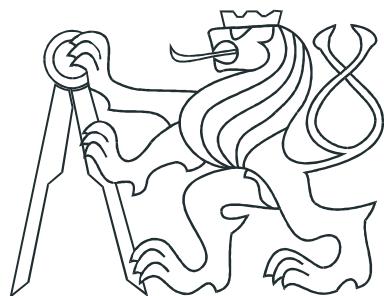


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh kaskádního řízení

Praha, 2010

Autor: Petr Ladman

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

podpis

Poděkování

Děkuji především vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Huškovi, Ph.D. za příkladné vedení a poskytnutí cenných rad.

Abstrakt

Tato práce analyzuje, při kterých kombinacích dynamiky vnitřní a vnější smyčky je použití kaskádního řízení výhodnější než použití klasického PID řízení. Popisuje výhody a nevýhody kaskádního řízení při potlačování poruch a robustnosti řízení na změnu parametrů systému ve srovnání s klasickým PID řízením. K porovnání bylo použito kaskádní řízení se dvěma do sebe vnořenými smyčkami. V jednotlivých kapitolách jsou postupně popsány výsledky simulací kombinací dynamiky, při kterých je vnitřní regulační smyčka rychlejší, stejně rychlá nebo pomalejší než vnější regulační smyčka. K návrhu kaskádního řízení jsou dle zadání použity PID regulátory. Všechny simulace a schémata byly vytvořeny v prostředí MATLAB a Simulink.

Abstract

This work analyses in which combination of dynamics of internal and external loops is cascade control more advantageous than conventional PID control. It describes advantages and disadvantages of cascade control in suppressing disturbances and robustness to change of parameters compared with conventional PID control. For comparison was used cascade control with two loops nested into each other. In three chapters are described the results of simulations of dynamics, in which is inner loop faster, identical or slower than outer loop. According to assignment cascade control is designed with using of PID regulators. All simulations and schemas were created in MATLAB and Simulink.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: Petr Ladman

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (bakalářský), strukturovaný
Obor: Kybernetika a měření

Název tématu: Návrh kaskádního řízení

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s klasickou strukturou kaskádní regulace.
2. Pro různé kombinace dynamik primární a sekundární části systému včetně dopravního zpoždění navrhněte kaskádní řízení pomocí PID regulátorů s různou kombinací výsledné dynamiky primární a sekundární regulační smyčky.
3. Diskutujte vhodnost kaskádní regulace pro různé kombinace dynamik primární a sekundární části a různé kombinace dynamik primární a sekundární regulační smyčky s ohledem na robustnost a potlačení poruch. Srovnejte s klasickým PID regulátorem.

Seznam odborné literatury:

- [1] G.F. Franklin, J.D. Powell, A. Emami-Naeini: Feedback Control of Dynamic Systems. Prentice Hall, 2006
[2] D.E. Seborg, T. F. Edgar, D. A. Mellichamp. Process Dynamics and Control. John Wiley & Sons, NY, 1989.

Vedoucí: Ing. Petr Hušek, Ph.D.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2010/2011

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry



doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 2. 12. 2009

Obsah

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	x
1 Úvod	1
2 Analýza kaskádního řízení	2
2.1 Schémata typů řízení	2
2.2 Analyzované systémy	3
2.3 Použité typy regulátorů	4
2.4 Metoda návrhu regulátorů	4
3 Vnitřní smyčka rychlejší než vnější	10
3.1 Nastavení regulátorů	10
3.2 Nominální systém	11
3.3 Robustnost systému na změnu parametrů	11
3.4 Vliv poruchy ve vnitřní smyčce	12
3.5 Robustnost potlačení poruchy ve vnitřní smyčce	13
3.6 Vliv poruchy ve vnější smyčce	15
3.7 Robustnost potlačení poruchy ve vnější smyčce	15
3.8 Shrnutí výsledků	17
4 Vnitřní smyčka stejně rychlá jako vnější	18
4.1 Nastavení regulátorů	18
4.2 Nominální systém	19
4.3 Robustnost systému na změnu parametrů	19
4.4 Vliv poruchy ve vnitřní smyčce	21
4.5 Robustnost potlačení poruchy ve vnitřní smyčce	21

4.6	Vliv poruchy ve vnější smyčce	23
4.7	Robustnost potlačení poruchy ve vnější smyčce	23
4.8	Shrnutí výsledků	25
5	Vnitřní smyčka pomalejší než vnější	26
5.1	Nastavení regulátorů	26
5.2	Nominální systém	27
5.3	Robustnost systému na změnu parametrů	27
5.4	Vliv poruchy ve vnitřní smyčce	29
5.5	Robustnost potlačení poruchy ve vnitřní smyčce	29
5.6	Vliv poruchy ve vnější smyčce	31
5.7	Robustnost potlačení poruchy ve vnější smyčce	31
5.8	Shrnutí výsledků	33
6	Omezení saturací	34
7	Závěr	36
Literatura		38
A Obsah přiloženého CD		I

Seznam obrázků

2.1	Schéma dvousmyčkového kaskádního řízení	2
2.2	Schéma klasického PID řízení.	3
2.3	Schéma dvousmyčkového kaskádního řízení motoru.	3
2.4	Frekvenční charakteristika otevřené vnitřní smyčky bez regulátoru.	6
2.5	Frekvenční charakteristika otevřené vnitřní smyčky s regulátorem.	7
2.6	Frekvenční charakteristika otevřené vnější smyčky bez regulátoru.	8
2.7	Frekvenční charakteristika otevřené vnější smyčky s regulátorem.	8
2.8	Porovnání approximovaného a nominálního systému.	9
3.1	Přechodové charakteristiky nominálního systému	11
3.2	Přechodové charakteristiky - K_2 změněné o $\pm 20\%$	12
3.3	Přechodové charakteristiky - K_1 změněné o $\pm 20\%$	12
3.4	Přechodové charakteristiky - τ_1 změněné o $\pm 20\%$	12
3.5	Přechodové charakteristiky - T_1 změněné o $\pm 20\%$	12
3.6	Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce.	13
3.7	Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce - K_2 změněné o $\pm 20\%$	14
3.8	Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce - K_1 změněné o $\pm 20\%$	14
3.9	Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce - τ_1 změněné o $\pm 20\%$	14
3.10	Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce - T_1 změněné o $\pm 20\%$	14
3.11	Potlačení poruchy ve vnější smyčce.	15
3.12	Potlačení poruchy ve vnější smyčce - K_2 změněné o $\pm 20\%$	16
3.13	Potlačení poruchy ve vnější smyčce - K_1 změněné o $\pm 20\%$	16
3.14	Potlačení poruchy ve vnější smyčce - τ_1 změněné o $\pm 20\%$	16
3.15	Potlačení poruchy ve vnější smyčce - T_1 změněné o $\pm 20\%$	16
4.1	Přechodové charakteristiky nominálního systému	19
4.2	Přechodové charakteristiky - K_2 změněné o $\pm 20\%$	20
4.3	Přechodové charakteristiky - K_1 změněné o $\pm 20\%$	20

4.4	Přechodové charakteristiky - τ_2 změněné o $\pm 20\%$	20
4.5	Přechodové charakteristiky - τ_1 změněné o $\pm 20\%$	20
4.6	Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce.	21
4.7	Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce - K_2 změněné o $\pm 20\%$	22
4.8	Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce - K_1 změněné o $\pm 20\%$	22
4.9	Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce - τ_2 změněné o $\pm 20\%$	22
4.10	Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce - τ_1 změněné o $\pm 20\%$	22
4.11	Potlačení poruchy ve vnější smyčce.	23
4.12	Potlačení poruchy ve vnější smyčce - K_2 změněné o $\pm 20\%$	24
4.13	Potlačení poruchy ve vnější smyčce - K_1 změněné o $\pm 20\%$	24
4.14	Potlačení poruchy ve vnější smyčce - τ_2 změněné o $\pm 20\%$	24
4.15	Potlačení poruchy ve vnější smyčce - τ_1 změněné o $\pm 20\%$	24
5.1	Přechodové charakteristiky nominálního systému	27
5.2	Přechodové charakteristiky - K_2 změněné o $\pm 20\%$	28
5.3	Přechodové charakteristiky - K_1 změněné o $\pm 20\%$	28
5.4	Přechodové charakteristiky - τ_2 změněné o $\pm 20\%$	28
5.5	Přechodové charakteristiky - T_2 změněné o $\pm 20\%$	28
5.6	Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce.	29
5.7	Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce - K_2 změněné o $\pm 20\%$	30
5.8	Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce - K_1 změněné o $\pm 20\%$	30
5.9	Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce - τ_2 změněné o $\pm 20\%$	30
5.10	Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce - T_2 změněné o $\pm 20\%$	30
5.11	Potlačení poruchy ve vnější smyčce.	31
5.12	Potlačení poruchy ve vnější smyčce - K_2 změněné o $\pm 20\%$	32
5.13	Potlačení poruchy ve vnější smyčce - K_1 změněné o $\pm 20\%$	32
5.14	Potlačení poruchy ve vnější smyčce - τ_2 změněné o $\pm 20\%$	32
5.15	Potlačení poruchy ve vnější smyčce - T_2 změněné o $\pm 20\%$	32
6.1	Schéma kaskádního řízení se saturací a ochranou anti-windup.	34
6.2	Schéma klasického PID řízení se saturací a ochranou anti-windup.	34
6.4	Akční zásahy bez saturace.	35
6.5	Akční zásahy se saturací.	35
6.3	Přechodová charakteristika a potlačení poruchy ve vnitřní smyčce.	35

Seznam tabulek

2.1	Parametry systémů G_1 a G_2 při rychlejší vnitřní smyčce	4
3.1	Parametry systémů G_1 a G_2 při rychlejší vnitřní smyčce	10
3.2	Parametry regulátorů při rychlejší vnitřní smyčce	10
4.1	Parametry systémů G_1 a G_2 při stejně rychlé vnitřní smyčce	18
4.2	Parametry regulátorů při stejně rychlé vnitřní smyčce	18
5.1	Parametry systémů G_1 a G_2 při pomalejší vnitřní smyčce	26
5.2	Parametry regulátorů při pomalejší vnitřní smyčce	26

Kapitola 1

Úvod

Tématem této bakalářské práce je návrh kaskádního řízení. Získané poznatky by měly pomoci při praktickém rozhodování, zda je v konkrétních realizacích výhodnější kaskádní řízení nebo klasické PID řízení. Řízení jsem dle zadání navrhoval s PID regulátory, které jsou v praxi nejpoužívanější.

Kaskádní řízení je typ řízení, při kterém se místo jedné regulační smyčky použije více do sebe vzájemně vnořených smyček s různou dynamikou a regulátory. Kaskádní řízení jsem realizoval pro systémy prvního rádu s dopravním zpožděním. Použitím systémů prvního rádu s dopravním zpožděním lze totiž v praxi často approximovat složitější systémy vyšších rádů. V následujícím textu postupně testuji různé kombinace dynamiky. Jedná se o kombinace, kdy je vnitřní regulační smyčka rychlejší, stejně rychlá nebo pomalejší než vnější regulační smyčka. Analyzuji také robustnost na změnu jednotlivých parametrů systému. Dále se zabývám potlačením poruch ve vnitřní i ve vnější smyčce a opět analyzuji robustnost na změnu parametrů systému. Všechny výsledky porovnávám s klasickým PID řízením s jednou regulační smyčkou, které jsem se snažil nastavit tak, aby přechodové charakteristiky systémů u obou typů řízení měly obdobný průběh. K nastavování všech PID regulátorů používám frekvenční metodu návrhu na základě zvolení fázové bezpečnosti, kterou popisuji v následující kapitole. V poslední kapitole jsem zkoumal vliv omezení saturací na přechodovou charakteristiku a potlačení poruch ve vnitřní smyčce u obou typů řízení. Všechny simulace a schémata jsem vytvořil v prostředí MATLAB a Simulink.

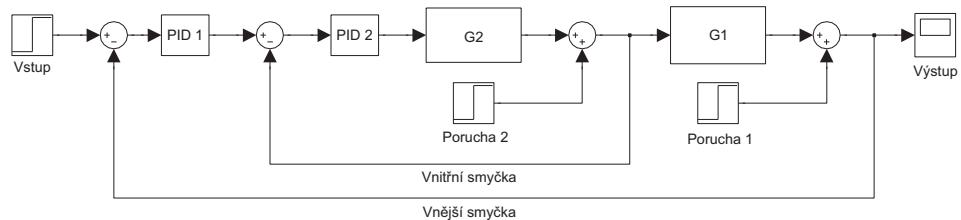
Tato práce by měla ukázat, při kterých kombinacích dynamiky vnitřní a vnější smyčky je použití kaskádního řízení výhodnější než použití klasického PID řízení a analyzovat výhody kaskádního řízení při potlačování poruch a robustnosti řízení na změnu parametrů systému.

Kapitola 2

Analýza kaskádního řízení

2.1 Schémata typů řízení

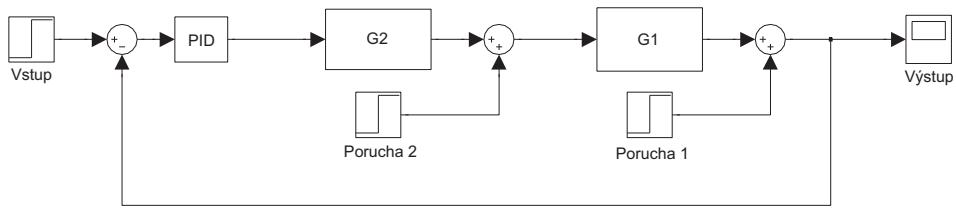
Schéma dvousmyčkového kaskádního řízení, kterým se budu v této práci zabývat, je uvedeno na obr. 2.1. Kaskádní řízení může obsahovat i více do sebe vnořených regulačních smyček. Dle zadání jsem zvolil nejjednodušší případ dvou do sebe vnořených regulačních smyček.



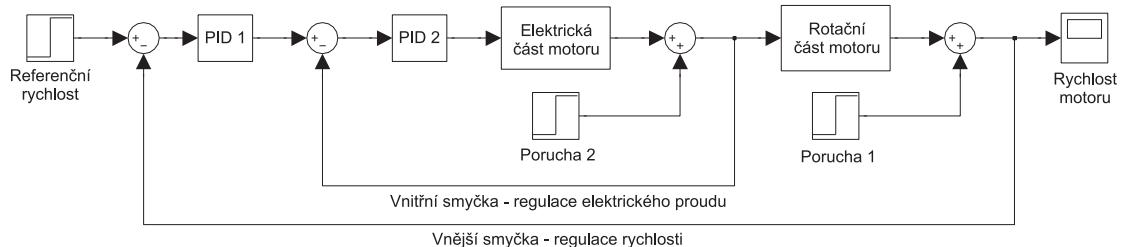
Obrázek 2.1: Schéma dvousmyčkového kaskádního řízení

Na obr. 2.2 je uvedeno schéma klasického PID řízení, jehož výsledky budu porovnávat s kaskádním řízením. U tohoto typu řízení nelze samozřejmě uvažovat systémy ve vnitřní a vnější smyčce, ale pouze části systému, mezi kterými může nastat porucha.

V praxi se kaskádní řízení nejčastěji používá například k řízení rychlosti elektrických motorů, kde vnitřní smyčka řídí elektrický proud ze zdroje do motoru a vnější smyčka řídí rychlosť. Tímto způsobem lze kompenzovat nelinearity zdroje. Schéma je znázorněno na obr. 2.3.



Obrázek 2.2: Schéma klasického PID řízení.



Obrázek 2.3: Schéma dvousmyčkového kaskádního řízení motoru.

2.2 Analyzované systémy

Jak už jsem se zmínil v úvodu, v praxi jsou většinou systémy nekmitavé a bez nul a lze je approximovat systémy prvního řádu s dopravním zpožděním. Systémy prvního řádu s dopravním zpožděním, které jsem použil pro analýzu, jsou

$$G_1(s) = \frac{K_1}{\tau_1 s + 1} e^{-T_1 s}, \quad (2.1)$$

$$G_2(s) = \frac{K_2}{\tau_2 s + 1} e^{-T_2 s}, \quad (2.2)$$

kde K_1 a K_2 je zesílení, τ_1 a τ_2 je časová konstanta a T_1 a T_2 je dopravní zpoždění. Systém G_1 odpovídá systému ve vnější smyčce a G_2 odpovídá systému ve smyčce vnitřní. Hodnoty těchto parametrů jsem zvolil tak, aby systémy splňovaly podmínu

$$\tau > 2T. \quad (2.3)$$

Podle [5] musí totiž být doba náběhu alespoň dvakrát větší než doba průtahu, aby byl systém dobře regulovatelný a bylo možné použít standardní PID regulátory.

Postupně budu analyzovat robustnost řízení na změnu jednotlivých parametrů částí systému. Všechny hodnoty parametrů systémů ve vnitřní a vnější smyčce jsem změnil o $\pm 20\%$ a pozoroval změny přechodových charakteristik celého systému a změny průběhu

potlačení poruchy ve vnitřní smyčce a poruchy ve vnější smyčce. Hodnoty parametrů systémů jsem zvolil tak, aby je bylo možné použít pro všechny kombinace dynamiky. Maximální přípustný překmit při nominálních hodnotách parametrů jsem zvolil 10%. Snažil jsem se regulátory v případě kaskádního řízení i v případě klasického PID řízení nastavit tak, aby výsledné systémy měly co možná nejvíce podobný průběh přechodové charakteristiky. Poruchy ve vnitřní a vnější smyčce jsem zvolil velikosti jednotkového skoku.

2.3 Použité typy regulátorů

Nejprve jsem zkoušel použít regulátory PID s nenulovou derivační složkou. Pro systémy s dopravním zpožděním nejsou ale příliš vhodné, protože derivační složka rozkrmitává průběh přechodové charakteristiky. Nejvýrazněji se průběh rozkrmitával při použití PID regulátorů u kaskádního řízení. Proto jsem se rozhodl použít pro analýzu všech kombinací dynamiky smyček regulátory typu PI. Přenos regulátoru typu PI a jeho úprava pro další odvozování jsou

$$C(s) = \frac{k_P s + k_I}{s} = \frac{k_P(s + \omega_I)}{s}, \quad (2.4)$$

$$\omega_I = \frac{k_I}{k_P}. \quad (2.5)$$

2.4 Metoda návrhu regulátorů

V této části popisují metodu návrhu regulátorů. Konkrétní návrh ukazuje na kombinaci dynamiky, kdy je vnitřní smyčka rychlejší než vnější. Zvolil jsem systémy podle (2.1) a (2.2) s parametry uvedenými v tabulce 2.1.

Systém	K	τ	T
G_1	1,2	14	2,25
G_2	1,8	1	0,4

Tabulka 2.1: Parametry systémů G_1 a G_2 při rychlejší vnitřní smyčce

Přenos uzavřené smyčky, která obsahuje systém prvního řádu s dopravním zpožděním a regulátor typu PI, je

$$T(s) = \frac{L(s)}{1 + L(s)} = \frac{\frac{(k_P s + k_I)K}{s(\tau s + 1)} e^{-Ts}}{1 + \frac{(k_P s + k_I)K}{s(\tau s + 1)} e^{-Ts}}, \quad (2.6)$$

kde $L(s)$ je přenos otevřené smyčky

$$L(s) = C(s)G(s) = \frac{k_P s + k_I}{s} \cdot \frac{K}{\tau s + 1} e^{-Ts} = \frac{(k_P s + k_I)K}{s(\tau s + 1)} e^{-Ts}, \quad (2.7)$$

kde $C(s)$ je přenos regulátoru a $G(s)$ je přenos systému, který chceme regulovat. Přenos $T(s)$ nelze kvůli dopravnímu zpoždění upravit tak, aby se s ním dále mohlo pracovat. Všechna dopravní zpoždění jsem tedy approximoval Padého approximací 2. řádu. Tato approximace nahrazuje polynomem dopravní zpoždění, které je zadáné exponenciálou. Nevýhodou Padého approximace je zvýšení řádu systému a zavedení nestabilní nuly do čitatele approximovaného přenosu. Systém se tak změní na systém s neminimální fází. Řád Padého approximace jsem určil experimentálně tak, aby celkový řád systému nebyl příliš vysoký, a zároveň aby byla approximace dostatečně přesná. Zvýšením řádu zvýšíme přesnost approximace. Výpočet přenosu Padého approximace 2. řádu je

$$e^{-Ts} \approx \frac{1 - \frac{T}{2}s + \frac{T^2}{12}s^2}{1 + \frac{T}{2}s + \frac{T^2}{12}s^2}. \quad (2.8)$$

K návrhu regulátorů jsem použil frekvenční metodu návrhu. Postupoval jsem podle postupu uvedeného v [2], který jsem upravil pro PI regulátor. Výsledný tvar přechodové charakteristiky je závislý na velikosti zvolené fázové bezpečnosti, která přímo souvisí s relativním tlumením. Průběh přechodové charakteristiky jsem navrhoval experimentálně, protože jsem nastavoval dvě do sebe navzájem vnořené regulační smyčky a nebylo tak možné vypočítat přímo relativní tlumení. U kaskádního řízení jsem nejprve nastavil regulátor vnitřní smyčky a poté regulátor smyčky vnější s uzavřenou vnitřní smyčkou. U klasického PID řízení jsem navrhoval regulátor pro celý systém.

Na zlomové frekvenci PI regulátoru ω_I , kterou ještě neznáme, sníží PI člen fázi soustavy o 45°

$$\arg(L(j\omega_I)) = \arg(C(j\omega_I)) + \arg(G(j\omega_I)) = \arg(G(j\omega_I)) - 45^\circ, \quad (2.9)$$

kde $L(j\omega_I)$ je přenos otevřené smyčky, $G(j\omega_I)$ je přenos regulovaného systému a $C(j\omega_I)$ je přenos regulátoru na frekvenci ω_I . Na frekvenci ω_I také následně měříme fázovou bezpečnost výsledného přenosu otevřené smyčky. Pro zvolený systém jsem pro výslednou

otevřenou vnitřní smyčku experimentálně zvolil fázovou bezpečnost $PM = 45^\circ$. Fázová bezpečnost PM je definována jako

$$\arg(L(j\omega_I)) = -180^\circ + PM. \quad (2.10)$$

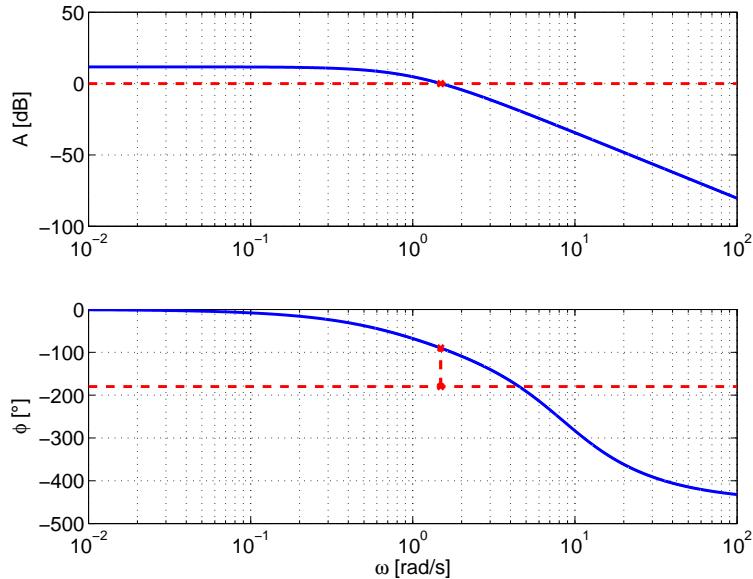
Kombinací vztahů (2.9) a (2.10) získáme

$$\arg(G(j\omega_I)) = -180^\circ + PM + 45^\circ \quad (2.11)$$

a pro zvolený systém ve vnitřní smyčce pak vychází $\arg(G(j\omega_I)) = -90^\circ$. Pokud ω_I je frekvence, na které se odečítá fázová bezpečnost, pak je zesílení otevřené smyčky na této frekvenci jednotkové. Potom platí

$$\begin{aligned} |L(j\omega_I)| &= |C(j\omega_I)| \cdot |G(j\omega_I)| = |k_P \cdot \frac{(j\omega_I + \omega_I)}{j\omega_I}| \cdot |G(j\omega_I)| = \\ &= |k_P| \cdot (1-j) \cdot |G(j\omega_I)| = k_P \sqrt{2} |G(j\omega_I)| = 1. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Frekvenci ω_I a zesílení $|G(j\omega_I)|$ získáme odečtením z frekvenční charakteristiky v místě, kde fáze prochází $\arg(G(j\omega_I))$. Frekvenční charakteristika zvoleného systému ve vnitřní smyčce s vyznačeným odečtením ω_I a $|G(j\omega_I)|$ je zobrazena na obr. 2.4. V místě, kde fáze prochází -90° , jsem odečetl frekvenci $\omega_I = 1,487$ rad/s a zesílení $|G(j\omega_I)| = 1,01$.



Obrázek 2.4: Frekvenční charakteristika otevřené vnitřní smyčky bez regulátoru.

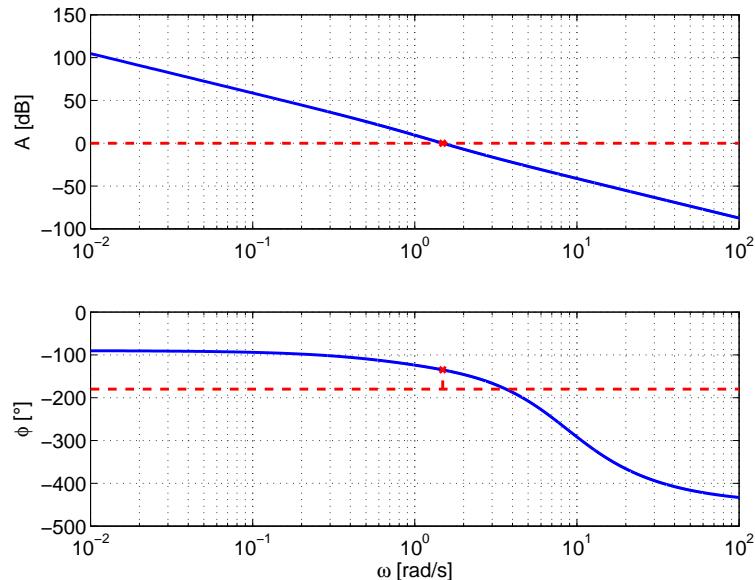
Po úpravě (2.12) získáme vztah pro výpočet proporcionální složky regulátoru

$$P = k_P = \frac{1}{\sqrt{2} |G(j\omega_I)|} \quad (2.13)$$

a pro regulátor ve vnitřní smyčce pak vychází $P = k_P = 0,704$. Použitím vztahu z úpravy přenosu PI regulátoru (2.5) získáme vztah pro výpočet integrační složky regulátoru

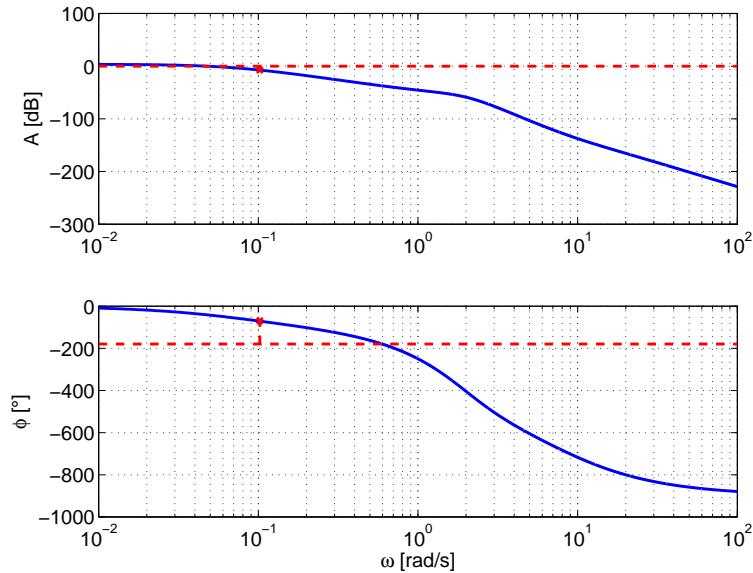
$$I = k_I = \omega_I k_P \quad (2.14)$$

a pro regulátor ve vnitřní smyčce pak vychází $I = k_I = 1,046$. Na obr. 2.5 můžeme vidět, že je fázová bezpečnost otevřené vnitřní smyčky $PM = 44,9^\circ$, což téměř přesně odpovídá požadované $PM = 45^\circ$.



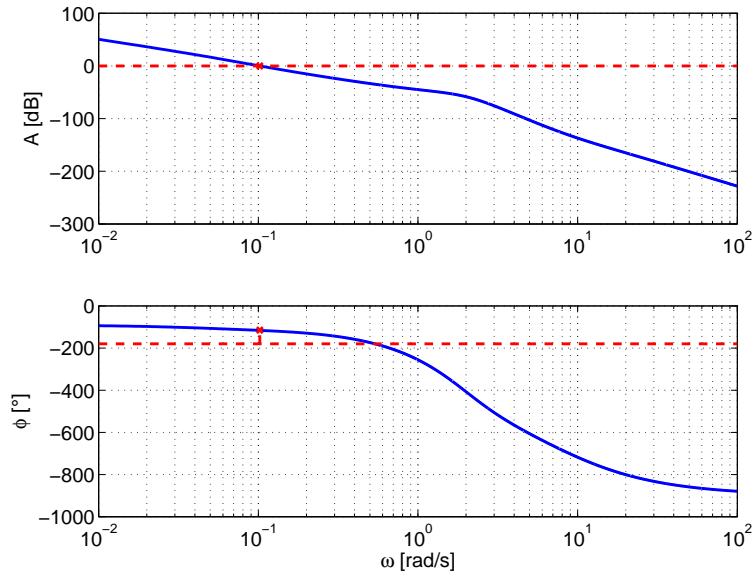
Obrázek 2.5: Frekvenční charakteristika otevřené vnitřní smyčky s regulátorem.

Podle výše popsaného postupu jsem navrhoval i regulátor vnější smyčky. Přenos otevřené vnější smyčky bez regulátoru je $L_1(s) = T_2 G_1$, kde T_2 je přenos uzavřené vnitřní smyčky a G_1 je přenos systému ve vnější smyčce. Pro vnější smyčku jsem experimentálně zvolil fázovou bezpečnost $PM = 65^\circ$, kdy je $\arg(G(j\omega_I)) = -70^\circ$. Na obr. 2.6 je zobrazena frekvenční charakteristiku otevřené vnější smyčky bez regulátoru s vyznačeným odečtením ω_I a $|G(j\omega_I)|$. Frekvenci $\omega_I = 0,102$ rad/s a zesílení $|G(j\omega_I)| = 0,69$ jsem odečetl v místě, kde fáze prochází -70° .



Obrázek 2.6: Frekvenční charakteristika otevřené vnější smyčky bez regulátoru.

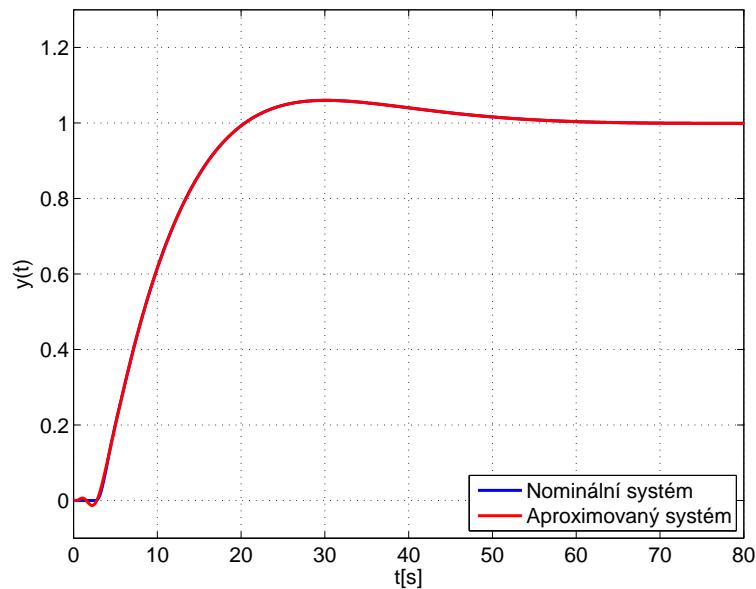
Proporcionální složka regulátoru ve vnější smyčce je pak $P = k_P = 1,025$ a integrační složka je $I = k_I = 0,105$. Na obr. 2.7 můžeme vidět, že je fázová bezpečnost otevřené vnější smyčky $PM = 63,7^\circ$, což téměř přesně odpovídá požadované $PM = 65^\circ$.



Obrázek 2.7: Frekvenční charakteristika otevřené vnější smyčky s regulátorem.

Aproximaci dopravního zpoždění jsem využil pouze při návrhu jednotlivých regulátorů. K samotným simulacím jsem použil systémy s dopravním zpožděním bez approximace.

Na obr. 2.8 můžeme vidět, že přechodové charakteristiky s použitím approximovaného a nominálního systému jsou u navrženého kaskádního řízení velmi podobné. Při návrhu regulátorů lze tedy používat Padého approximaci.



Obrázek 2.8: Porovnání approximovaného a nominálního systému.

Kapitola 3

Vnitřní smyčka rychlejší než vnější

V této části jsem analyzoval případ, kdy je vnitřní smyčka rychlejší než vnější. Pro analýzu jsem zvolil systémy podle (2.1) a (2.2) s parametry uvedenými v tabulce 3.1.

Systém	K	τ	T
G_1	1,2	14	2,25
G_2	1,8	1	0,4

Tabulka 3.1: Parametry systémů G_1 a G_2 při rychlejší vnitřní smyčce

3.1 Nastavení regulátorů

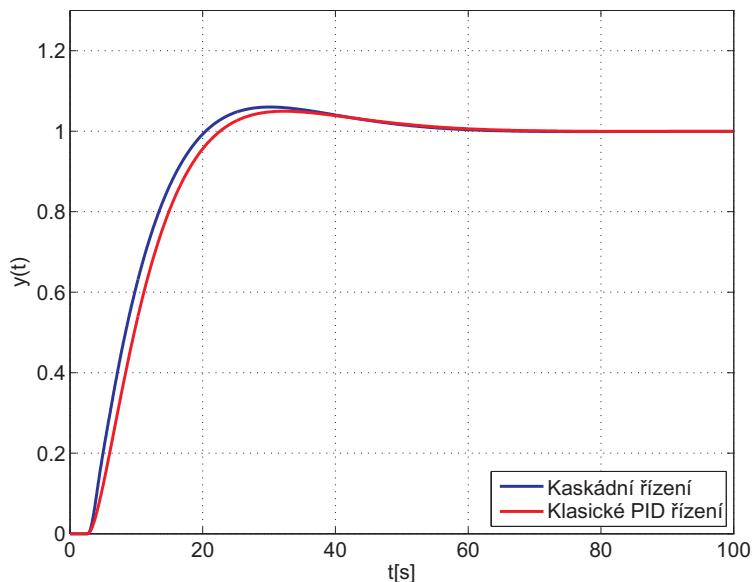
Konkrétní hodnoty proporcionálních, integračních a derivačních složek regulátorů a zvolené fázové bezpečnosti jsou uvedeny v tabulce 3.2, kde PM je zvolená fázová bezpečnost.

Regulátor	PM	P	I	D
PI vnitřní smyčka	45	0,704	1,046	0
PI vnější smyčka	65	1,025	0,105	0
PI klasické řízení	65	0,536	0,049	0

Tabulka 3.2: Parametry regulátorů při rychlejší vnitřní smyčce

3.2 Nominální systém

Na obr. 3.1 můžeme pozorovat přechodové charakteristiky systému při nominálních hodnotách parametrů. V případě kaskádního řízení má průběh kratší dobu náběhu, ale doba ustálení a překmit jsou shodné s klasickým PID řízením a průběh obou přechodových charakteristik je velmi podobný.

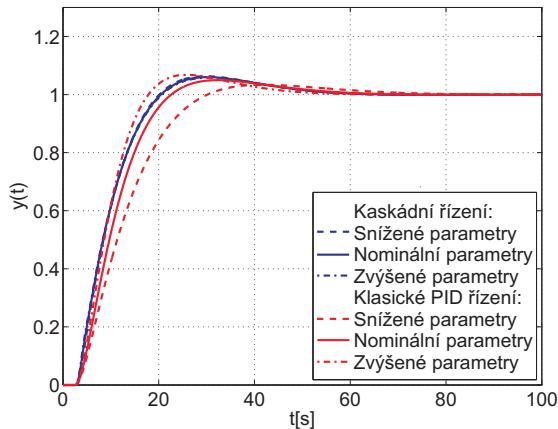


Obrázek 3.1: Přechodové charakteristiky nominálního systému

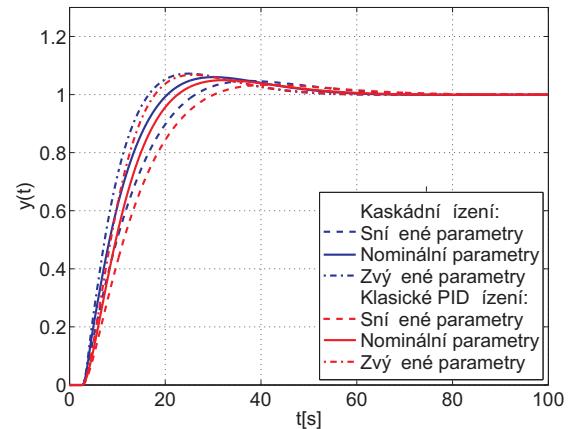
3.3 Robustnost systému na změnu parametrů

V této části jsem se zaměřil na robustnost celého systému vůči změně parametrů jednotlivých částí systému. Postupně jsem analyzoval případy změny parametrů K_2 , K_1 , τ_1 a T_1 podle (2.1) a (2.2). Změny průběhu přechodových charakteristik při změně τ_2 a T_2 byly při použití kaskádního řízení i klasického PID řízení v řádu desetin procenta. Lze je tedy zanedbat, proto přechodové charakteristiky pro tyto případy v této práci neuvádím.

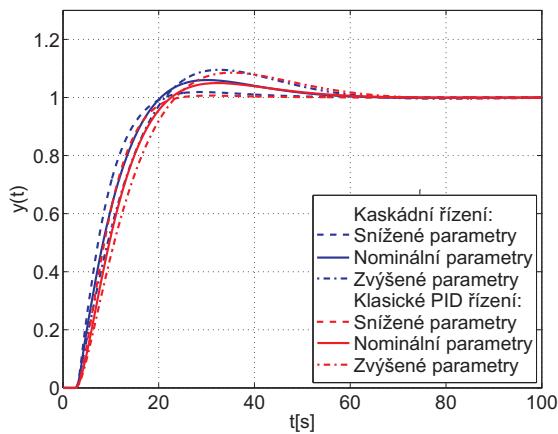
Na obr. 3.2 můžeme pozorovat vliv změny zesílení ve vnitřní smyčce K_2 . U kaskádního řízení se změnil průběh přechodové charakteristiky zanedbatelně. V případě rychlejší vnitřní smyčky tak má u kaskádního řízení změna jakéhokoli parametru systému ve vnitřní smyčce zanedbatelný vliv na přechodovou charakteristiku, což je výhoda ve srovnání s klasickým PID řízením. Naproti tomu u klasického PID řízení má změna K_2 na průběh



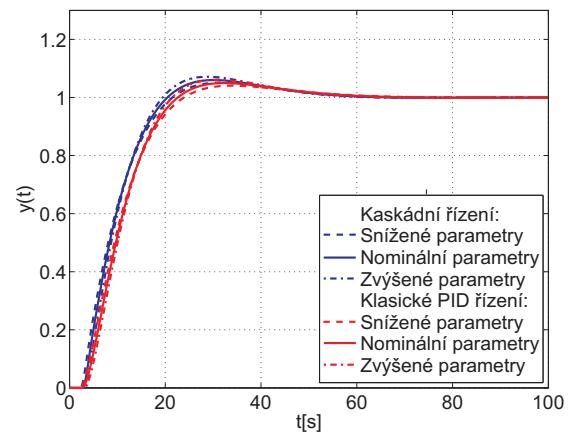
Obrázek 3.2: Přechodové charakteristiky - K_2
změněné o $\pm 20\%$.



Obrázek 3.3: Přechodové charakteristiky - K_1
změněné o $\pm 20\%$.



Obrázek 3.4: Přechodové charakteristiky - τ_1
změněné o $\pm 20\%$.



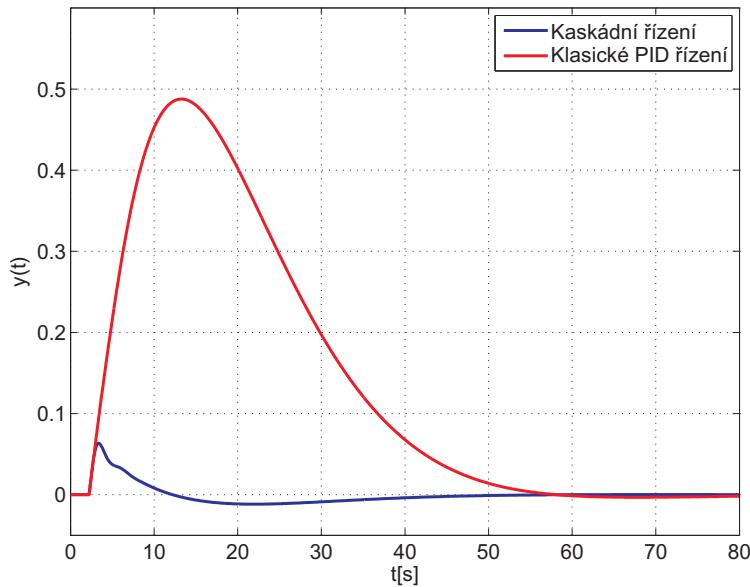
Obrázek 3.5: Přechodové charakteristiky - T_1
změněné o $\pm 20\%$.

výrazný vliv. Změny K_1 , τ_1 a T_1 mají u kaskádního řízení i u klasického PID řízení obdobný vliv na průběh přechodové charakteristiky (viz. obr. 3.3, obr. 3.4 a obr. 3.5). Změny K_1 a τ_1 výrazně ovlivňují velikost překmitu a dobu ustálení. Naproti tomu změna T_1 má pouze malý vliv na velikost překmitu.

3.4 Vliv poruchy ve vnitřní smyčce

V této části jsem analyzoval potlačení poruchy vzniklé ve vnitřní smyčce. Na obr. 3.6 můžeme pozorovat, že rozdíl mezi kaskádním řízením a klasickým PID řízením je značný.

V případě kaskádního řízení je překmit méně než 10% velikosti poruchy. Také dochází k mírnému podkmitnutí. Naproti tomu u klasického PID řízení se překmit blíží k 50%. Doba ustálení je v tomto případě delší než u kaskádního řízení. Kaskádní řízení tak výrazně lépe potlačuje poruchy ve vnitřní smyčce než klasické PID řízení.

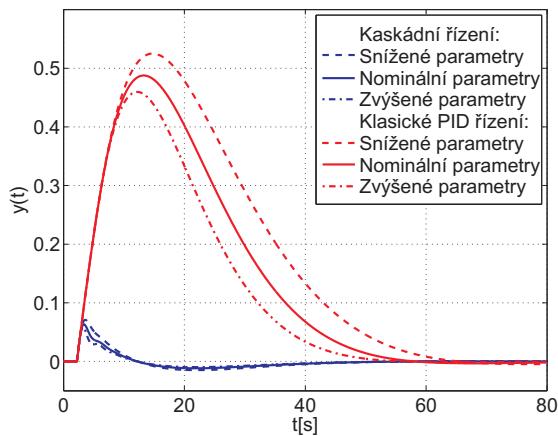


Obrázek 3.6: Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce.

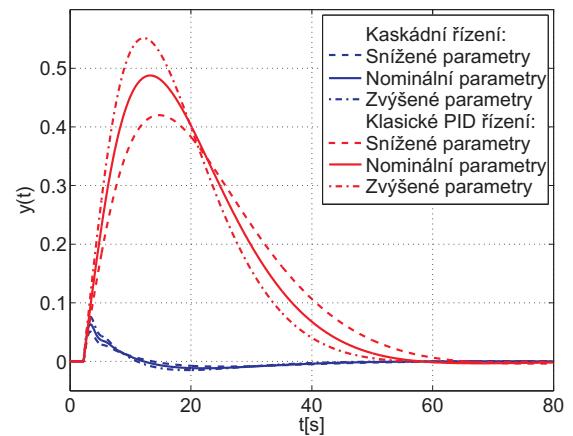
3.5 Robustnost potlačení poruchy ve vnitřní smyčce

Opět jsem postupně analyzoval případy změny parametrů K_2 , K_1 , τ_1 a T_1 podle (2.1) a (2.2). Změny parametrů τ_2 a T_2 se stejně jako v případě přechodové charakteristiky systému výrazněji neprojevily.

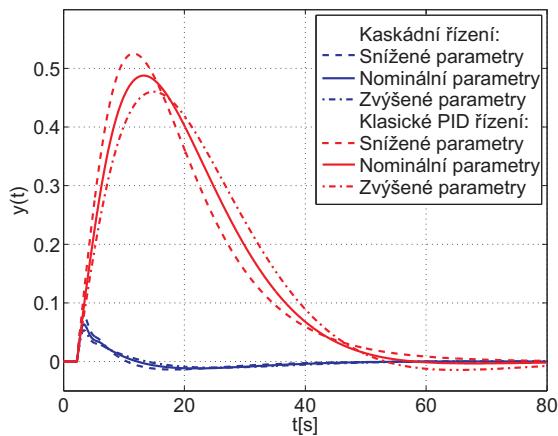
Změna parametrů K_2 , K_1 , τ_1 a T_1 má u kaskádního řízení zanedbatelný vliv na průběh potlačení poruchy ve vnitřní smyčce. Naproti tomu u klasického PID řízení se průběh mění výrazně při změnách všech parametrů (viz. obr. 3.7, obr. 3.8, obr. 3.9 a obr. 3.9). Nejvýrazněji se mění překmit průběhu potlačení poruchy ve vnitřní smyčce.



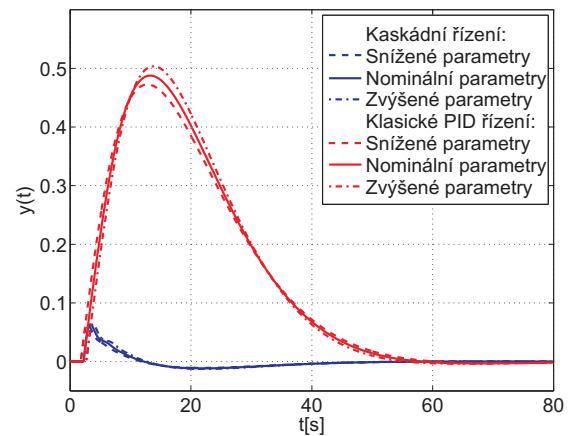
Obrázek 3.7: Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce - K_2 změněném o $\pm 20\%$.



Obrázek 3.8: Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce - K_1 změněném o $\pm 20\%$.



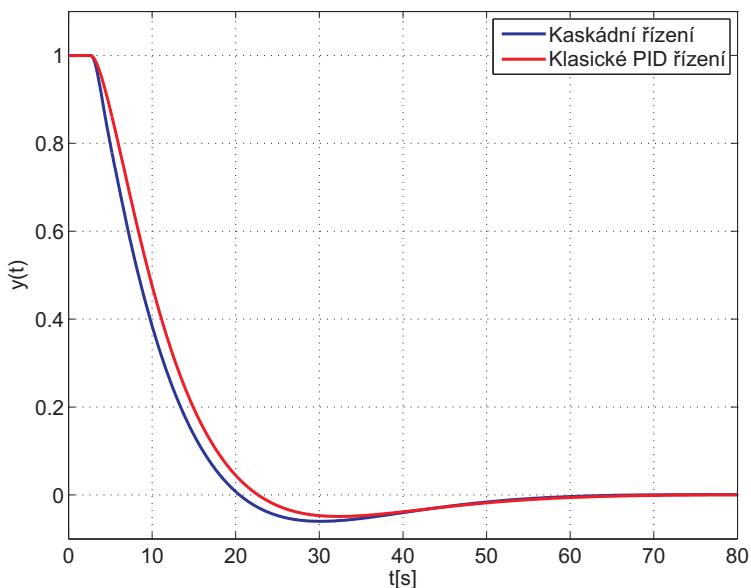
Obrázek 3.9: Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce - τ_1 změněném o $\pm 20\%$.



Obrázek 3.10: Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce - T_1 změněném o $\pm 20\%$.

3.6 Vliv poruchy ve vnější smyčce

V této části jsem analyzoval potlačení poruchy vzniklé ve vnější smyčce. Na obr. 3.11 můžeme pozorovat, že rozdíl mezi kaskádním řízením a klasickým PID řízením je obdobný jako u přechodové charakteristiky nominálního systému. V případě kaskádního řízení má potlačení poruchy kratší dobu náběhu. Doba ustálení je ale stejná jako v případě klasického PID řízení.

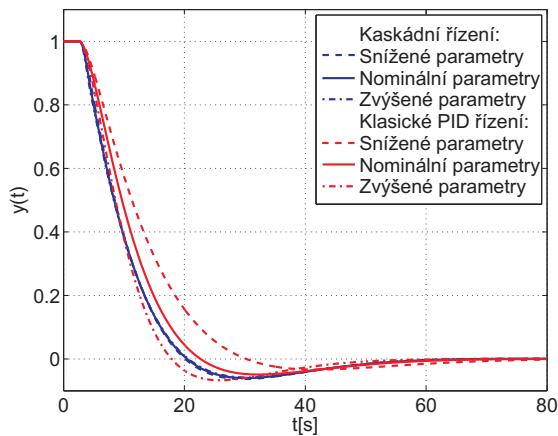


Obrázek 3.11: Potlačení poruchy ve vnější smyčce.

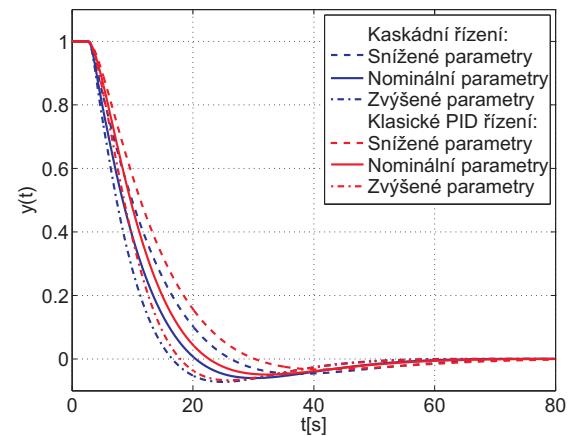
3.7 Robustnost potlačení poruchy ve vnější smyčce

Opět jsem postupně analyzoval případy změny parametrů K_2 , K_1 , τ_1 a T_1 podle (2.1) a (2.2). Změny parametrů τ_2 a T_2 se stejně jako v případě přechodové charakteristiky systému výrazněji neprojevily.

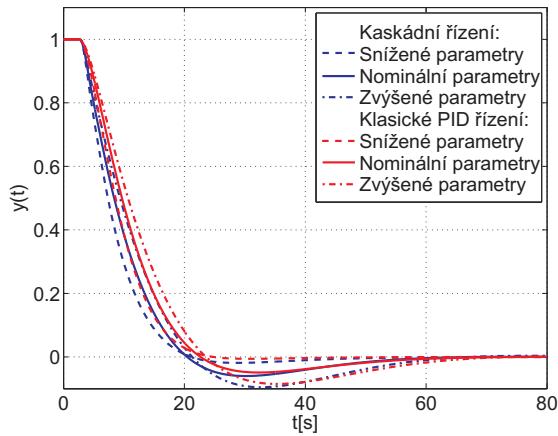
Na obr. 3.12 můžeme vidět vliv změny zesílení ve vnitřní smyčce K_2 . U kaskádního řízení se změnil průběh zanedbatelně. U klasického PID řízení má naproti tomu změna K_2 na průběh výrazný vliv. Změny K_1 , τ_1 a T_1 mají u kaskádního řízení i u klasického PID řízení obdobný vliv na průběh potlačení poruchy ve vnější smyčce (viz. obr. 3.13, obr. 3.13 a obr. 3.14). Změny K_1 a τ_1 ovlivňují výrazně podkmitnutí. Naproti tomu změna T_1 má na podkmitnutí pouze malý vliv.



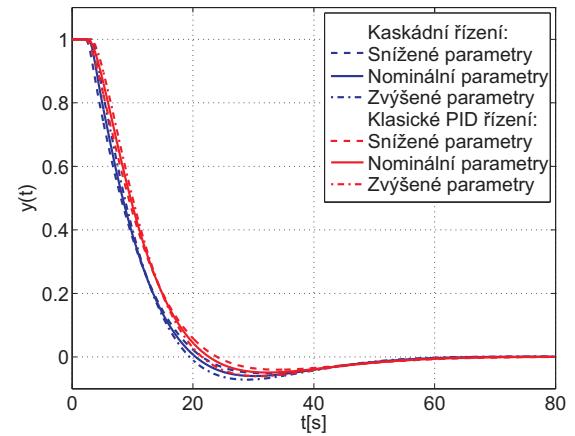
Obrázek 3.12: Potlačení poruchy ve vnější smyčce - K_2 změněné o $\pm 20\%$.



Obrázek 3.13: Potlačení poruchy ve vnější smyčce - K_1 změněné o $\pm 20\%$.



Obrázek 3.14: Potlačení poruchy ve vnější smyčce - τ_1 změněné o $\pm 20\%$.



Obrázek 3.15: Potlačení poruchy ve vnější smyčce - T_1 změněné o $\pm 20\%$.

3.8 Shrnutí výsledků

Při návrhu regulátorů jsem experimentálně zjistil, že pro co nejlepší potlačení poruch je optimální nastavit vnitřní smyčku tak, aby relativní tlumení uzavřené vnitřní smyčky bylo malé. Návrh se musí samozřejmě provést s ohledem na stabilitu celého systému. Regulátorem ve vnější smyčce se v tomto případě nastaví celkový tvar průběhu přechodové charakteristiky.

Výhodou kaskádního řízení je značná robustnost na změnu jednotlivých parametrů systému ve vnitřní smyčce. Změna K_2 má u kaskádního řízení na průběh přechodové charakteristiky zanedbatelný vliv ve srovnání s klasickým PID řízením. Reakce na změny parametrů K_1 , τ_1 a T_1 systému ve vnější smyčce byla u kaskádního řízení obdobná jako u klasického PID řízení.

Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce je při použití kaskádního řízení podstatně lepší než při použití klasického PID řízení. Průběh má podstatně menší překmit. Při změnách parametrů systému se navíc průběh potlačení poruchy téměř nemění. Naproti tomu u klasického PID řízení dochází při změnách parametrů systému k výrazným změnám průběhu potlačení poruchy.

Další výhodou kaskádního řízení je to, že lze měnit průběh potlačení poruchy ve vnitřní smyčce pomocí změny nastavení regulátoru ve vnitřní smyčce. Čím rychlejší je vnitřní smyčka, tím lépe se potlačí případná porucha. Podmínkou samozřejmě je, aby celý systém zůstal stabilní. Změna průběhu potlačení poruchy ve vnitřní smyčce u klasického PID řízení pochopitelně chybí a potlačení této poruchy se odvíjí pouze od celkové dynamiky systému. Pokud chceme tedy změnit průběh potlačení poruchy ve vnitřní smyčce, změníme tím výrazně i celkovou přechodovou charakteristiku systému.

Potlačení poruchy ve vnější smyčce má u kaskádního řízení i u klasického PID řízení podobný průběh jako přechodové charakteristiky. Hlavní rozdíl mezi oběma typy řízení je ten, že u kaskádního řízení nedojde při změně parametrů systému ve vnitřní smyčce k výraznějším změnám průběhu stejně jako je tomu u přechodové charakteristiky.

Kapitola 4

Vnitřní smyčka stejně rychlá jako vnější

V této části jsem analyzoval případ, kdy je vnitřní smyčka stejně rychlá jako vnější. V praxi ale nemají systémy nikdy úplně shodné parametry, proto jsem zvolil hodnoty parametrů systému ve vnitřní smyčce o 5% nižší. Pro analýzu jsem tedy zvolil systémy podle (2.1) a (2.2) s parametry uvedenými v tabulce 4.1.

Systém	K	τ	T
G_1	1,2	14	2,25
G_2	1,14	13,3	2,14

Tabulka 4.1: Parametry systémů G_1 a G_2 při stejně rychlé vnitřní smyčce

4.1 Nastavení regulátorů

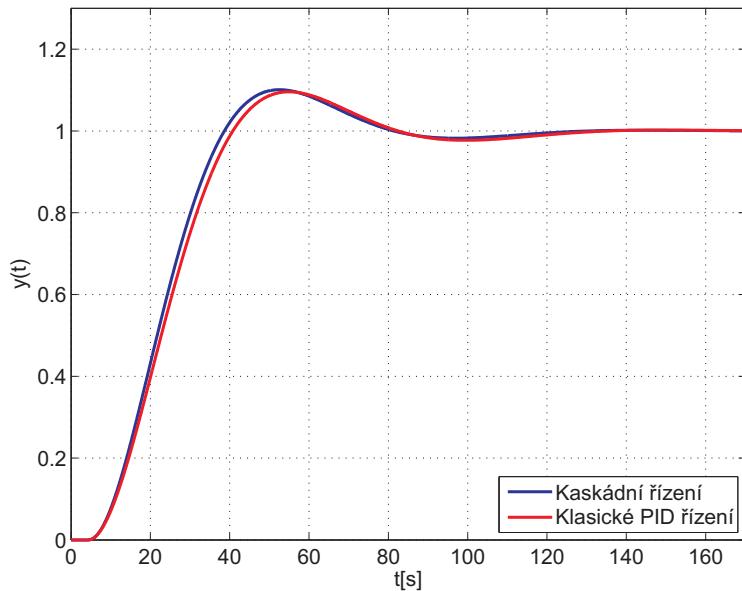
Konkrétní hodnoty proporcionálních, integračních a derivačních složek regulátorů a zvolené fázové bezpečnosti jsou uvedeny v tabulce 4.2.

Regulátor	PM	P	I	D
PI vnitřní smyčka	85	0,8419	0,0581	0
PI vnější smyčka	60	0,853	0,042	0
PI klasické řízení	60	0,73	0,034	0

Tabulka 4.2: Parametry regulátorů při stejně rychlé vnitřní smyčce

4.2 Nominální systém

Na obr. 4.1 můžeme pozorovat přechodové charakteristiky systému při nominálních hodnotách parametrů. V případě kaskádního řízení má průběh kratší dobu náběhu, ale doba ustálení a překmit jsou shodné s klasickým PID řízením a průběh obou přechodových charakteristik je velmi podobný.

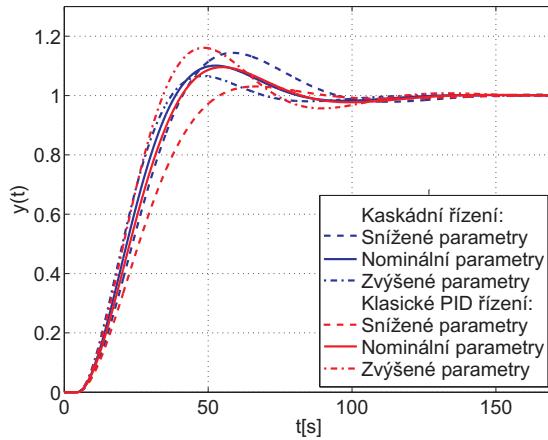


Obrázek 4.1: Přechodové charakteristiky nominálního systému

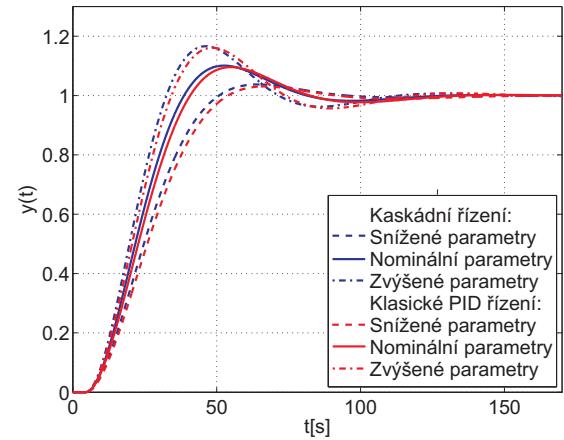
4.3 Robustnost systému na změnu parametrů

V této části jsem se zaměřil na robustnost systému vůči změně parametrů jednotlivých částí systému. Postupně jsem analyzoval případy změny parametrů K_2 , K_1 , τ_2 a τ_1 podle (2.1) a (2.2). Změny průběhu přechodových charakteristik při změně T_2 a T_1 byly při použití kaskádního řízení i klasického PID řízení v řádu desetin procenta. Lze je tedy zanedbat, proto přechodové charakteristiky pro tyto případy v této práci neuvádím.

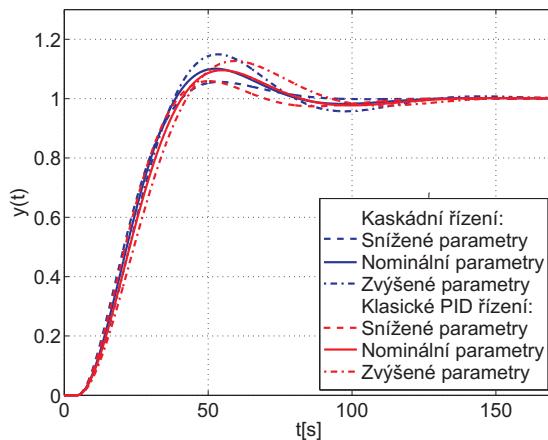
Na obr. 4.2 můžeme vidět vliv snížení zesílení ve vnitřní smyčce K_2 . U kaskádního řízení se se zvyšujícím K_2 zmenšuje překmit a zkracuje doba ustálení. Naproti tomu u klasického PID řízení se překmit zvětšuje. Změny K_1 , τ_2 a τ_1 mají u kaskádního řízení i u klasického PID řízení obdobný vliv na průběh přechodové charakteristiky (viz. obr. 4.3, obr. 4.4 a obr. 4.5). Výrazně ovlivňují velikost překmitu a dobu ustálení.



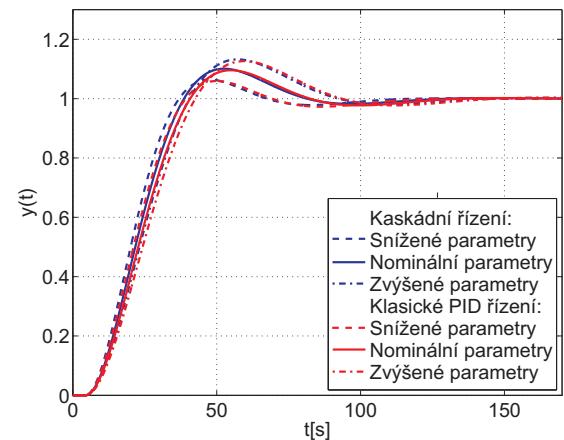
Obrázek 4.2: Přechodové charakteristiky - K_2
změněné o $\pm 20\%$.



Obrázek 4.3: Přechodové charakteristiky - K_1
změněné o $\pm 20\%$.



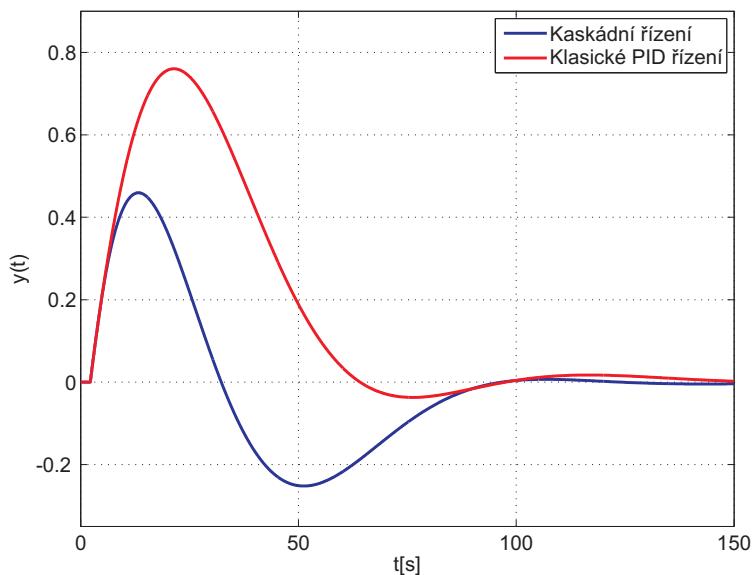
Obrázek 4.4: Přechodové charakteristiky - τ_2
změněné o $\pm 20\%$.



Obrázek 4.5: Přechodové charakteristiky - τ_1
změněné o $\pm 20\%$.

4.4 Vliv poruchy ve vnitřní smyčce

V této části jsem analyzoval potlačení poruchy vzniklé ve vnitřní smyčce. Na obr. 4.6 můžeme pozorovat, že rozdíl mezi kaskádním řízením a klasickým PID řízením je opět značný. V případě kaskádního řízení je překmit téměř poloviční než u klasického PID řízení. Na druhou stranu ale dochází k výraznému podkmitnutí požadované hodnoty. Doba ustálení je obdobná u obou typů řízení.

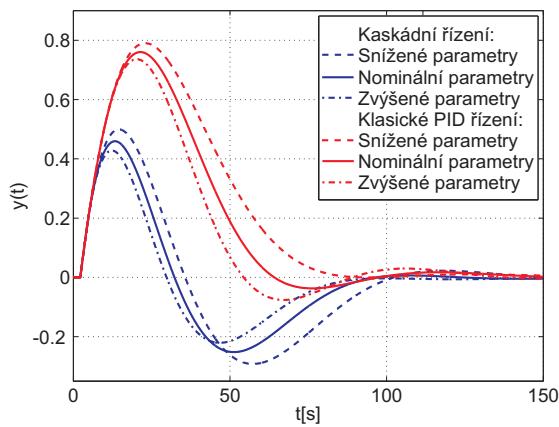


Obrázek 4.6: Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce.

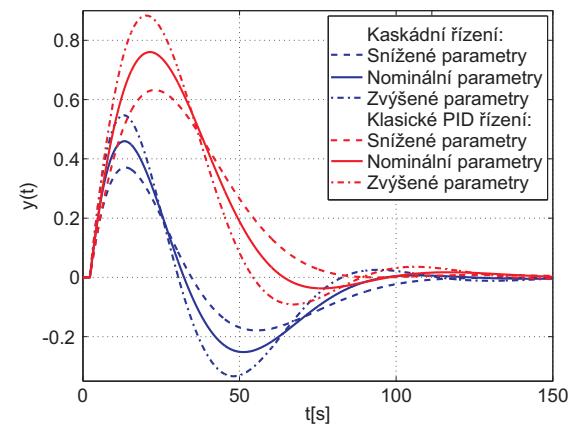
4.5 Robustnost potlačení poruchy ve vnitřní smyčce

Opět jsem postupně analyzoval případy změny parametrů K_2 , K_1 , τ_2 a τ_1 podle (2.1) a (2.2). Změny parametrů T_2 a T_1 se stejně jako v případě přechodové charakteristiky systému výrazněji neprojevily.

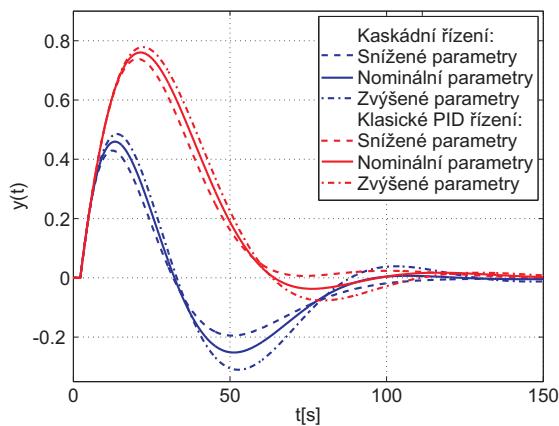
Změny K_2 , K_1 , τ_2 a τ_1 mají u kaskádního řízení i u klasického PID řízení obdobný vliv na průběh potlačení poruchy ve vnitřní smyčce (viz. obr. 4.7, obr. 4.8, obr. 4.9 a obr. 4.10).



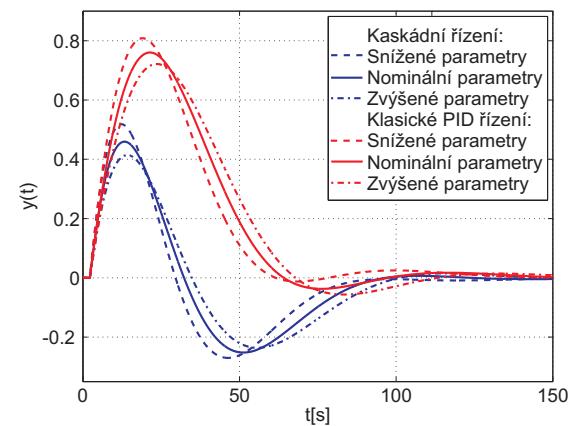
Obrázek 4.7: Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce - K_2 změněné o $\pm 20\%$.



Obrázek 4.8: Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce - K_1 změněné o $\pm 20\%$.



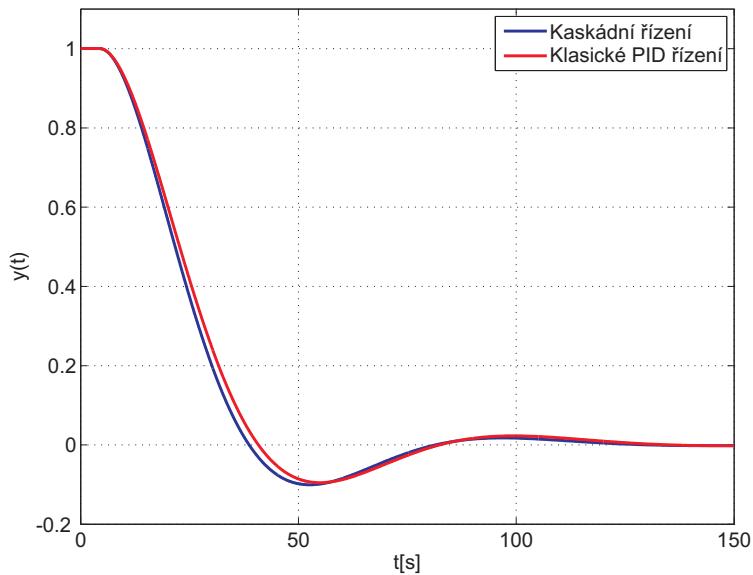
Obrázek 4.9: Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce - τ_2 změněné o $\pm 20\%$.



Obrázek 4.10: Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce - τ_1 změněné o $\pm 20\%$.

4.6 Vliv poruchy ve vnější smyčce

V této části jsem analyzoval potlačení poruchy vzniklé ve vnější smyčce. Na obr. 4.11 můžeme pozorovat, že rozdíl mezi kaskádním řízením a klasickým PID řízením je obdobný jako u přechodové charakteristiky nominálního systému. V případě kaskádního řízení má potlačení poruchy kratší dobu náběhu. Doba ustálení je ale stejná jako v případě klasického PID řízení.

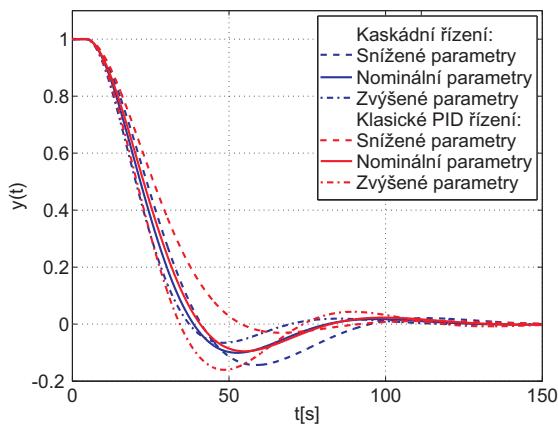


Obrázek 4.11: Potlačení poruchy ve vnější smyčce.

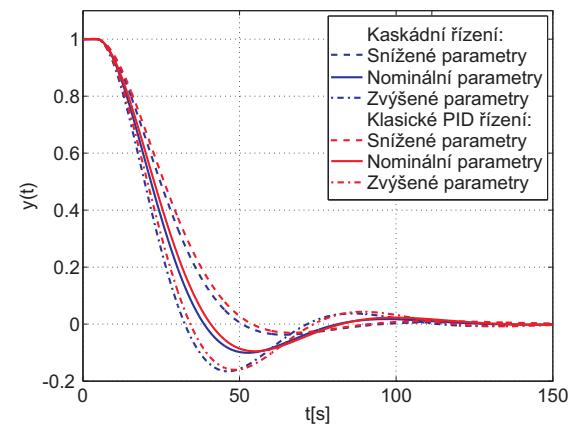
4.7 Robustnost potlačení poruchy ve vnější smyčce

Opět jsem postupně analyzoval případy změny parametrů K_2 , K_1 , τ_2 a τ_1 podle (2.1) a (2.2). Změny parametrů T_2 a T_1 se stejně jako v případě přechodové charakteristiky systému výrazněji neprojevily.

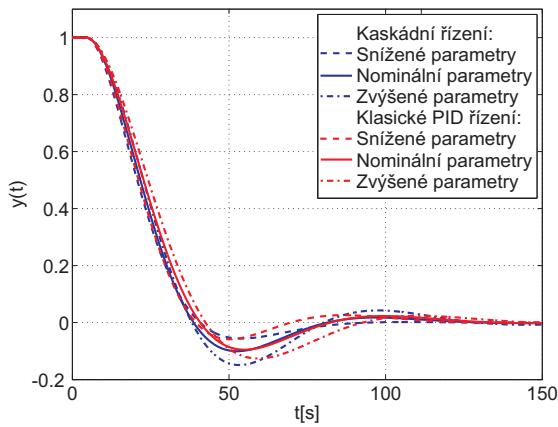
Na obr. 4.12 můžeme vidět vliv snížení zesílení ve vnitřní smyčce K_2 . U kaskádního řízení se se zvyšujícím K_2 zmenšuje podkmitnutí a zkracuje doba ustálení. Naproti tomu se u klasického PID řízení podkmitnutí zvětšuje. Změny K_1 , τ_2 a τ_1 mají u kaskádního řízení i u klasického PID řízení obdobný vliv na průběh potlačení poruchy ve vnější smyčce (viz. obr. 4.3, obr. 4.4 a obr. 4.5). Změny K_1 , τ_2 a τ_1 výrazně ovlivňují velikost podkmitnutí a dobu ustálení.



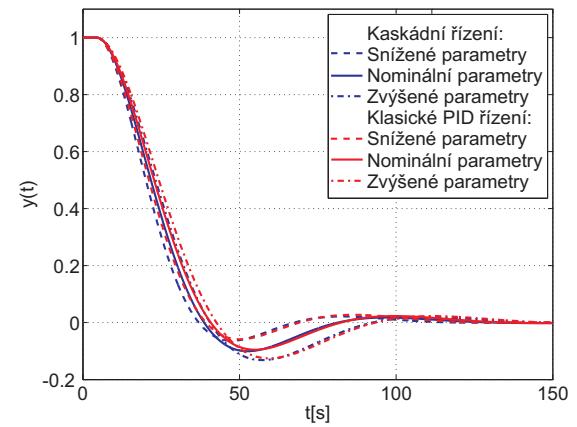
Obrázek 4.12: Potlačení poruchy ve vnější smyčce - K_2 změněné o $\pm 20\%$.



Obrázek 4.13: Potlačení poruchy ve vnější smyčce - K_1 změněné o $\pm 20\%$.



Obrázek 4.14: Potlačení poruchy ve vnější smyčce - τ_2 změněné o $\pm 20\%$.



Obrázek 4.15: Potlačení poruchy ve vnější smyčce - τ_1 změněné o $\pm 20\%$.

4.8 Shrnutí výsledků

Při návrhu regulátorů jsem experimentálně zjistil, že pro co nejlepší potlačení poruch je optimální nastavit vnitřní smyčku tak, aby relativní tlumení uzavřené vnitřní smyčky bylo velké. Pokud je relativní tlumení malé, zvětší se podkmitnutí průběhu potlačení poruchy ve vnitřní smyčce.

V případě stejně rychlé vnitřní smyčky ztrácí kaskádní řízení výhodu lepší robustnosti na změnu parametrů systému. Reakce na změny všech jednotlivých parametrů systému byla u kaskádního řízení obdobná jako u klasického PID řízení.

Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce má v případě kaskádního řízení téměř poloviční překmit než v případě klasického PID řízení. Nevýhodou je ale výrazné podkmitnutí požadované hodnoty. V případě stejně rychlé vnitřní smyčky opět ztrácí kaskádní řízení výhodu lepší robustnosti na změnu parametrů systému. Ve všech případech byla reakce na změnu parametrů systému při potlačení poruchy ve vnitřní smyčce obdobná jako u klasického PID řízení.

V předešlé kapitole jsem se zmínil o výhodě kaskádního řízení v tom, že lze měnit průběh potlačení poruchy ve vnitřní smyčce pomocí změny nastavení regulátoru ve vnitřní smyčce. Při shodné dynamice vnitřní a vnější smyčky bohužel nastane to, že obě části systému mají značný vliv na celkovou přechodovou charakteristiku systému, proto nelze téměř nezávisle měnit průběh potlačení poruchy ve vnitřní smyčce. Tuto výhodu tak kaskádní řízení při této kombinaci dynamiky obou smyček opět ztrácí.

Potlačení poruchy ve vnější smyčce je při použití kaskádního řízení téměř shodné s klasickým PID řízením. Při změně parametrů dochází k obdobným změnám průběhů jako u přechodových charakteristik.

Kapitola 5

Vnitřní smyčka pomalejší než vnější

V této části jsem analyzoval případ, kdy je vnitřní smyčka pomalejší než vnější. Pro analýzu jsem zvolil systémy podle (2.1) a (2.2) s parametry uvedenými v tabulce 5.1.

Systém	K	τ	T
G_1	1,8	1	0,4
G_2	1,2	14	2,25

Tabulka 5.1: Parametry systémů G_1 a G_2 při pomalejší vnitřní smyčce

5.1 Nastavení regulátorů

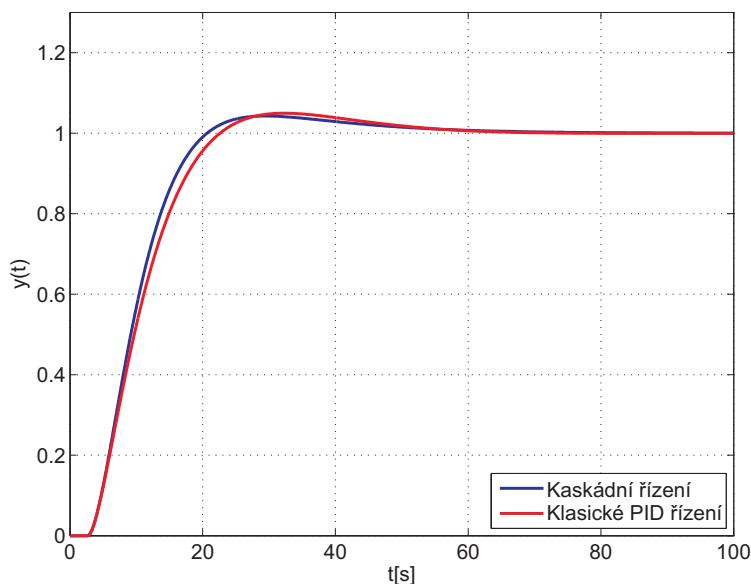
Konkrétní hodnoty proporcionálních, integračních a derivačních složek regulátorů a zvolené fázové bezpečnosti jsou uvedeny v tabulce 5.2, kde PM je zvolená fázová bezpečnost.

Regulátor	PM	P	I	D
PI vnitřní smyčka	85	0,802	0,053	0
PI vnější smyčka	65	0,641	0,064	0
PI klasické řízení	65	0,536	0,053	0

Tabulka 5.2: Parametry regulátorů při pomalejší vnitřní smyčce

5.2 Nominální systém

Na obr. 5.1 můžeme pozorovat přechodové charakteristiky systému při nominálních hodnotách parametrů. Kaskádní řízení má kratší dobu náběhu a menší překmit, ale doba ustálení je shodná s klasickým PID řízením a průběh obou přechodových charakteristik je velmi podobný.

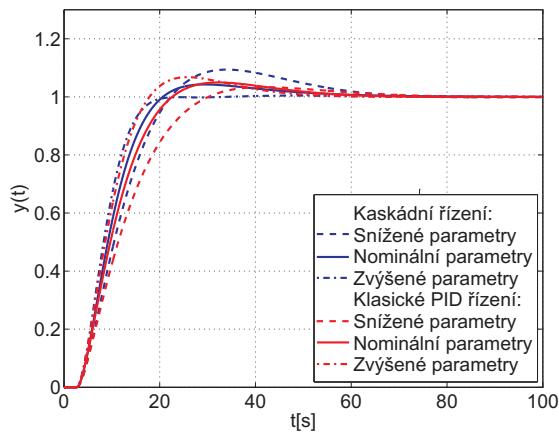


Obrázek 5.1: Přechodové charakteristiky nominálního systému

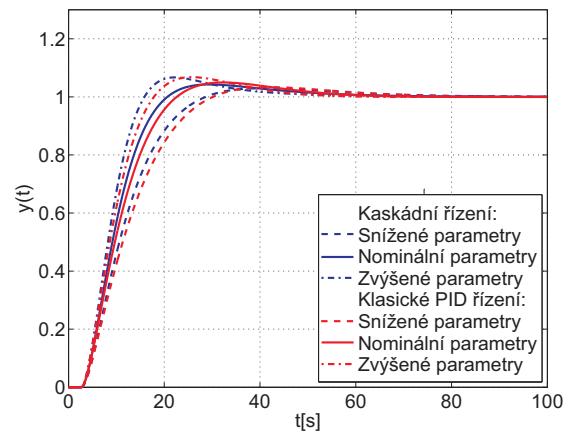
5.3 Robustnost systému na změnu parametrů

V této části jsem se zaměřil na robustnost systému vůči změně parametrů jednotlivých částí systému. Postupně jsem analyzoval změny parametrů K_2 , K_1 , τ_2 a T_2 podle (2.1) a (2.2). Změny průběhu přechodových charakteristik při snížení τ_1 a T_1 byly při použití obou typů řízení zanedbatelné, proto je v této práci neuvádím.

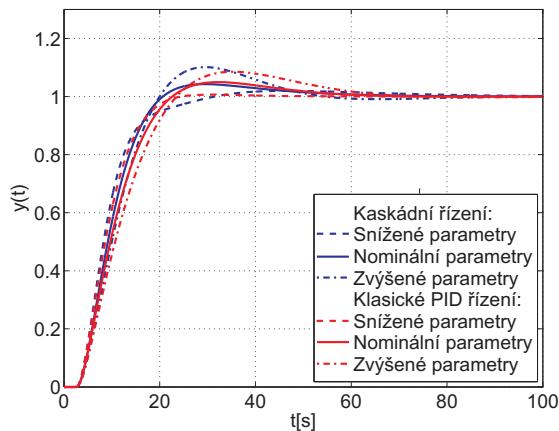
Na obr. 5.7 můžeme vidět vliv změny zesílení ve vnitřní smyčce K_2 . U kaskádního řízení se se zvyšujícím K_2 zmenšuje překmit a zkracují se doba ustálení a doba náběhu. Naproti tomu u klasického PID řízení se překmit zvětšuje. Vliv na průběh přechodové charakteristiky mají změny K_1 , τ_2 a T_2 obdobný u kaskádního řízení i u klasického PID řízení (viz. obr. 5.8, obr. 5.9 a obr. 5.10). Změny K_1 a τ_2 výrazně ovlivňují překmit a dobu ustálení. Změna T_2 má ale zanedbatelný vliv na průběh přechodové charakteristiky.



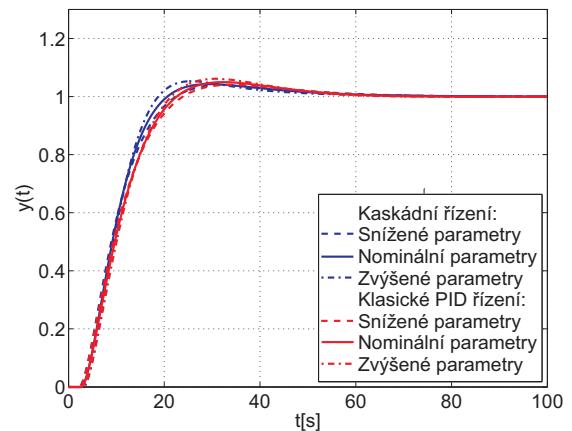
Obrázek 5.2: Přechodové charakteristiky - K_2
změněné o $\pm 20\%$.



Obrázek 5.3: Přechodové charakteristiky - K_1
změněné o $\pm 20\%$.



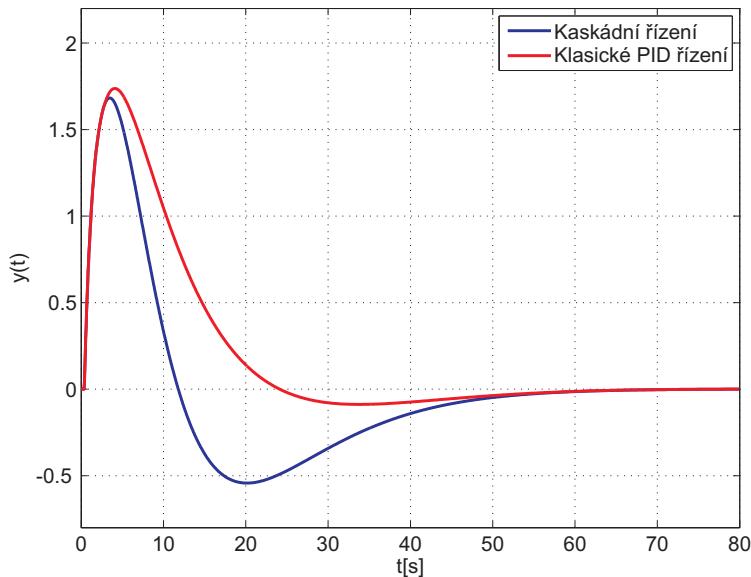
Obrázek 5.4: Přechodové charakteristiky - τ_2
změněné o $\pm 20\%$.



Obrázek 5.5: Přechodové charakteristiky - T_2
změněné o $\pm 20\%$.

5.4 Vliv poruchy ve vnitřní smyčce

V této části jsem analyzoval potlačení poruchy vzniklé ve vnitřní smyčce. Na obr. 5.6 můžeme pozorovat, že rozdíl mezi kaskádním řízením a klasickým PID řízením je značný. V případě kaskádního řízení je překmit menší. Dochází ale k velkému podkmitnutí. Naproti tomu u klasického PID řízení je překmit větší, ale podkmitnutí je výrazně menší. Doba ustálení je shodná u obou typů řízení.

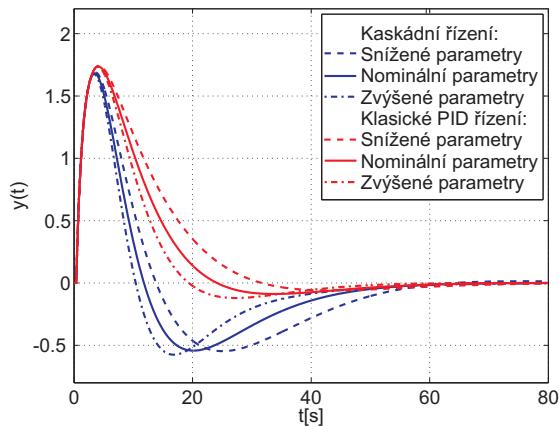


Obrázek 5.6: Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce.

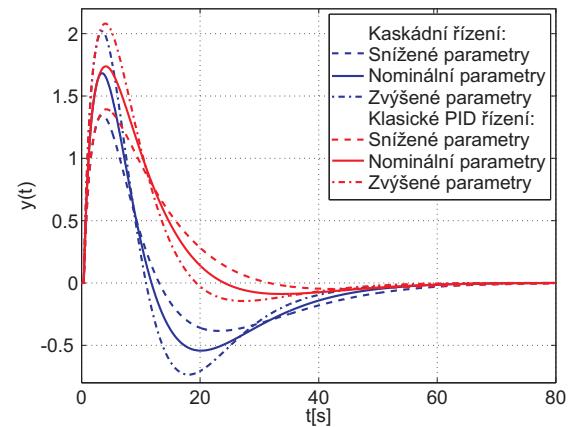
5.5 Robustnost potlačení poruchy ve vnitřní smyčce

Opět jsem postupně analyzoval případy změny parametrů K_2 , K_1 , τ_2 a T_2 podle (2.1) a (2.2). Změny parametrů τ_1 a T_1 se stejně jako v případě přechodové charakteristiky systému výrazněji neprojevily.

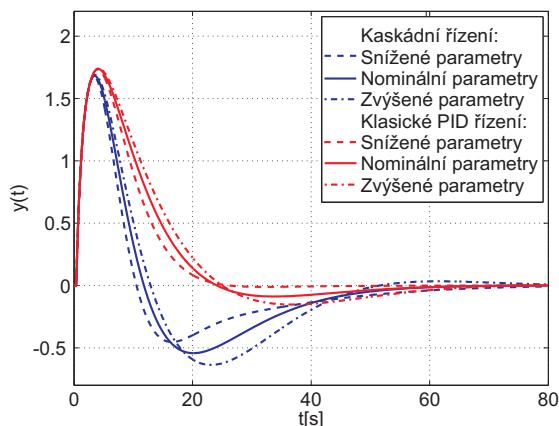
Změny K_2 , K_1 , τ_2 a T_2 mají u kaskádního řízení i u klasického PID řízení obdobný vliv na průběh potlačení poruchy ve vnitřní smyčce (viz. obr. 5.7, obr. 5.8, obr. 5.9 a obr. 5.10). Změny K_2 , K_1 , τ_2 a T_2 výrazně ovlivňují překmit, podkmitnutí a dobu ustálení.



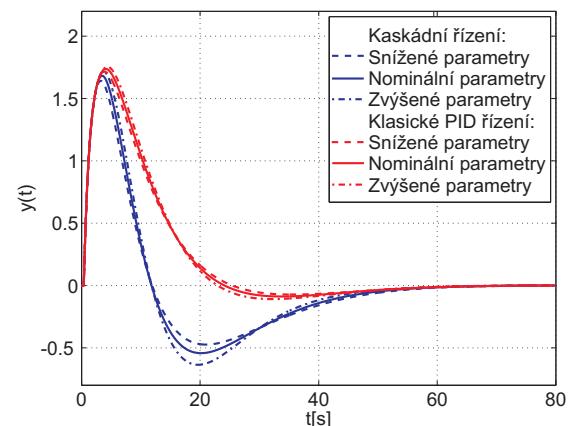
Obrázek 5.7: Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce - K_2 změněné o $\pm 20\%$.



Obrázek 5.8: Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce - K_1 změněné o $\pm 20\%$.



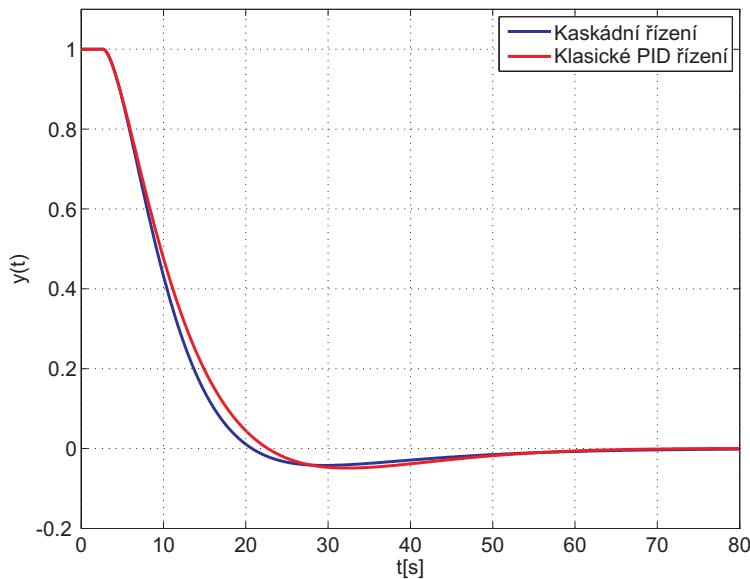
Obrázek 5.9: Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce - τ_2 změněné o $\pm 20\%$.



Obrázek 5.10: Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce - T_2 změněné o $\pm 20\%$.

5.6 Vliv poruchy ve vnější smyčce

V této části jsem analyzoval potlačení poruchy vzniklé ve vnější smyčce. Na obr. 5.11 můžeme pozorovat, že rozdíl mezi kaskádním řízením a klasickým PID řízením je obdobný jako u přechodové charakteristiky nominálního systému. V případě kaskádního řízení má potlačení poruchy kratší dobu náběhu. Doba ustálení je ale stejná jako v případě klasického PID řízení.

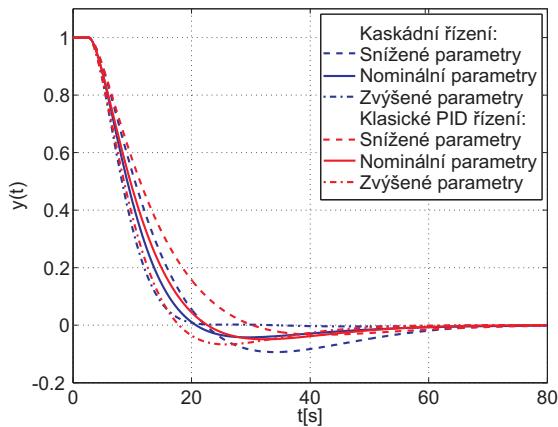


Obrázek 5.11: Potlačení poruchy ve vnější smyčce.

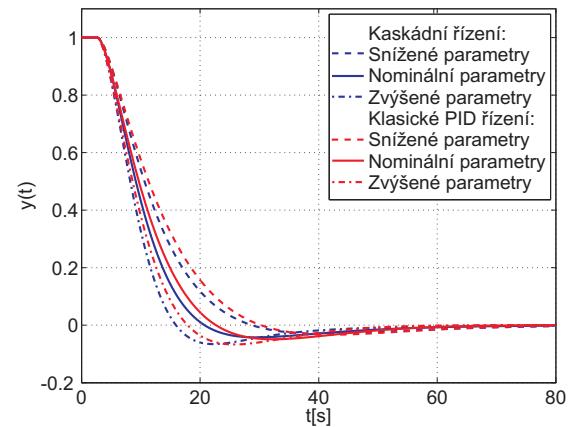
5.7 Robustnost potlačení poruchy ve vnější smyčce

Opět jsem postupně analyzoval případy změny parametrů K_2 , K_1 , τ_2 a T_2 podle (2.1) a (2.2). Změny parametrů τ_1 a T_1 se stejně jako v případě přechodové charakteristiky systému výrazněji neprojevily.

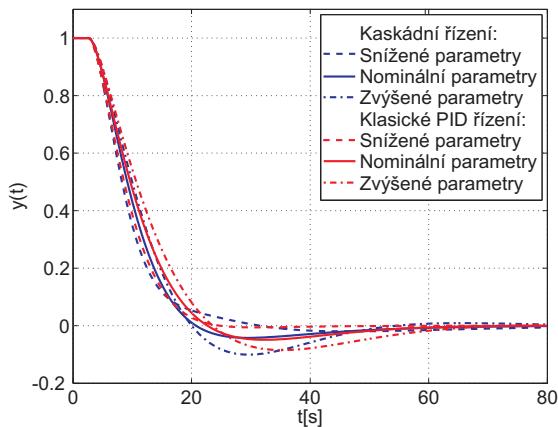
Na obr. 5.7 můžeme vidět vliv změny zesílení ve vnitřní smyčce K_2 . U kaskádního řízení se se zvyšujícím K_2 zmenšuje podkmitnutí. Naproti tomu u klasického PID řízení se podkmitnutí zvětšuje. Změny K_1 , τ_2 a T_2 mají u kaskádního řízení i u klasického PID řízení obdobný vliv na průběh potlačení poruchy ve vnější smyčce (viz. obr. 5.8, obr. 5.9 a obr. 5.10). Změny K_1 a τ_2 výrazně ovlivňují podkmitnutí a dobu ustálení. Naproti tomu změna T_2 má zanedbatelný vliv na průběh přechodové charakteristiky.



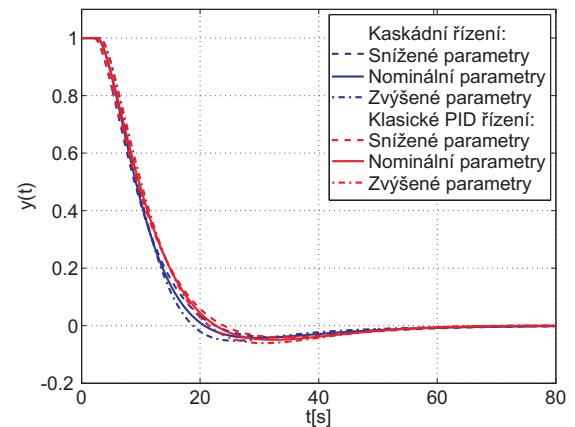
Obrázek 5.12: Potlačení poruchy ve vnější smyčce - K_2 změněné o $\pm 20\%$.



Obrázek 5.13: Potlačení poruchy ve vnější smyčce - K_1 změněné o $\pm 20\%$.



Obrázek 5.14: Potlačení poruchy ve vnější smyčce - τ_2 změněné o $\pm 20\%$.



Obrázek 5.15: Potlačení poruchy ve vnější smyčce - T_2 změněné o $\pm 20\%$.

5.8 Shrnutí výsledků

Při návrhu regulátorů jsem experimentálně zjistil, že pro co nejlepší potlačení poruch je optimální nastavit vnitřní smyčku tak, aby relativní tlumení uzavřené vnitřní smyčky bylo velké. Pokud je relativní tlumení malé, zvětší se podkmitnutí průběhu potlačení poruchy ve vnitřní smyčce.

V případě pomalejší vnitřní smyčky ztrácí kaskádní řízení výhodu lepší robustnosti na změnu parametrů systému ve vnitřní smyčce. Ve všech případech změny parametrů systému byly reakce u obou typů řízení obdobné nebo byly výsledky kaskádního řízení dokonce horší.

Průběh potlačení poruchy ve vnitřní smyčce má v případě kaskádního řízení menší překmit, ale dochází k výraznému podkmitnutí požadované hodnoty, což je v některých případech nežádoucí. Naproti tomu u klasického PID řízení je podkmitnutí výrazně menší.

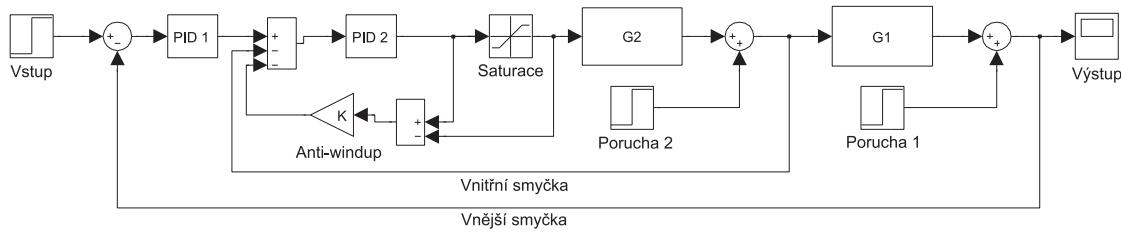
Jak už jsem se zmínil v předešlých kapitolách, výhodou kaskádního řízení je to, že lze měnit průběh potlačení poruchy ve vnitřní smyčce pomocí změny nastavení regulátoru ve vnitřní smyčce. V tomto případě ale téměř nelze dosáhnout výrazně lepších výsledků. Pomalejší systém ve vnitřní smyčce neumožňuje výrazné zlepšení potlačení poruchy, aniž bychom výrazně změnili celkovou přechodovou charakteristiky systému.

Potlačení poruchy ve vnější smyčce je u kaskádního řízení téměř shodné s klasickým PID řízením. Při změně parametrů systému se průběh mění obdobně jako u přechodových charakteristik.

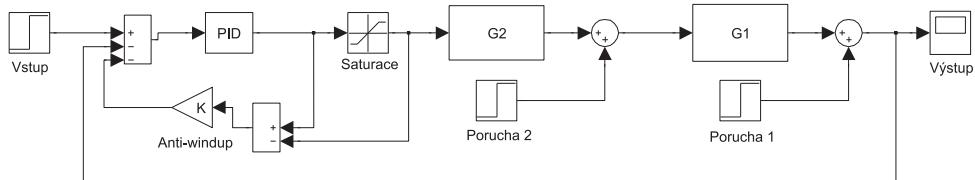
Kapitola 6

Omezení saturací

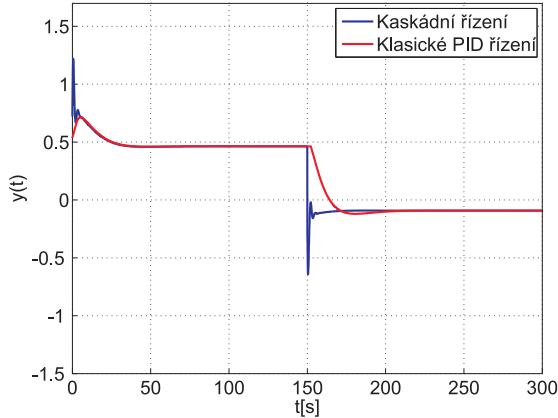
Akční zásahy u kaskádního řízení byly při všech kombinacích vnitřní a vnější smyčky větší než u klasického PID řízení. Vyhodnocuje tak otázka, zda lepší výsledky kaskádního řízení při potlačování poruchy ve vnitřní smyčce nejsou způsobeny pouze těmito většími akčními zásahy. V této části tak analyzuji případ, kdy jsou maximální akční zásahy omezeny saturací (viz. obr. 6.1 a obr. 6.2). Zároveň jsem u obou typů řízení zavedl jednoduchou ochranu proti přebuzení (anti-windup).



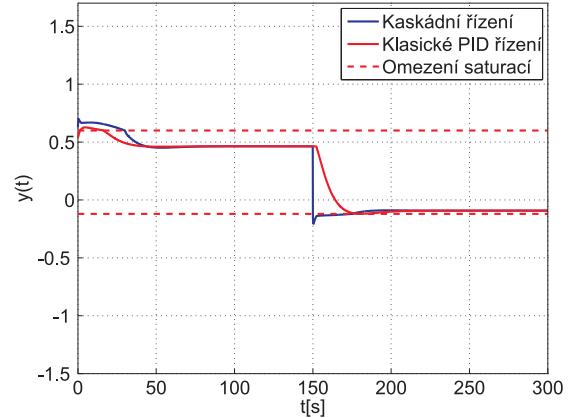
Obrázek 6.1: Schéma kaskádního řízení se saturací a ochranou anti-windup.



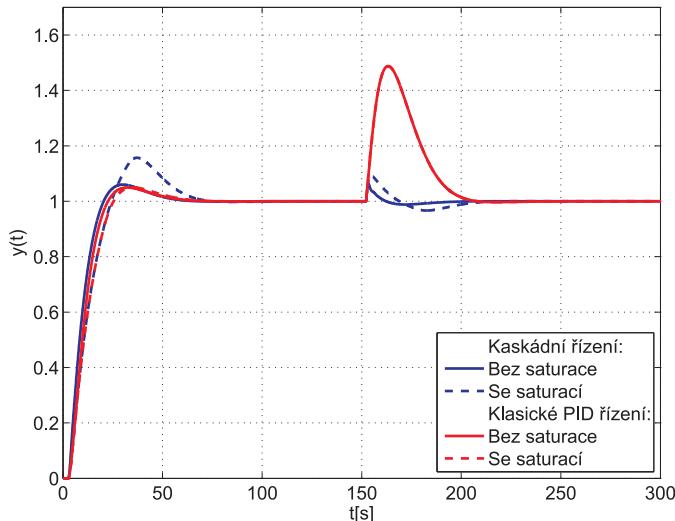
Obrázek 6.2: Schéma klasického PID řízení se saturací a ochranou anti-windup.



Obrázek 6.4: Akční zásahy bez saturace.



Obrázek 6.5: Akční zásahy se saturací.



Obrázek 6.3: Přechodová charakteristika a potlačení poruchy ve vnitřní smyčce.

K analýze jsem použil kombinaci dynamiky, kdy je vnitřní smyčka rychlejší než vnější, a při které kaskádní řízení dosáhlo výrazně lepších výsledků při potlačování poruchy ve vnitřní smyčce. Akční zásahy jsem saturací omezil tak, aby měly u obou typů řízení podobnou velikost. Zesílení u ochrany anti-windup jsem u obou typů řízení nastavil na $K = 5$. Nastavená horní mez saturace je $y_h = 0,6$ a dolní mez saturace je $y_d = -0,12$.

Saturace má největší vliv na přechodovou charakteristiku. U kaskádního řízení způsobí výrazné zvětšení překmitu (viz. obr. 6.3). Naproti tomu u klasického PID řízení se změní zanedbatelně, protože původní akční zásah je menší a saturace tak průběh příliš neovlivní (viz. obr. 6.4 a obr. 6.5). I po omezení akčních zásahů saturací ale kaskádní řízení výrazně lépe potlačuje poruchu ve vnitřní smyčce než klasické PID řízení.

Kapitola 7

Závěr

V této bakalářské práci jsem vyzkoušel nastavení regulátorů kaskádního řízení systémů prvního řádu s dopravním zpožděním pro všechny kombinace dynamiky vnitřní a vnější smyčky. Postupně jsem analyzoval robustnost řízení na změnu jednotlivých parametrů systému. Také jsem zkoumal potlačení poruchy jak ve vnitřní tak ve vnější smyčce. Všechny průběhy jsem porovnal s klasickým PID řízením nastaveným tak, aby přechodová charakteristika měla obdobný průběh jako u kaskádního řízení.

V případě, kdy je vnitřní smyčka rychlejší, lze při použití kaskádního řízení dosáhnout při potlačení poruchy ve vnitřní smyčce podstatně menšího překmitu a kratší doby ustálení než v případě klasického PID řízení. Kaskádní řízení také v tomto případě předčí klasické PID řízení robustností na změnu parametrů systému ve vnitřní smyčce. Průběhy potlačení poruch i přechodová charakteristika celého systému se na rozdíl od klasického PID řízení téměř nezměnily. Změny parametrů systému ve vnější smyčce měly na průběhy potlačení poruchy ve vnější smyčce a na přechodovou charakteristiku celého systému obdobný vliv u obou typů řízení. Výhodou kaskádního řízení je to, že lze v tomto případě průběh potlačení poruchy ve vnitřní smyčce upravit regulátorem ve vnitřní smyčce, aniž by došlo k výraznějším změnám průběhu přechodové charakteristiky celého systému.

V případě, kdy je vnitřní smyčka stejně rychlá, lze při použití kaskádního řízení dosáhnout při potlačení poruchy ve vnitřní smyčce menšího překmitu, ale zároveň většího podkmitnutí než v případě klasického PID řízení. Jelikož systémy ve vnitřní a vnější smyčce mají v tomto případě obdobnou dynamiku, projeví se změna parametrů obou systémů výrazně u obou typů řízení. Kaskádní řízení tak při této kombinaci dynamiky nezlepší robustnost na změnu parametrů systému.

V případě, kdy je vnitřní smyčka pomalejší, je překmit při potlačení poruchy téměř shodný jako v případě klasického PID řízení. Na druhou stranu má ale průběh velké

podkmitnutí. Při změnách parametrů systému byly změny průběhů u kaskádního řízení podobné nebo dokonce horší než u klasického PID řízení. Při této kombinaci dynamiky tak není příliš vhodné kaskádní řízení použít.

Největší rozdíl mezi kaskádním řízením a klasickým PID řízením je tedy v průbězích potlačení poruchy ve vnitřní smyčce. Nejvhodnější kombinací dynamiky je případ, kdy je vnitřní smyčka rychlejší než vnější. Při použití kaskádního řízení má průběh potlačení poruchy podstatně menší překmit a kratší dobu ustálení než u klasického PID řízení. Navíc lze průběh potlačení poruchy měnit příslušnou změnou nastavení regulátoru ve vnitřní smyčce bez větších změn přechodové charakteristiky celého systému.

Omezení akčních zásahů saturací má největší vliv na přechodovou charakteristiku u kaskádního řízení. Potlačení poruchy ve vnitřní smyčce v případě, kdy je vnitřní smyčka rychlejší, je ale i s tímto omezením podstatně lepší než u klasického PID řízení.

Literatura

- [1] FRANKLIN, G.F.; POWELL, J.D.; EMAMI-NAEINI, A. Feedback Control of Dynamic Systems. [s.l.] : Prentice Hall, 2006. 910 s. ISBN 0-13-149930-0.
- [2] HAVEL, Petr. Frekvenční metody syntézy [online]. [s.l.], 2005. 11 s. Oborová práce. ČVUT Praha. Dostupné z WWW: <http://support.dce.felk.cvut.cz/e-kurzy/file.php/14/cviceni/SRI_cv5_frekvencni_metody.pdf>.
- [3] Systémy a řízení : Web kurzu [online]. 2010 [cit. 2010-04-09]. X35SRI. Dostupné z WWW: <<http://support.dce.felk.cvut.cz/e-kurzy/course/view.php?id=14>>.
- [4] Cascade control [online]. 2010 [cit. 2010-04-09]. Dostupné z WWW: <http://www.bgu.ac.il/chem_eng/pages/Courses/oren%20courses/Chapter_10.pdf>.
- [5] SCHLEGEL, Miloš. Regulátory pro procesy s velkým dopravním zpožděním. Automa [online]. 2001, 12, [cit. 2010-05-14]. Dostupný z WWW : <<http://www.odbornecasopisy.cz/download/au120112.pdf>>.

Příloha A

Obsah přiloženého CD

K této práci je přiloženo CD, na kterém jsou uloženy skripty, funkce a schémata, které jsem vytvořil v prostředí MATLAB a Simulink pro účely této práce.

- Adresář ./: obsahuje hlavní skripty pro nastavení simulací - drawallinnerfaster.m, drawallallsame.m, drawallinnerslower.m, initialization.m
- Adresář ./drawing: obsahuje funkce pro vykreslení a uložení průběhů - drawallgraphs.m, drawstep.m, drawsteprobust.m
- Adresář ./saturation: obsahuje funkce pro simulace se saturací - drawsaturation.m, drawsaturationactionstep.m, drawsaturationstep.m, simulatesystemsaturation.m
- Adresář ./settings: obsahuje funkce pro nastavení regulátorů - getsettings.m, getregulator.m
- Adresář ./schemes: obsahuje schémata vytvořená v prostředí Simulink - cascadecontrolscheme.mdl, cascadecontrolsaturationscheme.mdl, classiccontrolsaturationscheme.mdl, classiccontrolscheme.mdl
- Adresář ./simulations: obsahuje funkce pro provedení simulací - simulateall.m, simulatesystem.m