

Autotuning regulátorů

Autotuning of regulators

Ladislav SKOVAJSA

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: **Ladislav SKOVAJSA**
Studijní program: **B 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**

Téma práce: **Autotuning regulátorů pomocí relé**

Zásady pro vypracování:

1. Využití symetrického relé bez hystereze pro určení kritických hodnot.
2. Využití symetrického relé s hysterezí pro určení kritických hodnot.
3. Využití nesymetrického relé s hysterezí pro identifikaci parametrů systému 1.a 2.řádu.
4. Výpočet parametrů regulátorů algebraickými metodami a metodou vyváženého nastavení.
5. Vypracování programového systému v prostředí Matlab, Simulink.
6. Porovnání a analýza jednotlivých přístupů na vybraných přenosech jednorozměrných systémů.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Astrom, K.J., Hagglund, T.: PID Controllers. ICMC N. Carolina, 1995

Klán P., Gorez, R.: Vyvážené nastavení PI regulátorů. Automa, 4, s. 49–53, 2000

Levine et al.: The Control Handbook. IEEE Press, 1995

Majhi, S., Atherton, D.P.: Autotuning and controller design. In: UKACC Control Conf. No. 455, s. 769–774, 1998.

Vítečková, M., Víteček, A.: Experimentální identifikace metodou relé. In: Automatizácia a informatizácia, Bratislava, 2004.

Marcaník, T.: Autotuning–samočinné ladění regulátorů. DP FT UTB, Zlín, 2004

Yu, Ch.Ch.: Autotuning of PID Controllers. A relay feedback approach. Springer, London, 2006.

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Roman Prokop, CSc.

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

ABSTRAKT

Autotuning znamená automatické provedení experimentu pro odhad parametrů systému a následný výpočet regulátorů. Estimační fáze autotuningu využívá relé ve zpětné vazbě k odhadu kritických hodnot nebo parametrů přenosu řízeného objektu. Pak následuje algoritmus pro výpočet parametrů regulátoru. Diplomová práce se zabývá speciální kombinací relé a způsobu syntézy. Nesymetrické relé s hysterezí poskytuje v identifikační fázi odhad přenosu druhého řádu, a to s kmitavou nebo nekmitavou odezvou podle zařazení integračního členu do zpětné vazby. Následná syntéza využívá algebraické metody, které takto generují třídu PID regulátorů. Tento přístup umožňuje zavedení skalárního kladného parametru, který dále ladí regulátor, čímž ovlivňuje vlastnosti celého regulačního pochodu. V prostředí Matlab+Simulink byl vytvořen program pro experiment, automatický návrh regulátoru a simulaci regulačního obvodu. Byla provedena řada simulačních experimentů pro systémy různého řádu.

Klíčová slova: Autotuning, PID regulátory, Matlab+Simulink

ABSTRACT

Autotuning means the process of automatic estimation and controller design. The estimation phase represents a relay experiment which yields critical or transfer function parameters of controlled system. Then the controller algorithm follows and controller parameters are computed. The work is focused on a special combination of a relay feedback experiment and controller design. An asymmetric relay with hysteresis was used in the feedback and the second order transfer function was identified. An integrator in the feedback loop enables also the estimation of harmonic stable systems. Then the algebraic approach for controller parameters is utilized and a class of PID controllers is generated. The methodology gives a scalar positive parameter which tunes the resulting controller. The program system in the Matlab+Simulink environment was developed and a set of simulation experiments were performed.

Keywords: Autotuning, PID controllers, Matlab+Simulink

Poděkování

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce Prof. Ing. CSc. Romanu Prokopovi za jeho pomoc, obětavost, čas který byl vynaložen na řešení dané problematiky a odborné vedení, bez kterého by tato práce nemohla vzniknout. Zvláštní poděkování bych chtěl udělit Ing. Jiřímu Korbelovi za pomoc při opravě simulačních programů bez kterých by nebylo možné simulační experimenty uskutečnit.

Motto

”

Každý by měl mít natolik velký hřbitov, aby tam mohl pohřbít chyby svých přátel.

”

Henry Brooks Adams

Ve Zlíně

.....

Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	7
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 RELÉ VE ZPĚTNÉ VAZBĚ	10
1.1 SYMETRICKÉ RELÉ	12
1.2 NESYMETRICKÉ RELÉ	12
2 NÁVRH REGULÁTORŮ	13
2.1 METODY NÁVRHU Z KRITICKÝCH HODNOT	15
2.1.1 Metoda Ziegler – Nichols.....	15
2.1.2 Metoda vyváženého nastavení	15
2.2 ALGEBRAICKÉ METODY.....	16
3 SYSTÉMY 2. ŘÁDU	19
3.1 IDENTIFIKACE PŘENOSU 2. ŘÁDU BEZ INTEGRAČNÍHO ČLENU	19
3.2 IDENTIFIKACE PŘENOSU 2. ŘÁDU S INTEGRAČNÍM ČLENEM.....	23
II PRAKTICKÁ ČÁST	26
4 POPIS PROGRAMOVÉHO PROSTŘEDÍ	27
4.1 SLOŽENÍ PROGRAMOVÉHO PROSTŘEDÍ.....	27
5 SIMULAČNÍ EXPERIMENTY	30
5.1 SYSTÉMY 2. ŘÁDU	30
5.1.1 Příklad 1	30
5.1.2 Příklad 2	32
5.1.3 Příklad 3	34
5.2 SYSTÉMY VYŠŠÍCH ŘÁDŮ.....	37
5.2.1 Příklad 4	37
5.2.2 Příklad 5	39
5.2.3 Příklad 6	41
5.3 SYSTÉMY S DOPRAVNÍM ZPOŽDĚNÍM.....	44
5.3.1 Příklad 7	44
5.3.2 Příklad 8	46
5.4 SYSTÉMY KMITAVÉ	49
5.4.1 Příklad 9	49
5.4.2 Příklad 10	53
ZÁVĚR	58
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	60
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	61
SEZNAM OBRÁZKŮ	62
SEZNAM TABULEK	64
SEZNAM PŘÍLOH	65

ÚVOD

Nejúčinnější způsob, jak změnit dynamiku daného systému je zpětná vazba. Zpětnovazební řízení a regulátory patří za poslední století k významným úspěchům lidského poznání a vyspělé techniky. Bez účinného automatického řízení si v dnešní době nelze představit naprostou většinu technologických procesů, ale i řízení vozidel, lodí, letadel a dalších objektů. Od 30.let minulého století k nejfrekventovanějším zpětnovazebním regulátorům patří PID regulátory. Tyto mají složky proporcionální, derivační a integrační. Udává se, že téměř 90 % technologických regulačních smyček je osazeno právě PID regulátory. Tedy pro efektivní a účinnou funkci takového regulátoru je potřeba nastavit (naladit) tyto tři parametry, proporcionální, derivační a integrační. Postup, jakým se to udělá, s nazývá syntézou regulátoru.

V průběhu mnoha desetiletí se hledaly postupy a algoritmy, jak nalézt správné a přijatelné hodnoty pro nastavení parametrů regulátorů. Existuje několik desítek těchto metod. Mezi nimi dominují metody nesoucí označení, jména Ziegler a Nichols.. Jejich výjimečnost je dána dvěma vlastnostmi. V první řadě nepotřebují znalost přenosu řízeného objektu, v druhé řadě nepotřebují komplikované odvození. Znalost přenosu je nahrazena experimentem s proporcionálním regulátorem, který přivede zpětnovazební obvod na hranici stability. Z kritických hodnot zesílení a kmitů lze pak hodnoty parametrů regulátoru odečíst z empiricky získaných tabulek. Ziegler-Nicholsovy metody se úspěšně využívaly několik desetiletí.

S vývojem číslicové regulační techniky v 80. letech minulého století se začaly projevovat i významné nedostatky tohoto přístupu. Šlo jednak o rizikový experiment na hranici stability a také o kritizovanou přílišnou kmitavost regulačních pochodů podle Zieglera a Nicholse. V r. 1983 navrhli Hägglund a Åström způsob, který Ziegler-Nicholsovo nastavení nahrazuje a automatizuje. Jedná se o slavné použití symetrického relé ve zpětné vazbě a důkaz, že z experimentu lze odečíst právě hledané kritické hodnoty. Způsob byl převzat řadou profesionálních regulačních firem pod označením autotuning, tedy automatické nastavení regulátorů.

V průběhu dalších dvaceti let byly rozpracovány další modifikace tohoto přístupu. Jedná se zejména o použití dalších typů relé jako je nesymetrické, relé s hysterezí nebo se zařazeným integračním členem. Na základě vyhodnocení experimentu lze pak identifikovat pa-

rametry přenosu a tím i podstatně rozšířit metody syntézy regulátorů na modernější přístupy.

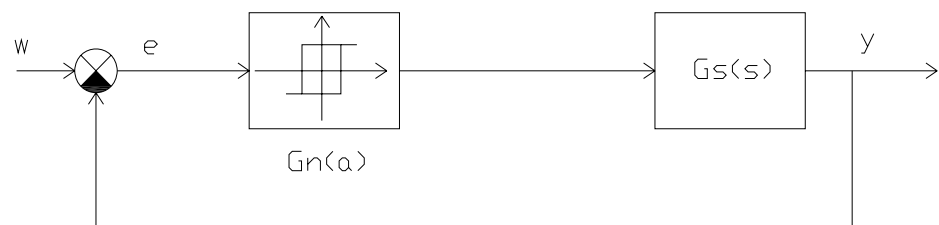
Tato práce je příspěvkem k problematice autotuningu ve smyslu experimentu a identifikace řízeného objektu přenosem druhého řádu. Tento přenos může být kmitavý nebo nekmitavý podle zařazení integračního členu ve zpětné vazbě. Výpočet parametrů regulátoru je pak proveden přes řešení diofantických rovnic v příslušném okruhu. Přitom je zohledněno nastavení proporcionální složky metodou vyváženého nastavení. V prostředí Matlab, Simulink byl vypracován program pro automatický návrh a simulaci. Uvedená metodika byla ověřena na řadě simulačních příkladů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

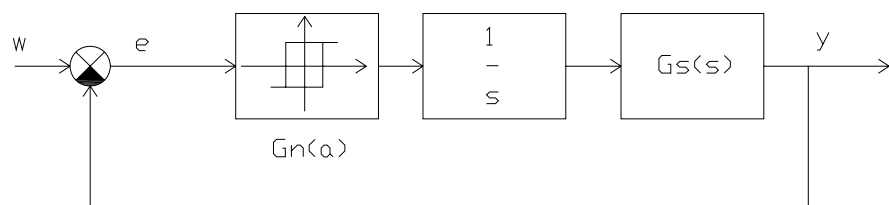
1 RELÉ VE ZPĚTNÉ VAZBĚ

Ziegler-Nicholsova metoda používá pro zjištění kritických hodnot (kritické zesílení a kritickou periodu kmitů) P regulátor ve zpětné vazbě a experiment s jeho nastavením na hranici stability, což může vyžadovat značný čas. Jednodušším způsobem je nahrazení P členu symetrickým relé podle obr.1a pro nekmitavou soustavu bez integračního členu a podle obr.1b pro kmitavou soustavu s integračním členem. Dalším možným způsobem je nesy-metrické nastavení relé (Kaya a Atherton, 2001; Yu, 1999).

a) bez integračního členu



b) s integračním členem



Obr.1: Relé ve zpětné vazbě

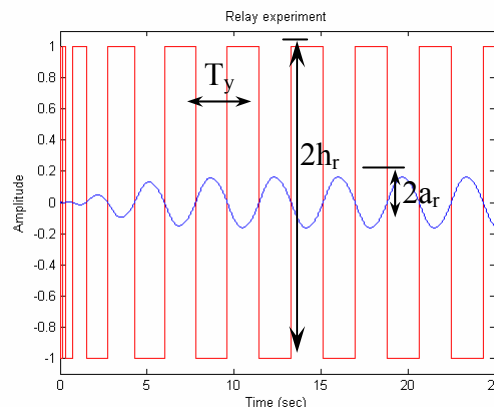
Situaci znázorňuje obr.1a a obr. 1b k. Symetrické relé má na výstupu hodnoty v absolutní hodnotě stejné, opačného znaménka a může nebo nemusí mít hysterezi. Podobně je to u nesy-metrického relé, které produkuje nestejně hodnoty na výstupu. Všechny kombinace charakterizuje obr.3, kde $2h_r$ je rozdíl výstupních hodnot a ε je velikost hystereze.

Jestliže označíme ekvivalentní přenos relé na obr.1 jako $G_N(a)$, kde „a“ je amplituda harmonických kmitů vstupujících do relé, pak podmínkou vzniku stabilního mezního cyklu je rovnice:

$$G(j\omega)G_N(a) + 1 = 0 \quad (1)$$

Po provedení reléového experimentu (typický průběh na obr.2) se perioda kmitů T_y odečte přímo z grafu v ustálené fázi experimentu a kritické zesílení r_{kr} se vypočte podle vztahu:

$$r_{kr} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{h_r}{\sqrt{a_r^2 - \varepsilon^2}} \Big|_{\varepsilon=0} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{h_r}{a_r} \quad (2)$$



Obr.2: Průběh experimentu

kde T_y , h_r , a_r mají stejný význam popsany u (2) a ε je hystereze relé. Přenosy bez dopravního zpoždění generují PI nebo PID regulátory. Z tohoto důvodu je užitečné pro estimaci (stabilního) řízeného systému libovolného řádu použít tyto přenosy. Pro identifikaci zesílení je tedy potřeba nesymetrické relé bez hystereze, zatímco k časovým konstantám je nutné relé symetrické. Tento příspěvek se snaží využít pouze jeden reléový experiment s „mírně nesymetrickým“ relé ve zpětné vazbě a následnou aplikací vzorců pro zesílení i časové konstanty. Nabízí se otázka, co znamená „mírně nesymetrický“. Z mnoha simulačních experimentů plyne závěr, že asymetrie může být značná a přitom estimační přenosy vystihují řízený přenos velmi dobře a pro návrh regulátorů jsou použitelné.

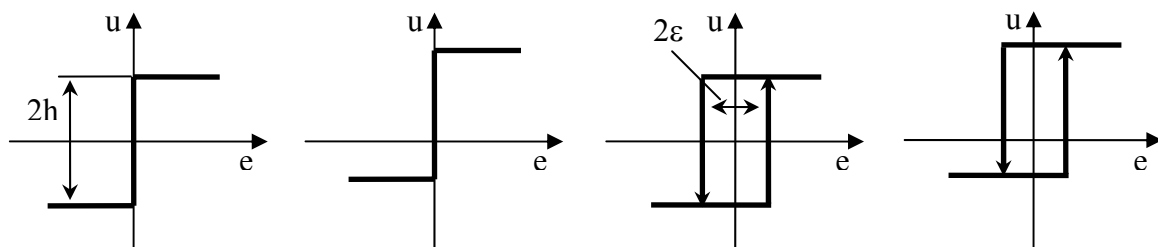
1.1 Symetrické relé

Symetrické relé se může dělit na dva druhy a to s hysterezí a bez hystereze. Relé bez hystereze Obr.3(a) provádí přepínání na mezi nulové regulační odchylky. Akční zásah je pro oba stavy relé symetrický kolem nulové hodnoty. To platí i pro symetrické relé s hysterezí Obr.3(c), ale je zde zpožděno přepínání stavů vůči nulové hodnotě regulační odchylky právě o velikost této hystereze ε .

1.2 Nesymetrické relé

Nesymetrické relé s hysterezí Obr.3(d) a bez hystereze Obr.3(b) se liší od symetrického relé jen tím, že akční zásah pro oba stavy relé není symetrický kolem nulové hodnoty. Tato hranice bývá posunuta nahoru, nebo dolů dle nastavení horní a dolní hranice zapínání či vypínání. Hystereze zde působí jako u symetrického relé.

Obr.3: Druhy relé



a) symetrické, $\varepsilon=0$

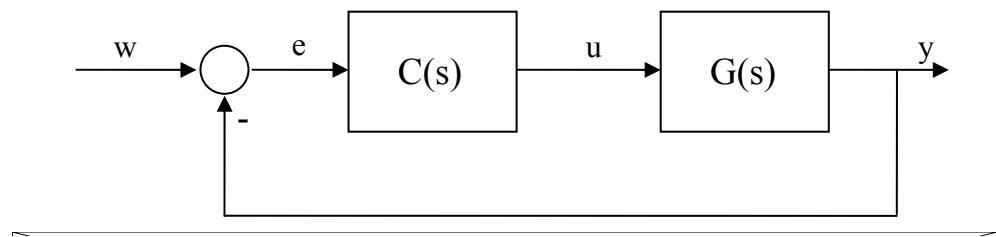
b) nesymetrické, $\varepsilon=0$

c) symetrické, $\varepsilon \neq 0$

d) nesymetrické, $\varepsilon \neq 0$

2 NÁVRH REGULÁTORŮ

Metody nastavení regulátorů můžeme „rozdělit“ na klasické a metody moderní. Mezi ty klasické řadíme metodu autorů Zieglera – Nicholse (dále jen ZN), metodu vyváženého nastavení, z přechodových charakteristik aperiodického typu, Cohen Coonovu metodu, Naslinovu metodu a pomocí autotuning(Hägglund), což je úkolem této práce. Mezi ty moderní a o to více efektivní řadíme metodu Chiena, Hronese a Reswicka (dále jen CHR).



Obr.4: Zpětnovazební obvod

$e = w - y \Rightarrow e$ se musí blížit k nule.

Klasickým případem regulátoru je PID regulátor, který v tzv. ideální interpretaci je popsán rovnicí:

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3)$$

tedy má přenos:

$$C(s) = K \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (4)$$

kde K se nazývá proporcionální zesílení

T_I integrační časová konstanta

T_D derivační časová konstanta

Ideální derivační člen má nežádoucí vlastnosti (zesiluje šumy, způsobuje saturaci, ...), proto se v technické praxi využívá tzv. realistický PID regulátor, který je popsán rovnicí:

$$C_R(s) = K \left(1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{\tau s + 1} \right) \quad (5)$$

kde τ je další parametr, obvykle se odvozuje od časové konstanty T_D , např. vztah:

$$\tau = \frac{T_D}{\alpha} ; \alpha \in \langle 5; 100 \rangle \quad (6)$$

Řízený systém se v těchto případech rozumí lineární, spojitý, v Laplaceově transformaci popsán přenosem:

$$G(s) = \frac{b_m s^m + \dots + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} e^{-\theta s} \quad (7)$$

kde $m < n$; $\theta \geq 0$ reprezentuje dopravní zpoždění

$$b(s) = b_m s^m + \dots + b_0$$

$$a(s) = s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0 \text{ jsou polynomy}$$

V literatuře se pro systémy 1. a 2. řádu často používají i popisy pomocí časových konstant, tedy speciální případy (7):

$$G_1(s) = \frac{K_P}{T_S + 1} \quad (8)$$

$$G_2(s) = \frac{K_P}{T_1 T_2 s^2 + 2T_1 T_2 \xi s + 1} \quad (9)$$

Ve vztazích (8),(9) se K_P nazývá statické zesílení systému. T, T_1, T_2 časové konstanty a $\xi \geq 0$ tlumení.

2.1 Metody návrhu z kritických hodnot

2.1.1 Metoda Ziegler – Nichols

Mezi nejfrekventovanější způsoby nastavení regulátorů typu PID patří zajisté metody, které navrhli ZN a které byly uveřejněny v r.1942. Původní verze metody se opírá o kritické hodnoty, tedy nastavení P regulátoru tak, aby celý zpětnovazební obvod byl na hranici stability. Výstupní veličina procesu v tomto stavu netlumeně kmitá s příslušnou periodou. Z hodnot kritických zesílení a kritické periody je pak nastavení odvozeno v podstatě empirickým způsobem, který odpovídá tabulce I.

Tab.I: Klasické Z-N nastavení z kritických parametrů

	K	T _I	T _D
P	0,5 r _{kr}	-	-
PI	0,45 r _{kr}	0,85 T _{kr}	-
PID	0,6 r _{kr}	0,5 T _{kr}	0,12 T _{kr}

Zákon řízení se předpokládá ve tvaru ideálního PID.

2.1.2 Metoda vyváženého nastavení

Významné zlepšení pro širokou třídu potenciálních objektů přináší vyvážené nastavení autorů Klán, Gorez (2000). Princip je přitom jednodušší než u metody Ziegler-Nichols, pouze je pro proporcionální složku potřeba znalost zesílení systému. Vyvážené nastavení (Gorez & Klán, 2000) předpokládá PI regulátor.

Metoda vyváženého nastavení pro PI strukturu používá jednoduchých vztahů:

$$K = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{K_p}, T_I = 0.4 \cdot T_{kr},$$

(10)

kde K_P je statické zesílení řízeného objektu ve smyslu $G(s) = \frac{K_P}{Ts+1} = \frac{b_0}{s+a_0}$.

Další modifikace návrhu parametrů regulátoru je možné nalézt např. v publikacích autorů Garcia a Castelo (2000), Thyagarajan a Yu (2002), Ingimundarson a Hägglund (2000).

2.2 Algebraické metody

Algebraické metody hledají přenos regulátoru pro systémy popsané (7) pomocí diofantických rovnic v okruhu polynomů, nebo v okruhu Rps, který reprezentuje množství všech stabilních a ryzích racionálních funkcí. Pro popis (7) v reprezentaci Rps znamená nahradit podíl dvou polynomů $b(s) / a(s)$ podílem dvou racionálních funkcí v Rps, což lze provést dle vztahu:

$$G(s) = \frac{b(s)}{a(s)} = \frac{\frac{b(s)}{(s+m)^n}}{\frac{a(s)}{(s+m)^n}} = \frac{B(s)}{A(s)}; \quad m > 0 \quad (11)$$

kde $st\ n = \max\{st\ a(s), st\ b(s)\}$

Pro speciální případ systému 2. řádu (9) s $\xi = 1$; $T_1=T_2$ má přenos v Rps tvar:

$$G_2(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{\frac{K_p}{(s+m)^2}}{(Ts+1)^2} \quad (12)$$

Všechny stabilizující regulátory jsou dány obecným řešením rovnice:

$$AP + BQ = 1 \quad (13)$$

které je dáno parametrizací:

$$\begin{aligned}P &= P_0 + BZ \\ Q &= Q_0 - AZ\end{aligned}$$

(14)

kde P_0, Q_0 jsou partikulární řešení, Z je libovolný prvek z R_{PS} . Jestliže se vyžaduje u obvodu asymptotické sledování, musí být z (14) vybrán takový regulátor, že jmenovatel žádané veličiny dělí P .

Diofantická rovnice (13) má pak pro systém druhého řádu následující tvar:

$$(Ts+1)^2 (p_1s + p_0)s + K_p(q_2s^2 + q_1s + q_0) = (s+m)^4$$

(15)

což vede na řešení následující soustavy rovnic:

$$\begin{aligned}s^4 : p_1 &= 1 \\ s^3 : a_1p_1 + p_0 &= 4m \\ s^2 : a_1p_0 + a_0p_1 + b_0q_2 &= 6m^2 \\ s^1 : a_0p_0 + b_0q_1 &= 4m^3 \\ s^0 : b_0q_0 &= m^4\end{aligned}$$

(16)

Řešení soustavy rovnic je pak následující:

$$\begin{aligned}p_1 &= 1 \\ p_0 &= 4m - a_1 \\ q_0 &= \frac{m^4}{b_0} \\ q_1 &= \frac{4m^3 - a_0p_0}{b_0} \\ q_2 &= \frac{6m^2 - a_1p_0 - a_0}{b_0}\end{aligned}$$

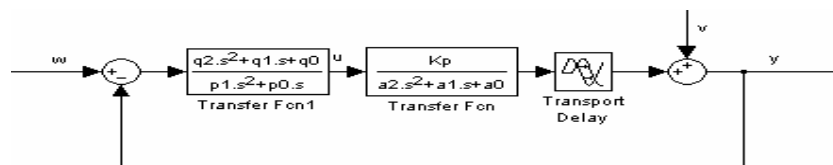
(17)

kde a a b jsou koeficienty zadaného přenosu a p a q složky výsledného regulátoru, který má následující tvar:

$$C(s) = \frac{q_2 s^2 + q_1 s + q_0}{p_1 s^2 + p_0 s}$$

(18)

Regulační obvod má pak následující zapojení:



Obr.5: Schéma regulačního obvodu se zpětnovazební částí FB

3 SYSTÉMY 2. ŘÁDU

3.1 Identifikace přenosu 2. řádu bez integračního členu

Důležitou metodu, která je velmi moderní a pružná a proto také byla v této práci využita pro získání parametrů systému – z anglického překladu metoda popisujících funkcí (describing function - DF). Tato práce se bude zabývat aplikací relé ve zpětné vazbě a následnou identifikací přenosu systému druhého řádu.

Při identifikaci pomocí relé se předpokládá, že relé je zapojeno místo regulátoru viz. Obr.1 Úlohou relé je způsobit stabilní kmitání, tj. způsobit vznik stabilního mezního cyklu. Ekvivalentní přenos relé $G_N(a)$ lze považovat za komplexní zesílení závislé na amplitudě a harmonických kmitů s úhlovým kmitočtem ω :

$$e(t) = a \cdot \sin \omega t \quad (19)$$

přicházejících na vstup relé, a proto s ním lze pracovat podobně jako s obyčejným přenosem. Podmínka vzniku mezního cyklu má tvar:

$$G_s(j\omega) = -\frac{1}{G_N(a)} \quad (20)$$

Pro dvoupolohové symetrické relé s hysterezí Obr.3c, nebo bez hystereze Obr.3a ekvivalentní přenos a odpovídající kritická charakteristika mají tvar (Víteček, Smutný & Kusyn 1983; Balátě 2003):

$$G_N(a) = \begin{cases} \frac{4u_0}{\pi a} \left[\sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon}{a}\right)^2} - j \frac{\varepsilon}{a} \right] & \text{pro } 0 \leq \varepsilon \leq a \\ 0 & \text{pro } 0 \leq a \leq \varepsilon \end{cases} \quad (21)$$

$$-\frac{1}{G_N(a)} = \begin{cases} \frac{A_N(a)e^{j\varphi_N(a)}}{0} & \text{pro } 0 \leq \varepsilon \leq a \\ 0 & \text{pro } 0 \leq a \leq \varepsilon \end{cases} \quad (22)$$

$$A_N(a) = \frac{\pi a}{4u_0} \quad (23)$$

$$\varphi_N(a) = -\pi + \operatorname{arctg} \frac{\varepsilon}{\sqrt{a^2 - \varepsilon^2}} \quad (24)$$

kde 2ε je šířka hystereze, u_0 – amplituda relé, $A_N(a)$ – modul kritické charakteristiky, $\varphi_N(a)$ – fáze kritické charakteristiky.

Podmínka (20) představuje komplexní rovnici, kterou pro kmitočtový přenos regulované soustavy ve tvaru:

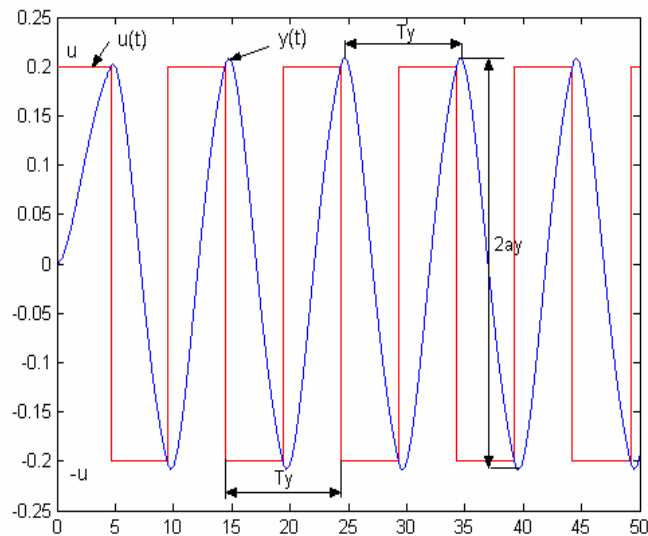
$$G_S(j\omega) = A_S(\omega)e^{j\varphi_S(\omega)} \quad (25)$$

je vhodné nahradit dvěma obecně nelineárními rovnicemi:

$$\begin{aligned} A_S(\omega) &= A_N(a) \\ \varphi_S(\omega) &= \varphi_N(a) \end{aligned} \quad (26)$$

kde $A_S(\omega)$ je modul a $\varphi_S(\omega)$ fáze kmitočtového přenosu regulované soustavy (25), jejichž řešením se obdrží amplituda a_M a úhlový kmitočet ω_M . Pokud tyto získané veličiny jsou kladné a reálné, pak v obvodu vznikne stabilní mezní cyklus s amplitudou na vstupu relé a_M a úhlovým kmitočtem ω_M .

Vznikne-li v obvodu stabilní mezní cyklus, pak ze změřených veličin a_M a ω_M lze na základě soustavy rovnic (26) získat dva neznámé parametry přenosu regulované soustavy $G_S(s)$, viz obr.6.



Obr.6: Průběhy výstupních veličin relé a regulované soustavy

Protože pro $w(t) = 0$ výstupní veličina regulované soustavy $y(t)$, až na znaménko, je vstupní veličinou $e(t)$ do relé, tj. platí:

$$a_M = a_y \quad (27)$$

a úhlový kmitočet ω_M je stejný pro všechny veličiny obvodu a určí se ze vztahu:

$$\omega_M = \frac{2\pi}{T_y} \quad (28)$$

Použití relé s hysterezí je vhodné v případě existence šumu. Doporučuje se, aby šířka hystereze 2ε byla větší než je dvojnásobek amplitudy šumu a amplituda relé u_0 byla taková, aby amplituda výstupních kmitů regulované soustavy a_y byla nejméně trojnásobkem amplitudy šumu.

Metodou relé pro proporcionální regulovanou soustavu aproximovanou přenosem:

$$G_S(s) = \frac{k_1}{(T_i s + 1)^i} \cdot e^{-T_{di}s} \quad (29)$$

je třeba určit časovou konstantu T_i a dopravní zpoždění T_{di} za předpokladu, že koeficient přenosu regulované soustavy k_1 a její řád i jsou známé.

Pak pro regulovanou soustavu (29) platí:

$$G_S(j\omega) = \frac{k_1}{(jT_i\omega + 1)^i} \cdot e^{-jT_{di}\omega} = A_S(\omega)e^{j\varphi_S(\omega)} \quad (30)$$

$$A_S(\omega) = \frac{k_1}{(1 + \omega^2 T_i^2)^{\frac{i}{2}}} \quad (31)$$

$$\varphi_S(\omega) = -[\omega T_{di} + i \cdot \arctg(\omega T_i)] \quad (32)$$

Za předpokladu, že z experimentálně získaného periodického průběhu výstupní veličiny $y(t)$ byla získána amplituda kmitů a_y a perioda T_y (viz.obr.5), na základě vztahů (23), (24), (26), (27), (28), (31) a (32) se pro $a = a_M = a_y$ a $\omega = \omega_M$ dostane:

$$T_i = \frac{T_y}{2\pi} \sqrt[2]{\frac{16k_1^2 u_0^2}{\pi^2 a_y^2} - 1} \quad (33)$$

$$T_{di} = \frac{T_y}{2\pi} \left[\pi - i \cdot \arctg \frac{2\pi T_i}{T_y} - \arctg \frac{\varepsilon}{\sqrt{a_y^2 - \varepsilon^2}} \right] \quad (34)$$

Vzorce (33) a (34) platí pro obecné řešení, kdy i může nabývat hodnoty $1 \div n$

Pro identifikaci systémem druhého řádu se ze vztahů (33) a (34) dostanou vzorce:

$$T_2 = \frac{T_y}{2\pi} \sqrt{\frac{4k_1 u_0}{\pi a_y} - 1} \quad (35)$$

$$T_{d2} = \frac{T_y}{2y} \left[\pi - 2 \cdot \text{arctg} \frac{2\pi T_2}{T_y} - \text{arctg} \frac{\varepsilon}{\sqrt{a_y^2 - \varepsilon^2}} \right] \quad (36)$$

Výsledkem identifikace pomocí relé je tedy přenos řízeného systému ve tvaru:

$$G_S(s) = \frac{k_1}{(Ts + 1)^2} \cdot e^{-T_d s} \quad (37)$$

kde hodnoty k_1 , T , T_d jsou dány vzorci (35), (36) a k_1 musí být známo.

Přenos (37) se pak využívá pro návrh regulátorů ve smyslu vztahů (15) ÷ (18). Jako volný pro uživatele měnitelný parametr (skalární) lze využít hodnotu čísla $m > 0$. Toto číslo přirozeně mění (a to nelineárně) parametry PID regulátoru (18) a samozřejmě i vlastnosti celého regulačního obvodu.

3.2 Identifikace přenosu 2. řádu s integračním členem

Tato metoda je určitým rozšířením přístupu popsaného v kapitole 3.1. Tato metoda může být použita ve dvou variantách a to s integračním členem před relé a za relé. Obě tyto varianty je nutno rozlišovat.

Pro obě zapojení má podmínka vzniku stabilního cyklu tvar :

$$\frac{1}{j\omega} G_S(j\omega) = - \frac{1}{G_N(a)} \quad (38)$$

a může být zastoupena rovnicemi:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\omega} A_S(\omega) &= A_N(a) \\ \varphi_S(\omega) - \frac{\pi}{2} &= \varphi_N(a) \end{aligned} \quad (39)$$

Pokud řešení, tj. veličiny $a = a_M$ a $\omega = \omega_M$, jsou reálná a kladná, pak v obvodě vznikne stabilní mezní cyklus s úhlovým kmitočtem ω_M a amplitudou a_M na vstupu relé.

Pokud bude integrační člen zapojen na výstupu relé platí $w(t) = 0$ výstupní veličina regulované soustavy $y(t)$ je, až na znaménko vstupní veličinou $e(t)$ do relé, a proto platí $a_M = a_y$

Metodou relé s integračním členem zapojeným na jeho výstupu je třeba u proporcionální kmitavé soustavy 2.řádu

$$G_S(s) = \frac{k_1}{T_0^2 s^2 + 2\xi_0 T_0 s + 1} \quad (40)$$

určit časovou konstantu T_0 a koeficient tlumení ξ_0 za předpokladu, že koeficient přenosu regulované soustavy k_1 je známý.

Pro regulovanou soustavu (40) platí:

$$G_S(j\omega) = \frac{k_1}{(jT_0\omega + 1)^2} \cdot e^{-jT_0\omega} = A_S(\omega)e^{j\varphi_S(\omega)} \quad (41)$$

$$A_S(\omega) = \frac{k_1}{\sqrt{(1 - \omega^2 T_0^2)^2 + 4\xi_0^2 \omega^2 T_0^2}} \quad (42)$$

$$\varphi_S(\omega) = \begin{cases} -\operatorname{arctg} \frac{2\xi_0 \omega T_0}{1 - \omega^2 T_0^2} & \text{pro } 0 \leq \omega < \frac{1}{T_0} \\ -\frac{\pi}{2} & \text{pro } \omega = \frac{1}{T_0} \\ -\pi + \operatorname{arctg} \frac{2\xi_0 \omega T_0}{\omega^2 T_0^2 - 1} & \text{pro } \omega > \frac{1}{T_0} \end{cases} \quad (43)$$

Pro relé bez hystereze s integračním členem platí:

$$\omega_M = \omega_{-\frac{\pi}{2}} = \frac{1}{T_0} \Rightarrow T_0 = \frac{T_y}{2\pi}$$

(44)

Na základě vztahů (23),(42),(44) a první rovnice (39) se obdrží

$$\xi_0 = \frac{k_1 T_y u_0}{\pi^2 a_y}$$

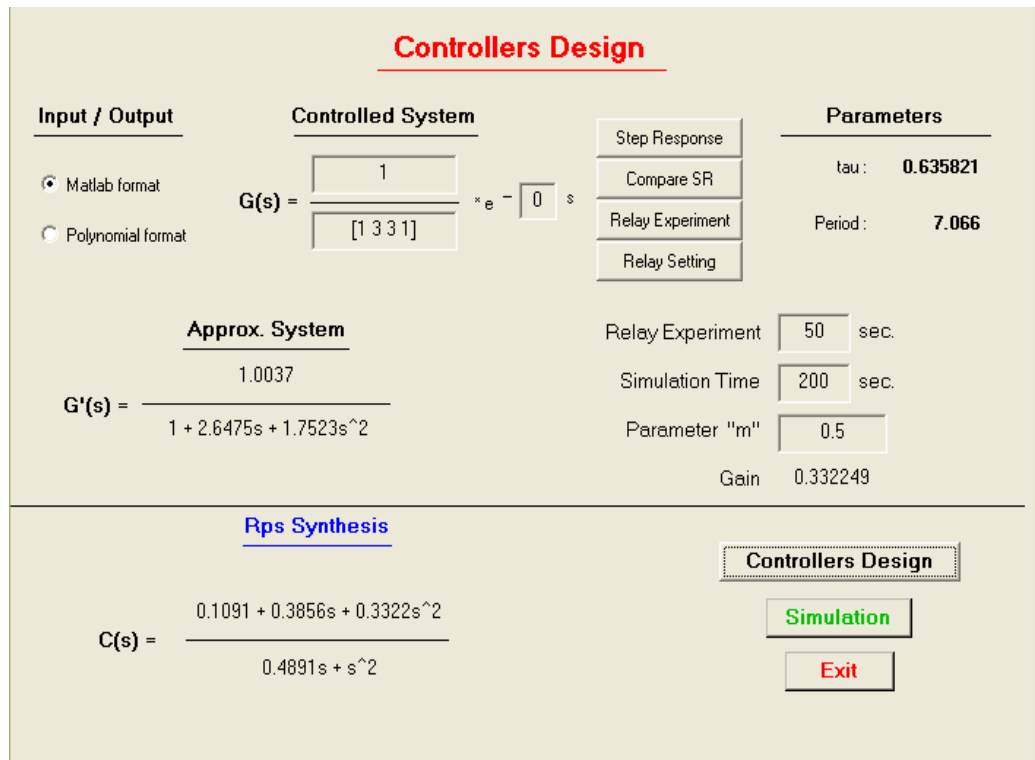
(45)

Z experimentálně zjištěných hodnot a_y a T_y lze pomocí vztahů (44) a (45) určit hledané parametry T_0 a ξ_0 přenosu G_s .

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 POPIS PROGRAMOVÉHO PROSTŘEDÍ

Pro automatické provedení experimentu s relé ve zpětné vazbě, pro výpočet parametrů regulátoru a následnou simulaci regulačního obvodu byl vytvořen programový systém v prostředí Matlab + Simulink. Úvodní menu okno tohoto programu ilustruje obr.7



Obr.7: Programové prostředí

4.1 Složení programového prostředí

Programové prostředí pro výpočet kritických parametrů a pro identifikaci různých systémů, bylo navrženo tak, aby bylo přehledné a aby ho byl schopen používat člověk, který dané problematice nemusí rozumět. Popis funkcí programu viz. níže.

Input/Output

Program má dvě možnosti zadávání systému: formát Matlabu, kdy se systém zapíše následujícím způsobem do hranatých závorek [1 3 3 1] a polynomiální způsob zadávání např. $(s + 1)^3$

Controlled System

Zde se zadává druh přenosu ke kterém má být vypočten regulátor. Lze zadávat i systémy s dopravním zpožděním. Jako výchozí přenos je nastaven $G(s) = \frac{1}{(s+1)^3} e^{-0s}$

Step response

Tlačítko slouží k vykreslení přechodové charakteristiky zadaného přenosu.

Compare SR

Slouží k porovnání přechodových charakteristik původního přenosu, aproximovaného přenosu bez a s dopravním zpožděním. Tato možnost se zpřístupní po provedení relay experiment.

Relay Experiment

Provede rozkmitání systému pomocí relé a následně vypočte kritické parametry aproximovaného přenosu jako jsou zesílení, dopravní zpoždění a všechny potřebné výpočty k identifikaci systému.

Relay Setting

Slouží k nastavení parametrů relé kterým provádíme identifikaci. Zde se dá nastavit horní a dolní mez relé a jeho hystereze.

Parameters

Existují zde dva výsledky výpočtu. Dopravní zpoždění aproximovaného přenosu a určení periody kmitání při provedení identifikace.

Approx. System

Zde se zobrazí výsledný aproximační přenos druhého řádu po provedení experimentu.

Relay Experiment

Zadávání času reléového experimentu. Standartně 50 sec.

Simulation Time

Zadávání času simulace. Standartně je nastaven 200 sec.

Parameter "m"

Zde se zadává parametr m na kterém závisí výpočet parametrů regulátoru a tím i následné regulace systému. Možností změny můžem buď zlepšovat, nebo zhoršovat průběh regulace.

Gain

Zde se spočítá hodnota zesílení regulátoru, která plyne z vyváženého nastavení. Hodnota tohoto zesílení se zobrazí po provedení výpočtu regulátoru.

Rps Synthesis

Slouží k zobrazení nastavení výsledného PID regulátoru. PID regulátor je vypočten po stlačení tlačítka **Controllers Design**.

Controllers Design

Používá se k výpočtu PID regulátorů. Po stisknutí provede výpočet PID regulátoru k aproximovanému přenosu druhého řádu.

Simulation

Provede nastavení všech vypočtených hodnot během identifikace a otevře okno k provedení simulace. Výsledná simulace je zobrazena v grafu.

Exit

Ukončení programu.

5 SIMULAČNÍ EXPERIMENTY

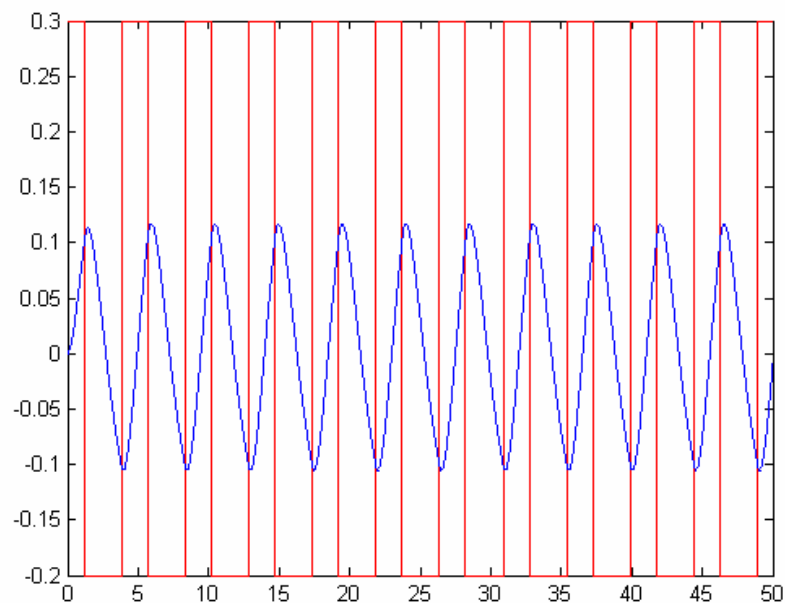
5.1 Systémy 2. řádu

5.1.1 Příklad 1

Jako první příklad byl zadán následující přenos druhého řádu:

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^2} \quad (46)$$

Relé bylo nastaveno na horní mez $h_h = 0,3$, dolní mez $h_d = -0,2$ a hystereze $\varepsilon = 0,1$. Průběh reléového experimentu je uveden na obr.8.

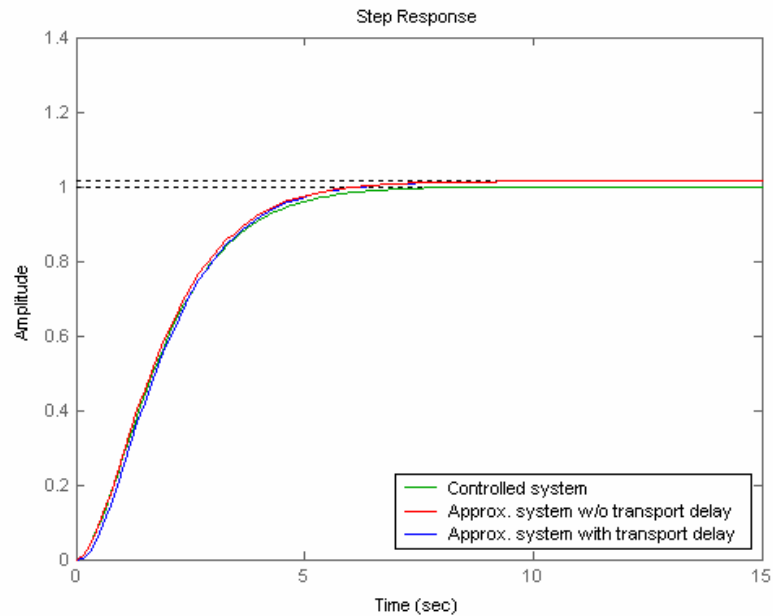


Obr.8: Relé experiment přenosu (46)

Z reléového experimentu byl spočítán následující aproximační přenos:

$$\tilde{G}(s) = \frac{1,014}{0,9837s^2 + 1,9836s + 1} \cdot e^{-0,095s} \quad (47)$$

Zobrazení přechodových charakteristik původního přenosu a aproximovaného přenosu bez a s dopravním zpožděním:



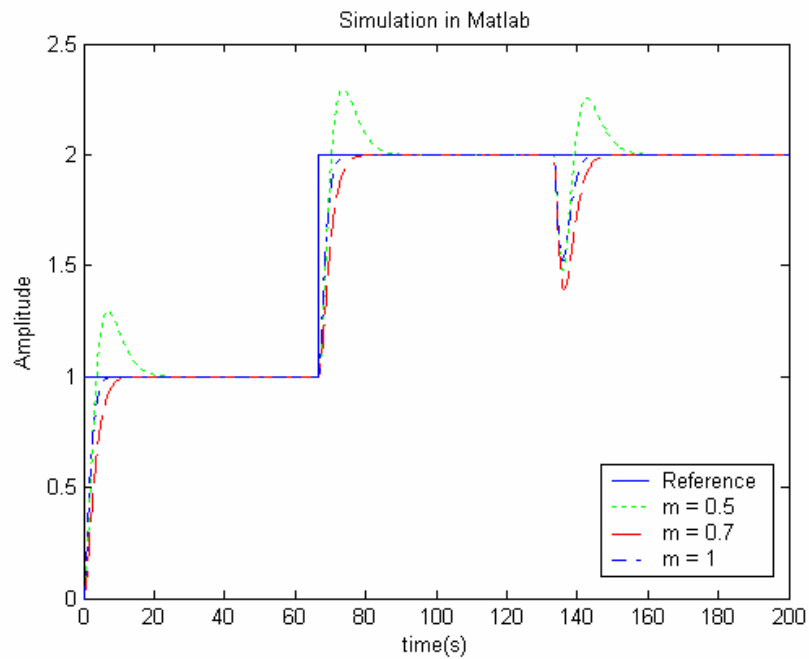
Obr.9: Přechodové charakteristiky přenosu (46) a (47)

K aproximovanému přenosu bez dopravního zpoždění byl spočítán následující regulátor při $m = 0,7$:

$$C(s) = \frac{0,3332s^2 + 0,5583s + 0,2329}{s^2 + 0,7835s}$$

(48)

Po zapojení regulátoru měla simulace následující průběh:



Obr.10: Průběh simulace přenosu (46)

Z obr.10 je možno vidět, že při $m = 0,5$ je regulátor téměř k nepoužití, protože má překmit a podkmit. Nejlepší regulace je zaznamenána pro $m = 1$.

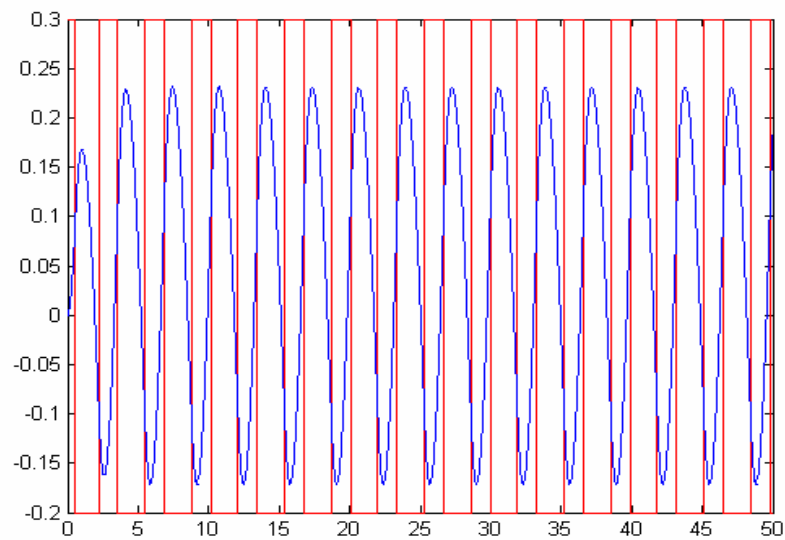
5.1.2 Příklad 2

Jako druhý příklad byl zadán následující přenos druhého řádu:

$$G(s) = \frac{7,5}{3s^2 + 3s + 1}$$

(49)

Relé bylo nastaveno na horní mez $h_h = 0,3$, dolní mez $h_d = -0,2$ a hysterese $\varepsilon = 0,1$. Průběh reléového experimentu je uveden na obr.11.



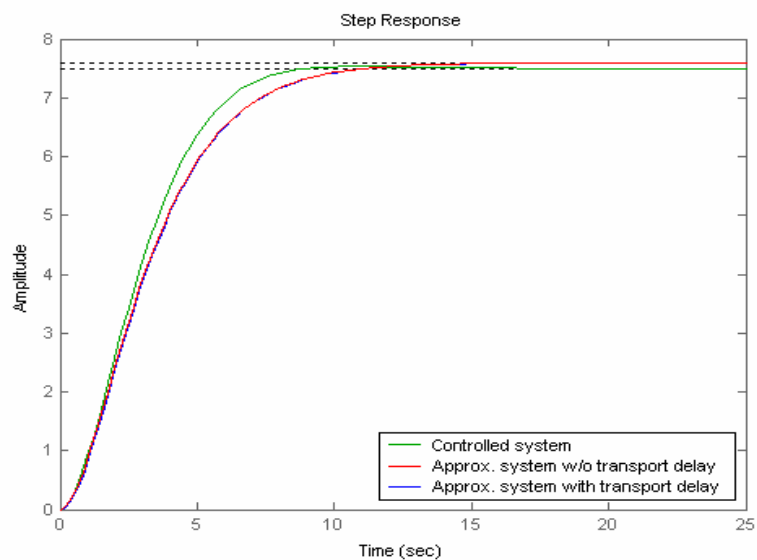
Obr. 11: Relé experiment přenosu (49)

Z reléového experimentu byl spočítán následující aproximační přenos:

$$\tilde{G}(s) = \frac{7,593}{3,0379s^2 + 3,4859s + 1} \cdot e^{-0,035s}$$

(50)

Zobrazení přechodových charakteristik původního přenosu a aproximovaného přenosu bez a s dopravním zpožděním:



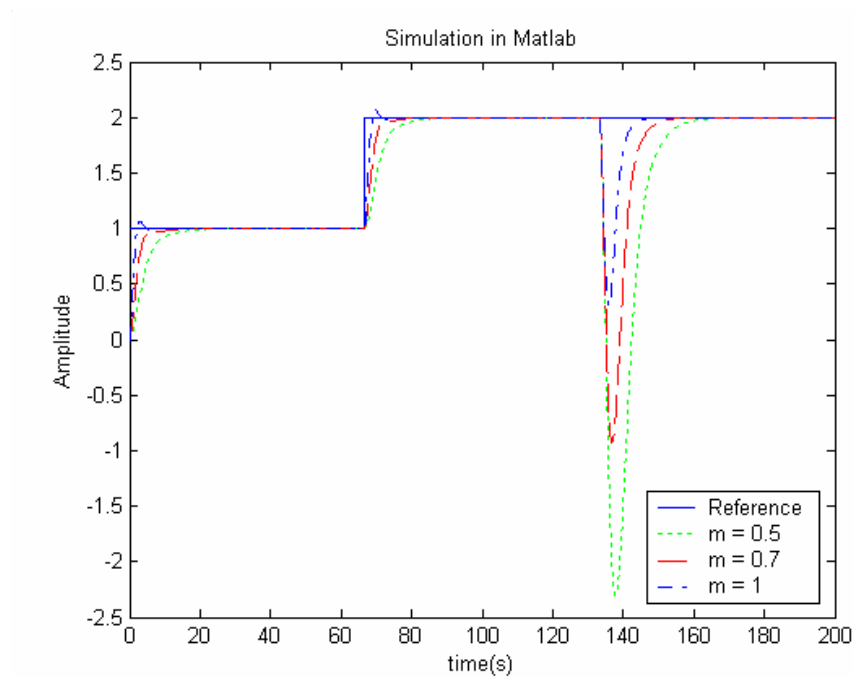
Obr.12: Přechodové charakteristiky přenosu (49) a (50)

K aproximovanému přenosu bez dopravního zpoždění byl spočítán následující regulátor při $m = 1$:

$$C(s) = \frac{0,9593s^2 + 1,2247s + 0,4001}{s^2 + 2,8525s}$$

(51)

Po zapojení regulátoru měla simulace následující průběh:



Obr.13: Průběh simulace přenosu (49)

Z obr.13 je možno vidět, že navržený regulátor pro $m = 1$ má nejlepší průběh regulace. Nejhorší průběh regulace je pro $m = 0,5$.

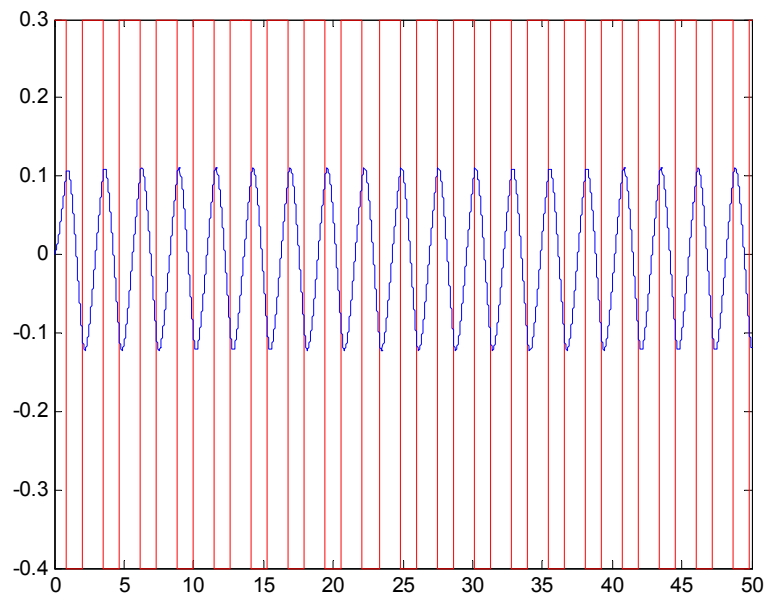
5.1.3 Příklad 3

Jako třetí příklad byl zadán následující přenos druhého řádu:

$$G(s) = \frac{2}{s^2 + 3s + 2}$$

(52)

Relé bylo nastaveno na horní mez $h_h = 0,3$, dolní mez $h_d = -0,4$ a hystereze $\varepsilon = 0,1$. Průběh reléového experimentu je uveden na obr.14.



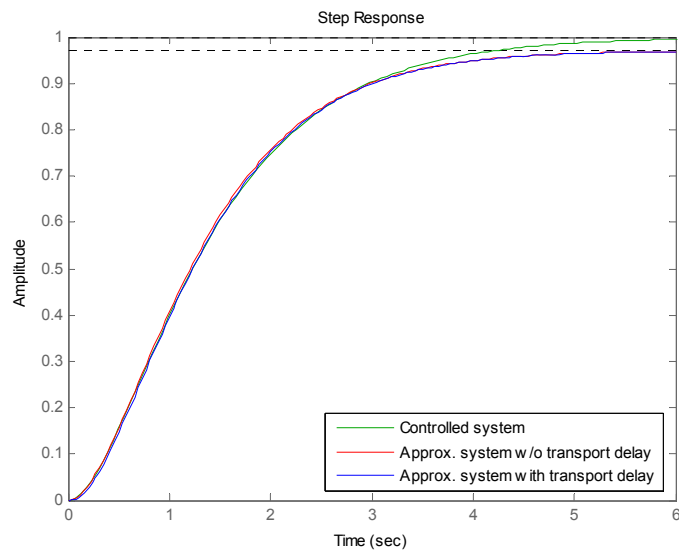
Obr.14: Relé experiment přenosu (50)

Z reléového experimentu byl spočítán následující aproximační přenos:

$$\widetilde{G}(s) = \frac{0,97024}{0,4870s^2 + 1,3957s + 1} e^{-0,0231s}$$

(53)

Zobrazení přechodových charakteristik původního přenosu a aproximovaného přenosu bez a s dopravním zpožděním:



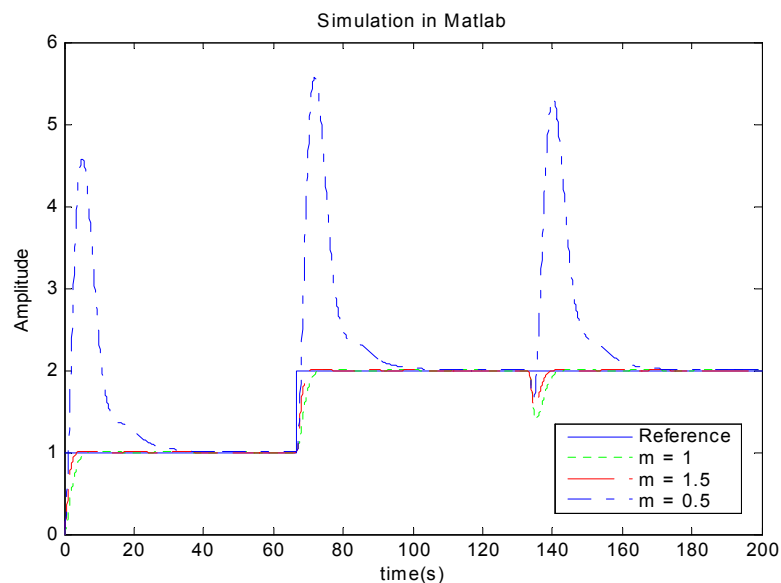
Obr.15: Přechodové charakteristiky přenosu (52) a (53)

K aproximovanému přenosu bez dopravního zpoždění byl spočítán následující regulátor při $m = 1$:

$$C(s) = \frac{0,3496s^2 + 0,8389s + 0,5019}{s^2 + 1,1340s}$$

(54)

Po zapojení regulátoru měla simulace následující průběh:



Obr.16: Průběh simulace přenosu (52)

Z obr.16 je možno vidět, že při $m = 0,5$ je regulátor téměř k nepoužití, protože má docela velký překmit. Nejlepší regulace je zaznamenána pro $m = 1,5$, při $m = 1$ je podkmit jen o málo horší.

5.2 Systémy vyšších řádů

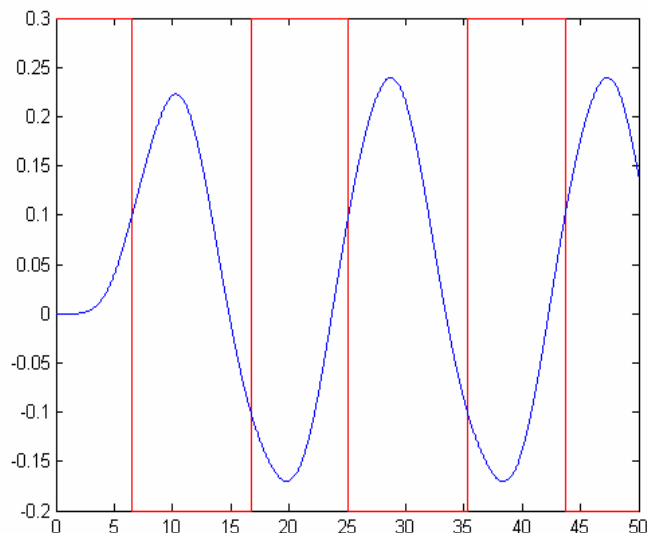
5.2.1 Příklad 4

Jako první příklad vyššího řádu byl zadán přenos:

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^8}$$

(55)

Relé bylo nastaveno na horní mez $h_h = 0,3$, dolní mez $h_d = -0,2$ a hystereze $\varepsilon = 0,1$. Průběh reléového experimentu je uveden na obr.17.



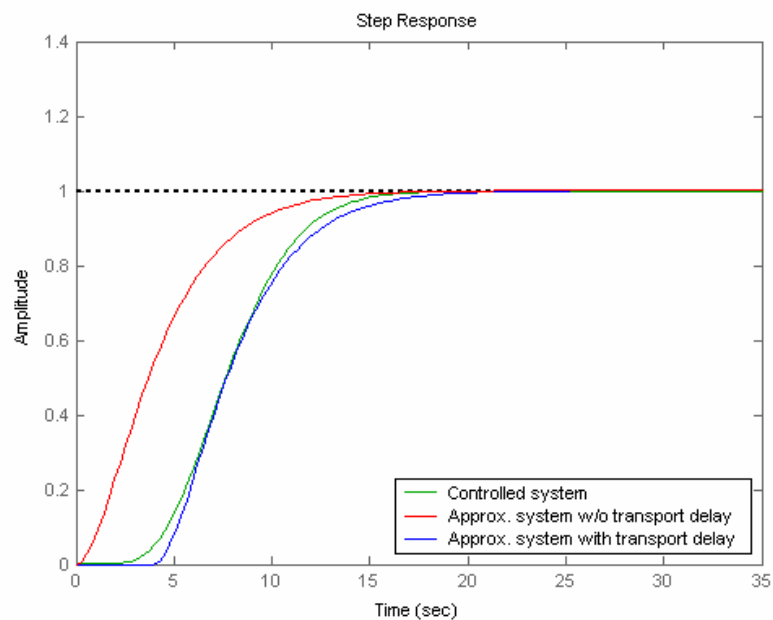
Obr.17: Relé experiment přenosu (55)

Z reléového experimentu byl spočítán následující aproximační přenos:

$$\widetilde{G}(s) = \frac{1,0007}{4,8627s^2 + 4,4103s + 1} e^{-4s}$$

(56)

Zobrazení přechodových charakteristik původního přenosu a aproximovaného přenosu bez a s dopravním zpožděním:



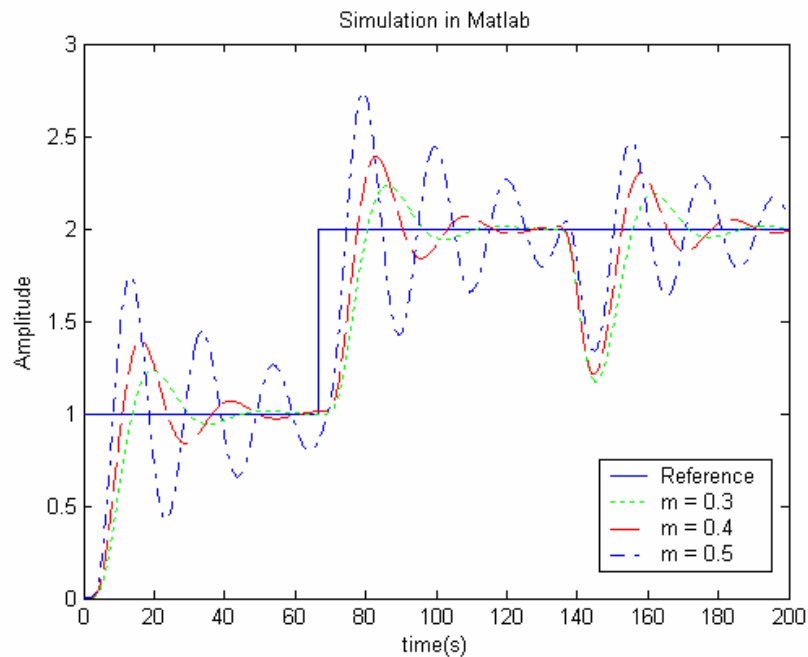
Obr.18: Přechodové charakteristiky přenosu (55) a (56)

K aproximovanému přenosu bez dopravního zpoždění byl spočítán následující regulátor při $m = 0,4$:

$$C(s) = \frac{0,6113s^2 + 0,5514s + 0,6113}{s^2 + 0,6930s}$$

(57)

Po zapojení regulátoru měla simulace následující průběh:



Obr.19: Průběh simulace přenosu (55)

Z průběhu simulace je možno říct, že nejlepší průběh byl zaznamenán pro nastavení $m = 0,3$. Při $m = 0,4$ se systém začíná rozkmitávat. Při dalším zvětšování m začíná být systém silně nestabilní.

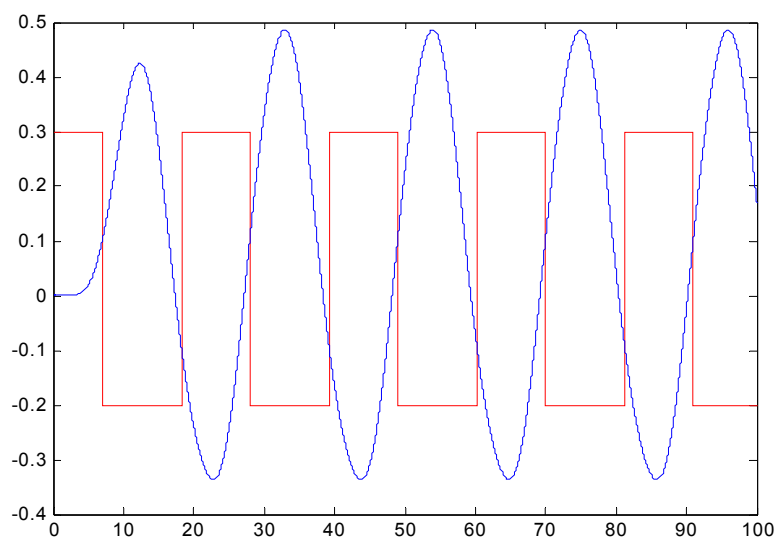
5.2.2 Příklad 5

Jako druhý příklad vyššího řádu byl zadán přenos:

$$G(s) = \frac{2}{(s+1)^{10}}$$

(58)

Relé bylo nastaveno na horní mez $h_n = 0,3$, dolní mez $h_d = -0,2$ a hystereze $\varepsilon = 0,1$. Průběh reléového experimentu je uveden na obr.20.



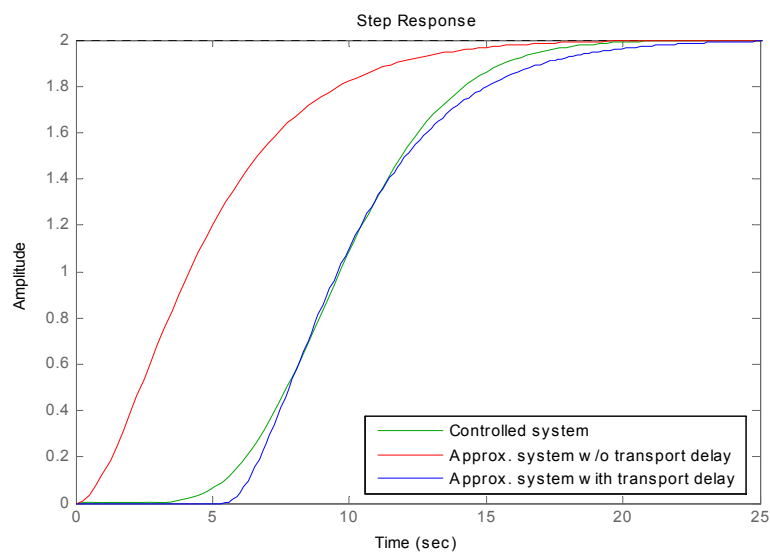
Obr.20: Relé experiment přenosu (58)

Z reléového experimentu byl spočítán následující aproximační přenos:

$$\widetilde{G}(s) = \frac{2,0008}{6,1250s^2 + 4,9498s + 1} \cdot e^{-5,42261s}$$

(59)

Zobrazení přechodových charakteristik původního přenosu a aproximovaného přenosu bez a s dopravním zpožděním:



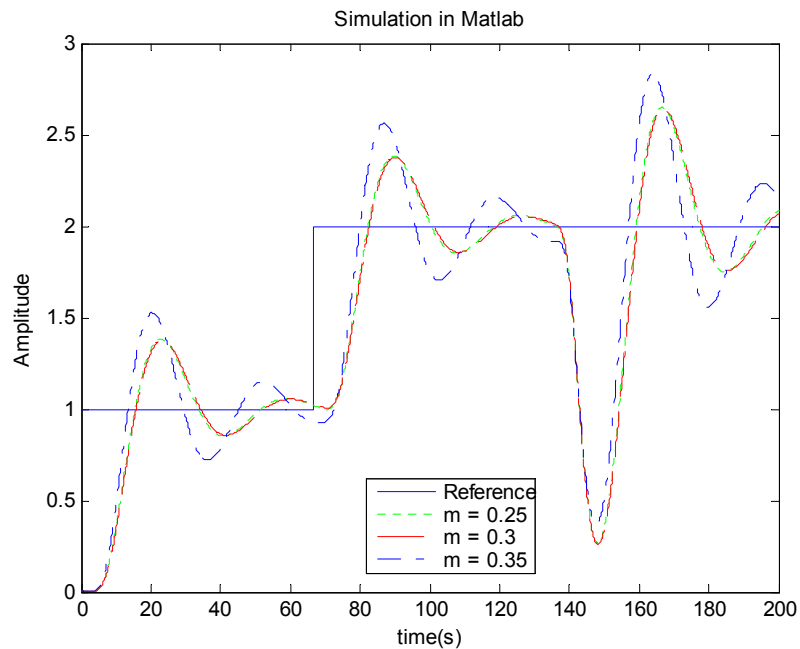
Obr.21: Přechodové charakteristiky přenosu (58) a (59)

K aproximovanému přenosu bez dopravního zpoždění byl spočítán následující regulátor při $m = 0,3$:

$$C(s) = \frac{0,1838s^2 + 0,1348s + 0,0248}{s^2 + 0,3919s}$$

(60)

Po zapojení regulátoru měla simulace následující průběh:



Obr.22: Průběh simulace přenosu (58)

Z průběhu simulace je možno říct, že nejlepší průběh byl zaznamenán pro nastavení $m = 0,3$. Při $m = 0,35$ začíná být systém nestabilní. Při dalším zvětšování m začíná být systém silně nestabilní.

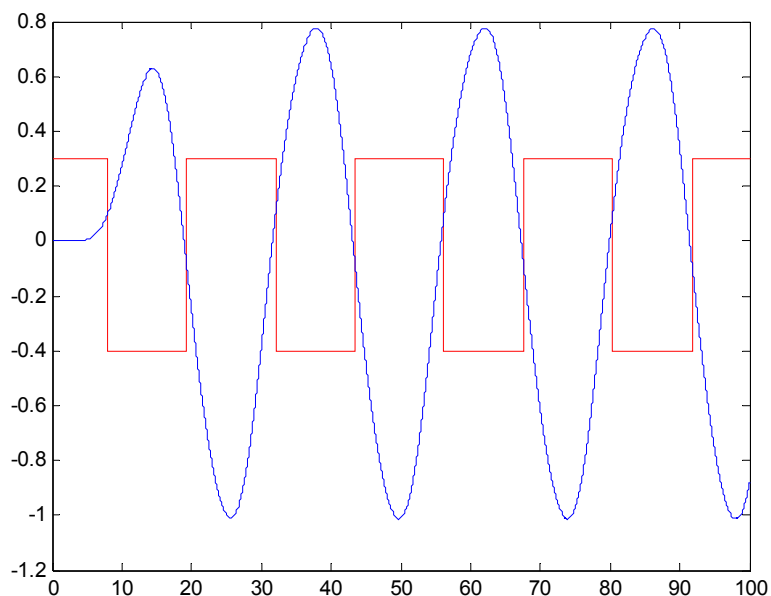
5.2.3 Příklad 6

Jako druhý příklad vyššího řádu byl zadán přenos:

$$G(s) = \frac{3}{(s+1)^{12}}$$

(61)

Relé bylo nastaveno na horní mez $h_h = 0,3$, dolní mez $h_d = -0,4$ a hysterese $\varepsilon = 0,1$. Průběh reléového experimentu je uveden na obr.23.



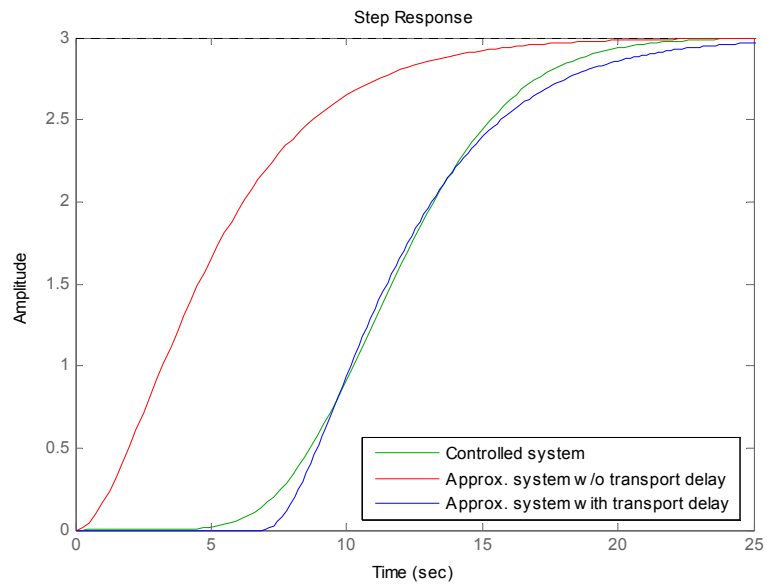
Obr.23: Relé experiment přenosu (61)

Z reléového experimentu byl spočítán následující aproximační přenos:

$$\widetilde{G}(s) = \frac{2,9983}{7,3081s^2 + 5,4067s + 1} e^{-6,9353s}$$

(62)

Zobrazení přechodových charakteristik původního přenosu a aproximovaného přenosu bez a s dopravním zpožděním:



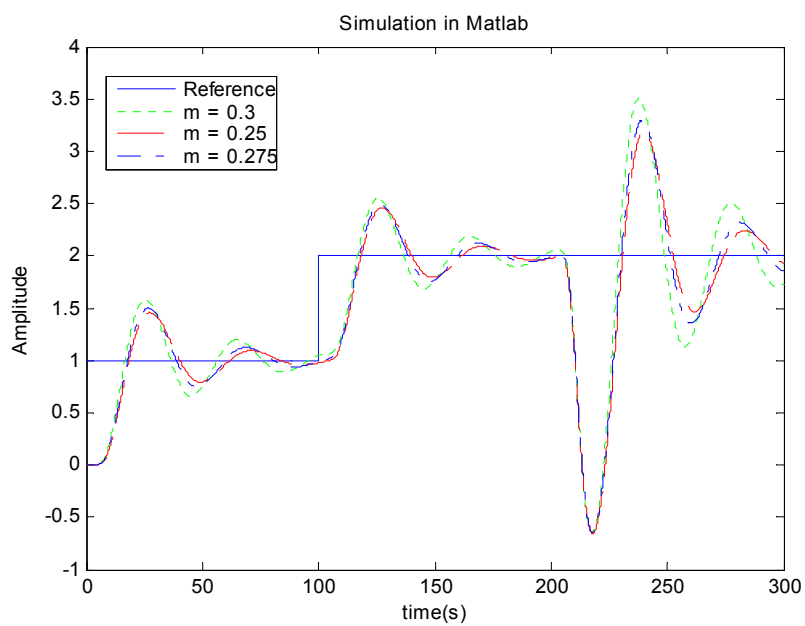
Obr.24: Přechodové charakteristiky přenosu (61) a (62)

K aproximovanému přenosu bez dopravního zpoždění byl spočítán následující regulátor při $m = 0,3$:

$$C(s) = \frac{0,1529s^2 + 0,1098s + 0,00197}{s^2 + 0,4602s}$$

(63)

Po zapojení regulátoru měla simulace následující průběh:



Obr.25: Průběh simulace přenosu (61)

Z průběhu simulace je možno říct, že nejlepší průběh byl zaznamenán pro nastavení $m = 0,25$. Při větším zvětšování, nebo zmenšování začíná být systém nestabilní.

5.3 Systémy s dopravním zpožděním

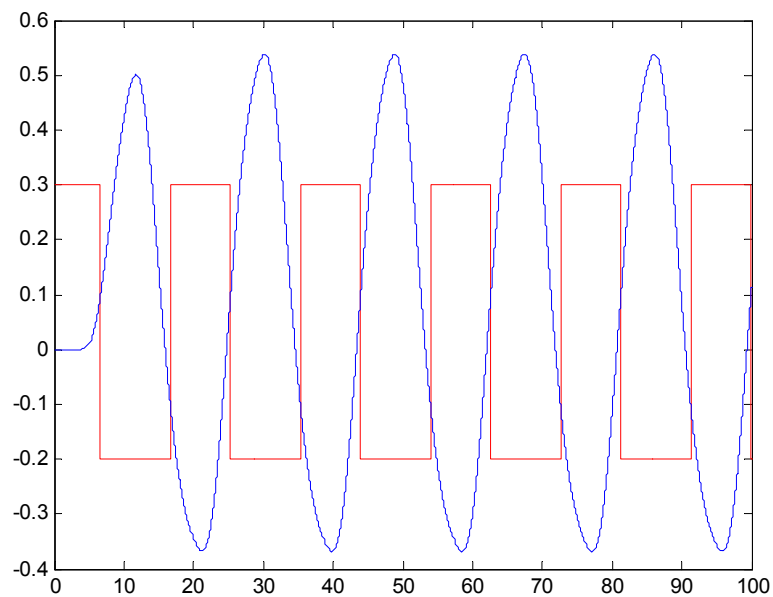
5.3.1 Příklad 7

Jako první příklad systému s dopravním zpožděním byl zadán přenos:

$$G(s) = \frac{2}{(s+1)^6} \cdot e^{-3s}$$

(64)

Relé bylo nastaveno na horní mez $h_h = 0,3$, dolní mez $h_d = -0,2$ a hystereze $\varepsilon = 0,1$. Průběh reléového experimentu je uveden na obr.26.



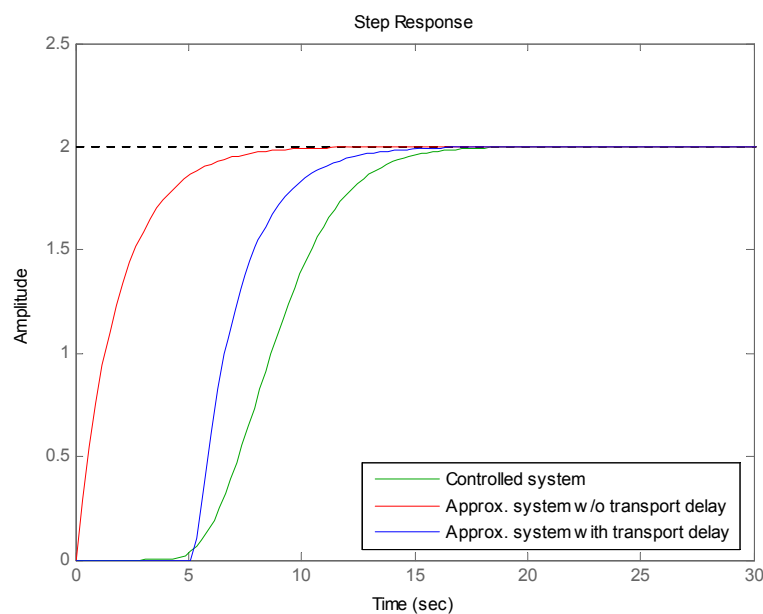
Obr.26: Relé experiment přenosu (64)

Z reléového experimentu byl spočítán následující aproximační přenos:

$$\widetilde{G}(s) = \frac{2,0008}{3,5762s^2 + 3,7822s + 1} \cdot e^{-5,2977s}$$

(65)

Zobrazení přechodových charakteristik původního přenosu a aproximovaného přenosu bez a s dopravním zpožděním:



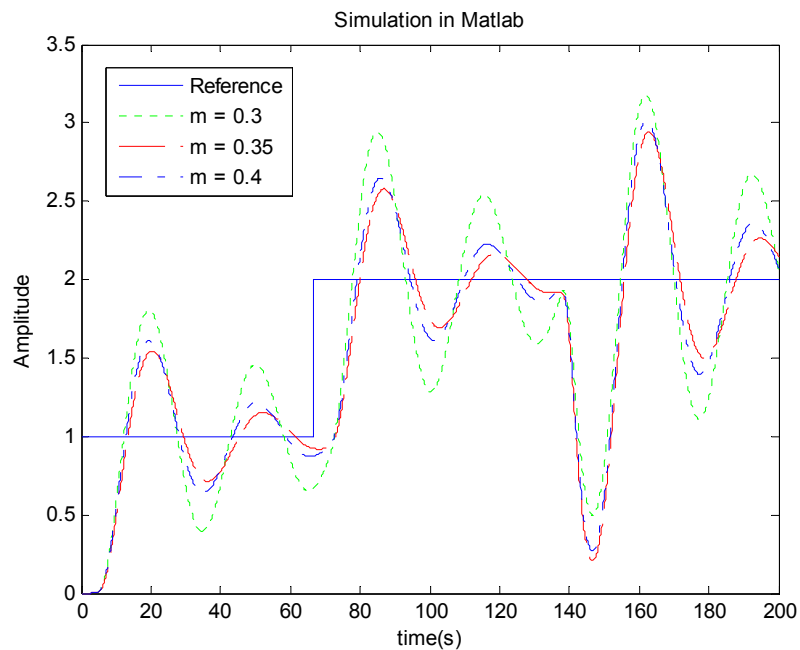
Obr.27: Přechodové charakteristiky přenosu (64) a (65)

K aproximovanému přenosu bez dopravního zpoždění byl spočítán následující regulátor při $m = 0,35$:

$$C(s) = \frac{0,1667s^2 + 0,1354s + 0,0268}{s^2 + 0,3424s}$$

(66)

Po zapojení regulátoru měla simulace následující průběh:



Obr.28: Průběh simulace přenosu (64)

Z průběhu simulace je možno říct, že nejlepší průběh byl zaznamenán pro nastavení $m = 0,35$. Při zvětšování m začíná stabilita systému kolísat. U snižování hodnoty m , systém rychle nabývá na nestabilitě.

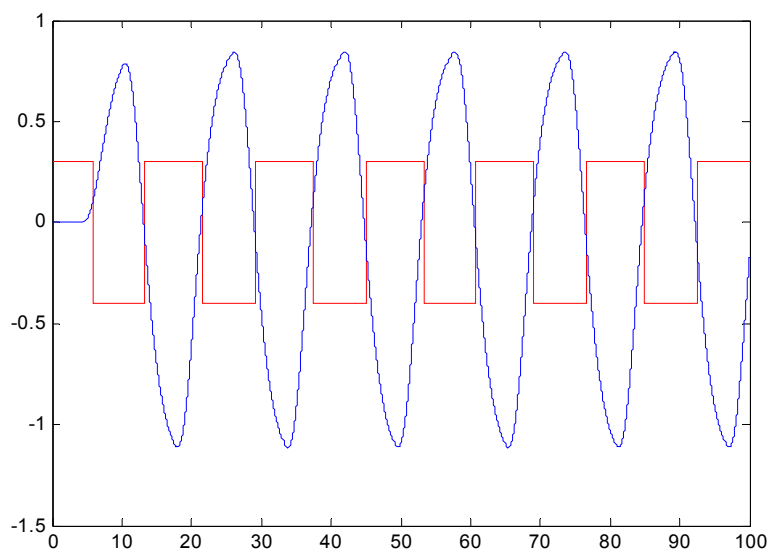
5.3.2 Příklad 8

Jako druhý příklad systému s dopravním zpožděním byl zadán přenos:

$$G(s) = \frac{3}{(s+1)^4} \cdot e^{-4s}$$

(67)

Relé bylo nastaveno na horní mez $h_h = 0,3$, dolní mez $h_d = -0,4$ a hystereze $\varepsilon = 0,1$. Průběh reléového experimentu je uveden na obr.29.



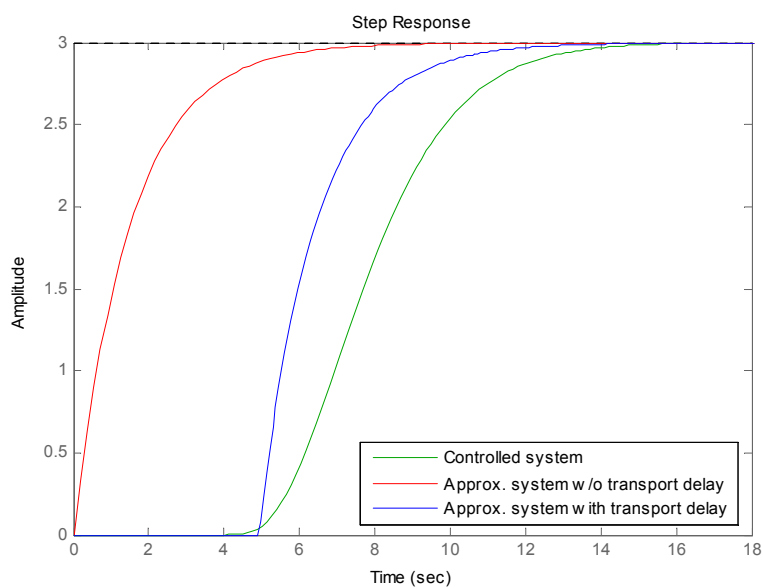
Obr.29: Relé experiment přenosu (67)

Z reléového experimentu byl spočítán následující aproximační přenos:

$$\widetilde{G}(s) = \frac{2,9976}{2,3121s^2 + 3,0411s + 1} \cdot e^{-4,91327s}$$

(68)

Zobrazení přechodových charakteristik původního přenosu a aproximovaného přenosu bez a s dopravním zpožděním:



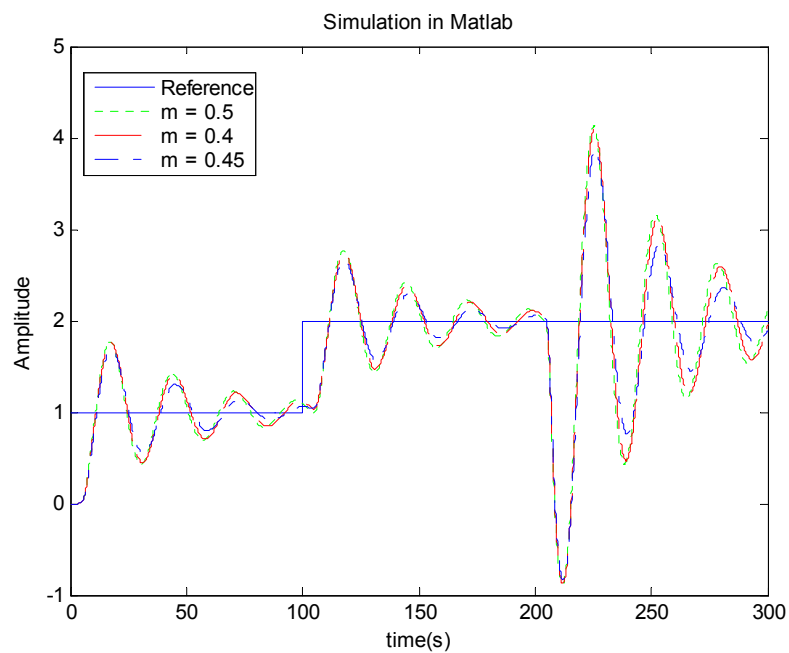
Obr.30: Přechodové charakteristiky přenosu (67) a (68)

K aproximovanému přenosu bez dopravního zpoždění byl spočítán následující regulátor při $m = 0,5$:

$$C(s) = \frac{0,1287s^2 + 0,1572s + 0,00482}{s^2 + 0,6847s}$$

(69)

Po zapojení regulátoru měla simulace následující průběh:



Obr.31: Průběh simulace přenosu (67)

Z průběhu simulace je možno říct, že nejlepší průběh byl zaznamenán pro nastavení $m = 0,45$. Při sebemenším zvětšení či zmenšení začíná být systém silně nestabilní.

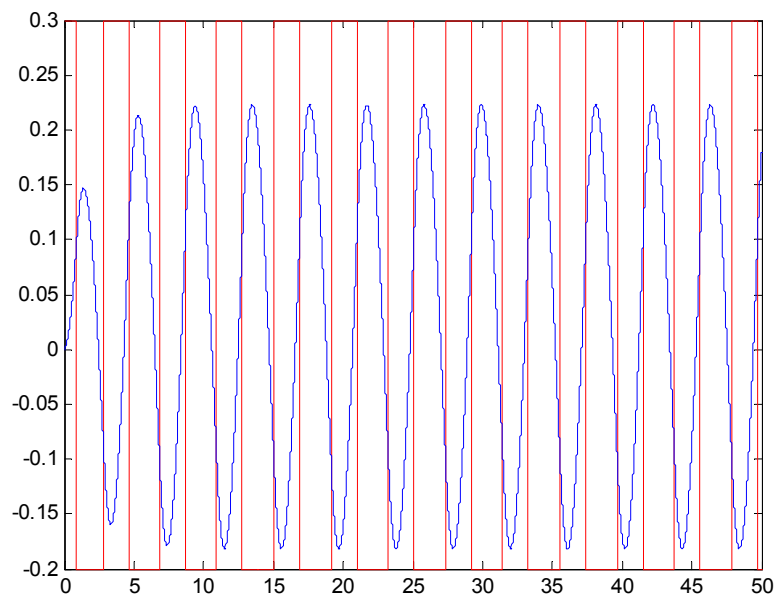
5.4 Systémy kmitavé

5.4.1 Příklad 9

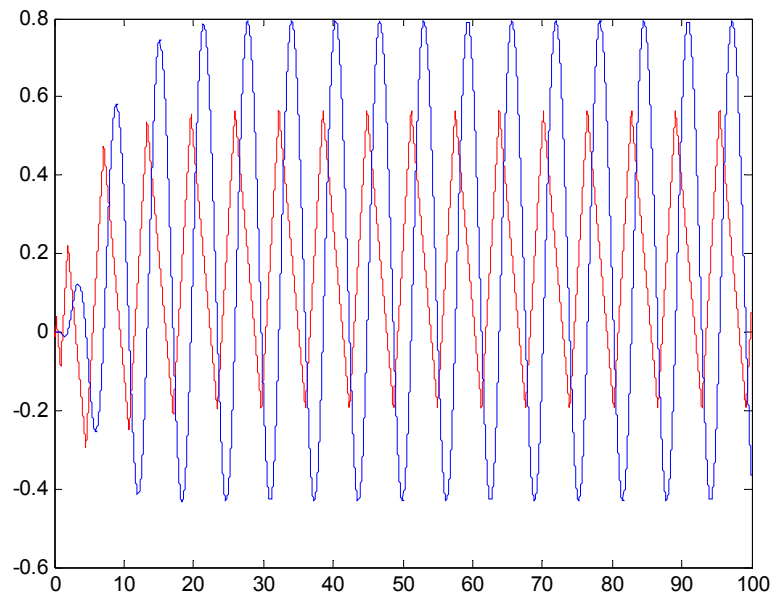
Příklad je ilustrací rozdílu při odhadu kmitavým nebo nekmitavým systémem druhého řádu, tedy podle metodiky kap. 3.2 a metody bez integračního členu z kap. 3.1. K ověření vhodnosti metody byl zadán přenos s kmitavou odezvou:

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 0,5s + 1} \quad (70)$$

Relé bylo nastaveno na horní mez $h_h = 0,3$, dolní mez $h_d = -0,2$ a hystereze $\varepsilon = 0,1$. U experimentu s integračním členem byla hystereze nastavena na nulovou hodnotu. Průběh reléového experimentu je uveden na Obr.33 pro experiment, kde je použit integrační člen na výstupu z relé a na Obr. 32, kde je průběh relé bez integračního členu.



Obr.32: Relé experiment přenosu (70) bez použití integrátoru



Obr.33: Relé experiment přenosu (70) s použitím integrátoru

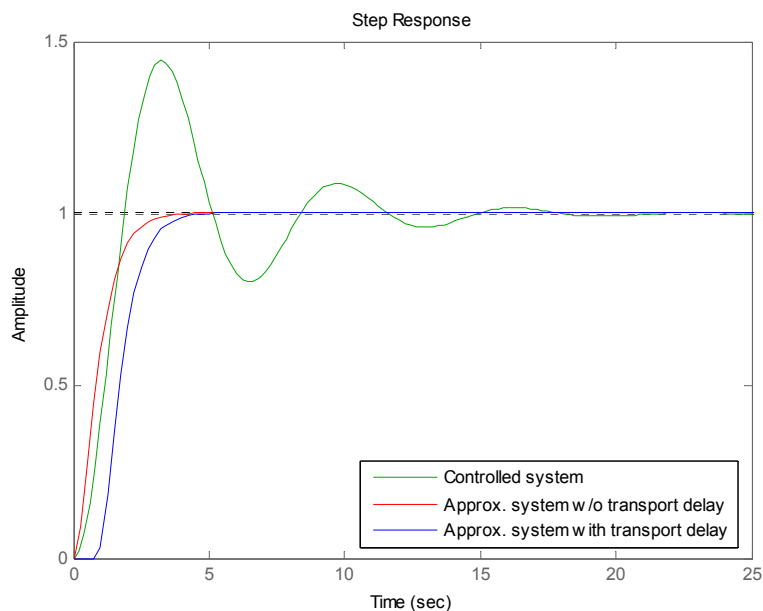
Z reléového experimentu byl spočítán následující aproximační přenos pro přenos s integračním členem (72) a bez integračního členu (71):

$$\widetilde{G}(s) = \frac{1,003}{0,2460s^2 + 0,9920s + 1} \cdot e^{-0,866s} \quad (71)$$

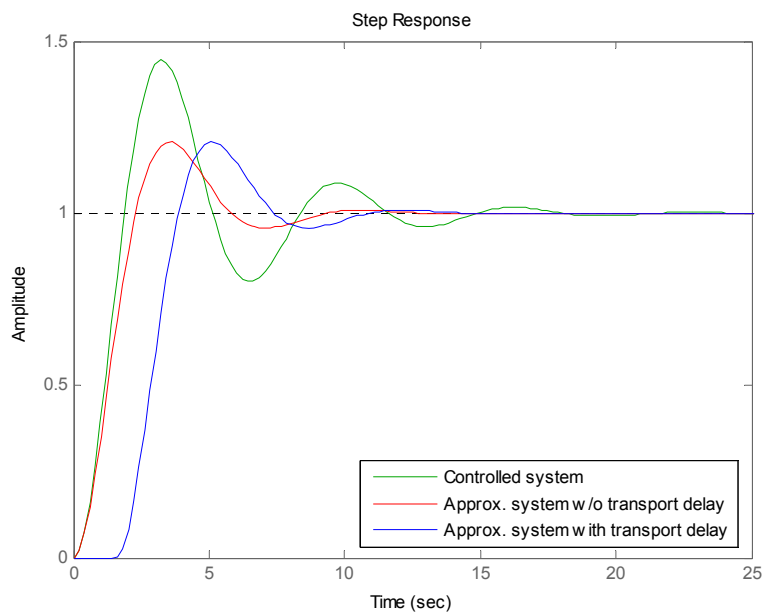
$$\widetilde{G}(s) = \frac{1,0005}{1,0102s^2 + 0,9008s + 1} \cdot e^{-1,578s} \quad (72)$$

Jak je možno vidět ze spočítaných přenosů, liší se od sebe proporcionalní a integrační složky, které jsou počítány dle jiného kritéria.

Zobrazení přechodových charakteristik původního přenosu a aproximovaného přenosu bez a s dopravním zpožděním pro systém bez integračního členu Obr.34 a s integračním členem Obr. 35:



Obr.34: Přechodové charakteristiky přenosu (70) a (71)



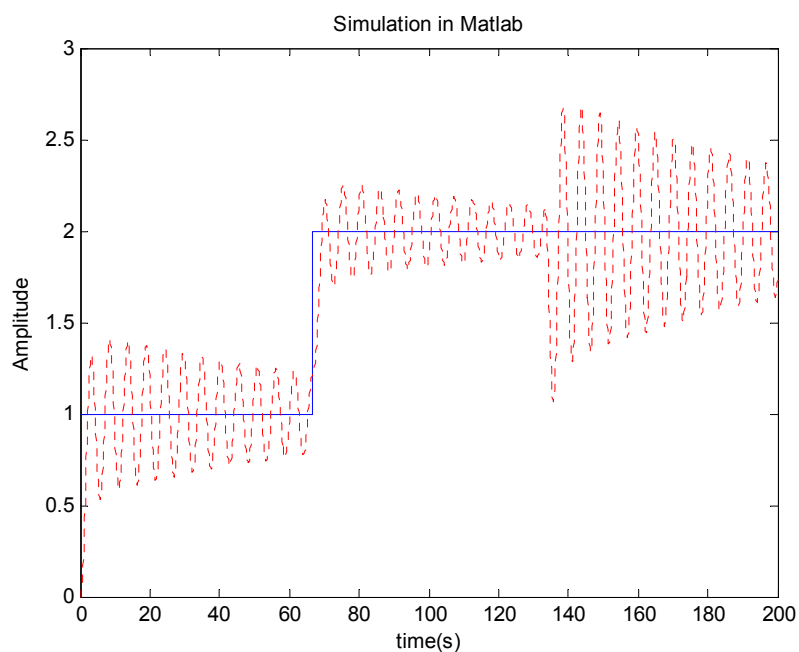
Obr.35: Přechodové charakteristiky přenosu (70) a (72)

K aproximovanému přenosu bez dopravního zpoždění (71) bez použití integračního členu byl spočítán následující regulátor (73) při $m = 1,6$ a pro systém s integračním členem byl spočítán z přenosu (72) regulátor (74) při $m = 1,5$:

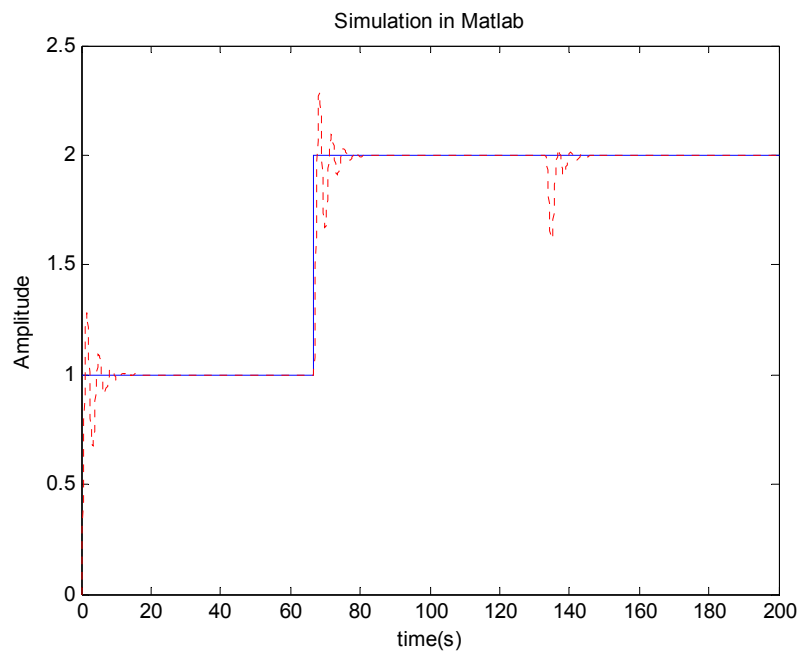
$$C(s) = \frac{0,4287s^2 + 1,6579s + 1,6073}{s^2 + 2,3676s} \quad (73)$$

$$C(s) = \frac{0,4203s^2 + 0,7711s + 0,354}{s^2 + 2,5814s} \quad (74)$$

Po zapojení regulátorů měly simulace následující průběh:



Obr.36: Průběh simulace přenosu (70) bez použití integrátoru



Obr.37: Průběh simulace přenosu (70) s použitím integrátoru

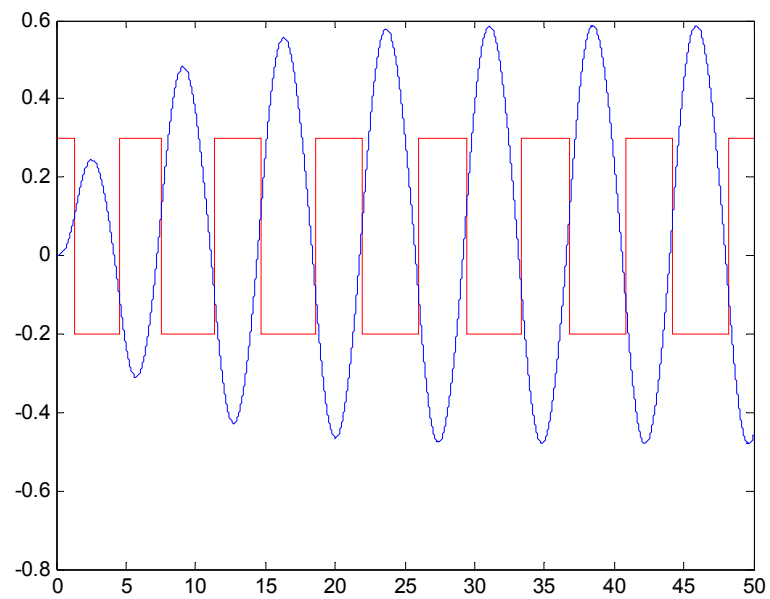
Výsledky provedené simulace potvrzují, že identifikace kmitavým přenosem má významný vliv na kvalitu regulace v případě, že řízeným objektem je systém skutečně kmitající. Z obrázků je možno vidět, že regulátor nekmitavé identifikace (bez použití integrátoru) má nepříjemně kmitavou odezvu.

5.4.2 Příklad 10

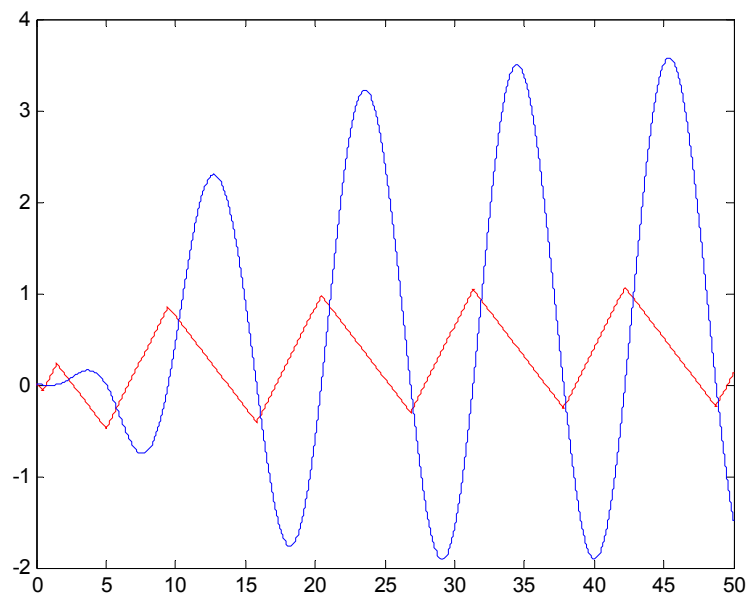
Příklad je ilustrací rozdílu při odhadu kmitavým nebo nekmitavým systémem druhého řádu, tedy podle metodiky kap. 3.2 a metody bez integračního členu z kap. 3.1. K ověření vhodnosti metody byl zadán přenos s kmitavou odezvou:

$$G(s) = \frac{2}{s^3 + 3s^2 + s + 1} \quad (75)$$

Relé bylo nastaveno na horní mez $h_h = 0,3$, dolní mez $h_d = -0,2$ a hystereze $\varepsilon = 0,1$. U experimentu s integračním členem byla hystereze nastavena na nulovou hodnotu. Průběh reléového experimentu je uveden na Obr.39 pro experiment, kde je použit integrační člen na výstupu z relé a na Obr. 38, kde je průběh relé bez integračního členu.



Obr.38: Relé experiment přenosu (75) bez použití integrátoru



Obr.39: Relé experiment přenosu (75) s použitím integrátoru

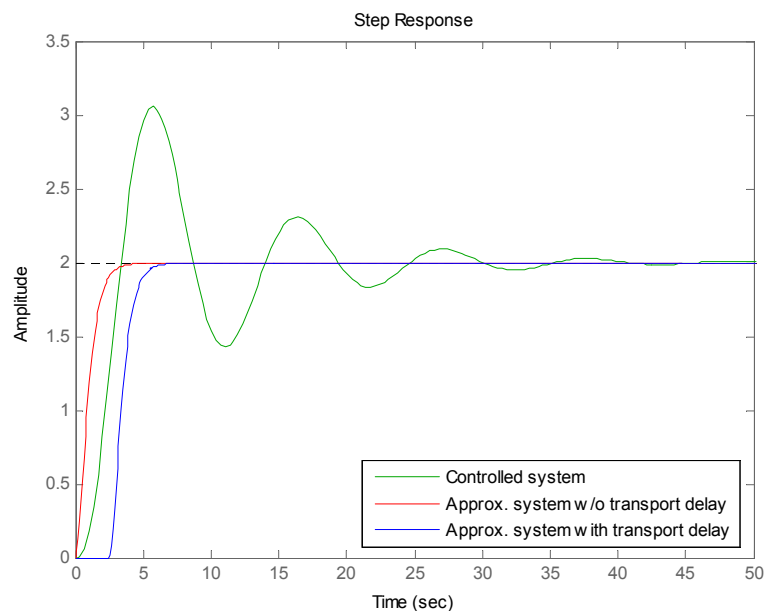
Z reléového experimentu byl spočítán následující aproximační přenos pro přenos s integračním členem (77) a bez integračního členu (76):

$$\widetilde{G}(s) = \frac{1,995}{0,2641s^2 + 1,0278s + 1} \cdot e^{-2,515s} \quad (76)$$

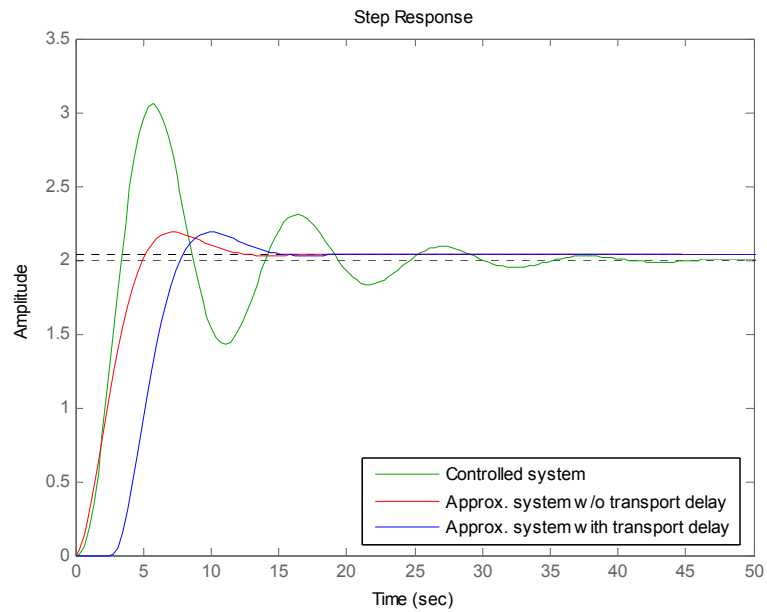
$$\widetilde{G}(s) = \frac{2,0407}{3,0733s^2 + 2,2499s + 1} \cdot e^{-2,753s} \quad (77)$$

Jak je možno vidět ze spočítaných přenosů, liší se od sebe proporcionalní a integrační složky, které jsou počítány dle jiného kritéria.

Zobrazení přechodových charakteristik původního přenosu a aproximovaného přenosu bez a s dopravním zpožděním pro systém bez integračního členu Obr.40 a s integračním členem Obr. 41:



Obr.40: Přechodové charakteristiky přenosu (75) a (76)



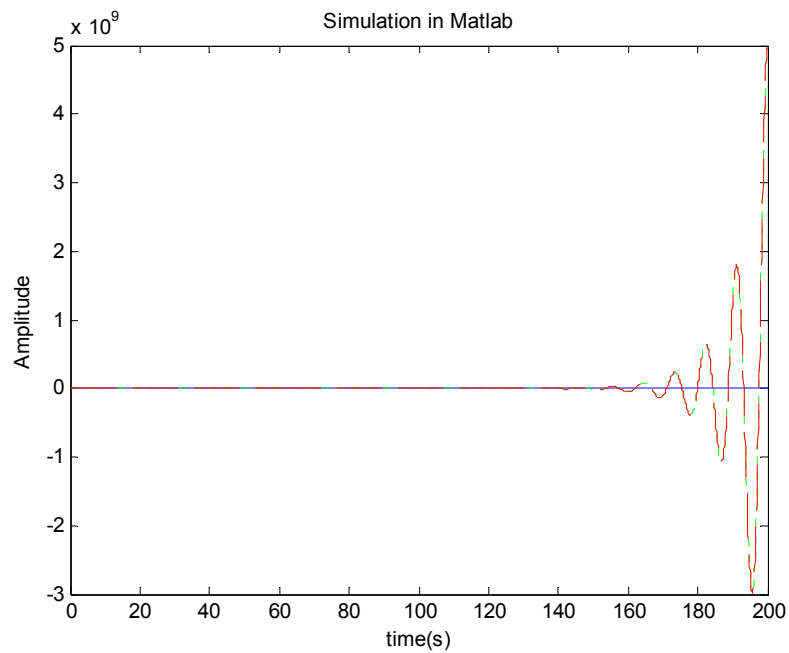
Obr.41: Přejchodové charakteristiky přenosu (75) a (77)

K aproximovanému přenosu bez dopravního zpoždění (76) bez použití integračního členu byl spočítán následující regulátor (78) při $m = 1,5$ a pro systém s integračním členem byl spočítán z přenosu (77) regulátor (79) při $m = 0,4$:

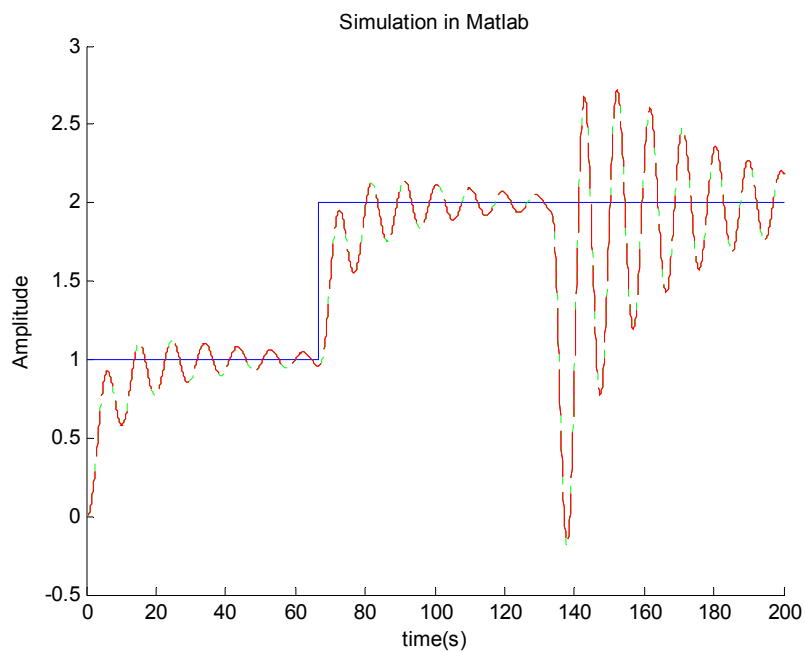
$$C(s) = \frac{0,1997s^2 + 0,7304s + 0,6702}{s^2 + 2,1082s} \quad (78)$$

$$C(s) = \frac{0,1669s^2 + 0,1605s + 0,0386}{s^2 + 0,4592s} \quad (79)$$

Po zapojení regulátorů měly simulace následující průběh:



Obr.42: Průběh simulace přenosu (75) bez použití integrátoru



Obr.43: Průběh simulace přenosu (75) s použitím integrátoru

Výsledky provedené simulace potvrzují, že identifikace kmitavým přenosem má významný vliv na kvalitu regulace v případě, že řízeným objektem je systém skutečně kmitající. Z obrázků je možno vidět, že regulátor nekmitavé identifikace (bez použití integrátoru) má nestabilní odezvu.

ZÁVĚR

Automatické nastavení, ladění regulátorů neboli *autotuning* ať již PID typu nebo jiného typu se pro technologickou praxi a implementaci řídicích systémů stává nevyhnutelnou součástí firemních softwarů. Procedura autotuningu sestává ze dvou etap. V první fázi je nutné vykonat jednoduchý experiment, který lze snadno a automaticky vyhodnotit. Přes dvacet let se na tomto poli úspěšně využívá relé ve zpětné vazbě. Původně symetrické relé bez hystereze, které použil k experimentu Åström a Hägglund (1984) poskytovalo odhad kritických hodnot potřebných pro metodu Ziegler-Nichols, která vzápětí následovala. Nastavení touto metodou má však různé nevýhody, např. značnou kmitavost. Lze je tedy nahradit jinou metodou, příkladem je vyvážené nastavení Gorez a Klán (2000). Změna relé na nesymetrické, případně s hysterezí umožňuje z experimentu získat víc, Vítečková a Víteček (2004). Jsou to odhady parametrů přenosu, zesílení, časové konstanty a dopravní zpoždění pro systém druhého řádu a to buď pro systém s integračním členem zařazeným na výstupu z relé, nebo bez integračního členu. Tento identifikovaný systém jsme obecně nazývali aproximační přenos. Jeho parametry prohlubují a zdokonalují návrh regulátoru, který může být přesněji naladěn k požadovanému chování a vlastnostem. Elegantní způsob návrhu regulátorů lze provést pomocí diofantických rovnic v některém z okruhů, které teorie řízení využívá, Prokop et al (2002). Pomocí těchto diofantických rovnic byl k aproximovanému přenosu bez dopravního zpoždění spočítán PID regulátor a následně bylo ověřeno jeho řízení na původně zadaný systém, který vstupoval do experimentu a estimace. Výsledek regulace je zaznamenán u každého příkladu a to hned v několika variantách pro různou hodnotu parametru m , na kterém záleží nastavení každého regulátoru. Odsimulovány byly přenosy nízkého i vyšších řádů, bez i s dopravním zpožděním. Příklady 9 a 10 reprezentují kmitavé systémy a estimaci kmitavou nebo nekmitavou soustavou druhého řádu. V těchto příkladech se ukazuje, že úspěšná a přijatelná regulace značně závisí na systému, který vstupuje do identifikace. Pokud do identifikace vstupuje systém, který má kmitavý průběh, je lépe jej aproximovat systémem který má rovněž kmitavou odezvu. To je zaručeno tím že do experimentu s relé přidáme integrační člen a upravíme rovnice pro výpočet aproximačního přenosu na póly s imaginární částí. Pokud aproximační přenos nemá kmitavý průběh, může dojít k tomu, že výsledný regulátor bude téměř nepoužitelný z důvodu silného kmitání či dokonce nestability. Z tohoto důvodu byly vyhotoveny dva programy na identifikaci v programu Matlab – Simulink, kdy jeden je zaměřen na

identifikaci nekmitajícího systému, kdy jeho vypočtený aproximační přenos je druhého řádu a jeho průběh je taktéž nekmitající. Druhý program byl vyhotoven pro identifikaci kmitavého systému, kdy jeho aproximační přenos je druhého řádu a má kmitavý průběh. Rozdíl těchto dvou systémů je odzkoušen na uvedených příkladech.

Hlavním přínosem práce je identifikace systémem druhého řádu pomocí relé bez nebo s integračním členem. Následný návrh PID regulátoru je proveden algebraickým způsobem pomocí diofantických rovnic. Tento přístup umožňuje parametry regulátoru ladit jediným skalárním parametrem.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Astrom,K.J.,Hagglund,T.:PID Controllers.ICMC N.Carolina,1995
- [2] Klán P.,Gorez,R.:Vyvážené nastavení PI regulátorů.Automa,4,s.49-53,2000
- [3] Levine et al:The Control Handbook.IEEE Press.1995
- [4] Majhi,S.,Atherton,D.P.:Autotuning and controller design.In:UKACC Control Conf.No.455,s.769-774,1998.
- [5] Vítečková, M.,Víteček, A.: Experimentální identifikace metodou relé. In:Automatizácia a informatizácia,Bratislava,2004.
- [6] Marcaník,T.:Autotuning-samočinné ladění regulátorů.DP FT UTB,Zlín,2004
- [7] Yu, Ch.Ch.: Autotuning of PID Controllers. A relay feedback approach. Springer, London, 2006.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

- ZN metoda Zieglera – Nicholse
- FB FeedBack control
- PID Proporcionálně-integračně-derivační

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr.1: Relé ve zpětné vazbě	10
Obr.2: Průběh experimentu.....	11
Obr.3: Druhy relé.....	12
Obr.4: Zpětnovazební obvod	13
Obr.5: Schéma regulačního obvodu se zpětnovazební částí FB.....	18
Obr.6: Průběhy výstupních veličin relé a regulované soustavy.....	21
Obr.7: Programové prostředí	27
Obr.8: Relé experiment přenosu (46)	30
Obr.9: Přejchodové charakteristiky přenosu (46) a (47).....	31
Obr.10: Průběh simulace přenosu (46)	32
Obr.11: Relé experiment přenosu (49)	33
Obr.12: Přejchodové charakteristiky přenosu (49) a (50).....	34
Obr.13: Průběh simulace přenosu (49)	34
Obr.14: Relé experiment přenosu (50)	35
Obr.15: Přejchodové charakteristiky přenosu (52) a (53).....	36
Obr.16: Průběh simulace přenosu (52)	36
Obr.17: Relé experiment přenosu (55)	37
Obr.18: Přejchodové charakteristiky přenosu (55) a (56).....	38
Obr.19: Průběh simulace přenosu (55)	39
Obr.20: Relé experiment přenosu (58)	40
Obr.21: Přejchodové charakteristiky přenosu (58) a (59).....	41
Obr.22: Průběh simulace přenosu (58)	41
Obr.23: Relé experiment přenosu (61)	42
Obr.24: Přejchodové charakteristiky přenosu (61) a (62).....	43
Obr.25: Průběh simulace přenosu (61)	44
Obr.26: Relé experiment přenosu (64)	44
Obr.27: Přejchodové charakteristiky přenosu (64) a (65).....	45
Obr.28: Průběh simulace přenosu (64)	46
Obr.29: Relé experiment přenosu (67)	47
Obr.30: Přejchodové charakteristiky přenosu (67) a (68).....	48
Obr.31: Průběh simulace přenosu (67)	48

Obr.32: Relé experiment přenosu (70) bez použití integrátoru	49
Obr.33: Relé experiment přenosu (70) s použitím integrátoru	50
Obr.34: Přechodové charakteristiky přenosu (70) a (71).....	51
Obr.35: Přechodové charakteristiky přenosu (70) a (72).....	51
Obr.36: Průběh simulace přenosu (70) bez použití integrátoru	52
Obr.37: Průběh simulace přenosu (70) s použitím integrátoru.....	53
Obr.38: Relé experiment přenosu (75) bez použití integrátoru	54
Obr.39: Relé experiment přenosu (75) s použitím integrátoru	54
Obr.40: Přechodové charakteristiky přenosu (75) a (76).....	55
Obr.41: Přechodové charakteristiky přenosu (75) a (77).....	56
Obr.42: Průběh simulace přenosu (75) bez použití integrátoru.....	57
Obr.43: Průběh simulace přenosu (75) s použitím integrátoru.....	57

SEZNAM TABULEK

Tab.I: Klasické Z-N nastavení z kritických parametrů.....	15
---	----

SEZNAM PŘÍLOH

P1: Program pro identifikaci nekmitající soustavy

P2: Program pro identifikaci kmitající soustavy