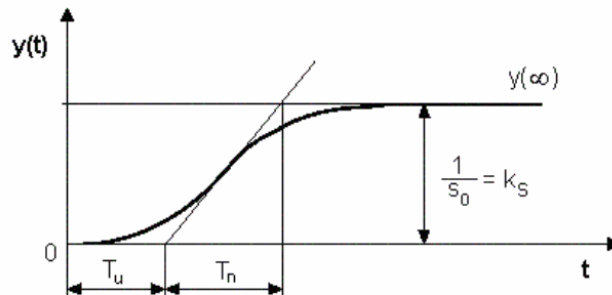


WWW stránka základního submodulu „Seřízení regulátoru na základě znalosti přechodové charakteristiky regulované soustavy“ (první část)

Seřízení regulátoru na základě znalosti přechodové charakteristiky regulované soustavy

Popis řešeného problému:

Tato metoda vychází ze známého průběhu přechodové charakteristiky regulované soustavy. Je možné přímo volit jednoduché relace mezi přechodovou charakteristikou regulované soustavy a stavitelnými parametry regulátoru takové, aby regulační pochod byl blízký optimálnímu. V přechodové charakteristice (viz. obrázek 1) najdeme inflexní bod. V tomto bodě sestavíme tečnu. Tím určíme dobu náběhu T_u , dobu průtahu T_n a odečteme hodnotu statického zesílení k_s .



Obrázek 1: Přechodová charakteristika

Z určených hodnot z přechodové charakteristiky T_u , T_n , k_s a zvolené periody vzorkování T určíme optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru pomocí následující tabulky.

Tabulka 1: Seřízení PSD regulátoru z průběhu přechodové charakteristiky

Typ regulátoru	k_p	$\frac{T}{T_i}$	$\frac{T_D}{T}$
P	$\frac{T_n}{T_u + T}$	-	-
PS	$\frac{0,9T_n}{T_u + 0,5T} - \frac{0,135T_n T}{(T_u + 0,5T)^2}$	$\frac{1}{k_s k_p} \frac{0,27T_n T}{(T_u + 0,5T)^2}$	-
PSD	$\frac{1,2T_n}{T_u + T} - \frac{0,3T_n T}{(T_u + 0,5T)^2}$	$\frac{1}{k_s k_p} \frac{0,67T_n T}{(T_u + 0,5T)^2}$	$\frac{1}{k_s k_p} \frac{0,5T_n}{T}$

*) Tabulku pro seřízení PSD regulátoru lze použít, když $T_u/T \neq 0$

Poznámka:

Modifikovaný přírůstkový algoritmus, který odvodil Takahashi je ve tvaru:

$$\nabla u_k = u_k - u_{k-1} = K_p \left[y_{k-1} - y_k + \frac{T}{T_i} (w_k - y_k) + \frac{T_D}{T} (-y_{k-2} + 2y_{k-1} - y_k) \right]$$

$$\nabla u_k = u_k - u_{k-1} = K_p (y_{k-1} - y_k) + T_i (w_k - y_k) + T_D (-y_{k-2} + 2y_{k-1} - y_k)$$

Přepočtové vztahy:

$$k_p = K_p, \quad T_i = \frac{k_p T}{K_i}, \quad T_D = \frac{K_D T}{k_p}$$

WWW stránka základního submodulu „Seřízení regulátoru na základě znalosti přechodové charakteristiky regulované soustavy“ (druhá část)

K určení konstant K_p , K_I , K_D musíme znát kritické zesílení regulátoru k_{pk} a kritickou periodu T_k . Určíme je stejným způsobem jako u nastavení regulátoru Ziegler-Nichols. Hodnoty konstant K_p , K_I , K_D určíme ze vztahů:

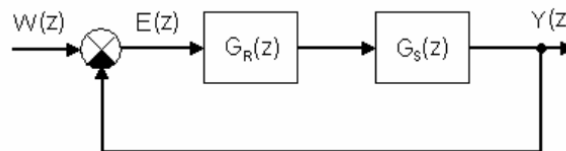
$$K_I = \frac{1,2 \cdot k_{pk} \cdot T}{T_k}, \quad K_p = 0,6 \cdot k_{pk} - \frac{K_I}{2}, \quad K_D = \frac{3 \cdot k_{pk} \cdot T_k}{40 \cdot T}$$

Příklad:

Je třeba určit přenos diskrétního regulátoru typu PSD pro regulovanou soustavu se spojitým přenosem:

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

Z přechodové charakteristiky bylo určeno $T_u = 0,22$; $T_n = 3,64$; $k_s = 2$



Obrázek 2: Blokové schéma regulačního obvodu

Z přechodové charakteristiky byl odečten čas, kdy regulovaná soustava dosáhne 95% své ustálené hodnoty.

$$T_{95} = 9$$

Zadání 1:

Je třeba určit parametry PSD regulátoru pomocí metody z přechodové charakteristiky, který bude ve tvaru:

$$G_R(z) = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}}$$

Řešení:

Periodu vzorkování určíme z rovnice:

$$T = \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{15} \right) T_{95} = \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{15} \right) \cdot 12 = \frac{12}{8} = 1,5$$

Podle tabulky 1 nastavíme parametry PSD regulátoru.

$$k_p = \frac{1,2 T_n}{T_u + T} - \frac{0,3 T_n T}{(T_u + 0,5 T)^2} = \frac{1,2 \cdot 3,64}{0,22 + 2} - \frac{0,3 \cdot 3,64 \cdot 1,5}{(0,22 + 0,5 \cdot 1,5)^2} = 0,805$$

$$\frac{T}{T_i} = \frac{1}{k_s \cdot k_p} \frac{0,67 T_n T}{(T_u + 0,5 T)^2} = \frac{1}{1,5 \cdot 0,805} \frac{0,67 \cdot 3,64 \cdot 1,5}{(0,22 + 0,5 \cdot 1,5)^2} = 3,1987$$

$$\frac{T_D}{T} = \frac{1}{k_s \cdot k_p} \frac{0,5 T_n}{T} = \frac{1}{1,5 \cdot 0,805} \frac{0,5 \cdot 3,64}{1,5} = 1,0047$$

Pro určení koeficientů q_0 , q_1 a q_2 použijeme vztahů pro zpětnou obdélníkovou metodu

WWW stránka základního submodulu „Seřízení regulátoru na základě znalosti přechodové charakteristiky regulované soustavy“ (třetí část)

$$K_p = k_p = 0,805$$

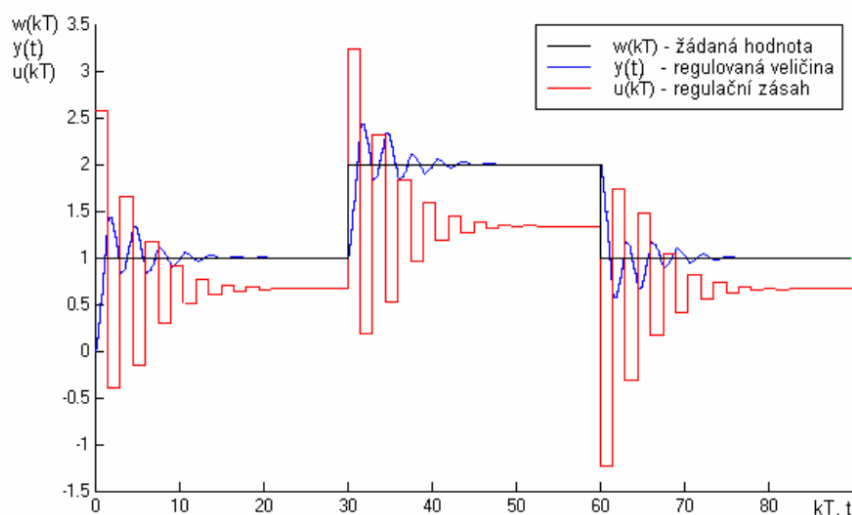
$$K_I = \frac{k_p T}{T_I} = 0,805 \cdot 3,1987 = 2,575$$

$$K_D = \frac{k_p T_D}{T} = 0,805 \cdot 1,0047 = 0,8088$$

Takahashiho modifikace PSD algoritmu: $_k$

$$\nabla u_k = u_k - u_{k-1} = K_p (y_{k-1} - y_k) + K_I \cdot e_k + K_D (-y_{k-2} + 2y_{k-1} - y_k)$$

$$\nabla u_k = 0,805(y_{k-1} - y_k) + 2,575 \cdot e_k + 0,8088(-y_{k-2} + 2y_{k-1} - y_k)$$



Obrázek 4: Průběh regulačního pochodu řízení pro daný příklad – zadání 2

Použitá, případně doporučená literatura:

1. Balátě, J.: Automatické řízení. BEN - technická literatura, 2. přepracované vydání, Praha, 2004.
2. Vašek, V.: Teorie automatického řízení II. VUT v Brně, Brno, 1990.

Výpočetní program:

- Seřízení regulátoru na základě znalosti přechodové charakteristiky regulované soustavy

Autor programu: Marholt, J. (3/2006), UTB ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky



WWW stránka výpočetního programu v základním submodulu

Seřízení regulátoru na základě znalosti přechodové charakteristiky regulované soustavy

Popis funkce programu:

- Tento program umožňuje nastavení parametrů diskrétního P, PS a PSD regulátoru z přechodové charakteristiky regulované soustavy. Pro určení koeficientů q_0 , q_1 a q_2 byly použity vztahy pro zpětnou-ZOBD transformaci.

Požadavky na SW a HW:

- Ke správnému běhu programu je nutné používat prohlížeč s podporou Java skriptu (Internet Explorer verze 5.0 a vyšší)

Návod na spuštění a ovládání:

- V programu je nutno zadat typ regulátoru (PSD, PS, P), dobu náběhu T_n , dobu průtahu T_u a zesílení regulované soustavy k_s . Výpočet se provede stlačením tlačítka "Vypočti".

Požadované vstupní údaje:

Typ regulátoru :	P	<input type="button" value="v"/>
Zesílení regulované soustavy k_s :	5	<input type="text"/>
Doba náběhu T_n :	5	<input type="text"/>
Doba průtahu T_u :	1.5	<input type="text"/>
Perioda vzorkování T :	2	<input type="text"/>

Vypočti

Parametry regulátoru vypočtené metodou z přechodové charakteristiky:

Parametr q_0 :
 Parametr q_1 :
 Parametr q_2 :

Rovnice regulátoru: a) P, b) PS nebo c) PSD

$$a) G_R(z) = q_0 \quad b) G_R(z) = \frac{q_0 + q_1 z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad c) G_R(z) = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}}$$

Zpět

C OBSAH VLOŽENÉHO CD-ROMU

Na zadní straně desek je vložen 1 CD-ROM, který obsahuje dva adresáře s níže uvedeným obsahem:

- adresář „CAAC“
 - obsahuje vytvořené WWW stránky informačního systému CAAC
(startovací soubor: *index.html*)
- adresář „Program“
 - obsahuje vytvořený program pro návrh diskrétního regulátoru, který byl naprogramovaný v prostředí MATLAB/Simulink ver. 6.5.
(startovací soubor: *synteza.m*)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Struktura bakalářské práce	8
Obr. 2	Podrobné blokové schéma diskrétního regulačního obvodu	11
Obr. 3	Stupňovitá náhrada zleva (levá obdélníková LOBD)	13
Obr. 4	Stupňovitá náhrada zprava (pravá obdélníková POBD)	14
Obr. 5	Sečnová náhrada (lichoběžníková LICH)	14
Obr. 6	Přechodová charakteristika	19
Obr. 7	Určení kritických hodnot regulátoru	20
Obr. 8	Schéma výpočtu parametrů PSD regulátoru pro Takahashiho algoritmus	21
Obr. 9	Předpokládaný průběh přechodové charakteristiky pro regulované soustavy bez dopravního zpoždění	22
Obr. 10	Předpokládaný průběh přechodové charakteristiky pro regulované soustavy s dopravního zpoždění	23
Obr. 11	Regulační pochody kmitavé – $y_1(t)$ a aperiodické – $y_2(t)$ vyvolané změnou $w(t)$ nebo vznikem poruchy $v(t)$	32
Obr. 12	Schéma regulačního obvodu vytvořeného v programu MATLAB/Simulink	35
Obr. 13	Průběh regulace pro PSD regulátor nastavený metodou vycházející z přechodové charakteristiky pro regulovanou soustavu č.1	37
Obr. 14	Průběh regulace pro PSD regulátor nastavený metodou vycházející z přechodové charakteristiky pro regulovanou soustavu č.2	38
Obr. 15	Průběh regulace pro PS regulátor nastavený metodou vycházející z přechodové charakteristiky pro regulovanou soustavu č.3	39
Obr. 16	Průběh regulace pro PS regulátor nastavený metodou vycházející z přechodové charakteristiky pro regulovanou soustavu č.4	40
Obr. 17	Průběh regulace pro PSD regulátor nastavený metodou kritického zesílení regulátoru (Ziegler-Nichols) pro regulovanou soustavu č.1	42
Obr. 18	Průběh regulace pro PSD regulátor nastavený metodou kritického zesílení regulátoru (Ziegler-Nichols) pro regulovanou soustavu č.2	44
Obr. 19	Průběh regulace pro PS regulátor nastavený metodou kritického zesílení regulátoru (Ziegler-Nichols) pro regulovanou soustavu č.3	45
Obr. 20	Průběh regulace pro PS regulátor nastavený metodou kritického zesílení regulátoru (Ziegler-Nichols) pro regulovanou soustavu č.4	47
Obr. 21	Průběh regulace pro PSD regulátor nastavený metodou požadovaného modelu (Inverze dynamiky) pro regulovanou soustavu č.1	49
Obr. 22	Průběh regulace pro PSD regulátor nastavený metodou požadovaného modelu (Inverze dynamiky) pro regulovanou soustavu č.2	50
Obr. 23	Průběh regulace pro PS regulátor nastavený metodou požadovaného modelu (Inverze dynamiky) pro regulovanou soustavu č.3	51
Obr. 24	Průběh regulace pro PS regulátor nastavený metodou požadovaného modelu (Inverze dynamiky) pro regulovanou soustavu č.4	53
Obr. 25	Průběh regulace pro regulátor nastavený metodou konečný počet kroků bez omezení počáteční hodnoty akční veličiny pro regulovanou soustavu č.1	54
Obr. 26	Průběh regulace pro regulátor nastavený metodou konečný počet kroků bez omezení počáteční hodnoty akční veličiny pro regulovanou soustavu č.2	55
Obr. 27	Průběh regulace pro regulátor nastavený metodou konečný počet kroků bez omezení počáteční hodnoty akční veličiny pro regulovanou soustavu č.3	56

Obr.k 28 Průběh regulace pro regulátor nastavený metodou konečný počet kroků bez omezení počáteční hodnoty akční veličiny pro regulovanou soustavu č.4	57
Obr. 29 Průběh regulace pro regulátor nastavený metodou konečný počet kroků s omezením počáteční hodnoty akční veličiny pro regulovanou soustavu č.1	59
Obr. 30 Průběh regulace pro regulátor nastavený metodou konečný počet kroků s omezením počáteční hodnoty akční veličiny pro regulovanou soustavu č.2	60
Obr. 31 Průběh regulace pro regulátor nastavený metodou konečný počet kroků s omezením počáteční hodnoty akční veličiny pro regulovanou soustavu č.3	61
Obr. 32 Průběh regulace pro regulátor nastavený metodou konečný počet kroků s omezením počáteční hodnoty akční veličiny pro regulovanou soustavu č.4	63
Obr. 33 Úvodní okno programu	69

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Přehled možností určení hodnoty integrálu I_k a derivace D_k u číslicových PID regulátorů	14
Tab. 2 Možností určení ∇I_k a ∇D_k u číslicových přírůstkových PID regulátorů	15
Tab. 3 Varianty přepočtu parametrů k_P , T_I , T_D spjitého PID regulátoru na parametry q_0 , q_1 , q_2 přírůstkového číslicového PSD regulátoru	16
Tab. 4 Seřízení PSD regulátoru z průběhu přechodové charakteristiky	19
Tab. 5 Seřízení PSD regulátoru z kritických hodnot regulátoru	20
Tab. 6 Přenos konvenčních regulátorů.....	22
Tab. 7 Doporučené typy regulátorů a výpočet jejich stavitelných parametrů	24
Tab. 8 Určení koeficientů pro daný překmit	25
Tab. 9 Srovnání metod syntézy podle kvality regulace pro soustavy druhého řádu.....	63
Tab. 10 Srovnání metod syntézy podle kvality regulace pro soustavy prvního řádu	64
Tab. 11 Vytvořené výpočetní programy	70
Tab. 12 Naplněné vybrané základní submoduly	70

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**Seznam symbolů**

δ	šířka impulzu
∇	operátor zpětné diference
ϖ	úhlový kmitočet
ϖ_k	kritický úhlový kmitočet
κ	překmit
τ_i	časové konstanty
a	zesílení otevřeného regulačního obvodu
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
c_S	koeficient přenosu integrační regulované soustavy, statický činitel rychlosti
D	diferenční číslicový regulátor
D_k	hodnota derivace
e	regulační odchylka, základ přirozených logaritmů
G_{RO}	regulační orgán
$G_R(z)$	přenos regulátoru
G_{SV}	část regulované soustavy, na kterou působí porucha
$G_S(s)$	přenos regulované soustavy
h_w	přechodová funkce vyvolaná žádanou veličinou
I_k	hodnota integrálu
J_K	kvadratická regulační plocha
k_P	zesílení regulátoru
k_{Pk}	kritické zesílení regulátoru
k_S	koeficient přenosu (zesílení) proporcionální regulované soustavy
kT	diskrétní čas
L	dopravní zpoždění
M_i	paměťové místo
p_i	koeficienty mnohočlenu ve jmenovateli přenosu regulátoru
P	proporcionální složka u regulátoru, proporcionální číslicový regulátor

PD	proporcionálně diferenční číslicový regulátor
PID	proporcionálně integračně derivační analogový regulátor
PS	proporcionálně sumační číslicový regulátor
PSD	proporcionálně sumačně diferenční číslicový regulátor
q_i	koeficienty mnohočlenu v čitateli přenosu regulátoru
S	sumační složka u regulátoru, sumační číslicový regulátor
t	spojitý čas
t_r	doba regulace
T	perioda vzorkování
T_D	derivační časová konstanta
T_i	časová konstanta
T_I	integrační časová konstanta
T_k	kritická perioda
T_n	doba náběhu
T_u	doba průtahu
T_w	požadovaná časová konstanta
u	akční veličina
v	poruchová veličina (porucha)
V_i	vzorkovací člen
w	řídící veličina (žádaná hodnota)
y	výstupní veličina (regulovaná veličina)

Seznam zkratk

A/Č	analogově číslicový převodník
CAAC	Computer aided automatic control (Počítačová podpora automatického řízení)
Č/A	číslicově analogový převodník
TČ	tvarovací člen
WWW	World-Wide-Web

SEZNAM POUŽITÉ LITERARURY

- [1] BALÁTĚ, J. *Automatické řízení*. 2. přeprac. vyd. Praha : BEN –technická literatura, Praha 2004.
- [2] BOBÁL, V., BÖHM, J., PROKOP, R., FESSL, J. *Praktické aspekty samočinně se nastavujících regulátorů algoritmy a implementace*. Brno : VUT v Brně, 1999.
- [3] HLAVENKA, J., et al. *Vytváříme WWW stránky*. Brno : Computers Press, 1999.
- [4] KOSEK, J. *Téměř vše o WWW* [online]. c1999, 2005/11/07 [cit.2006-01-18].
- [5] KOZÁK, Š. *Lineárne číslicové systémy I*. Bratislava : STU v Bratislave 1993.
- [6] NAVRÁTIL, P. *Počítačová podpora automatického řízení – CAAC*, Disertační práce, FT Zlín, Zlín, 2004.
- [7] PERŮTKA, K. *MATLAB- Základy pro studenty automatizace a informačních technologií*. Zlín : UTB ve Zlíně 2005.
- [8] VAŠEK, V. *Teorie automatického řízení II*. Brno : VUT v Brně, 1990.
- [9] ZAPLATÍLEK, K., DOŇAR, B. *MATLAB pro začátečníky*. 2.vydání Vyd. Praha : BEN –technická literatura, Praha 2005.
- [10] ZAPLATÍLEK, K., DOŇAR, B. *MATLAB tvorba uživatelských aplikací*. Vyd. Praha : BEN –technická literatura, Praha 2005.