

Disertační práce

Decentralizované adaptivní řízení

Ing. Karel Perůtka

Školitel: Prof. Ing. Vladimír Bobál, CSc.

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav řízení procesů

Zlín 2007

Poděkování

Rád bych poděkoval mému školiteli, panu prof. Ing. Vladimíru Bobálovi, CSc., za jeho příkladné vedení a podporu během přípravy mé disertace a během mého studia. Také bych rád poděkoval všem zaměstnancům Fakulty aplikované informatiky, kteří přispěli k realizaci disertační práce a také všem ostatním, kteří mě během studia podporovali.

Nejvíce ze všeho bych však rád poděkoval mým rodičům za jejich velkou podporu, protože bez jejich neustálého povzbuzování by tato disertace nikdy nebyla dokončená.

RESUMÉ

Předkládaná disertační práce se zabývá decentralizovaným adaptivním řízením mnohorozměrových soustav se stejným počtem vstupů a výstupů.

Hlavní částí práce je návrh algoritmu decentralizovaného řízení. Decentralizované řízení je jedním z nejpoužívanějších postupů v praxi při řízení mnohorozměrových soustav. Důvodem častého nasazení v praxi je jeho jednoduchá implementace. Předkládaný algoritmus je založen na přepínání nastavování s využitím supervisora během regulace a předidentifikaci. Předidentifikace se provádí rekurzivními metodami. Po předidentifikaci dojde k automatickému výběru nejvhodnější metody rekurzivní identifikace pro nasazení u samočinně se nastavujícího regulátoru během regulace.

Hlavním důvodem pro vznik nové metody decentralizovaného řízení byl námět vytvořit algoritmus supervisora pro nasazení v kombinaci se samočinně se nastavujícími regulátory.

Navržený algoritmus decentralizovaného řízení byl ověřen simulačně a na laboratorním modelu a to za různých podmínek. Simulačně byl testován vliv použité metody decentralizovaného řízení, vliv interakcí, poruchy ve tvaru sinusového signálu, šumu a vliv volby intervalu aproximace pro výpočet derivace. Pro ověření průběhů regulace na laboratorním modelu byl zvolen model spřažených elektromotorů CE108.

ABSTRACT

The thesis deals with decentralized adaptive control of multivariable systems with the same number of inputs and outputs.

The originally proposed algorithm of decentralized control is the key feature of the thesis. It is due to the massive usage of decentralized control applied on multivariable systems in practice. The simple implementation of this approach is the main reason why it is so commonly used. The proposed algorithm is based on switching of controllers' tuning phase using the supervisor and on the pre-identification. The pre-identification is realized by recursive methods. When the pre-identification was done, the automatic selection of the most suitable method of recursive identification is realized.

The idea of combination of self-tuning controllers together with the new algorithm of supervisor was the main reason of proposal of the original method of decentralized control.

The proposed algorithm of decentralized control was verified by simulation and at the laboratory model under different conditions. Simulation examined the influence of used method of decentralized control, the influence of interactions, disturbance in the form of sinusoid, noise, and finally the influence of chosen interval of approximation for derivation computation. To verify acceptable behavior of control of the proposed method at the laboratory model, the model of coupled drives CE108 was chosen.

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	7
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	9
SEZNAM ZKRATEK.....	12
1 ÚVOD	13
2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	14
3 LITERÁRNÍ PRŮZKUM.....	15
3.1 DECENTRALIZOVANÉ ŘÍZENÍ.....	15
3.1.1 <i>Autonomní řízení</i>	15
3.1.2 <i>PI řízení</i>	15
3.1.3 <i>Adaptivní řízení</i>	15
3.1.4 <i>Automatické nastavování</i>	16
3.1.5 <i>Robustní řízení</i>	16
3.1.6 <i>Jiné přístupy</i>	16
3.1.7 <i>Důležité oblasti</i>	17
3.1.8 <i>Aplikace</i>	17
3.2 REGULACE S PŘEPÍNÁNÍM	18
3.2.1 <i>Lineární systémy</i>	19
3.2.2 <i>Nelineární systémy</i>	19
4 TEORETICKÝ RÁMEC	20
4.1 ÚVOD.....	20
4.2 MNOHOROZMĚROVÉ REGULAČNÍ OBVODY	20
4.2.1 <i>Definice mnohorozměrových regulačních obvodů</i>	20
4.2.2 <i>Popis mnohorozměrových regulačních obvodů</i>	21
4.2.3 <i>Decentralizovaný přístup</i>	23
4.3 IDENTIFIKACE LINEÁRNÍCH SPOJITÝCH SYSTÉMŮ.....	24
4.4 REKURZIVNÍ METODA NEJMENŠÍCH ČTVERCŮ	26
4.5 REKURZIVNÍ METODA INSTRUMENTÁLNÍ PROMĚNNÉ	29
4.6 ADAPTIVNÍ SYSTÉMY REGULACE A SAMOČINNĚ SE NASTAVUJÍCÍ REGULÁTORY ..	30
4.7 REGULÁTORY	31
4.7.1 <i>Suboptimální lineární kvadratické (LQ) sledování</i>	32
4.8 VÝPOČET DERIVACÍ S POUŽITÍM APROXIMAČNÍCH FUNKCÍ	33
4.9 NUMERICKÉ ŘEŠENÍ DIFERENCIÁLNÍCH ROVNIC.....	34
5 NAVRŽENÝ ALGORITMUS DECENTRALIZOVANÉHO ŘÍZENÍ	36
5.1 ÚVODEM.....	36
5.2 PŘEDPOKLADY	36
5.3 NAVRŽENÝ ALGORITMUS.....	38
6 SIMULAČNÍ OVĚŘOVÁNÍ.....	44
6.1 POPIS SOFTWARE MATLAB.....	44
6.2 STRUČNÝ POPIS VYTVOŘENÉHO SOFTWARE PRO SIMULAČNÍ OVĚŘOVÁNÍ	45
6.3 VÝSLEDKY OVĚŘOVÁNÍ.....	49
6.3.1 <i>Vliv interakcí mezi subsystemy</i>	49
6.3.2 <i>Vliv metody identifikace během předidentifikace na koeficient korelace</i>	53

6.3.3	<i>Vliv poruchy</i>	56
6.3.4	<i>Vliv šumu</i>	59
6.3.5	<i>Vliv volby intervalu aproximace polynomem pro výpočet derivací</i>	65
7	LABORATORNÍ EXPERIMENTY	69
7.1	SOUSTAVA SPŘAŽENÝCH ELEKTROMOTORŮ	69
7.2	REGULACE CE108 POMOCÍ STC	74
7.3	REGULACE CE108 POMOCÍ STC SE SUPERVISOREM	76
7.4	REGULACE CE108 POMOCÍ STC S PŘEDIDENTIFIKACÍ	78
7.5	REGULACE CE108 POMOCÍ STC SE PŘEDIDENTIFIKACÍ A SUPERVISOREM	81
8	VYHODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH METOD	85
9	ZÁVĚR	87
	LITERATURA	89
	PUBLIKAČNÍ A VÝZKUMNÉ AKTIVITY	94
	PŘÍLOHY	98
	PŘÍLOHA P1 – UKÁZKA MOŽNOSTÍ VYTVOŘENÉHO SOFTWARE NA KOMPLEXNÍM PŘÍKLADĚ	98
	PŘÍLOHA P2 – REGULACE LABORATORNÍHO MODELU CE108 POMOCÍ SOFTWARE DISERTAČNÍ PRÁCE	98
	PŘÍLOHA P3 – RŮZNÉ VZHLEDY DIALOGU BĚHEM VÝPOČTU	98
	PŘÍLOHA P4 – VIDEOZÁZNAM REGULACE	98

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Obecný mnohorozměrový regulovaný obvod	21
Obr. 2	Mnohorozměrový regulovaný systém S	21
Obr. 3	Obecný mnohorozměrový regulovaný obvod s decentralizovaným regulátorem	23
Obr. 4	Decentralizovaná regulace "P" dvourozměrového systému	24
Obr. 5	Schéma identifikace spojitého systému	26
Obr. 6	Obecné schéma regulace se samočinně se nastavujícím regulátorem	31
Obr. 7	Systém se zpětnovazebním regulátorem	32
Obr. 8	Blokové schéma navržené metody	43
Obr. 9	Dialog pro výběr simulace	46
Obr. 10	Dialog pro vybranou simulaci	47
Obr. 11	Dialog s ukázkou kontextové nápovědy formou tooltipu	48
Obr. 12	Dialog s ukázkou editace vstupních parametrů	48
Obr. 13	Modální dialog vytvořeného programu	49
Obr. 14	Průběh regulace pomocí STC se supervisorem – slabé interakce	50
Obr. 15	Průběh parametrů 1. a 2. soustavy	51
Obr. 16	Průběh parametrů 1. a 2. regulátoru	51
Obr. 17	Průběh regulace pomocí STC se supervisorem – silné interakce	52
Obr. 18	Průběh parametrů 1. a 2. soustavy	52
Obr. 19	Průběh parametrů 1. a 2. regulátoru	53
Obr. 20	Průběh parametrů 1. a 2. soustavy – předidentifikace RIV	54
Obr. 21	Průběh parametrů 1. a 2. soustavy – předidentifikace RLS	54
Obr. 22	Průběh koeficientů korelace u 1. a 2. soustavy	55
Obr. 23	Průběh odhadu parametrů 1. a 2. soustavy po předidentifikaci	55
Obr. 24	Průběh regulace STC se supervisorem – silné interakce	57
Obr. 25	Průběh parametrů 1. a 2. regulátoru	57
Obr. 26	Průběh parametrů 1. a 2. soustavy	58
Obr. 27	Průběh regulace STC se supervisorem – silné interakce s poruchou	58
Obr. 28	Průběh parametrů 1. a 2. regulátoru	59
Obr. 29	Průběh parametrů 1. a 2. soustavy	59
Obr. 30	Odezva systému	60
Obr. 31	Průběh parametrů 1. a 2. soustavy – předidentifikace RIV	60
Obr. 32	Průběh parametrů 1. a 2. soustavy – předidentifikace RLS	60
Obr. 33	Průběh koeficientů korelace u 1. a 2. soustavy	61
Obr. 34	Průběh odhadu parametrů 1. a 2. soustavy po předidentifikaci	61
Obr. 35	Průběh regulace pomocí STC s předidentifikací	61
Obr. 36	Průběh parametrů 1. a 2. regulátoru	62
Obr. 37	Průběh parametrů 1. a 2. soustavy	62
Obr. 38	Odezva systému	62
Obr. 39	Průběh parametrů 1. a 2. soustavy – předidentifikace RIV	63
Obr. 40	Průběh parametrů 1. a 2. soustavy – předidentifikace RLS	63
Obr. 41	Průběh koeficientů korelace u 1. a 2. soustavy	63
Obr. 42	Průběh odhadu parametrů 1. a 2. soustavy po předidentifikaci	64
Obr. 43	Průběh regulace STC s předidentifikací s šumem	64
Obr. 44	Průběh parametrů 1. a 2. regulátoru	65
Obr. 45	Průběh parametrů 1. a 2. soustavy	65
Obr. 46	Průběh regulace STC se supervisorem	66

Obr. 47 Průběh parametrů 1. a 2. regulátoru	66
Obr. 48 Průběh parametrů 1. a 2. soustavy	67
Obr. 49 Průběh regulace STC se supervisorem – aproximace z většího úseku.....	67
Obr. 50 Průběh parametrů 1. a 2. regulátoru	68
Obr. 51 Průběh parametrů 1. a 2. soustavy	68
Obr. 52 Fotografie soustavy spřažených elektromotorů s připojením k PC.....	70
Obr. 53 Napětí reprezentující rychlost kola v závislosti na ručně nastavené výchylce ramene a pořadí změny vstupních signálů	71
Obr. 54 Napětí reprezentující napínání pásu v závislosti na ručně nastavené výchylce ramene a pořadí změny vstupních signálů	72
Obr. 55 Odezvy všech subsystémů systému	72
Obr. 56 Regulace CE108 pomocí STC	74
Obr. 57 Průběh parametrů 1. a 2. regulátoru	74
Obr. 58 Průběh parametrů 1. a 2. soustavy	75
Obr. 59 Regulace CE108 pomocí STC se supervisorem.....	76
Obr. 60 Průběh parametrů 1. a 2. regulátoru	76
Obr. 61 Průběh parametrů 1. a 2. soustavy	77
Obr. 63 Průběhy parametrů 1. a 2. soustavy – předidentifikace RIV	78
Obr. 64 Průběhy parametrů 1. a 2. soustavy – předidentifikace RLS	79
Obr. 65 Průběhy korelačních koeficientů.....	79
Obr. 66 Průběhy parametrů 1. a 2. soustavy po předidentifikaci	79
Obr. 67 Regulace CE108 pomocí STC s předidentifikací.....	80
Obr. 68 Průběh parametrů 1. a 2. regulátoru	80
Obr. 69 Průběh parametrů 1. a 2. soustavy	81
Obr. 70 Průběh odezvy.....	81
Obr. 71 Průběhy parametrů 1. a 2. soustavy – předidentifikace RIV	82
Obr. 72 Průběhy parametrů 1. a 2. soustavy – předidentifikace RLS	82
Obr. 73 Průběhy korelačních koeficientů.....	82
Obr. 74 Průběhy parametrů 1. a 2. soustavy po předidentifikaci	83
Obr. 75 Regulace CE108 pomocí STC s předidentifikací a supervisorem.....	83
Obr. 76 Průběh parametrů 1. a 2. regulátoru	84
Obr. 77 Průběh parametrů 1. a 2. soustavy	84

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

$\mathbf{W}(s)$	Laplaceův obraz vektoru žádaných hodnot
$\mathbf{E}(s)$	Laplaceův obraz vektoru odchylek regulace
$\mathbf{G}_R(s)$	Laplaceův obraz mnohorozměrového regulátoru
$\mathbf{Y}(s)$	Laplaceův obraz vektoru výstupních veličin
$\mathbf{U}(s)$	Laplaceův obraz vektoru akčních veličin
$\mathbf{V}(s)$	Laplaceův obraz vektoru poruchových veličin
$\mathbf{G}_S(s)$	Laplaceův obraz mnohorozměrové soustavy
s	komplexní proměnná Laplaceovy transformace
$\mathbf{G}_{SV}(s)$	Laplaceův obraz matice přenosů poruchových veličin
S	mnohorozměrový regulovaný systém
u_i	i -tá akční veličina
v_j	j -tá poruchová veličina
y_i	i -tá výstupní veličina
w_i	i -tá žádaná hodnota
$G_{ij}(s)$	přenos subsystému matice přenosů soustavy
y_{Uki}	k -tý prvek výstupní veličiny ovlivněný i -tou změnou akční veličiny
y_{Vkj}	k -tý prvek výstupní veličiny ovlivněný j -tým prvkem poruchové veličiny
$S_{ki}(s), S_{Vkj}(s)$	přenosové subfunkce
C_1, C_2, \dots, C_n	decentralizovaný regulátor
\mathbf{G}	soustava
\mathbf{r}	vektor žádaných hodnot
$\bar{G}_{S11}(s), \bar{G}_{S11}(s)$	přenosové funkce modelu
T_S	perioda vzorkování
$u_L^{(j)}(t)$	j -tá derivace Lagrangeova polynomu aproximujícího akční veličinu
$u_L^{(j)}(t_k)$	j -tá derivace Lagrangeova polynomu aproximujícího akční veličinu v čase
t_k	k -tý časový okamžik

$y_L^{(i)}(t)$	i -tá derivace Lagrangeova polynomu aproximujícího výstupní veličinu
$y_L^{(i)}(t_k)$	i -tá derivace Lagrangeova polynomu aproximujícího výstupní veličinu v čase t_k
a_i, b_j	parametry modelu soustavy
$\tilde{\Theta}(k)$	k -tý odhad parametrů modelu
$\mathbf{K}(k)$	vektor zesílení u RMNČ
$\mathbf{C}(k)$	kovarianční matice
$\hat{e}(k)$	chyba predikce
φ	faktor exponenciálního zapomínání
$\phi(k)$	regressor
$\mathbf{L}(k)$	vektor zesílení u RIV
$\mathbf{z}(k)$	vektor instrumentů
\mathbf{q}	vektor parametrů regulátoru
Q_i	kriterium identifikace
Q_s	kriterium syntézy regulátoru
μ, φ	penalizační konstanty
$P_2(s)$	Lagrangeův polynom 2. řádu
n	rozměr matice přenosů soustavy
$\mathbf{S}(t)$	mnohorozměrová soustava
$\mathbf{S}(s)$	Laplaceův obraz mnohorozměrové soustavy
$S_{ij}(s)$	Laplaceův obraz ij -té podsoustavy
$\mathbf{M}(t)$	model mnohorozměrové soustavy
$\mathbf{M}(s)$	Laplaceův obraz modelu mnohorozměrové soustavy
$M_i(s)$	Laplaceův obraz i -tého submodelu
$\mathbf{r}(s)$	Laplaceův obraz vektoru žádaných hodnot
$R_i(s)$	i -tý Laplaceův obraz žádané hodnoty
h_i	po částech konstantní funkce

J_{ip}	konstantní funkce
$M_{ki}(s)$	k -tý element Laplaceova obrazu i -tého submodelu
t	čas
$\mathbf{C}(s)$	Laplaceův obraz decentralizovaného regulátoru
$C_i(s)$	Laplaceův obraz i -tého subregulátoru
$C_{ik}(s)$	k -tý element Laplaceova obrazu i -tého subregulátoru
$\mathbf{G}_{Mp}(s)$	počáteční odhad modelu mnohorozměrové soustavy pro předidentifikaci
$\mathbf{G}_{Mo}(s)$	počáteční odhad modelu mnohorozměrové soustavy pro on-line identifikaci

SEZNAM ZKRATEK

CONTSID	continuous-time system identification
EE	equation error
EI	element identifikace
HEN	heat-exchanger network
HVAC	heat, ventilation and air-conditioning
IVM	identifikace více metodami
LQ	linear quadratic
LT	linear transformation
LTI	linear time invariant
MATLAB	matrix laboratory
MIMO	multi input multi output
PI	proportional integral
PID	proportional integral derivative
RIV	recursive instrumental variable
RLS	recursive least squares
RMNČ	rekurzivní metoda nejmenších čtverců
SISO	single input single output
STC	self-tuning controller
TITO	two input two output

1 ÚVOD

Tato část ve stručnosti informuje o obsahu jednotlivých kapitol. Disertační práce je rozdělena do 8 kapitol.

V následující, druhé, kapitole jsou formulovány cíle disertační práce.

V třetí kapitole je uvedena literární rešerše publikací týkajících se uvedené problematiky, téměř celá se věnuje decentralizovanému řízení.

Nejdůležitějším poznatkům z oblasti teorie řízení, které přímo souvisí s obsahem práce, se věnuje čtvrtá kapitola. Hlavní část tvoří vymezení pojmu decentralizovaného řízení, popis rekurzivních metod identifikace a popis metody pro výpočet regulátoru.

Pátá kapitola popisuje navržený algoritmus decentralizovaného řízení mnohorozměrových soustav. Kromě slovní formulace navrženého algoritmu se v této kapitole nachází i jeho blokové schéma.

V šesté kapitole je hlavní pozornost věnována simulačním experimentům. V této kapitole jsou graficky zobrazeny a posléze diskutovány výsledky simulací. Součástí kapitoly je také stručný popis software MATLAB a v něm vytvořeného programu pro simulační ověřování.

Sedmá kapitola prezentuje výsledky v reálném čase získané navrženou metodou. Ověření bylo realizováno na laboratorním přístroji simulujícím regulaci rychlosti a napínání pásu.

Poslední, osmá kapitola, podává výsledky disertační práce.

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Hlavním cílem disertační práce bylo vytvořit novou metodu decentralizovaného adaptivního řízení. V oblasti decentralizovaného řízení je v praxi realizováno velké množství postupů, nicméně jednoduchých metod, které zahrnují regulaci samočinně se nastavujícími regulátory se supervisorem, je velmi málo. Hlavní cíle práce jsou

- 1) literární rešerše z oblasti decentralizovaného řízení ,
- 2) formulování navržené metody decentralizovaného adaptivního řízení ,
- 3) simulační ověření navržené metody a to i s uvažováním šumu na výstupu soustavy,
- 4) ověření navržené metody na laboratorním přístroji,
- 5) vyhodnocení výsledků získaných použitím navrženého algoritmu simulačně a na laboratorním přístroji.

3 LITERÁRNÍ PRŮZKUM

3.1 *Decentralizované řízení*

V této kapitole je stručně nastíněn aktuální stav poznatků v oblasti použití decentralizovaného řízení. Tato část je rozdělena podle systémů, u kterých se používá anebo podle strategie regulace.

3.1.1 Autonomní řízení

Otázka autonomních decentralizovaných systémů je řešena v praxi a to v různých oborech, vezněme si např. systémový management [31] nebo chemický průmysl [17]. Autonomní decentralizovaný systém řízení pro návrh systémů zpracování a operací běžné organizační struktury flexibilně adaptované na základě změn prostředí ukazující na autonomní chování jednotlivců může být jedním z příkladů z oboru, který jen zdánlivě nesouvisí s automatizací [31]. Příkladem autonomního chemického systému může být bioproces využívající bioreaktor pro oddělení plynné fáze od tekuté fáze v japonské továrně [17].

3.1.2 PI řízení

V praxi se vždy směřuje k tomu, aby byla výsledná realizace regulace co možná nejjednodušší a přitom efektivní. Již po mnoho desetiletí jsou proto využívány tyto přístupy, mezi něž patří i PI řízení [20], [28], [41], které má svou klasickou podobu [41], nebo bývá rozšířeno o sofistikovanější přístup [20] a samozřejmě že lze dokumentovat použití tohoto přístupu v praxi [28]. První zmíněná publikace [41] mimo jiné obsahuje pravidla pro ladění a výpočet decentralizovaných regulátorů, jejichž výhody jsou zřejmé: mají méně parametrů pro ladění, jsou jednodušší pro pochopení. Oblast použití PI regulátorů lze rozšířit aplikací robustního řízení [20]. Jak již bylo zmíněno, PI řízení je velmi oblíbené v praxi a příkladem může být aplikace při řízení ventilace a klimatizace budov pomáhající snížit spotřebu energie, aplikace u HVAC (heat, ventilation and air-conditioning) systémů [28].

3.1.3 Adaptivní řízení

Využití výhod adaptivního řízení v kombinaci s decentralizovaným řízením bylo rovněž v teoretické i praktické rovině mnohokrát ověřeno [11], [12], [18], [57] a nabízí se zejména v posledních letech jako vhodnou alternativou klasického decentralizovaného řízení

zejména u aplikací, kde dochází k častým změnám. V teoretické rovině bylo prezentováno velké množství výsledků, byl vybrán jen zlomek z těchto publikací [18], [57]. Jedná se o decentralizované adaptivní řízení rozlehlých systémů ve stavovém prostoru [18] a o robustní adaptivní regulaci [57]. Praktické aplikace se zaměřují například na řízení polohy a pohybu [11], [12], jde o decentralizované adaptivní řízení pohybu elektricky řízených manipulátorů [11] a regulace pohybu mechanických systémů za přítomnosti nekompletní informace týkající se modelu a stavu systému [12].

3.1.4 Automatické nastavování

Zajímavou oblastí u decentralizovaného řízení se jeví i použití techniky auto-tuning, automatického nastavování [24], [38], [54], konkrétně se jedná v těchto zmíněných publikacích o PID regulátory. V [24] je prezentováno automatické nastavování pro decentralizované PID řízení mnohorozměrových přenosů. Automatizace decentralizovaných regulátorů je jednou z nejdůležitějších částí při decentralizovaném řízení, jak vyplývá z [38], kde je popsáno automatické nastavování decentralizovaných PID regulátorů u TITO procesů. V [55] je popsána metoda automatického nastavování PID regulátorů z decentralizované reléové zpětné vazby.

3.1.5 Robustní řízení

Jedním z nejvýznamnějších a v teorii i v praxi nejpoužívanějších metod řízení je robustní řízení, což lze dokumentovat množstvím příspěvků. Je proto logické se zde zmínit o využití tohoto řízení v kombinaci s decentralizovaným řízením [22], [33], [34], [35], [43], [46], [58], [59], [61]. Jelikož počet publikací zabývajících se decentralizovaným robustním řízením je opravdu velký, byly vybrány jen některé a to ty, které reprezentují ještě další segment teorie řízení, jedná se konkrétně o následující: stabilizace [22], [33], [58], [61], adaptivní řízení [35], řízení využívající faktorizace [34], [46], řízení propojených systémů [43], [59].

3.1.6 Jiné přístupy

Při strategii decentralizovaného řízení nejsme omezeni pouze na přístupy, metody, které byly zmíněny výše. Existují i jiné postupy [2], [10], [13], [19], [21], [30], [37], [44], [50], [51], [59], [60]. Jedná se o supervizní řízení [10], [50], řízení s přepínáním [2], se zpožděním [30], ve stavovém prostoru [19], [59], [60], s vnitřním modelem [51], LQ [21], pomocí neuronových sítí [37], s kaskádovými regulátory [13] a s kompenzací [44].

3.1.7 Důležité oblasti

Kromě vlastních metod regulace, které se používají pro decentralizované systémy a nebo kromě různých způsobů popisu systémů, je rovněž důležité věnovat se přímo vlastnostem a analýze chování decentralizovaných systémů [6], [8], [14], [23], [45], [52], čemuž se věnuje tato podkapitola. Jedná se o metodologii [52], stabilizaci [6], [23] a garanci stability [8], omezení výkonu během řízení [14] a o volbě struktury vzájemných vazeb [45].

Metodologie pro decentralizovanou regulaci [52] obsahující mimo jiné i vyhodnocení vhodnosti použití různých struktur týkajících se přímo návrhu a realizace regulace přesně zapadá do této podkapitoly. Významnou oblastí je i stabilizace. Jedná se například o stabilizaci výstupu ve zpětné vazbě pro lineární časově invariantní rozlehlé systémy [6], nebo o stabilizaci s integrální akcí u lineárních časově invariantních mnohorozměrových decentralizovaných systémů se stabilním přenosem [23]. Garance stability [8] uzavřeného obvodu u decentralizovaných systémů s využitím PI regulátorů s odvozením stabilní oblasti pro každý regulátor ve smyslu jeho parametrů je rovněž častým předmětem zájmu. Omezení výkonu během decentralizovaného řízení bylo rovněž zkoumáno [14]. Během decentralizovaného řízení mnohorozměrových systémů se realizuje rozklad celkového systému na sadu subsystémů a následně jsou navrženy modely pro každý subsystém. Mezi výhody takového rozkladu patří snížení požadavků na řád modelu a celkové zjednodušení implementace. Nicméně existují i nevýhody takového přístupu, konkrétně redukce požadovaného dosažitelného výkonu regulace kvůli omezení struktury regulátoru. Volba struktury vzájemných vazeb mezi akčními veličinami a regulovanými výstupy [45] je obsahem posledního příspěvku této podkapitoly. Je důležitá pro celkový výkon.

3.1.8 Aplikace

Aplikace decentralizovaného řízení vzhledem k jeho jednoduchosti a logickému rozdělení komplikovaného systému s více vstupy a výstupy je v praxi značná. Pro tuto práci byly zvoleny aplikace v průmyslu [3], [4], [15], [25], [53], [56] a speciálně vybrány u elektrizačních soustav [27], [55], [62].

Aplikace decentralizovaného řízení v průmyslu jsou vidět na každém kroku a v každém odvětví. V této části je uveden jen jejich zlomek, jedná se například o energetiku [15], [56], automobilový průmysl [3], strojírenství [25], teplárenství [4].

V [56] je řízen systém turbína – regulátor v systému dodávky elektřiny. Potlačení nízkofrekvenčních oscilací v systému dodávky elektřiny je cílem regulace. Příspěvek [15] využívá teorii decentralizace pro regulaci vzájemně propojených systémů dodávky elektřiny o mnoha strojích. Článek [3] aplikuje decentralizovaný přístup při řízení trajektorie pohybu žebříku hasičského vozu Iveco. Autoři poukazují na tu skutečnost, že je výhodné použít decentralizovaných regulátorů pro kompletní regulaci trajektorie, každý pro jednu osu. V [25] je použit decentralizovaný přístup během frézování.

Častá aplikace decentralizovaného přístupu je u tepelných systémů. Systémy tepla, ventilace a klimatizace (HVAC) vyžadují regulaci přirozených veličin, jako je tlak, teplota nebo vlhkost a proto je možné použít metodu PID auto-tuning, což je prezentováno v [4]. Decentralizované řízení bylo také použito pro regulaci sítě tepelných výměníků (heat-exchanger networks HEN) [53].

Decentralizace se s úspěchem po mnoho desítek let používá u elektrizačních soustav. Jedna z metod pro návrh decentralizovaných regulátorů u elektrizačních soustav je popsána v [62]. Jedná se o to, že návrh decentralizovaného stabilizujícího regulátoru pro rozlehlý systém lze převést na ekvivalentní problém návrhu decentralizovaného regulátoru u MIMO systému. Nelineární adaptivní zpětnovazební decentralizované stabilizující řízení systémů s více stroji je popsáno v [27]. Systém s neznámými parametry a zvolená metoda jsou rovněž určeny pro regulaci elektrizační soustavy. Bylo rovněž navrženo robustní decentralizované nelineární řízení [55] pro zlepšení dynamické stability vícestrojového systému elektrizační soustavy.

3.2 Regulace s přepínáním

Regulace s přepínáním je jednou z důležitých oblastí použití a je implementována u navržené metody v této disertační práci. Umožňuje implementovat použitý přístup založený na jednoduchém adaptivním nastavování i v oblasti slabě nelineárních systémů. Literární prameny, které byly dostupné a které využívají regulaci s přepínáním, lze rozdělit podle toho o jaký typ regulovaného systému se jedná, buď je lineární ([26], [49], [63]) nebo nelineární ([9], [32], [62]).

3.2.1 Lineární systémy

Prvním případem byly lineární systémy. Zde lze literární podklady dále rozdělit na skupinu využívající vybrané metody návrhu regulátorů [26] a zbývající příspěvky, řešící důležitou vlastnost systému jakou je například stabilita [63] nebo říditelnost a dosažitelnost [49].

V prvním ze zmiňovaných příspěvků [26] se jedná o regulaci lineárního systému s neznámými parametry s přepínáním založenou na konečném počtu potenciálních regulátorů. Další část publikací v této oblasti se zmiňuje o důležitých vlastnostech systému a obvodu. Jedná se o stabilitu [63], kde jsou popsány podmínky, které jsou dostačující pro stabilizaci bez poruch. V neposlední řadě byla řešena i říditelnost a dosažitelnost lineárních systémů s přepínáním [49].

3.2.2 Nelineární systémy

Nelineární systém jako objekt regulace je předmět zájmů dalšího okruhu podkladů ([9], [32], [62]). Použití regulátorů s přepínáním rozšiřuje oblast praktických aplikací i na nelineární systémy, protože konvenční metody návrhu adaptivního regulátoru vyžadují znalost apriorní informace, což u strategie regulátorů s přepínáním není vždy potřeba. Dalším způsobem je přibližná linearizace [9]. Jinou variantou může být takové řešení, kdy pro určitý typ signálu nachystáme dopředu daný regulátor a pak během regulace podle vývoje signálu měníme regulátory [32]. V neposlední řadě si můžeme definovat vlastní kritérium, do kterého implementujeme prioritně nejdůležitější vlastnosti a provádíme neustále systematickou regulaci s přepínáním [62].

4 TEORETICKÝ RÁMEC

4.1 Úvod

Tato kapitola se ve svých podkapitolách věnuje vybraným tématům, která přímo souvisí s navrženým algoritmem decentralizovaného řízení. Ten je popsán v další kapitole. Tyto podkapitoly jsou zde uvedeny za účelem přiblížení tématu práce po předchozí stručné analýze literárních podkladů zabývajících se decentralizovaným řízením. Předchozí kapitola byla zpracována tak, aby co nejjednodušší formou zmapovala co nejvíce poznatků z dané oblasti.

V první části je zmíněn obecný popis mnohorozměrových regulačních obvodů s vymezením decentralizovaného přístupu. Dále se zde pojednává o identifikaci spojitých systémů. Jedná se o popis rekurzivní metody nejmenších čtverců a metody instrumentální proměnné, které byly použity během ověřování navržené metody decentralizovaného řízení. Dále se věnuje pozornost adaptivnímu řízení, protože byly nasazeny samočinně se nastavující regulátory (self-tuning controllers STC). Tento popis je následován popisem metody pro výpočet parametrů regulátoru, suboptimální lineární kvadratické sledování. Následně je uvedena podkapitola popisující výpočet derivací aproximačních funkcí vstupního i výstupního signálu. Pro urychlení výpočtů v MATLABu zejména v laboratoři bylo nutné realizovat numerické řešení diferenciálních rovnic nezávisle na řešitelích, funkcích *ode*, MATLABu. Byla použita Runge-Kutta-Fehlberg metoda, jejíž rovnice jsou uvedeny.

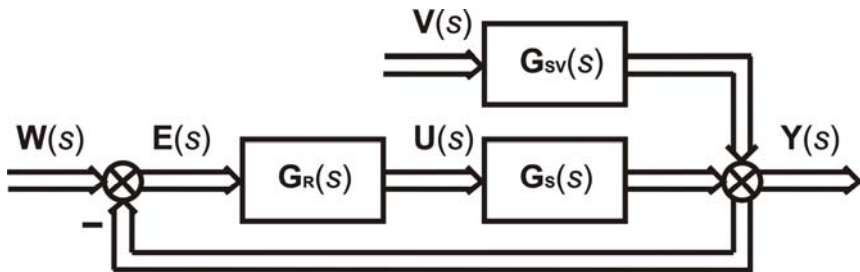
4.2 Mnohorozměrové regulační obvody

Jak bylo zmíněno výše, věnujme se nyní vymezení mnohorozměrového regulačního obvodu za účelem aplikace decentralizovaného přístupu na nejjednodušší příklad, systém se dvěma vstupy a dvěma výstupy.

4.2.1 Definice mnohorozměrových regulačních obvodů

Mnohorozměrové regulační obvody (MIMO) jsou takové systémy, u kterých je třeba znát několik veličin pro souběžnou regulaci, ale nejedná se přitom o na sobě nezávislé

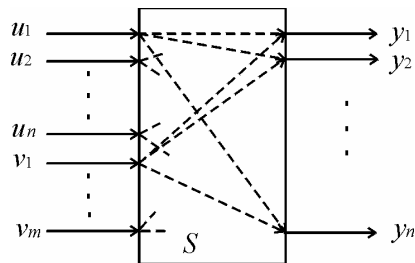
jednorozměrové obvody, ale o navzájem propojené obvody, což lze nalézt v [1], [47]. Podle této knihy změna jedné regulované veličiny ovlivní ostatní veličiny podrobené regulaci a to podle předem daných vztahů, tzv. interakcí. Vztahy mezi vstupy a výstupy jsou popsány maticemi přenosů. Schéma mnohorozměrového regulačního obvodu je znázorněno na obrázku 1.



Obr. 1 Obecný mnohorozměrový regulovaný obvod

4.2.2 Popis mnohorozměrových regulačních obvodů

Mnohorozměrový deterministický regulovaný systém může být schématicky znázorněn jako na obrázku 2.



Obr. 2 Mnohorozměrový regulovaný systém S

Vstupní veličiny se dělí na akční veličiny u_i ($i=1, 2, \dots, n$) a poruchové veličiny v_j ($j=1, 2, \dots, m$). Akční veličiny se používají pro regulaci výstupních regulovaných veličin y_i ($i=1, 2, \dots, n$). Poruchové veličiny nemohou být ovlivněny, pouze mohou být měřeny. Každá ze vstupních veličin ovlivňuje všechny veličiny výstupní.

Označme y_{Uki} jako k -tý prvek výstupní veličiny ovlivněný i -tou změnou akční veličiny označené jako u_i a y_{Vkj} jako k -tý prvek výstupní veličiny ovlivněný j -tým prvkem poruchové veličiny označené jako v_j . Pak k -tá výstupní veličina má tvar

$$y_k = \sum_{i=1}^n y_{Uki} + \sum_{j=1}^m y_{Vkj} \quad (1)$$

kde $k = 1, 2, \dots, n$ a y_{Uki} a y_{Vkj} jsou definovány soustavou lineárních diferenciálních rovnic

$$\sum_{l=0}^r a_{Ukil} \frac{d^l y_{Uki}}{dt^l} = \sum_{l=0}^r b_{Ukil} \frac{d^l u_i}{dt^l} \quad (2)$$

$$\sum_{l=0}^s a_{Vkj} \frac{d^l y_{Vkj}}{dt^l} = \sum_{l=0}^r b_{Vkj} \frac{d^l v_j}{dt^l} \quad (3)$$

kde $k = 1, 2, \dots, n$, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$. Definujme přenosové subfunkce

$$S_{ki}(s) = \frac{Y_{Uki}(s)}{U_i(s)} \quad (4)$$

$$S_{Vkj}(s) = \frac{Y_{Vkj}(s)}{V_j(s)} \quad (5)$$

Výstupní veličiny v Laplaceově transformaci mají tvar

$$Y_k(s) = \sum_{i=1}^n S_{ki}(s)U_i(s) + \sum_{j=1}^m S_{Vkj}(s)V_j(s) \quad (6)$$

Dále definujme vektory akčních, regulovaných a poruchových veličin

$$\mathbf{U}(s) = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{pmatrix}, \quad \mathbf{Y}(s) = \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{pmatrix}, \quad \mathbf{V}(s) = \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_m \end{pmatrix} \quad (7)$$

a matice přenosových funkcí a poruch

$$\mathbf{G}_S(s) = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{pmatrix} \quad (8)$$

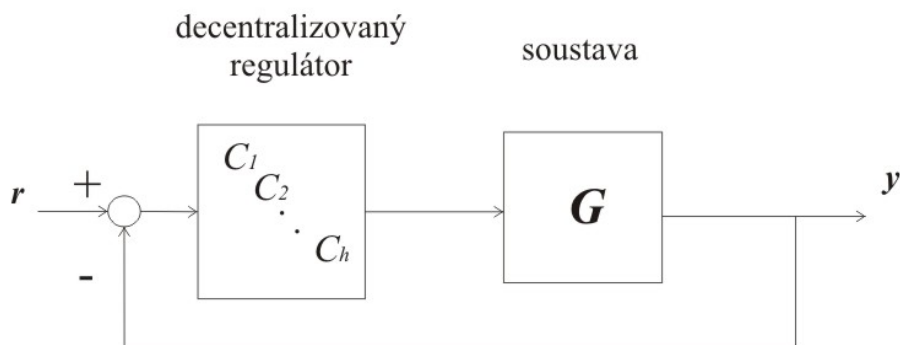
$$\mathbf{G}_{SV}(s) = \begin{pmatrix} S_{V11} & S_{V12} & \cdots & S_{V1m} \\ S_{V21} & S_{V22} & \cdots & S_{V2m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ S_{Vn1} & S_{Vn2} & \cdots & S_{Vnm} \end{pmatrix} \quad (9)$$

Vektor výstupních veličin v Laplaceově transformaci má tvar

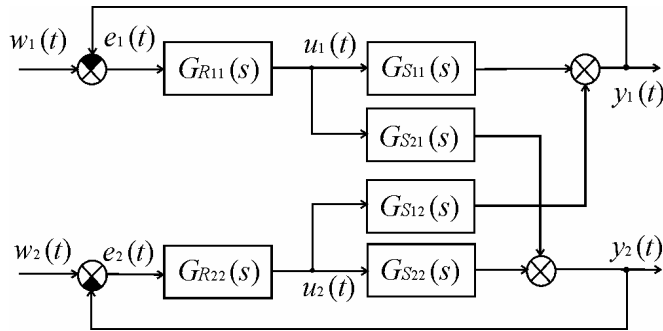
$$\mathbf{Y}(s) = \mathbf{G}_S(s)\mathbf{U}(s) + \mathbf{G}_{SV}(s)\mathbf{V}(s) \quad (10)$$

4.2.3 Decentralizovaný přístup

Použijeme-li decentralizovaný přístup podle obrázku 3, pak celková regulace je rozdělena na podúlohy a těmto podlohám odpovídající jednoduché regulátory. Tyto podúlohy dávají celkový průběh regulace. Hlavní dvě výhody decentralizace jsou následující: složitější úkol je rozdělen na sadu jednoduchých úloh a výsledný regulátor je tak více flexibilní.



Obr. 3 Obecný mnohorozměrový regulovaný obvod s decentralizovaným regulátorem



Obr. 4 Decentralizovaná regulace “P” dvourozměrového systému

Jak je vidět z obrázku 4, byl použit tzv. „P“ popis dvourozměrového systému, tj. vstupy do subsystémů popisujících interakce jsou hodnoty akčních signálů některého ze SISO subregulátorů a jejich výstupy jsou pak přičteny k opačným výstupům z hlavních diagonálních subsystémů. Za pomoci obrázku 4 získáme rovnice výsledných přenosových funkcí modelu

$$\bar{G}_{S11}(s) = \frac{Y_1(s)}{U_1(s)} = G_{S11}(s) - \frac{G_{S21}(s)G_{S12}(s)G_{R22}(s)}{1 + G_{S22}(s)G_{R22}(s)}, \quad w_2(t) = 0 \quad (11)$$

$$\bar{G}_{S22}(s) = \frac{Y_2(s)}{U_2(s)} = G_{S22}(s) - \frac{G_{S21}(s)G_{S12}(s)G_{R11}(s)}{1 + G_{S11}(s)G_{R11}(s)}, \quad w_1(t) = 0 \quad (12)$$

4.3 Identifikace lineárních spojitých systémů

Nezbytným předpokladem kvalitní regulace je co možná nejpřesnější popis regulovaného systému. Identifikací lze označit postup získání matematického modelu systému za účelem jeho hlubšího poznání. Jak uvádí literární podklady [42], je velmi dobře zpracovaná identifikace založená na diskrétních modelech. Počátky identifikace založené na spojitéch modelech sahají do poloviny 20. století. Ty byly zastíněny rozmachem diskrétních systémů. V poslední době lze vidět návrat ke spojitě oblasti demonstrováný počtem publikací nebo aplikací, např. CONTSID toolboxem pro MATLAB ([36]).

Důvody proč používat spojité modely:

- 1) Koeficienty spojitého modelu si ponechávají charakter diferenciální rovnice oproti diskrétnímu modelu. Příkladem je obrovské množství praktických aplikací založených na PID regulátoru, který je odvozován ze spojitého popisu.
- 2) Jasná představa o průběhu řídicího zákona v čase spojité oblasti. Z tohoto důvodu někteří autoři dávají přednost řešení řídicího zákona ve spojité oblasti.
- 3) Diskretizace může vytvořit u modelů neminimální fázi – podrobnější popis viz [42]
- 4) Diskretizace může způsobit nárůst nechtěných citlivostních problémů při rychlejším vzorkování – tento problém nastává při vzorkování, které se blíží nule. V tomto případě se používá tzv. δ operátor.

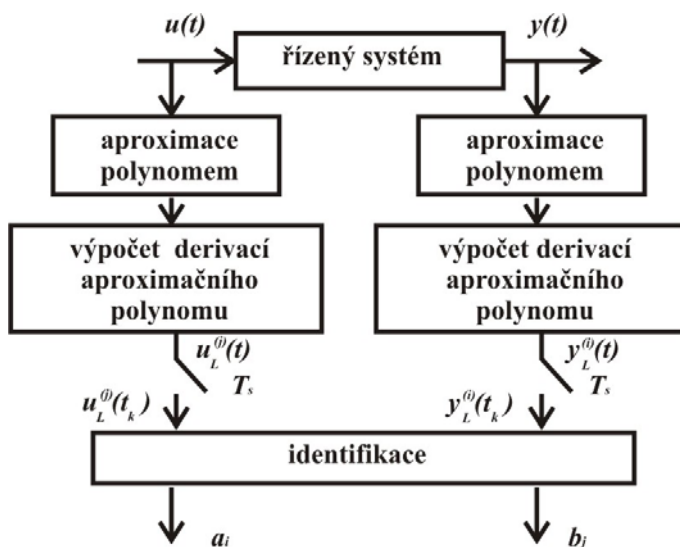
Jednou z pozitivních vlastností této identifikace je to, že identifikovaný model je spojitý a proto se používá diferenciálních rovnic. Diferenciální rovnice obsahují výrazy s derivacemi v čase, které však nejsou měřitelné.

$$\frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + \dots + b_0 u(t) \quad (13)$$

Nicméně je možné derivace počítat numericky. Máme-li tedy všechny potřebné výrazy pro odhad parametrů a_i a b_i , pak můžeme realizovat výpočet parametrů. Jeden z obecných přístupů je založen na aplikování lineární transformace (LT) vstupního a výstupního signálu. Použijeme-li u struktury založené na chybě rovnice (EE) jako estimátor metodu nejmenších čtverců, pak je tento estimátor vždy ovlivněný chybou, i když se jedná jen o bílý šum. Ve skutečnosti totiž aplikujeme lineární transformaci také na šum, ze kterého se stává šum barevný. To je také důvod, proč se používá metod redukce šumu, například metody instrumentální proměnné. Nicméně estimátor založený na metodě nejmenších čtverců je dobrý v případech, kdy se nejedná o zašuměné simulace.

1) diskretní signály se použijí pro identifikaci diskretního modelu, který je pak převeden do spojitého popisu,

2) diskretní signály se použijí pro identifikaci δ modelu, který konverguje se svým spojitém popisem.



Obr. 5 Schéma identifikace spojitého systému

4.4 Rekurzivní metoda nejmenších čtverců

Tato podkapitola se zabývá rekurzivní metodou nejmenších čtverců (RLS), která byla použita v rámci této práce během tzv. předidentifikace. Její rovnice jsou uzpůsobeny na nasazení aproximačního Lagrangeova polynomu pro výpočet derivací vstupního a výstupního signálu v konkrétním čase. Identifikace probíhá podle obrázku 5. Pro odhad parametrů rekurzivní metodou nejmenších čtverců platí vztah

$$\hat{\Theta}(k) = \hat{\Theta}(k-1) + \mathbf{K}(k)\hat{\epsilon}(k). \quad (14)$$

Vektor zesílení počítáme podle vztahu

$$\mathbf{K}(k) = \frac{\mathbf{C}(k-1)\boldsymbol{\phi}(k)}{1 + \boldsymbol{\phi}^T(k)\mathbf{C}(k-1)\boldsymbol{\phi}(k)}, \quad (15)$$

a kovarianční matici podle

$$\mathbf{C}(k) = \mathbf{C}(k-1) - \frac{\mathbf{C}(k-1)\boldsymbol{\phi}(k)\boldsymbol{\phi}^T(k)\mathbf{C}(k-1)}{1 + \boldsymbol{\phi}^T(k)\mathbf{C}(k-1)\boldsymbol{\phi}(k)}. \quad (16)$$

Informaci, kterou přináší nové měření a která není v předcházejících údajích, označme jako chybu predikce, platí pro ni vztah

$$\hat{e}(k) = y(k) - \boldsymbol{\phi}^T(k)\hat{\boldsymbol{\Theta}}(k-1). \quad (17)$$

Při exponenciálním zapominání je kritériem identifikace

$$J = \sum_{i=k_0}^k (\varphi^{k-i} e(i))^2, \quad (18)$$

kde φ^2 je faktor exponenciálního zapominání, který je volí v rozsahu hodnot $0 \dots 1$, nejčastěji blízko 1. Při směrovém zapominání se exponenciální zapominání aplikuje jen na složku údajů přinášející novou informaci. Je-li

$$\boldsymbol{\phi}^T(k)\mathbf{C}(k-1)\boldsymbol{\phi}(k) > 0, \quad (19)$$

pak

$$\mathbf{C}(k) = \mathbf{C}(k-1) - \frac{\mathbf{C}(k-1)\boldsymbol{\phi}(k)\boldsymbol{\phi}^T(k)\mathbf{C}(k-1)}{\eta^{-1} + \boldsymbol{\phi}^T(k)\mathbf{C}(k-1)\boldsymbol{\phi}(k)}, \quad (20)$$

kde

$$\eta(k) = \varphi(k) - \frac{1 - \varphi(k)}{\xi(k)} \quad (21)$$

Je-li

$$\boldsymbol{\phi}^T(k) \mathbf{C}(k-1) \boldsymbol{\phi}(k) = 0, \quad (22)$$

pak platí

$$\mathbf{C}(k) = \mathbf{C}(k-1). \quad (23)$$

Dále platí

$$\varphi(k) = \left\{ 1 + (1 + \rho) \left[\ln(1 + \xi(k-1)) \right] + \left[\frac{(\nu(k-1) + 1) \eta(k-1)}{1 + \xi(k-1) + \eta(k-1)} - 1 \right] \frac{\xi(k-1)}{1 + \xi(k-1)} \right\}^{-1}, \quad (24)$$

$$\eta(k) = \frac{\hat{\varepsilon}^2(k)}{\lambda(k)}, \quad (25)$$

$$\nu(k) = \varphi(k) [\nu(k-1) + 1], \quad (26)$$

$$\lambda(k) = \varphi(k) \left[\lambda(k-1) + \frac{\hat{\varepsilon}^2(k)}{1 + \xi(k-1)} \right], \quad (27)$$

$$\xi(k) = \boldsymbol{\phi}^T(k) \mathbf{C}(k-1) \boldsymbol{\phi}(k). \quad (28)$$

Vektor odhadů parametrů má tvar

$$\hat{\boldsymbol{\Theta}}^T(k) = (\hat{a}_0, \hat{a}_1, \dots, \hat{a}_{\deg(a)}, \hat{b}_0, \hat{b}_1, \dots, \hat{b}_{\deg(b)}, d), \quad (29)$$

a regresor

$$\boldsymbol{\phi}^T(k) = (-y(t_k), \dots, -y_L^{(n-1)}(t_k), u(t_k), \dots, u_L^{(m)}(t_k), 1). \quad (30)$$

Vektor odhadu parametrů obsahuje hodnoty získané v čase t_k . Vektor dat obsahuje derivace aproximační funkce, Lagrangeova polynomu, vstupního i výstupního signálu v daném okolí, a proto jsou indexovány dolním indexem L . Stejně je tomu i u rekurzivní metody instrumentální proměnné.

4.5 Rekurzivní metoda instrumentální proměnné

Následující kapitola se věnuje rekurzivní metodě instrumentální proměnné (RIV). Metoda instrumentální proměnné představuje modifikaci metody nejmenších čtverců. Metoda nejmenších čtverců používá kvadratického kritéria a existence jednoho globálního minima. Předpokladem úspěšného stanovení parametrů modelu metodou nejmenších čtverců však je, že porucha je představována bílým šumem s nulovou střední hodnotou. Metoda instrumentální proměnné sice neumožňuje zjistit vlastnosti šumu, ale vychází ze slabších předpokladů než metoda nejmenších čtverců [64]. Identifikace probíhá podle obrázku 5. Stejně jako je tomu u metody nejmenších čtverců, také i metodu instrumentální proměnné lze formulovat rekurzivně. Vektor odhadů parametrů má tvar

$$\hat{\Theta}^T(k) = (\hat{a}_0, \hat{a}_1, \dots, \hat{a}_{\deg(a)}, \hat{b}_0, \hat{b}_1, \dots, \hat{b}_{\deg(b)}, d), \quad (31)$$

a vektor dat

$$\Phi^T(k) = (-y(t_k), \dots, -y_L^{(n-1)}(t_k), u(t_k), \dots, u_L^{(m)}(t_k), 1). \quad (32)$$

Vektor zesílení se počítá podle vztahu

$$\mathbf{L}(k) = \frac{\mathbf{C}(k-1)\mathbf{z}(k)}{1 + \Phi^T(k)\mathbf{C}(k-1)\mathbf{z}(k-1)}. \quad (33)$$

Pro výpočet je třeba znát kromě vektoru dat také kovarianční matici

$$\mathbf{C}(k) = \mathbf{C}(k-1) - \frac{\mathbf{C}(k-1)\mathbf{z}(k)\Phi^T(k)\mathbf{C}(k-1)}{1 + \Phi^T(k)\mathbf{C}(k-1)\mathbf{z}(k)}, \quad (34)$$

a vektor instrumentů

$$\mathbf{z}(k) = (u(t_k), u(t_{k-1}), \dots, u(t_{k-n-m})), \quad (35)$$

který volíme jako sadu zpožděných vstupů. Chyba predikce se počítá podle

$$\hat{e}(k) = y(k) - \Phi^T(k) \hat{\Theta}(k-1), \quad (36)$$

a odhad parametrů podle

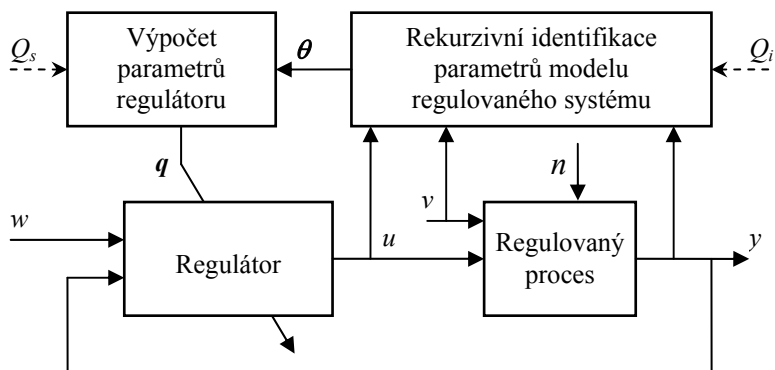
$$\hat{\Theta}(k) = \hat{\Theta}(k-1) + \mathbf{L}(k) \hat{e}(k). \quad (37)$$

4.6 *Adaptivní systémy regulace a samočinně se nastavující regulátory*

Tato podkapitola stručně pojednává o adaptivních systémech regulace a samočinně se nastavujících regulátorech, protože jich bylo rovněž použito.

Podle [5] a [7] je hlavní cílem adaptivního řízení řešení otázky regulace v případech, kdy charakteristiky regulovaného systému nejsou známy a nebo se v čase mění. Základním principem adaptivních systému regulace je změna charakteristik regulátoru na základě charakteristik regulovaného procesu.

Samočinně se nastavující regulátory jsou jednou z variant tohoto přístupu a jsou založeny na on-line identifikaci a nastavování parametrů regulátoru s ohledem na identifikované změny popisu regulovaného systému.



Obr. 6 Obecné schéma regulace se samočinně se nastavujícím regulátorem

Obecné schéma SISO regulovaného obvodu se samočinně se nastavujícím regulátorem je znázorněno na obrázku 6, kde w je žádaná hodnota, u je akční veličina, y je výstupní veličina, v měřitelná poruchová veličina, n je neměřitelná poruchová veličina. θ je vektor odhadů parametrů modelu a q je vektor parametrů regulátoru, Q_i označuje kritérium identifikace a Q_s označuje kritérium syntézy regulátoru.

Hlavním účelem nasazení samočinně se nastavujících regulátorů je splnění následujících úkolů za účelem zjednodušení procesu návrhu regulátoru a zvýšení kvality regulovaného procesu:

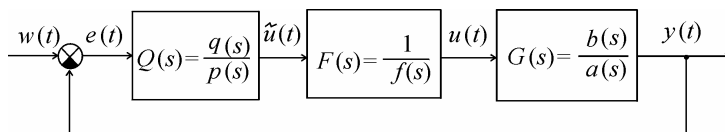
- automatické nastavování regulátoru,
- snížení vlivu proměnlivých poruch,
- odhalení změn parametrů regulovaného systému způsobených různými technologickými vlivy, např. ovládání zařízení regulace v různých podmínkách

4.7 Regulátory

Volba vhodné metody návrhu regulátorů a následného výpočtu parametrů regulátorů je jedním ze základů pro úspěšnou regulaci. V této podkapitole se stručně zmíníme o metodě suboptimálního lineárního kvadratického sledování, která byla použita pro určení parametrů subregulátorů u navrženého decentralizovaného přístupu k řízení mnohorozměrných systémů.

4.7.1 Suboptimální lineární kvadratické (LQ) sledování

Suboptimální LQ sledování bylo poprvé představeno Dostálem [16]. Uvažujme systém na obrázku 7.



Obr. 7 Systém se zpětnovazebním regulátorem

Minimalizujeme kvadratický funkcional

$$J = \int_0^{\infty} \{ \mu e^2(t) + \varphi \tilde{u}^2(t) \} dt \quad (38)$$

kde $\mu \geq 0, \varphi > 0$ jsou penalizační konstanty. Syntéza regulátoru metodou optimálního LQ sledování nám dává regulátor, který je prakticky nerealizovatelný kvůli závislosti parametrů na počátečních hodnotách. Proto byla navržena suboptimálního sledování referenčního signálu pro danou třídu referenčních signálů. Pro Laplaceův obraz žádané hodnoty platí

$$w(s) = \frac{h_w(s)}{s \tilde{f}_w(s)} \quad (39)$$

Pro stupně polynomů platí

$$\deg(h_w) \leq \deg(f_w), f_w(0) \neq 0 \quad (40)$$

Regulátor, který nám zajistí suboptimální sledování, získáme následujícím způsobem. Vypočteme stabilní polynomy g a n jako výsledky spektrálních faktorizací

$$(as)^* \varphi as + b^* \mu b = g^* g, \quad n^* n = a^* a \quad (41)$$

řešíme následující diofantickou rovnici

$$asp + bq = gn \quad (42)$$

ze které se získají parametry regulátoru. Uvažujeme-li přenos soustavy ve tvaru

$$G(s) = \frac{b_0}{s^2 + a_1s + a_0} \quad (43)$$

pak regulátor má tvar

$$FQ = \frac{q_2s^2 + q_1s + q_0}{s(p_2s^2 + p_1s + p_0)}. \quad (44)$$

Pro tento případ mají polynomy g a n tvar

$$g(s) = g_3s^3 + g_2s^2 + g_1s + g_0, \quad n(s) = s^2 + n_1s + n_0 \quad (45)$$

a pro výpočet jejich koeficientů získaný spektrální faktorizací pak platí

$$g_0 = \sqrt{\mu b_0^2} \quad (46)$$

$$g_1 = \sqrt{2g_2g_0 + \varphi a_0^2} \quad (47)$$

$$g_2 = \sqrt{2g_3g_1 + \varphi(a_1^2 - 2a_0)} \quad (48)$$

$$g_3 = \sqrt{\varphi} \quad (49)$$

$$n_0 = \sqrt{a_0^2} \quad (50)$$

$$n_1 = \sqrt{2n_0 - a_1^2 - 2a_0} \quad (51)$$

kde koeficienty g se počítají iteračně.

4.8 Výpočet derivací s použitím aproximačních funkcí

Následující podkapitola se věnuje výpočtu derivací s použitím aproximačních funkcí. Díky známým problémům s numerickým řešením nebo filtrováním, kdy u takového filtru je vhodné znát alespoň přibližný popis systémů, byl v této práci použit jiný přístup pro určení derivací vstupního a výstupního signálu v daném čase. Provede se aproximace v nejbližším okolí pro daný čas aproximační funkcí. Analytický popis aproximační funkce je znám a proto se vypočte obecný tvar její derivace analyticky. Při rekurzivním identifikačním výpočtu se pak upravují pouze číselné hodnoty uvnitř obecného tvaru derivace. Jednou z možností je použití Lagrangeova polynomu. Výhodou použití Lagrangeova polynomu je to, že jej lze použít na vzorkovaná data získaná jak s konstantní periodou vzorkování, tak také

s proměnnou periodou vzorkování. V práci byl použit Langrangeův polynom 2. stupně ve tvaru [29]

$$P_2(x) = \frac{(x-b)(x-c)}{(a-b)(a-c)}f(a) + \frac{(x-a)(x-c)}{(b-a)(b-c)}f(b) + \frac{(x-a)(x-b)}{(c-a)(c-b)}f(c), \quad (52)$$

jehož 1. derivace má tvar

$$f'(x) \cong P_2'(x) = \frac{2x-(b+c)}{(a-b)(a-c)}f(a) + \frac{2x-(a+c)}{(b-a)(b-c)}f(b) + \frac{2x-(a+b)}{(c-a)(c-b)}f(c), \quad (53)$$

a 2. derivace je pak

$$f''(x) \cong P_2''(x) = \frac{2f(a)}{(a-b)(a-c)} + \frac{2f(b)}{(b-a)(b-c)} + \frac{2f(c)}{(c-a)(c-b)}. \quad (54)$$

V předchozích rovnicích představuje x aktuální hodnotu nezávislé veličiny a platí $a, b, c \equiv t_1, t_{k-r}, t_{k-s}$; $r < s$. Konstanty r a s se volí heuristicky.

4.9 Numerické řešení diferenciálních rovnic

Následující podkapitola se věnuje vybrané metodě numerického řešení diferenciálních rovnic. Za účelem realizace přenosu v MATLABu bylo použito metody numerického řešení diferenciálních rovnic. Jedná se o Runge-Kutta-Fehlbergovu metodu [29], kterou lze popsat následujícími rovnicemi

$$y_{n+1} = y_n + \left(\frac{16}{135}k_1 + \frac{6656}{12825}k_3 + \frac{28561}{56430}k_4 - \frac{9}{50}k_5 + \frac{2}{55}k_6 \right), \quad (55)$$

$$k_1 = \Delta t f(t_n, y_n), \quad (56)$$

$$k_2 = \Delta t f\left(t_n + \frac{1}{4}h, y_n + \frac{1}{4}k_1\right), \quad (57)$$

$$k_3 = \Delta t f\left(t_n + \frac{3}{8}h, y_n + \frac{3}{32}k_1 + \frac{9}{32}k_2\right), \quad (58)$$

$$k_4 = \Delta t f \left(t_n + \frac{12}{13} h, y_n + \frac{1932}{2197} k_1 - \frac{7200}{2197} k_2 + \frac{7296}{2197} k_3 \right), \quad (59)$$

$$k_5 = \Delta t f \left(t_n + h, y_n + \frac{439}{216} k_1 - 8k_2 + \frac{3680}{513} k_3 - \frac{845}{4104} k_4 \right), \quad (60)$$

$$k_6 = \Delta t f \left(t_n + \frac{1}{2} h, y_n - \frac{8}{27} k_1 + 2k_2 - \frac{3544}{2565} k_3 + \frac{1859}{4104} k_4 - \frac{11}{40} k_5 \right), \quad (61)$$

Funkce *ode* MATLABu je ve všech svých variantách implicitní funkcí, proto její chod nelze urychlit. Pokud je vytvořena nová funkce pro řešení ODR, pak ji lze urychlit. Tato výhoda se projeví zejména při regulaci v reálném čase.

5 NAVRŽENÝ ALGORITMUS DECENTRALIZOVANÉHO ŘÍZENÍ

5.1 Úvodem

Tato kapitola se věnuje popisu algoritmu decentralizovaného řízení spojitého systému. Obsahem je návrh algoritmu spolu s teoretickými předpoklady. Po formulaci navrženého algoritmu následuje schéma. Ověření navrženého postupu je demonstrováno v následující kapitole. Důvody, proč byl použit právě tento návrh, vyplynuly především z experimentů v laboratoři reálných procesů. Jednalo se o metodu neadaptivního decentralizovaného řízení a metodu decentralizovaného řízení s využitím STC a filtrace vstupních a výstupních veličin na několika různých laboratorních přístrojích propojených přes technologickou kartou s PC. Řízení se realizovalo v software MATLAB.

Primární snahou bylo zlepšit stávající výsledky experimentů. Jak je patrné z literárních podkladů zabývajících se popisem metod decentralizovaného řízení, jsou tyto metody formulovány výhradně pomocí matematického aparátu s uvedením teoretických předpokladů. Proto je tomu stejně i v této práci.

5.2 Předpoklady

a) decentralizovaná říditelnost

Předpokládáme existenci stabilní minimálně fázové lineární časově invariantní (LTI) v čase spojité mnohorozměrové soustavy rozměru $N \times N$. Její Laplaceův obraz $\mathbf{S}(s) : \mathbf{S}(t) \rightarrow \mathbf{S}(s)$, který si označíme pojmem *transformovaná soustava*, je ve tvaru

$$\mathbf{S}(s) = \begin{pmatrix} S_{11}(s) & S_{12}(s) & \cdots & S_{1N}(s) \\ S_{21}(s) & S_{22}(s) & \cdots & S_{2N}(s) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N1}(s) & S_{N2}(s) & \cdots & S_{NN}(s) \end{pmatrix}, \quad (62)$$

kde $S_{ij}(s)$, $i = 1, 2, \dots, N$, $j = 1, 2, \dots, N$ je Laplaceův obraz ij -té podsoustavy $S_{ij}(t)$ transformované soustavy $\mathbf{S}(s)$. Transformovaná soustava $\mathbf{S}(s)$ je decentralizovaně říditelná právě tehdy když je dominantní její hlavní diagonála.

b) model soustavy a tvar referenčních signálů

Předpokládejme, že existuje soustava $\mathbf{S}(t)$ a transformovaná soustava $\mathbf{S}(s)$ tak, jak byla popsána výše. Pak k ní formulujeme model vytvořený za účelem decentralizovaného řízení, který si označme jako $\mathbf{M}(t)$, a jeho Laplaceův obraz $\mathbf{M}(s)$. Uvažujme $\mathbf{M}(s)$ jako stabilní minimálně fázovou lineární časově invariantní mnohorozměrovou diagonální matici ve tvaru

$$\mathbf{M}(s) = \begin{pmatrix} M_1(s) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & M_2(s) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & M_N(s) \end{pmatrix}, \quad (63)$$

kde $M_i(s)$, $i = 1, 2, \dots, N$, je Laplaceův obraz i -tého submodelu $M_i(t)$ modelu $\mathbf{M}(t)$ transformované soustavy $\mathbf{S}(s)$. Tímto předpokládáme minimální vliv mimodiagonálních přenosů, což je kvůli nasazení decentralizovaného regulátoru. Provede se zjednodušení regulace N -rozměrné soustavy na regulaci N jednorozměrových soustav.

Dále předpokládejme, že Laplaceův obraz vektoru referenčních signálů $\mathbf{r}(s)$ je vždy ve tvaru

$$\mathbf{r}(s) = (R_1(s) \ R_2(s) \ \cdots \ R_N(s)), \quad (64)$$

kde $R_i(s)$, $i = 1, 2, \dots, N$, je i -tý Laplaceův obraz referenčního signálu Laplaceova obrazu vektoru referenčních signálů $\mathbf{r}(s)$ a má tvar

$$R_i(s) = \frac{h_i}{s}, \quad (65)$$

kde $h_i \in R$, $i = 1, 2, \dots, N$, je i -tá po částech konstantní funkce, tj. referenční signál, který je pouze kombinací p -l skokových změn signálu o jeho různých konstantních hodnotách

$$h_i = \begin{cases} j_{i1} & \text{pro } t \in \langle 0, t_{i1} \rangle \\ j_{i2} & \text{pro } t \in \langle t_{i1}, t_{i2} \rangle \\ \vdots & \\ j_{ip} & \text{pro } t \in \langle t_{ip-1}, t_{ip} \rangle \end{cases}, \quad 0 < t_{i1} < t_{i2} < \dots < t_{ip-1} < t_{ip}, \quad (66)$$

kde $j_{il} \in R$, $i = 1, 2, \dots, N$, $l = 1, 2, \dots, p$, je l -tá konstantní funkce i -té po částech konstantní funkce h_i , t je čas a $t_{il} \in R^+$, $i = 1, 2, \dots, N$, $l = 1, 2, \dots, p$, je l -tý časový okamžik i -té po částech konstantní funkce h_i . Uvedené tedy znamená, že ke každému nenulovému prvku matice $\mathbf{M}(s)$ existuje právě jeden nenulový prvek vektoru $\mathbf{r}(s)$, tj. že každý dílčí přenos celkového modelu soustavy má pro sebe definován referenční signál. Co se týká podoby referenčního signálu, jedná se o po částech konstantní funkci. Tato funkce je složena z libovolného ale předem daného počtu p segmentů o různé, ale přitom konstantní hodnotě, tedy že se v čase mění.

5.3 Navržený algoritmus

V této části je formulace algoritmu decentralizovaného řízení s uvažováním výše formulovaných předpokladů, tj. decentralizované říditelnosti, modelu soustavy a tvaru referenčních signálů.

a) modifikace modelu systému

Mějme $M_i(s)$, $i = 1, 2, \dots, N$, tj. Laplaceův obraz i -tého submodelu $M_i(t)$, který zapišme ve tvaru

$$M_i(s) \approx \begin{cases} M_{i1}(s) & \text{pro } t \in \langle 0, t_1 \rangle \\ M_{i2}(s) & \text{pro } t \in \langle t_1, t_2 \rangle \\ \vdots & \\ M_{ir}(s) & \text{pro } t \in \langle t_{r-1}, t_r \rangle \end{cases}, \quad 0 < t_1 < t_2 < \dots < t_{r-1} < t_r, \quad (67)$$

kde M_{ir} , $i=1,2,\dots,N$, $k=1,2,\dots,r$, je k -tý element Laplaceova obrazu i -tého submodelu $M_i(t)$, t je čas a $t_k \in R^+$, $k=1,2,\dots,r$, je k -tý časový okamžik u k -tého elementu Laplaceova obrazu i -tého submodelu $M_i(t)$, a tento časový okamžik je stejný pro všechny Laplaceovy obrazy submodelů $M_i(s)$, $i=1,2,\dots,N$. Hodnota r je počet časových úseků, na něž jsou rozděleny referenční signály. V rámci každého úseku je hodnota všech referenčních signálů konstantní, tj.

$$r = \sum_{i=1}^N h_i \quad (68)$$

přičemž tyto změny se vždy provádí tak, aby nedošlo k více změnám různých referenčních signálů ve stejném časovém okamžiku t_k než k jedné.

b) decentralizovaný v čase spojité regulátor

Platí-li výše uvedený model systému, pak existuje Laplaceův obraz decentralizovaného zpětnovazebního regulátoru $C(s)$ transformované soustavy $S(s)$ ve tvaru

$$C(s) = \begin{pmatrix} C_1(s) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_2(s) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & C_N(s) \end{pmatrix}, \quad (69)$$

kde $C_i(s)$, $i=1,2,\dots,N$, je Laplaceův obraz i -tého subregulátoru decentralizovaného zpětnovazebního regulátoru $C(s)$. Odtud plyne, že ke každému Laplaceovu obrazu i -tého submodelu $M_i(t)$ modelu $M(t)$ transformované soustavy $S(s)$ existuje právě jeden odpovídající i -tý subregulátor decentralizovaného zpětnovazebního regulátoru $C(s)$. Při výpočtu je pak počítána každá i -tá zpětnovazební smyčka zvlášť. Dále pro i -tý Laplaceův obraz subregulátoru $C_i(s)$ platí

$$C_i(s) \approx \begin{cases} C_{i1}(s) & \text{pro } t \in \langle 0, t_1 \rangle \\ C_{i2}(s) & \text{pro } t \in \langle t_1, t_2 \rangle \\ \vdots \\ C_{ir}(s) & \text{pro } t \in \langle t_{r-1}, t_r \rangle \end{cases}, \quad 0 < t_1 < t_2 < \dots < t_{r-1} < t_r, \quad (70)$$

kde C_{ir} , $i = 1, 2, \dots, N$, $k = 1, 2, \dots, r$, je k -tý element Laplaceova obrazu i -tého subregulátoru $C_i(t)$, t je čas a $t_k \in R^+$, $k = 1, 2, \dots, r$, je k -tý časový okamžik u k -tého elementu Laplaceova obrazu i -tého subregulátoru $C_i(t)$, a tento časový okamžik je stejný pro všechny Laplaceovy obrazy subregulátorů $C_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, N$. Stejně jako u modifikace modelu, tak i zde je hodnota r počet časových úseků, na něž jsou rozděleny referenční signály. V rámci každého úseku je hodnota všech referenčních signálů konstantní.

c) regulace s přepínáním

Kombinací výše uvedeného modelu a decentralizovaného v čase spojitého regulátoru dojdeme k následujícímu závěru. Každý úsek regulace takovéto soustavy, kde referenční signály mají konstantní hodnotu, má své submodely a proto i své subregulátory. Z tohoto důvodu musí docházet k přepínání během regulace mezi těmito regulátory podle předem dané logiky, která byla popsána výše. V tomto pohledu lze na daný typ regulace nahlížet jako na regulaci s přepínáním.

d) celková stabilita

Jestliže jsou všechny subregulátory silně stabilní a platí v předpokladech popsána decentralizovaná říditelnost, pak je celý systém stabilní. Silná stabilita všech subregulátorů je zaručena z jejich definice, jelikož se používá metody suboptimálního LQ sledování. Pokud je potřeba testovat stabilitu, pak za tímto účelem můžeme použít některého ze známých kritérií stability, jako je například kritérium Hurwitzovo.

f) v čase spojitá předidentifikace

Uvažujme nejprve platnost předpokladu decentralizované říditelnosti, popisu soustavy a modelu soustavy. Pak na transformovanou soustavu $S(s)$ lze nahlížet jako na model "černé

skříňky" a ten necht' je identifikován pomocí přímých a /nebo nepřímých v čase spojitých algoritmů. Pak v čase spojitou identifikaci tohoto modelu lze realizovat pomocí následujících kroků:

1. V uzavřeném obvodu není zapojen regulátor. Hodnoty vektoru rozdílů výstupních veličin a referenčních signálů $E(t)$ jsou poslány na vstup soustavy $S(t)$. Hodnoty referenčních signálů jsou stejné a ve stejném čase jako ty, které budou použity během regulace.
2. Uvažujeme-li regulaci s přepínáním tak, jak byla uvedena výše, pak každý časový interval průběhu regulace soustavy $S(t)$, na kterém všechny referenční signály mají konstantní hodnotu, je identifikován zvlášť, v takzvaných *elementech identifikace* (EI).
3. Každý EI je identifikován několikrát, pokaždé jiným algoritmem identifikace a získaný model může být ověřen porovnáním s naměřenými daty. Získaný model, který je nejvíc ve shodě s naměřenými daty je pak následovně použit pro regulaci. Označme si tento způsob identifikace jako *identifikace více metodami* (IVM).

Soustava $S(s)$ je výše uvedeným postupem úplně identifikována předtím, než začne vlastní regulace, proto není třeba identifikace během regulace. Tento postup je vhodný u procesů, kde se mnohokrát opakuje tentýž postup. Identifikace během regulace je však možná.

g) supervisor

Formulujme si nyní podobu supervisoru. Jeho podobu jsme získali na základě mnoho opakovaných experimentů a zkoumání jejich chování.

Uvažujeme-li platnost výše uvedeného, pak mějme n elementů subregulátorů s jedním vstupem a jedním výstupem $C_1 \dots C_n$ Laplaceova obrazu decentralizovaného zpětnovazebního regulátoru $C(s)$ transformované soustavy $S(s)$, a pak předpokládejme existenci bitového pole o $n \times n$ bitech které odpovídají hodnotám jednotkové matice rozměru $N \times N$; $n \equiv N$. Každý řádek bitového pole odpovídá odpovídajícímu subsystému regulovaného mnohorozměrového systému. Během celého průběhu regulace se střídají dvě fáze: (1) Krokové sekvenční nastavování a (2) sekvenční nastavování založené na odchylce regulace. Počáteční nastavení bitové pole má podobu jednotkové matice.

Fáze (1). Krokové sekvenční nastavování

Krok 1. Projdeme bitové pole řádek po řádku. Řádek, ve kterém pořadí bitů reprezentuje po konverzi do desítkové soustavy nejvyšší číslo nám dá číslo subsystému, ve kterém proběhne krok on-line identifikace.

Krok 2. Po nastavení subsystému se nastaví poslední bit řádku, který odpovídá právě identifikovanému subsystému na 1 a u zbývajících řádků se nastaví poslední bit na 0.

Krok 3. Rotace všech řádků o jeden bit vlevo.

Krok 4. Projdeme bitové pole řádek po řádku. Řádek, ve kterém pořadí bitů reprezentuje po konverzi do desítkové soustavy nejnižší číslo nám dá číslo subsystému, ve kterém proběhne krok on-line identifikace.

Krok 5. Provede se krok 2.

Krok 6. Provede se krok 3.

Krok 1-6 opakujeme $n/2$ -krát u sudého n a $n/2$ -krát bez kroku 4-6 u posledního volání u lichého n , vždy však jako kombinace kroku 1-3 a 4-6, respektive 4-6 a 1-3 při dalším volání.

Fáze (2). Sekvenční nastavování založené na odchylce regulace

Krok 1. Najdeme subsystém, který má největší odchylku regulace z těchto subsystémů a provedme STC pouze pro tento subsystém.

Krok 2. Nastavme poslední bit řádku, který odpovídá právě nastavenému subsystému na 1, u zbývajících řádků nastavme poslední bit na 0.

Krok 3. Rotujme všechny řádky o jeden bit vlevo.

Krok 4. Najdeme subsystém, který má nejmenší odchylku regulace z těchto subsystémů a provedeme STC pouze pro tento subsystém.

Krok 5. Provede se krok 2.

Krok 6. Provede se krok 3.

Přepínání dvou fází supervisoru a jeho použití

Přepínání dvou fází během regulace je možné za sebou nepřetržitě nebo pouze ve vybraných úsecích, například na začátku změny referenčního signálu anebo vždy po změně referenčního signálu. Použití supervisoru se předpokládá pouze při regulaci časově variantních systémů nebo nelineárních soustav, protože pokud platí popis regulované soustavy ve tvaru lineárních časově invariantního systému (LTI), pak postup regulace bez bitového supervisoru popsáný výše je naprosto dostačující a navíc garantuje klidnější průběh výstupního a akčního signálu.



Obr. 8 Blokové schéma navržené metody

6 SIMULAČNÍ OVĚŘOVÁNÍ

6.1 Popis software MATLAB

MATLAB je integrované prostředí pro vědeckotechnické výpočty, modelování, návrhy algoritmů, simulace, analýzu a prezentaci dat, měření a zpracování signálů. Tento software se během uplynulých let stal celosvětovým standardem v oblasti technických výpočtů a simulací nejen ve sféře vědy, výzkumu a průmyslu, ale i v oblasti vzdělávání. První verze MATLABu byla vytvořena pro OS Unix, v roce 1985 vznikla první verze pro PC XT. Jeho instalace jsou k dispozici pro různé operační systémy. V současnosti je k dispozici verze R2006b pro 32 bitové a 64 bitové operační systémy různých výrobců.

Nejpodstatnější součástí numerického jádra MATLABu jsou algoritmy pro operace s poli reálných a komplexních čísel o dimenzi n . Matice jsou pak speciální případ pole o dimenzi 2, pro které jsou v MATLABu definovány pojmy řádek a sloupec. Téměř všechny funkce numerického jádra umožňují přímý výpočet s polem, což snižuje četnost používání cyklů a zrychluje chod programu. MATLAB navíc umožňuje pomocí vektorizace odkazování a logických operací omezit používání cyklů na minimum, což se označuje jako maskování cyklů.

Samotné výpočetní jádro je implementováno s využitím nejmodernějších knihoven a je schopno adaptivně optimalizovat svou činnost podle konkrétní hardwarové konfigurace počítače.

Autorem software je firma MathWorks, na jejichž [www stránkách](http://www.mathworks.com) je k dispozici kompletní dokumentace software stejně jako stovky vzorových programů, které uživatelé nabízí zdarma ke stažení. Hlavním distributorem programu v České republice je firma Humusoft z Prahy, která poskytuje rovněž školení o tomto programu.

Akademická pracoviště v České a Slovenské republice mají bohaté zkušenosti v práci s tímto software. V současné době na českém trhu existuje dostatek publikací zabývajících se tímto program a také skripta, např. Perůtka [40].

Použití MATLABu se rozšiřuje díky jeho nadstavbovým balíkům programů, označovaných jako toolboxy a je opravdu rozmanité, např. Aerospace Toolbox, Bioinformatics Toolbox, Financial Toolbox, Mapping Toolbox. Speciální a také hlavní nadstavbou je SIMULINK, který převážně slouží pro simulace lineárních a nelineárních systémů. Rovněž SIMULINK obsahuje své toolboxy a také speciální knihovny bloků

označované jako blocksety, např. SimBiology, SimDriveline, SimHydraulics, SimPowerSystems.

Software MATLAB je využíván při předních projektech, např. použití v projektu NASA Mars Observer vozítka na Marsu.

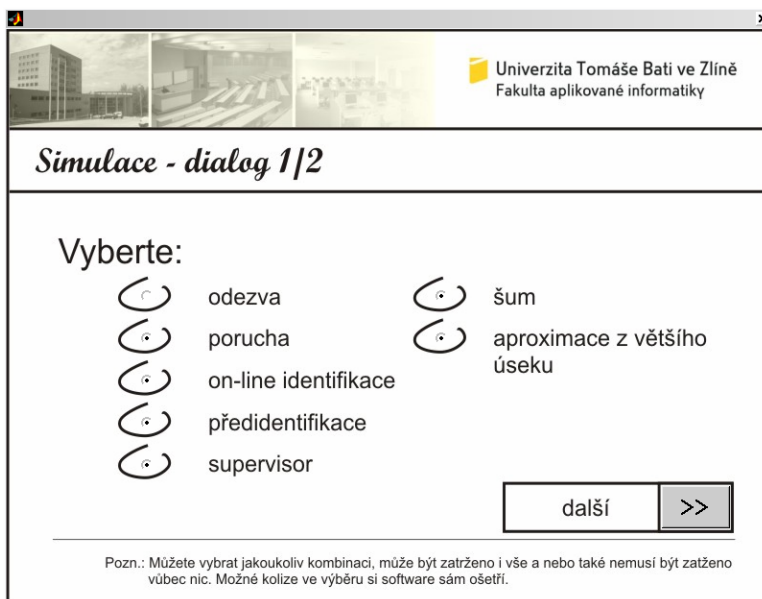
6.2 Stručný popis vytvořeného software pro simulační ověřování

Pro simulační ověřování navrženého algoritmu byl vytvořen program v software MATLAB. Program nevyužívá SIMULINK, speciálních funkcí MATLABu využívá minimum. Pro rychlejší výpočet byla napsána nová funkce pro řešení diferenciálních rovnic, tj. za účelem výpočtu výstupu z přenosu systému. Celý program tvoří 241 M-souborů zdrojového kódu o celkové délce cca 12600 řádek zdrojového kódu představujících cca 250 stran formátu A4. Software byl vytvořen pro MATLAB verze 6.5 pro rozlišení monitoru 1024x768. Pokud se uživatel pokusí program spustit v jiné verzi MATLABu nebo pod jiným rozlišením, pak se zobrazí varovné modální dialogy a program se ukončí.

Pro spuštění programu se musí přidat cesta k adresáři, ve kterém se program nachází, do souboru `pathdef.m` a nebo tento adresář nastavit po spuštění MATLABu jako aktuální. Program se spouští zadáním příkazu `start` do příkazového okna MATLABu. Po úvodním dialogu se objeví dialog, viz obrázek 9, ve kterém zatržením různých kombinací vybereme jednu z 32 možných simulací. Jedná se o následující možnosti:

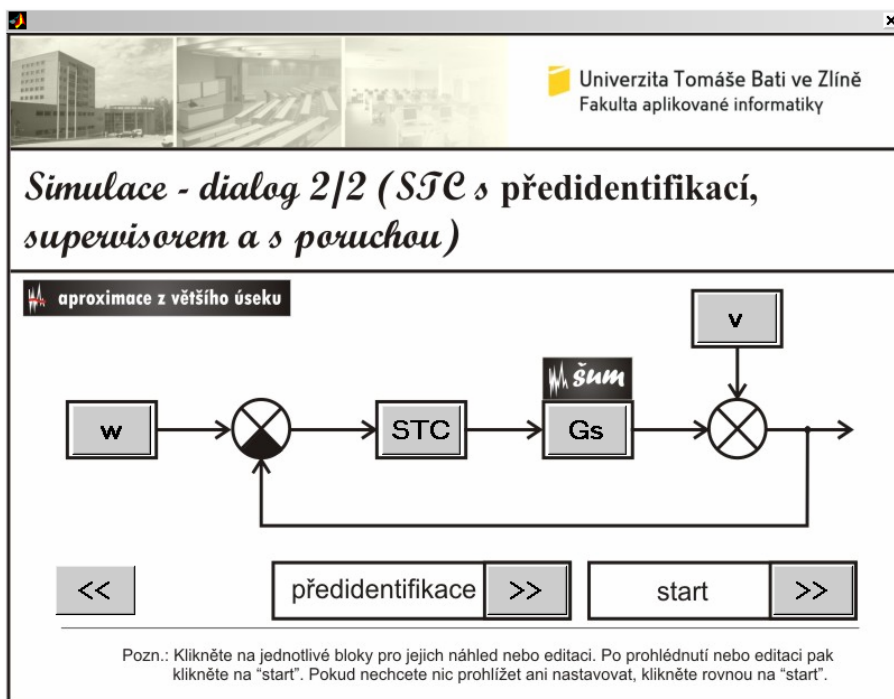
1. odezva
2. odezva s poruchou
3. neadaptivní řízení
4. neadaptivní řízení s poruchou
5. neadaptivní řízení s předidentifikací
6. neadaptivní řízení s předidentifikací a poruchou
7. STC
8. STC s poruchou
9. STC s předidentifikací
10. STC s předidentifikací a poruchou
11. STC s předidentifikací a supervisorem
12. STC s předidentifikací, supervisorem a poruchou
13. STC se supervisorem
14. STC se supervisorem a poruchou

15. odezva se šumem
16. odezva s poruchou a šumem
17. neadaptivní řízení se šumem
18. neadaptivní řízení s poruchou a šumem
19. neadaptivní řízení s předidentifikací a šumem
20. neadaptivní řízení s předidentifikací, šumem a poruchou
21. STC se šumem
22. STC se šumem a aproximací z většího úseku
23. STC s poruchou a šumem
24. STC s poruchou, šumem a aproximací z většího úseku
25. STC s předidentifikací, šumem a aproximací z většího úseku
26. STC s předidentifikací, poruchou, šumem a aproximací z většího úseku
27. STC s předidentifikací, supervisorem, šumem a aproximací z většího úseku
28. STC s předidentifikací, supervisorem, poruchou, šumem a aproximací z většího úseku
29. STC se supervisorem a šumem
30. STC se supervisorem, šumem a aproximací z většího úseku
31. STC se supervisorem, poruchou a šumem
32. STC se supervisorem, poruchou a šumem a aproximací z většího úseku



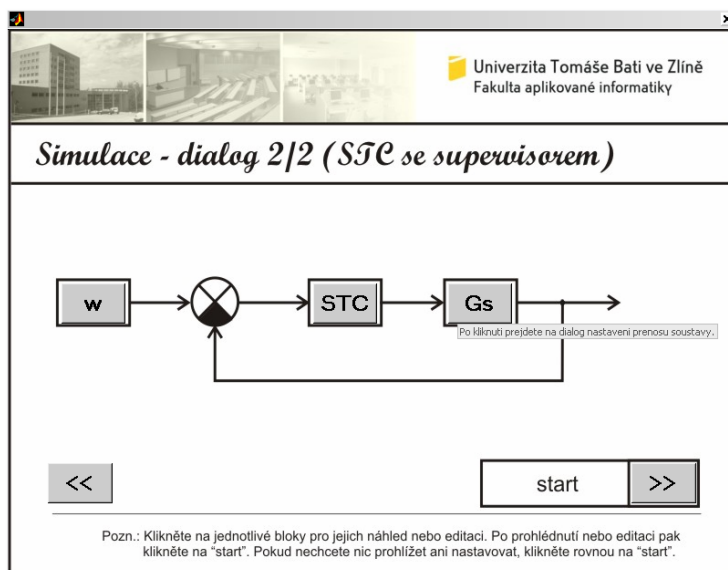
Obr. 9 Dialog pro výběr simulace

Po kliknutí na tlačítko *další* se pak zobrazí dialog pro vybranou volbu, viz obrázek 10.



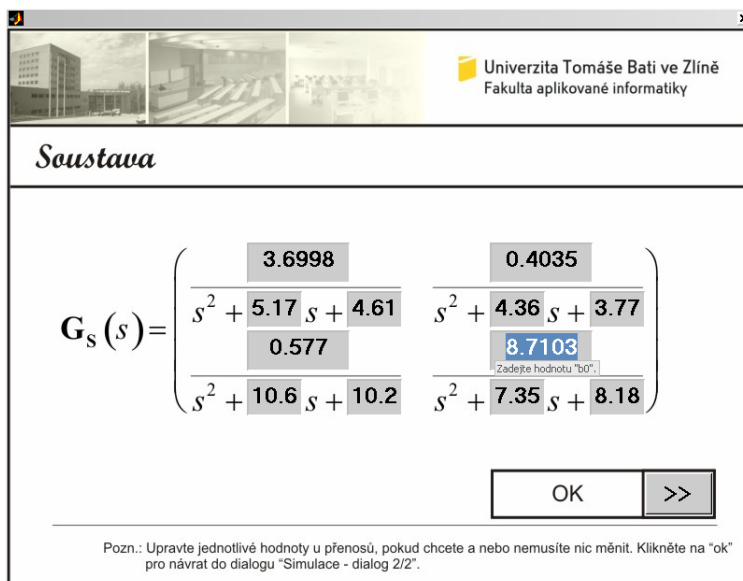
Obr. 10 Dialog pro vybranou simulaci

Ovládání programu usnadňuje online nápověda. Každý ovládací prvek všech dialogů software, jako je například tlačítko nebo editační okno, má vytvořenou stručnou nápovědu. Podržíme-li chvíli kurzor myši na daném prvku, pak se nápověda objeví formou tooltipu, jak je znázorněno na obrázku 11



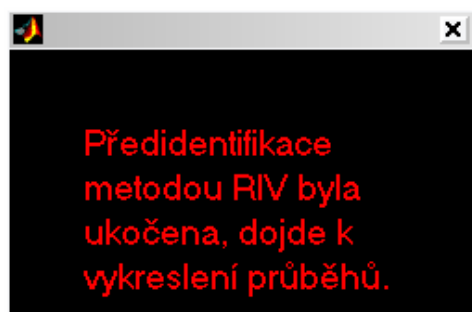
Obr. 11 Dialog s ukázkou kontextové nápovědy formou tooltipu

U každého z dialogů je v jeho spodní části pod čarou uveden v poznámce stručný popis toho, k čemu konkrétní dialog slouží. Každý z dialogů simulace umožňuje měnit různá nastavení týkající se konkrétní simulace, například můžeme nastavit přenos regulované soustavy, viz obrázek 12.



Obr. 12 Dialog s ukázkou editace vstupních parametrů

Jakmile nastavíme všechny požadované hodnoty v dialogích příslušné volby simulace, pak klikneme na tlačítko start dialogu označeného jako Simulace - dialog 2/2... a tím spustíme simulaci. V závislosti na vybrané volbě získáme od 1 do 14 grafů během jedné simulace. Software s uživatelem komunikuje také formou modálních dialogů, ukázka je na obrázku 13.



Obr. 13 Modální dialog vytvořeného programu

Za účelem demonstrace možností vytvořeného programu byly pro stejné vstupní parametry realizovány všechny výše znázorněné možnosti. Grafický výstup spolu se vstupními dialogy je umístěn v příloze práce. Vzhledem k jejímu rozsahu, přes 450 obrázků, je tato příloha pouze v elektronické podobě a to na přiloženém CD-ROM.

6.3 Výsledky ověřování

Následující kapitola se věnuje výsledkům simulačního ověřování pro různé vlivy na průběh regulace. Jedná se o vliv interakcí, dále o vliv metody identifikace na koeficient korelace, vliv poruchy a šumu. Na závěr této kapitoly je uveden vliv volby intervalu aproximace Lagrangeovým polynomem na průběh regulace. Výsledky jsou znázorněny pomocí grafů, které jsou následně komentovány.

6.3.1 Vliv interakcí mezi subsystémy

Pro ověřování vlivu interakcí mezi subsystémy byly vstupní parametry simulace následující. Přenos regulované soustavy je ve tvaru

$$\mathbf{G}_s(s) = \begin{pmatrix} \frac{3.6998}{s^2 + 5.17s + 4.61} & \frac{0.4035}{s^2 + 4.36s + 3.77} \\ \frac{0.577}{s^2 + 10.6s + 10.2} & \frac{4.7103}{s^2 + 7.35s + 8.18} \end{pmatrix},$$

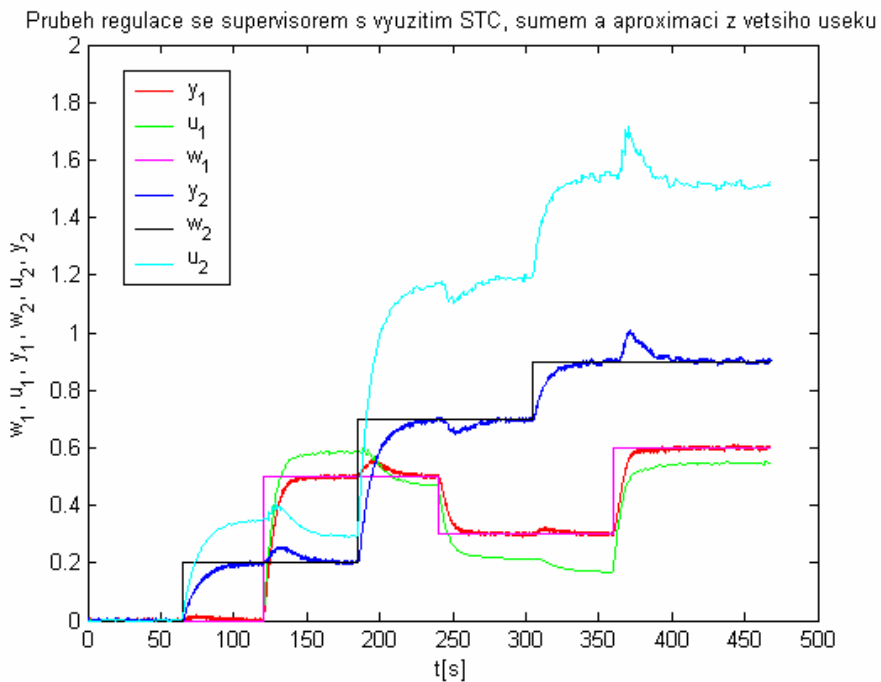
počáteční odhad modelu soustavy pro online-identifikaci je

$$\mathbf{G}_{Mo}(s) = \begin{pmatrix} \frac{1}{s^2 + 2s + 1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{s^2 + 2s + 1} \end{pmatrix}.$$

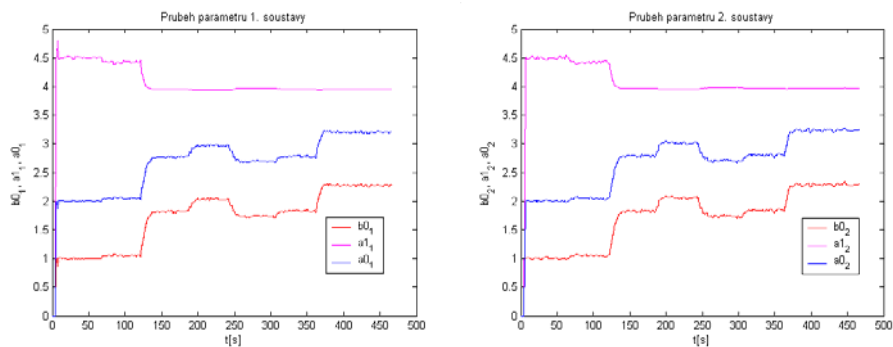
Penalizační konstanty suboptimálních LQ regulátorů byly voleny

$$\mu_1 = 1, \quad \varphi_1 = 30, \quad \mu_2 = 1, \quad \varphi_2 = 30.$$

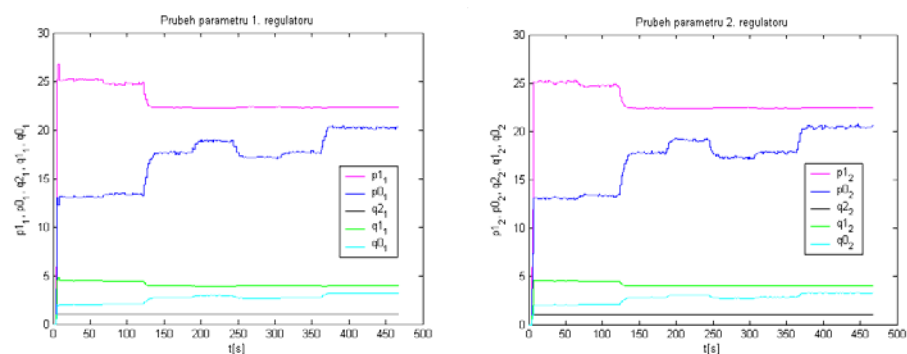
Celková doba simulace je 1.3 násobek času poslední změny referenčního signálu. Perioda identifikace je 1 s a perioda výpočtu 0.1 s. K výstupu ze soustavy byl přičítán šum. Nyní následují grafické průběhy regulace a parametrů regulátorů a soustavy během regulace, obrázky 14 – 16.



Obr. 14 Průběh regulace pomocí STC se supervisorem – slabé interakce



Obr. 15 Průběh parametrů 1. a 2. soustavy

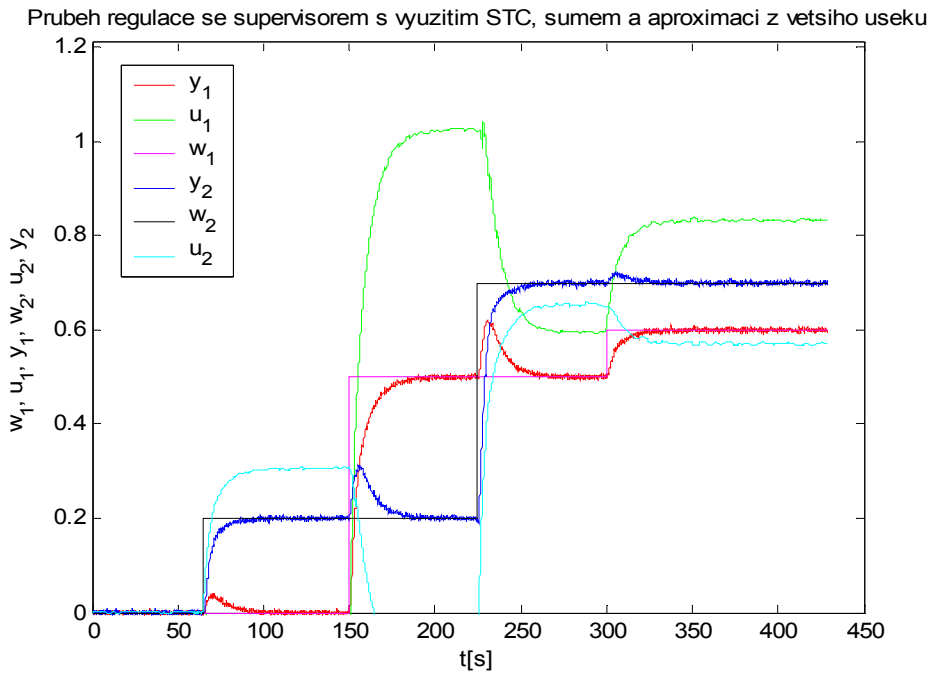


Obr. 16 Průběh parametrů 1. a 2. regulátoru

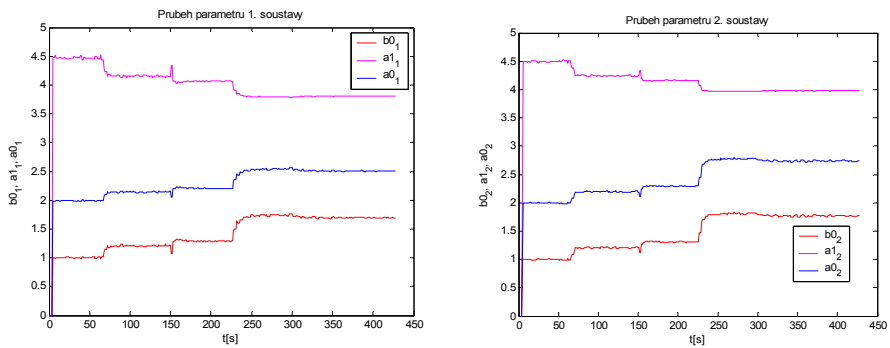
Pro porovnání vlivu interakcí byla dále provedena simulace systému, jehož přenos je

$$\mathbf{G}_S(s) = \begin{pmatrix} \frac{2.3998}{s^2 + 5.17s + 4.61} & \frac{1.1035}{s^2 + 4.36s + 3.77} \\ \frac{1.777}{s^2 + 7.68s + 6.26} & \frac{4.2103}{s^2 + 6.35s + 5.18} \end{pmatrix},$$

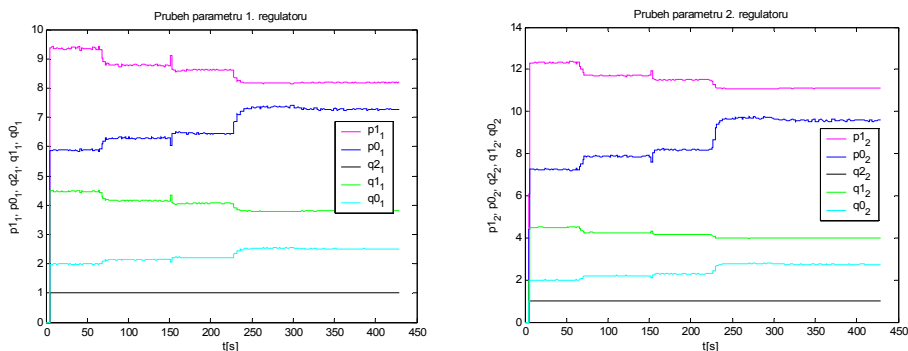
Ostatní parametry simulace byly zvoleny jako u předchozího příkladu. Grafické průběhy jsou na obrázcích 17 – 19.



Obr. 17 Průběh regulace pomocí STC se supervisorem – silné interakce



Obr. 18 Průběh parametrů 1. a 2. soustavy



Obr. 19 Průběh parametrů 1. a 2. regulátoru

Vliv interakcí je zřejmý. U průběhu regulace s většími interakcemi jsou také větší překmity výstupní veličiny v případě změny žádané hodnoty. Je to zřejmé také v případě průběhu parametrů soustav i regulátorů, kdy v případě soustavy s většími interakcemi jsou v případě změny žádané hodnoty krátkodobě prudké změny parametrů, např. v čase 150 s u druhého příkladu.

6.3.2 Vliv metody identifikace během předidentifikace na koeficient korelace

Za účelem ověření vlivu použité metody identifikace během předidentifikace na koeficient korelace byly provedeny následující simulace na systému se silnými interakcemi. V prvním případě je přenos regulované soustavy ve tvaru

$$\mathbf{G}_s(s) = \begin{pmatrix} \frac{3.6998}{s^2 + 5.17s + 4.61} & \frac{3.4035}{s^2 + 4.36s + 3.77} \\ \frac{4.577}{s^2 + 10.69s + 10.27} & \frac{4.7103}{s^2 + 7.36s + 8.18} \end{pmatrix},$$

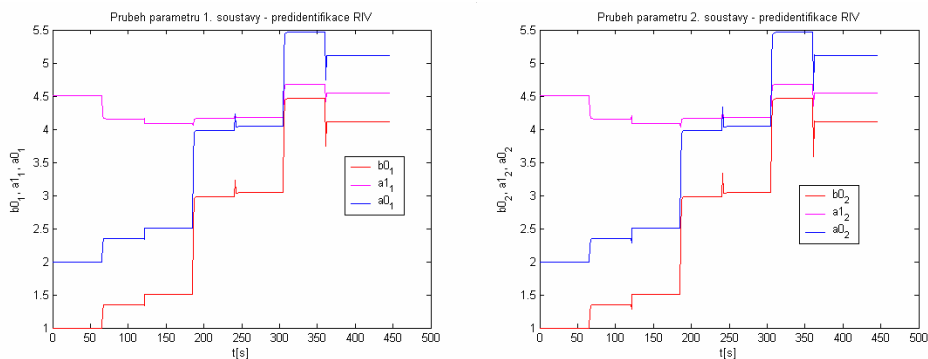
počáteční odhad modelu soustavy pro předidentifikaci je

$$\mathbf{G}_{Mp}(s) = \begin{pmatrix} \frac{1}{s^2 + 2s + 1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{s^2 + 2s + 1} \end{pmatrix}.$$

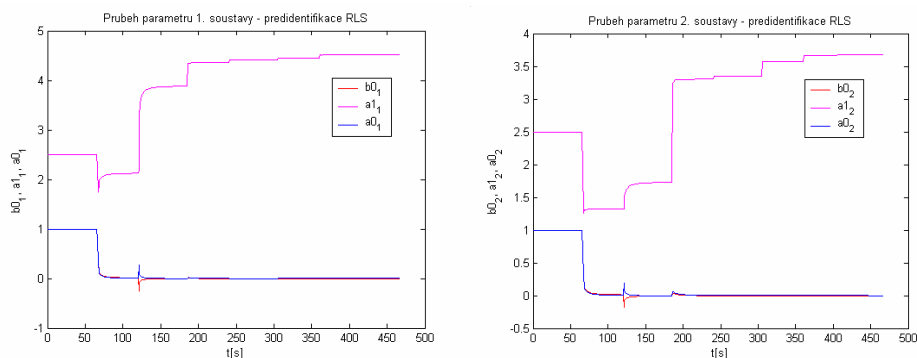
Penalizační konstanty suboptimálních LQ regulátorů byly voleny

$$\mu_1 = 1, \quad \varphi_1 = 30, \quad \mu_2 = 1, \quad \varphi_2 = 30.$$

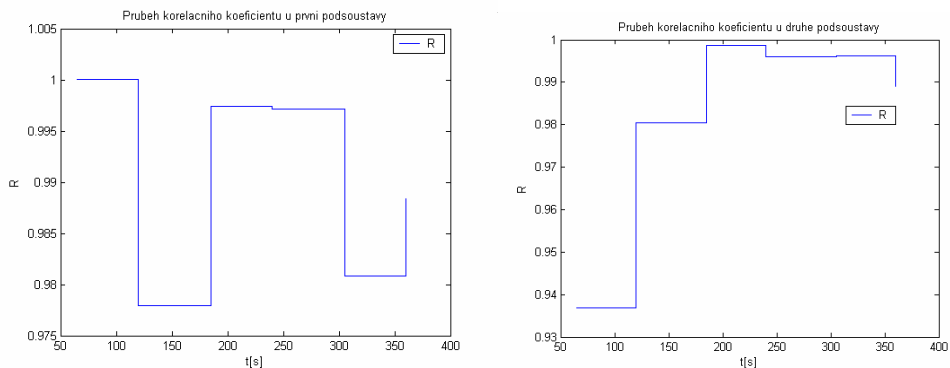
Doba simulace je 1.3 násobek času poslední změny referenčního signálu. Perioda identifikace je 1 s a perioda výpočtu 0.1 s. K výstupu ze soustavy byl přičítán šum. Během předidentifikace byla nejprve provedena identifikace rekurzivní metodou instrumentální proměnné, následně metodou rekurzivních nejmenších čtverců se směrovým zapomínáním. Obě metody měly stejné výchozí hodnoty. Pro obě metody identifikace byla provedena simulace odezvy pro identifikované parametry. Výsledky byly porovnány s naměřenou odezvou, výsledek je ve formě koeficientu korelace. Koeficient korelace měří těsnost lineární závislosti dvou proměnných. Pozorované dvojice dat jsou výběrem z normálního rozdělení [39]. Na základě koeficientu korelace byly vybrány nejvhodnější odhady parametrů modelu. Grafické průběhy parametrů a tabulka korelačních koeficientů jsou na obrázcích 20 - 23.



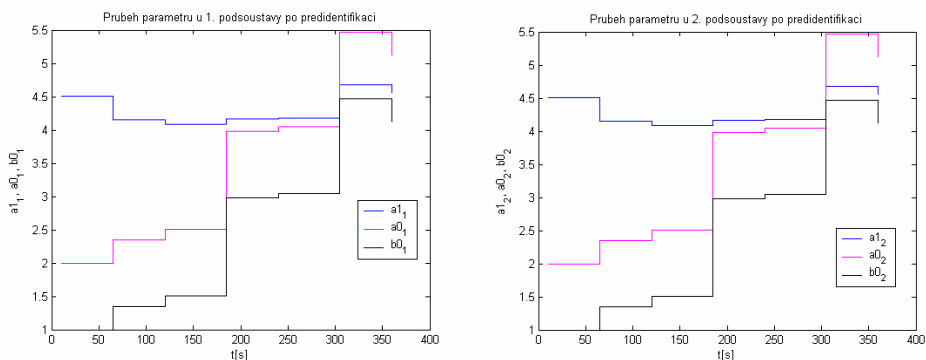
Obr. 20 Průběh parametrů 1. a 2. soustavy – předidentifikace RIV



Obr. 21 Průběh parametrů 1. a 2. soustavy – předidentifikace RLS



Obr. 22 Průběh koeficientů korelace u 1. a 2. soustavy



Obr. 23 Průběh odhadu parametrů 1. a 2. soustavy po předidentifikaci

Tab. 1 Průběh koeficientu korelace pro různé metody identifikace v daném čase

čas [s]	65-120	120-185	185-240	240-305	305-360	360-468
RLS 1.soustava	0	0.2846	0.3108	0.2860	0.3105	0.2746
RIV 1.soustava	1	0.9779	0.9974	0.9972	0.9808	0.9885
RLS 2.soustava	0.2830	0.2778	0.2848	0.2917	0.2835	0.2770
RIV 2.soustava	0.9369	0.9804	0.9986	0.9959	0.9962	0.9888

Jak je patrné z tabulky, pro daný příklad je vhodnější použít výsledky získané metodou rekurzivní instrumentální proměnné během předidentifikace jako odhady parametrů modelů během simulace regulace. Takto tomu bylo ve většině případů, ale vyskytly se i příklady, kdy dala lepší výsledek metoda nejmenších čtverců. Obecně lze říci, pokud to podmínky

realizace umožňují, že je lepší použít více metod identifikace pro stanovení odhadu parametrů, protože to zlepšuje průběh regulace. V případě, kdy hodnoty ze sady dvojic pozorovaných dat byly rovny 0, program vrátí koeficient korelace 0 pro RLS a 1 pro RIV.

6.3.3 Vliv poruchy

Za účelem ověření vlivu poruchy na průběh regulace navrženou metodou byla použita soustava

$$\mathbf{G}_s(s) = \begin{pmatrix} \frac{2.3998}{s^2 + 5.17s + 4.61} & \frac{1.1035}{s^2 + 4.36s + 3.77} \\ \frac{1.777}{s^2 + 7.68s + 6.26} & \frac{4.2103}{s^2 + 6.35s + 5.18} \end{pmatrix},$$

počáteční odhad modelu soustavy pro online-identifikaci je

$$\mathbf{G}_{Mo}(s) = \begin{pmatrix} \frac{1}{s^2 + 2s + 1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{s^2 + 2s + 1} \end{pmatrix}.$$

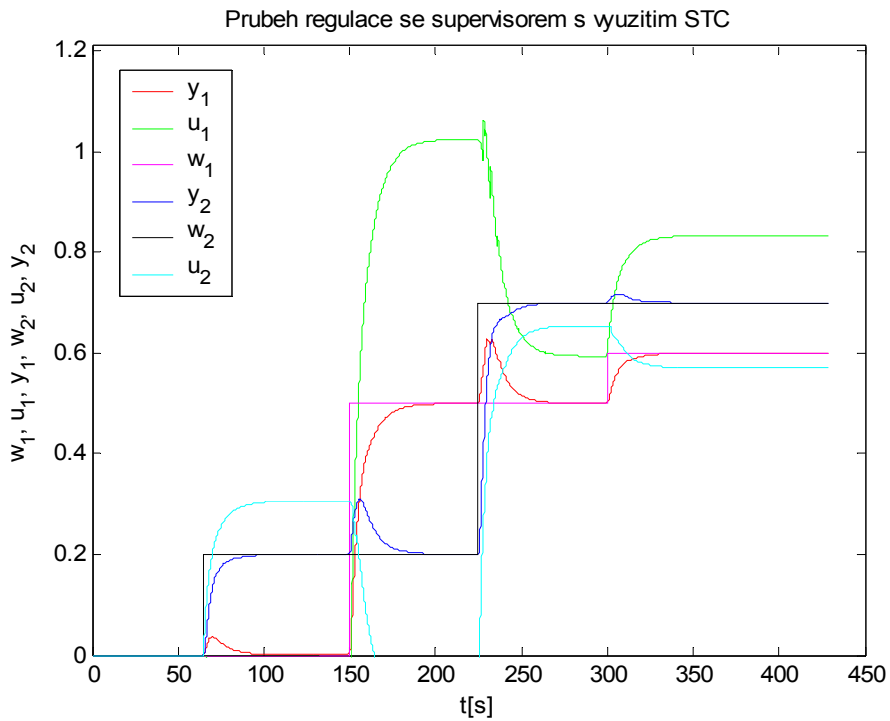
Penalizační konstanty suboptimálních LQ regulátorů byly voleny

$$\mu_1 = 1, \quad \varphi_1 = 4, \quad \mu_2 = 1, \quad \varphi_2 = 7,$$

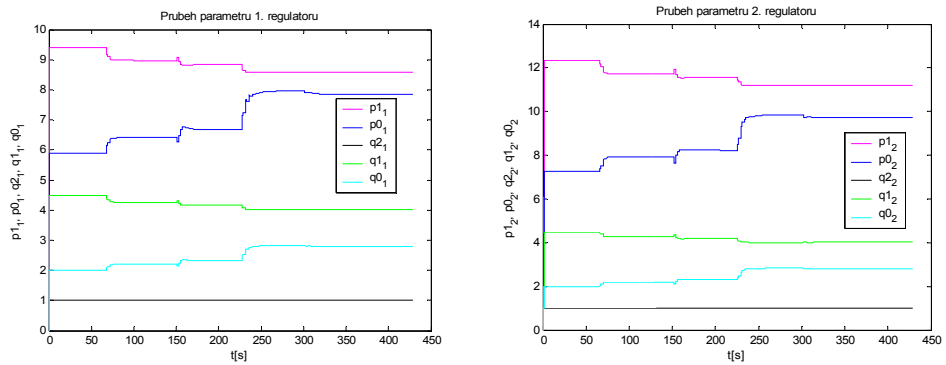
porucha je ve tvaru sinusoidy

$$v_1 = 0.01 \sin(k/20), \quad v_2 = 0.01 \sin(k/20)$$

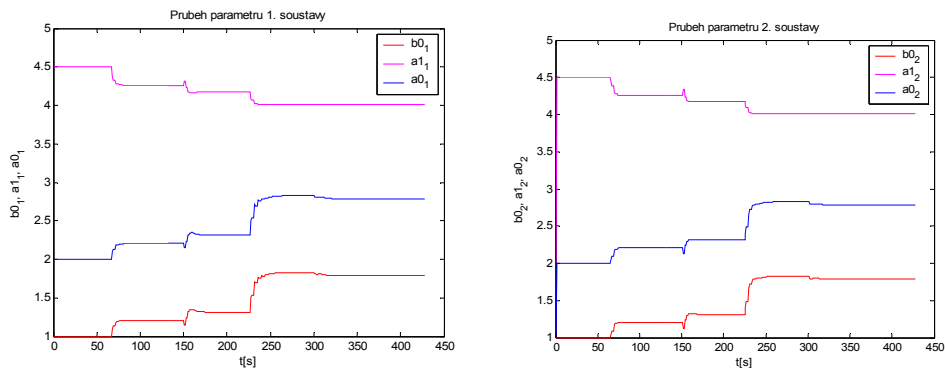
kde k je krok výpočtu, argument funkce sinus je brán v radiánech. Zbývající parametry byly stejné jako u předchozích příkladů s tím rozdílem, že k výstupu nebyl přičítán šum. Nejprve jsou znázorněny průběhy pro systém bez poruchy, obrázky 24 – 26, a následně pro systém s poruchou na výstupu, obrázky 27 – 29.



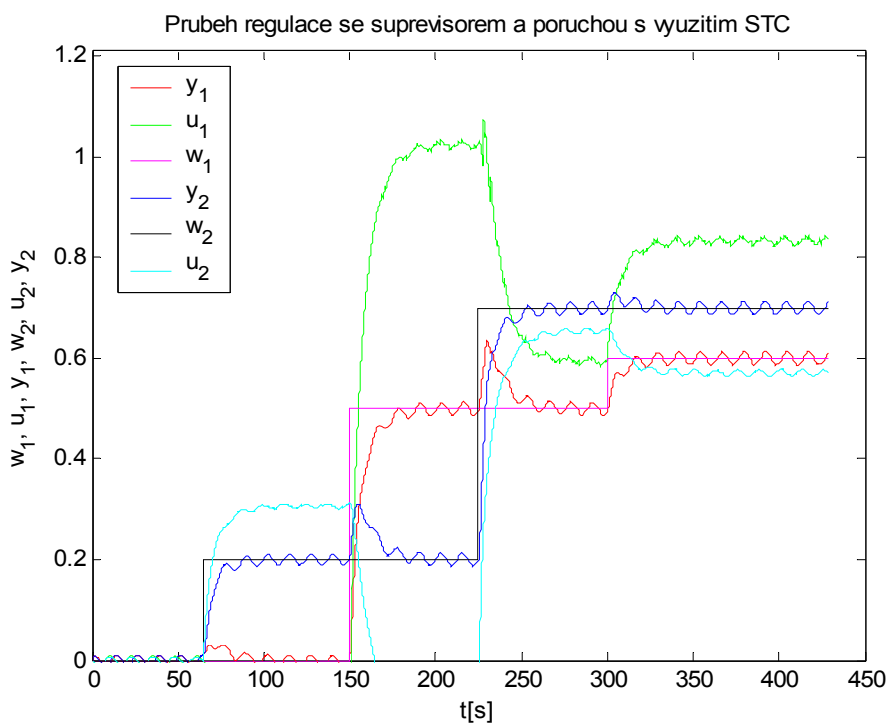
Obr. 24 Průběh regulace STC se supervisorem – silné interakce



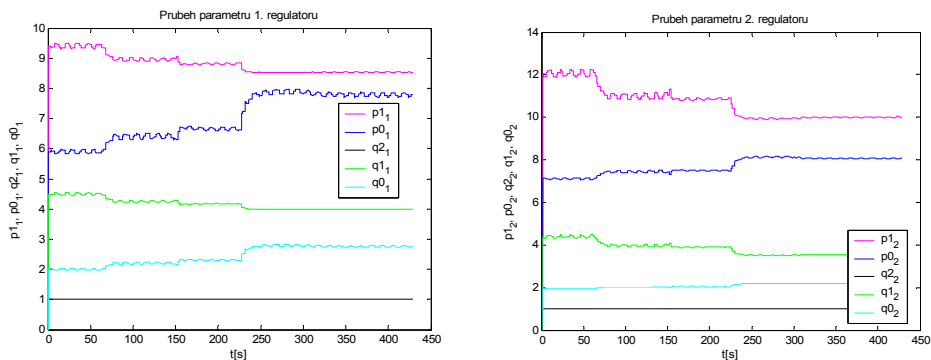
Obr. 25 Průběh parametrů 1. a 2. regulátoru



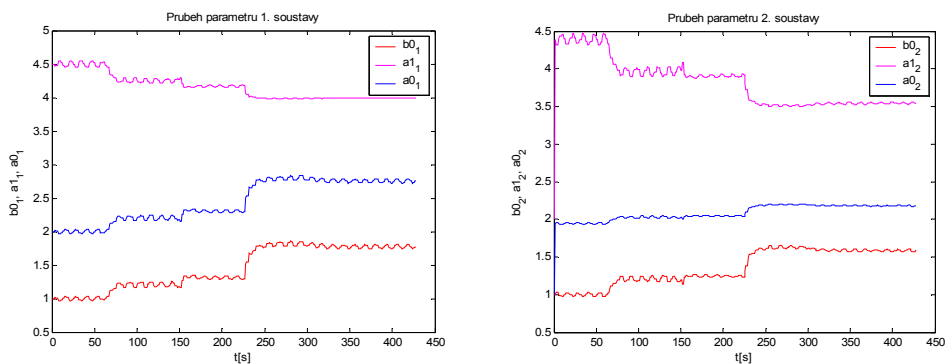
Obr. 26 Průběh parametrů 1. a 2. soustavy



Obr. 27 Průběh regulace STC se supervisorem – silné interakce s poruchou



Obr. 28 Průběh parametrů 1. a 2. regulátoru

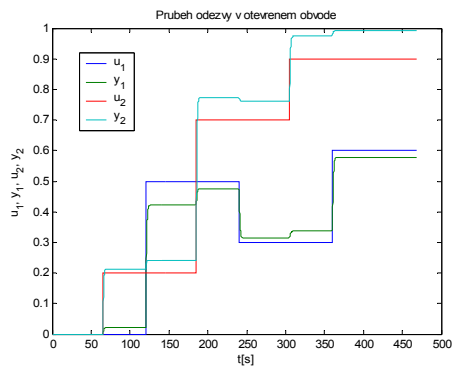


Obr. 29 Průběh parametrů 1. a 2. soustavy

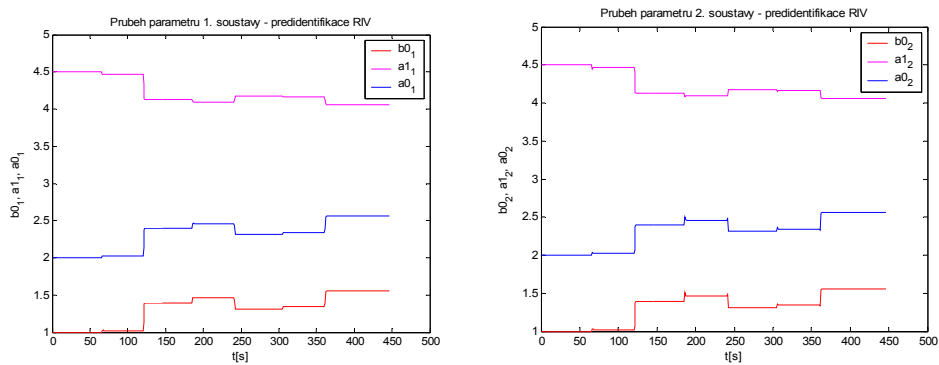
Jak je patrné z výše uvedených průběhů, navržená metoda není schopna minimalizovat vliv poruchy na průběh regulace. Nicméně regulace v přítomnosti poruchy je možná v případě, kdy vliv poruchy není příliš významný. Porucha ovlivňuje nejen průběh regulace ale také i průběh parametrů regulátorů a parametrů průběžně identifikovaného modelu soustavy. Nejhorší je vliv poruchy na výši překmitu během změny žádané hodnoty, který může být díky poruše ještě vyšší.

6.3.4 Vliv šumu

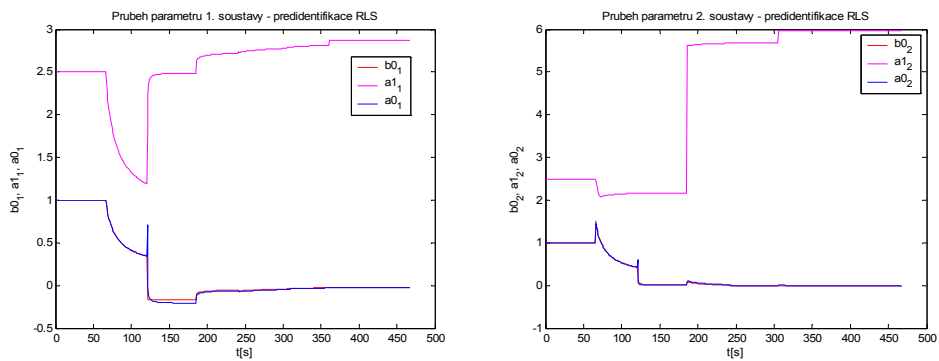
Ověření vlivu šumu bylo provedeno u řízení používajícího STC s předidentifikací u systému se slabými interakcemi. Vstupní parametry simulace byly stejné v případě, který je uveden v případě vlivu interakcí. Nejprve byla provedena simulace bez vlivu šumu, viz obrázky 30 - 37, a následně pak s vlivem šumu, viz obrázky 38 - 45.



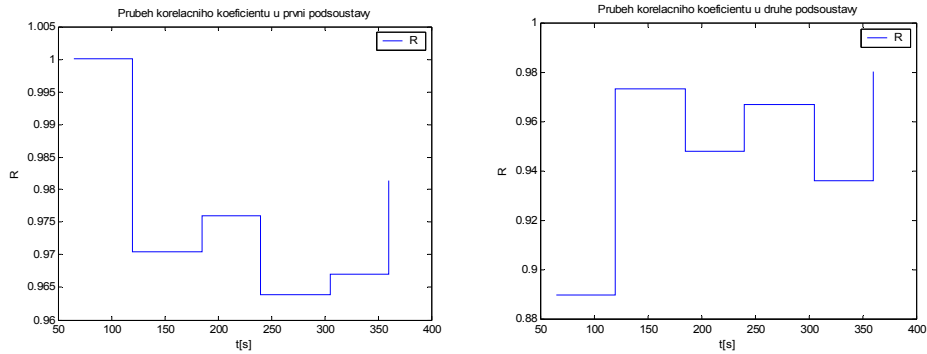
Obr. 30 Odezva systému



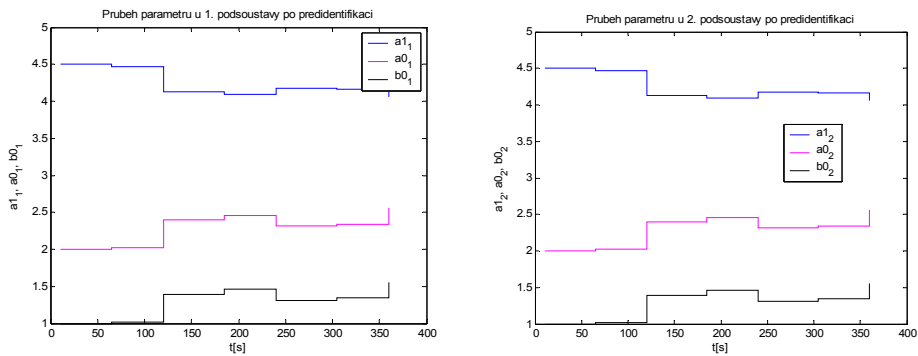
Obr. 31 Průběh parametrů 1. a 2. soustavy – předidentifikace RIV



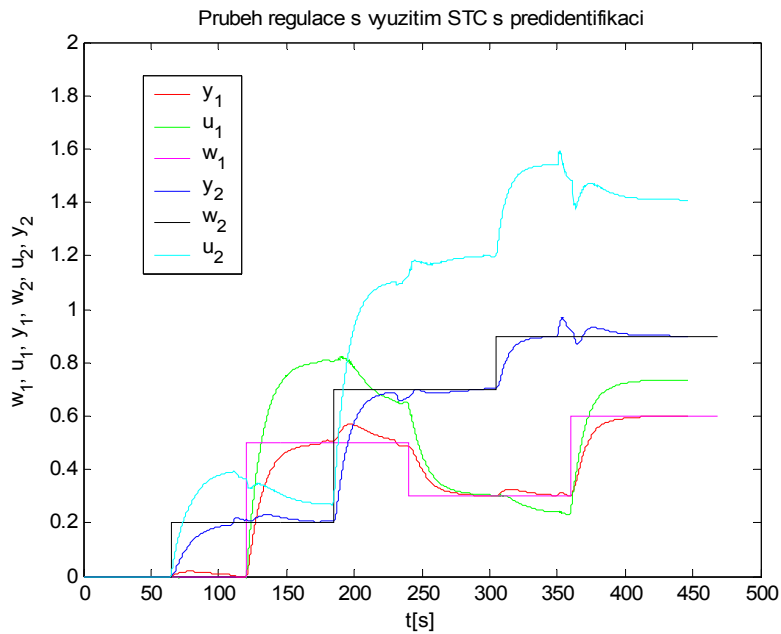
Obr. 32 Průběh parametrů 1. a 2. soustavy – předidentifikace RLS



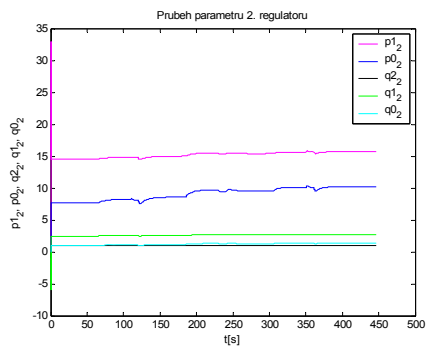
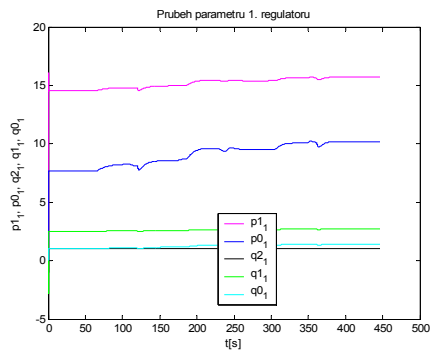
Obr. 33 Průběh koeficientů korelace u 1. a 2. soustavy



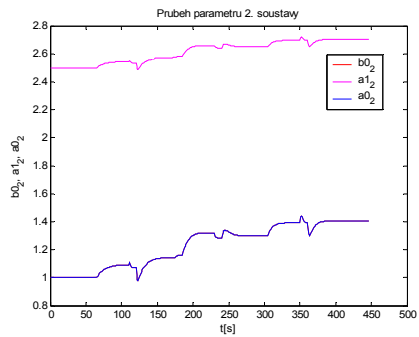
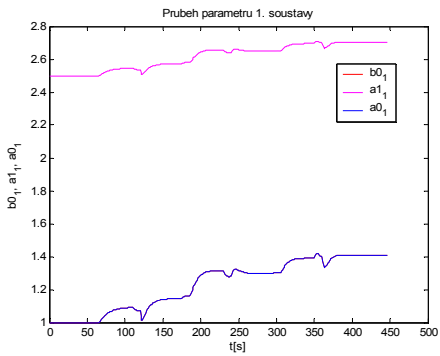
Obr. 34 Průběh odhadu parametrů 1. a 2. soustavy po předidentifikaci



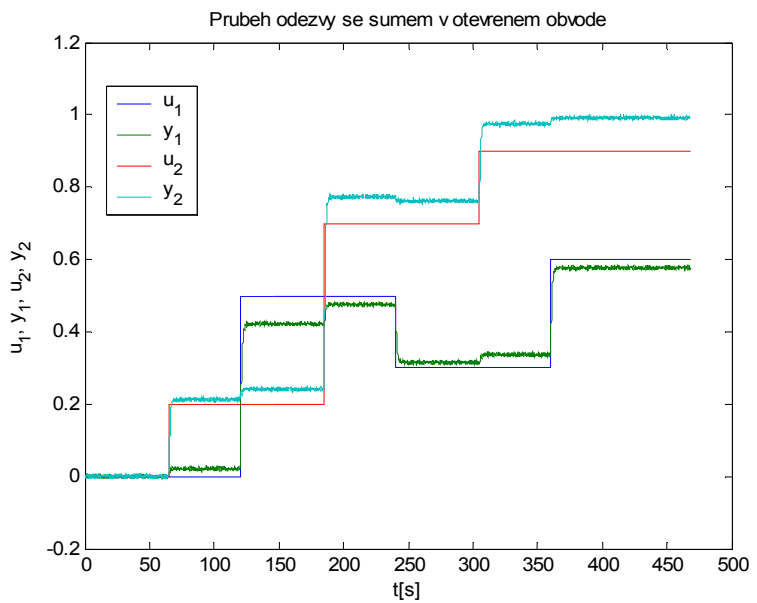
Obr. 35 Průběh regulace pomocí STC s předidentifikací



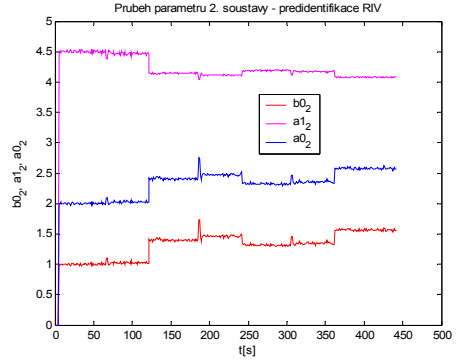
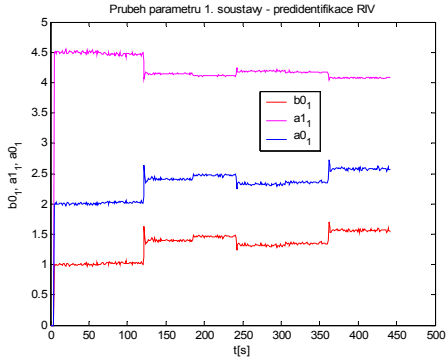
Obr. 36 Průběh parametrů 1. a 2. regulátoru



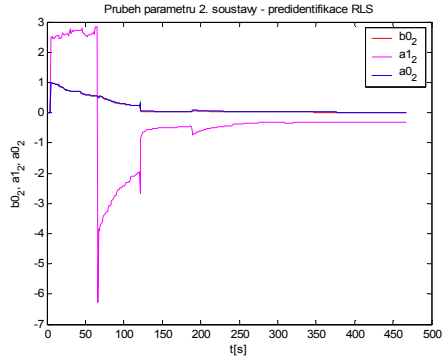
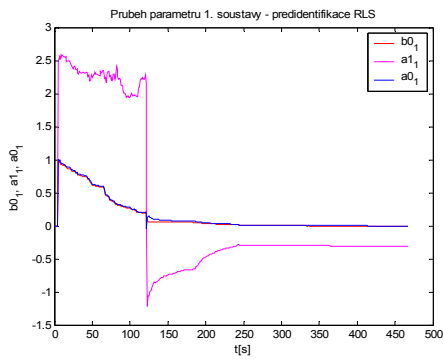
Obr. 37 Průběh parametrů 1. a 2. soustavy



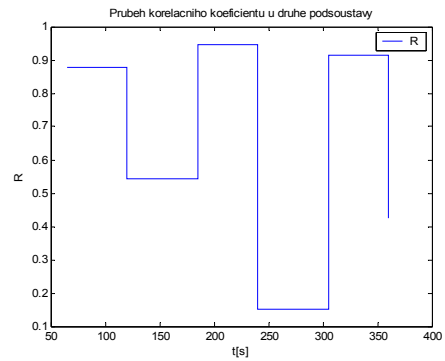
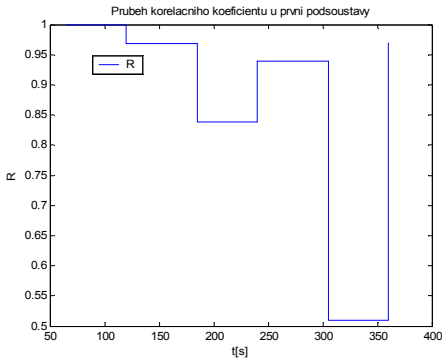
Obr. 38 Odezva systému



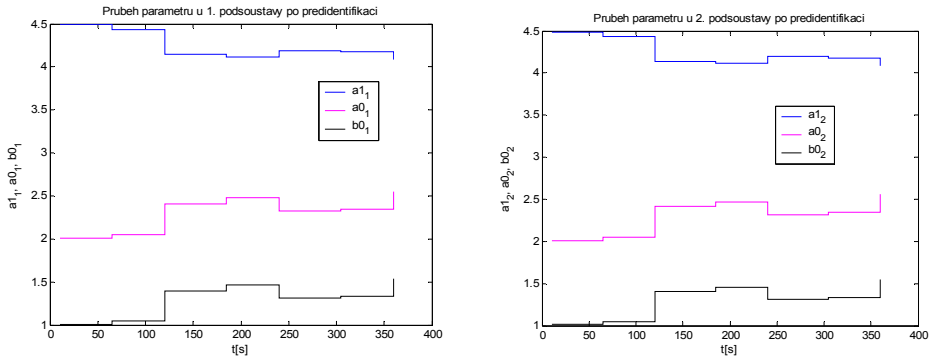
Obr. 39 Průběh parametrů 1. a 2. soustavy – předidentifikace RIV



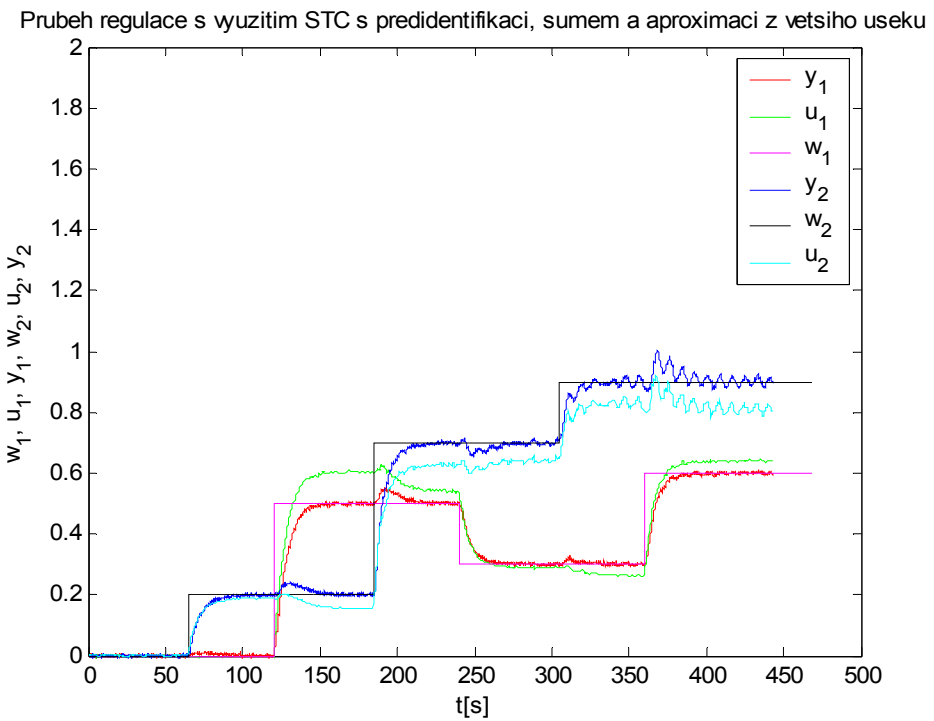
Obr. 40 Průběh parametrů 1. a 2. soustavy – předidentifikace RLS



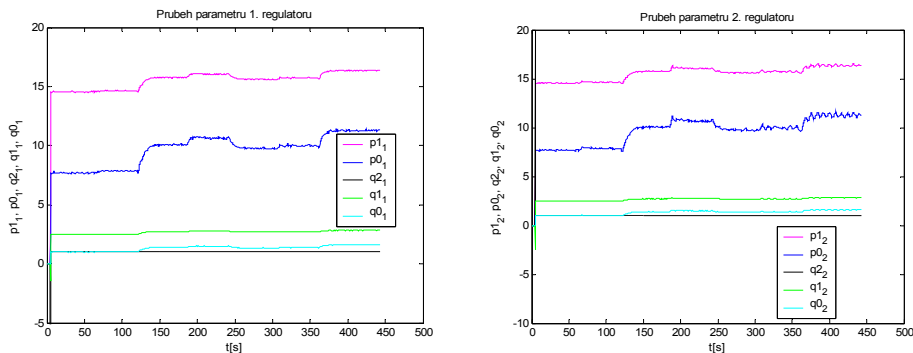
Obr. 41 Průběh koeficientů korelace u 1. a 2. soustavy



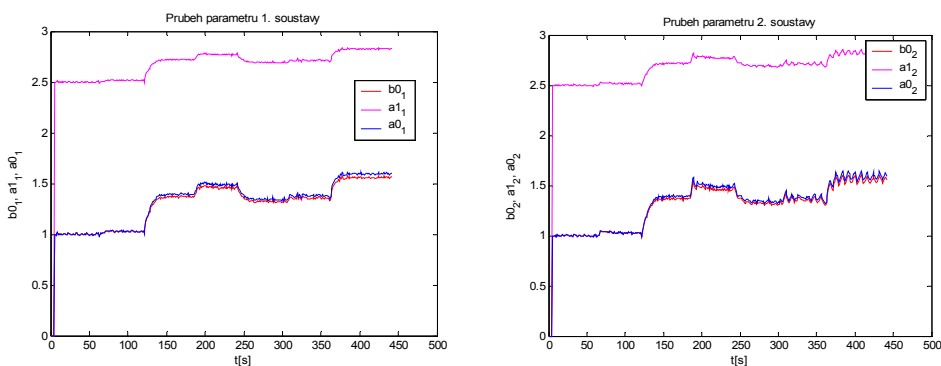
Obr. 42 Průběh odhadu parametrů 1. a 2. soustavy po předidentifikaci



Obr. 43 Průběh regulace STC s předidentifikací s šumem



Obr. 44 Průběh parametrů 1. a 2. regulátoru



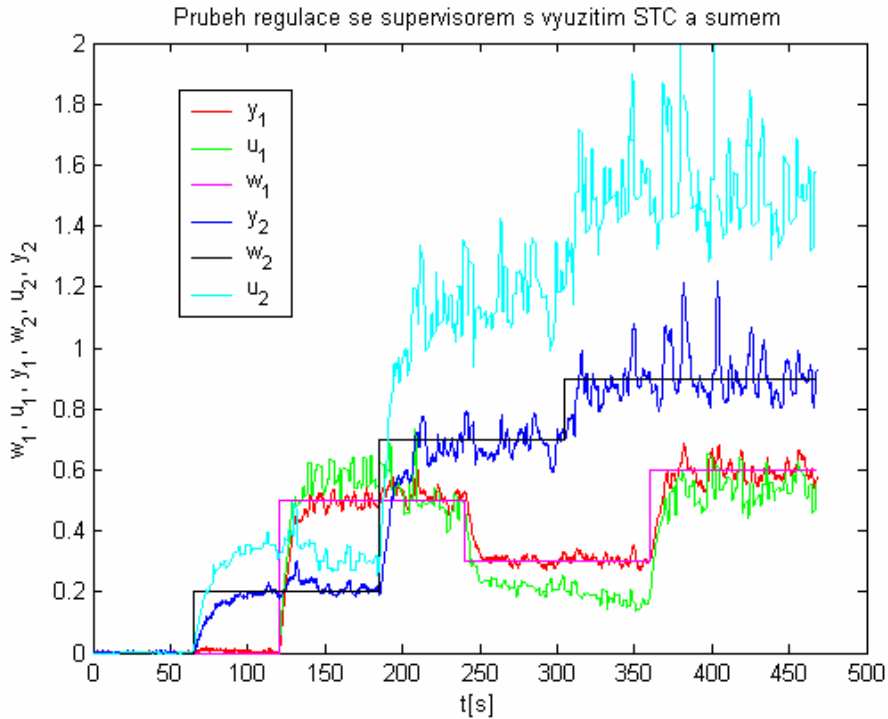
Obr. 45 Průběh parametrů 1. a 2. soustavy

Šum negativně ovlivňuje průběh regulace, odezvy, parametrů regulátorů, parametrů identifikovaného modelu soustavy u všech metod předidentifikace i během identifikační fáze STC. Ovlivňuje také koeficient korelace, protože simulace na základě identifikovaných dat není zatížena šumem. Pokud je jeho amplituda dostatečně nízká vůči výstupní veličině a žádané hodnotě, pak navrženou metodu lze použít i u systémů, které jsou ovlivněny šumem. V případě nevhodně zvolené kombinace žádaných hodnot může dojít ke zvýšení jeho vlivu, viz čas 370 s a více u předchozích grafických průběhů. U výše uvedeného příkladu se snižuje doba překmitu v rámci změny žádané hodnoty u systému zatíženého šumem, viz časy 120 s a 180 s.

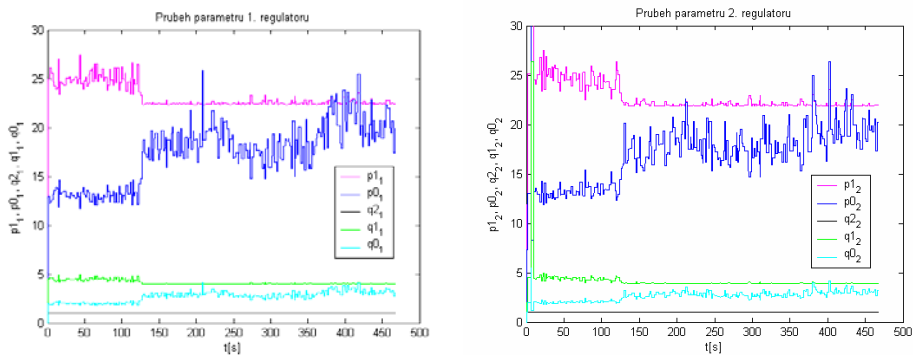
6.3.5 Vliv volby intervalu aproximace polynomem pro výpočet derivací

Podstatným faktorem, který může výrazně ovlivnit průběh regulace v případě výskytu šumu je časový interval, ze kterého se počítá aproximace polynomem. Pro ověření vlivu byly zvoleny stejné vstupní parametry, jak jsou uvedeny v této kapitole u vlivu interakcí. Byla

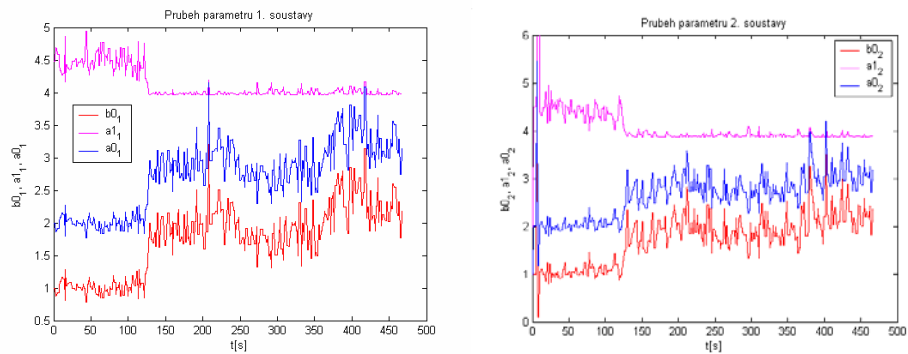
použita regulace s STC a supervisorem. V prvním příkladě byl interval aproximace 0.3 s a v druhém příkladě 4.5 s. Amplituda šumu byla v obou případech stejná. Grafické průběhy pro oba příklady nastavení jsou znázorněny na obrázcích 46 – 51. První příklad je znázorněn na obrázcích 46 – 48 a druhý na obrázcích 49 – 51.



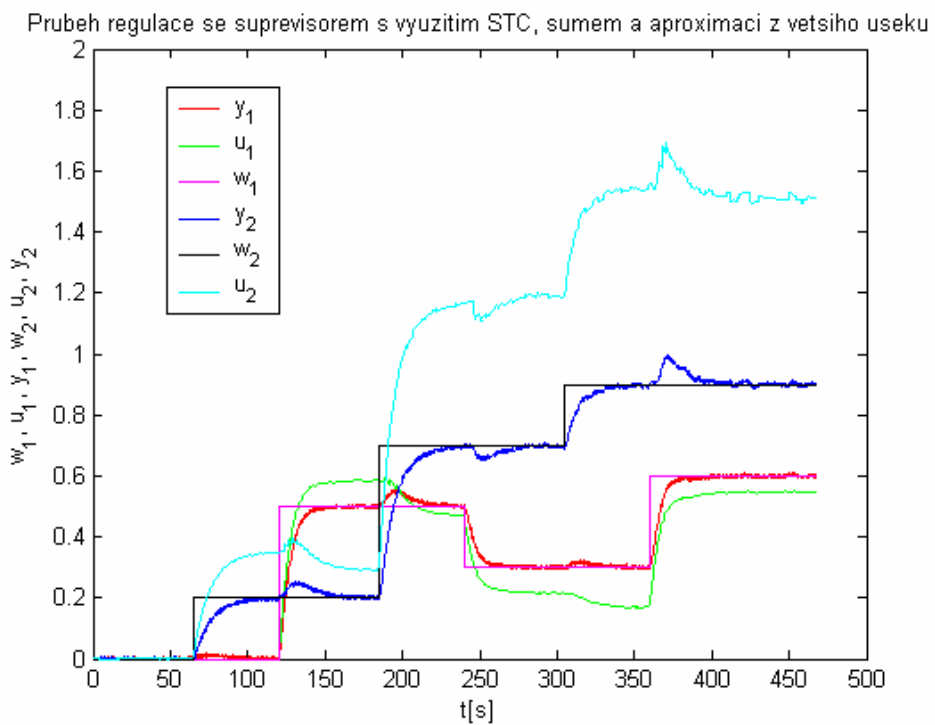
Obr. 46 Průběh regulace STC se supervisorem



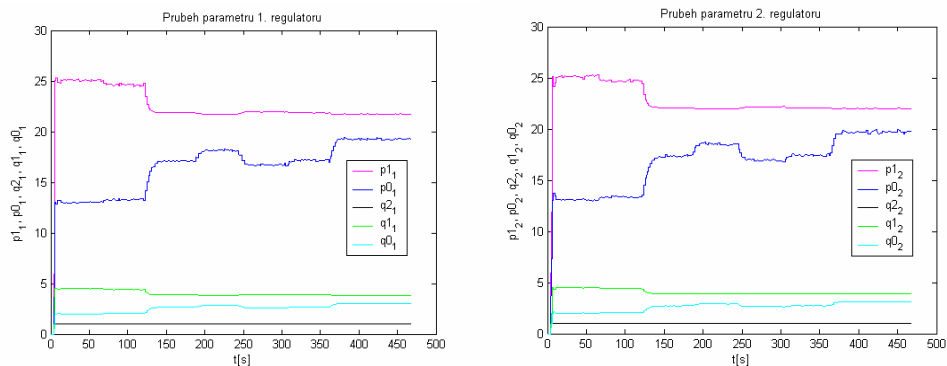
Obr. 47 Průběh parametrů 1. a 2. regulátoru



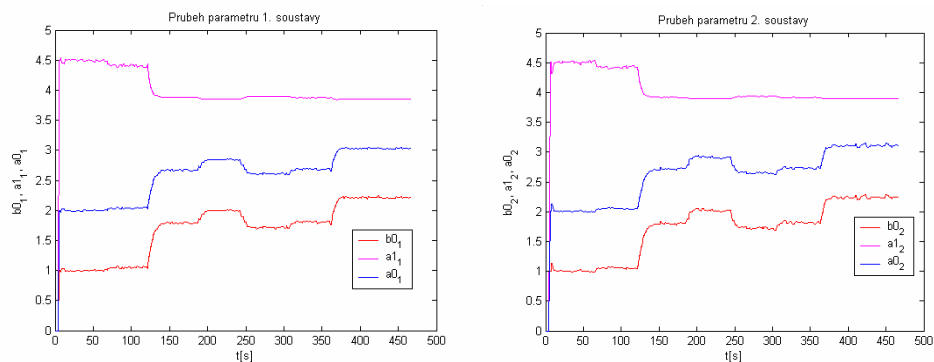
Obr. 48 Průběh parametrů 1. a 2. soustavy



Obr. 49 Průběh regulace STC se supervisorem – aproximace z většího úseku



Obr. 50 Průběh parametrů 1. a 2. regulátoru



Obr. 51 Průběh parametrů 1. a 2. soustavy

Z grafických průběhů vyplývá, že volba intervalu aproximace má podstatný vliv na průběh regulace v případě, kdy regulovaný systém je zatížen šumem. V případě malého intervalu aproximace polynomem za účelem výpočtu derivací vstupního a výstupního signálu dochází k zesílení vlivu šumu během rekurzivní identifikace, což se negativně projeví jak u průběhu parametrů regulátorů, tak také u regulačního pochodu.

7 LABORATORNÍ EXPERIMENTY

7.1 *Soustava spřažených elektromotorů*

Popis přístroje

Laboratorní model CE108 soustava spřažených elektromotorů, viz obrázek 52, umožňuje řešit praktické úlohy napínání a rychlosti pohybu materiálu při spojitých procesech. Příkladem může být rychlost a napínání nitě při převijení z jedné cívky na druhou, které je třeba řídit. Další příklady lze najít například při výrobě papíru, výrobě kabelů a všude tam, kde dochází k napínání spojitého pásu materiálu. Při těchto procesech prochází materiál pracovní stanicí, kde se měří rychlost a napínání, které jsou na sobě závislé a tyto veličiny se upravují rychlostí motorů umístěných před a za měřicí stanicí. Tato situace je upravena pro laboratorní měření tak, že pružný pás je upevněn na 3 kolech. Dolní dvě kola jsou napevno umístěná, lze měřit a regulovat jejich rychlost. Třetí kolo se může pohybovat (umístěno na pohyblivém rameni zavěšeném na pružině) a simuluje tak pracovní stanicí spolu s měřením napínání a rychlosti. Dva servomotory řídí rychlost pohybu a napínání pásu. Rychlost pohybuje 0 – 3000 ot/min, což odpovídá napětí 0 – 10 V.

Měření napínání je nepřímé přes úhel pohyblivého ramene, od -10° do 10° , což odpovídá napětí od -10 V do 10 V. Vstupy a výstupy jsou umístěny na předním panelu přístroje, jedná se o řídicí napětí k zesilovačům servomotorů, které jsou obousměrné, což jsou vstupy. Výstupy jsou čtyři, napětí odpovídající rychlosti dvou servomotorů a napětí odpovídající napínání a rychlosti pásu.

Hlavní funkční části přístroje lze rozdělit na: dvojici stejných servomotorů, tachogenerátor a servo potenciometr.

Servomotory – stejné servomotory jsou řízeny pomocí zesilovačů napětí umístěných v hlavní části přístroje. Servomotory jsou spojeny s tachogenerátory, které vytváří elektrický signál, který je přímo úměrný úhlovým rychlostem kol 1 a 2.

Tachogenerátor – počítá pulzy napětí a poskytuje napětí, které je úměrné rychlosti kola.

Servo potenciometr – je umístěn axiálně k ose rotace ramene. S vychýlením ramene potenciometr dává odpovídající napětí, které je zesíleno zesilovači a je úměrné k napínání pásu.

Propojení mezi přístrojem a PC

Přístroj je připojen k PC pomocí technologické karty Advantech PCL-812PG, která je připojena k základní desce PC. Karta má vyvedeny 4 konektory, použije se pouze konektor 2, označený jako CN2, protože má analogové vstupy i výstupy. Tento konektor je propojen s konektorem označeným jako CNA na svorkovnici PCLD-780 technologické karty. Řídící napětí ze dvou zesilovačů servomotorů jsou vyvedeny ze svorkovnice. Napětí tachogenerátoru a servo potenciometru jsou přivedeny na svorkovnici. Připojení je realizováno následujícím způsobem. Napětí prvního zesilovače je vyvedeno z pozice A13, druhého zesilovače z A15, napětí od tachogenerátoru je přivedeno do A1 a konečně napětí servo potenciometru do A3. Zem je propojena s A2. Vstupní napětí může být v rozsahu -10V až 10V, používalo se v rozsahu 0-10V. Výstupní napětí může být v rozsahu -10V až 10V. Technologická karta má jumpery v následujících pozicích: JP1 má propojeno INT a TRG, JP2 INT a CLK, JP3 INT a VREF, JP4 INT a VREF, JP5 je X, JP6 je X, JP7 je X, JP8 je 10 a JP9 je 10. Odtud plyne, že hodiny jsou interní, referenční signály jsou generovány interně, vše funguje bez DMA a převodníky jsou nastaveny na svou maximální hodnotu.



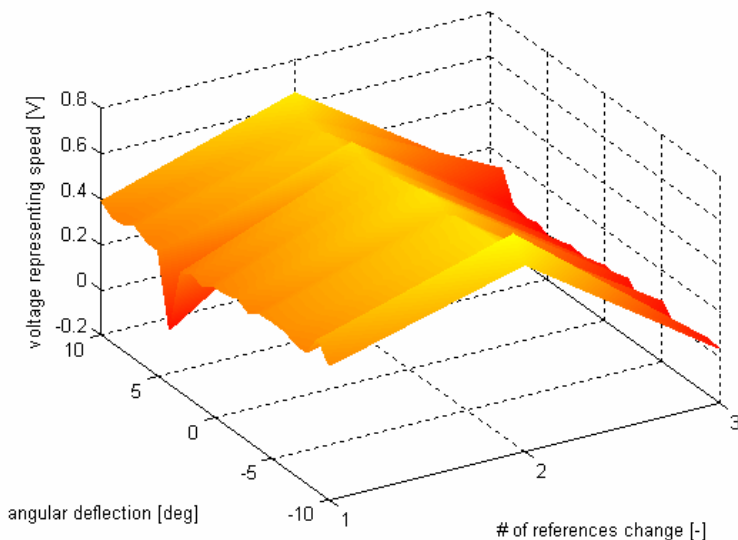
Obr. 52 Fotografie soustavy spřažených elektromotorů s připojením k PC

Analýza přístroje

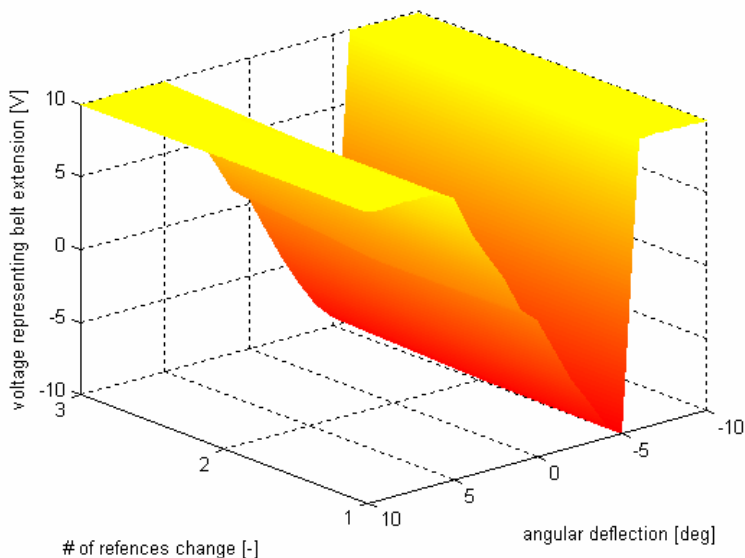
CE108 soustava spřažených elektromotorů byla analyzována z jiného úhlu pohledu než pouze z pohledu statických charakteristik. Výstup není závislý pouze na hodnotách vstupního signálu do zesilovačů servomotorů, ale také na ručním nastavení úhlové výchylky ramene. Kombinace změn signálů na vstupu také ovlivňuje chování výstupů, což lze usoudit z následujících dvou obrázků, obrázky 53 a 54. Na nich je změna výstupů, tj. rychlosti pásu a jeho napínání, závislá na ručně nastavené výchylce ramene a dále na změně signálů na vstupu.

Jak lze usoudit z grafických průběhů, rychlost je mnohem více závislá na změně signálů na vstupu než na ručně nastavené výchylce ramene. Napínání pásu je mnohem více závislé na ručním nastavení výchylky ramene ve stupních.

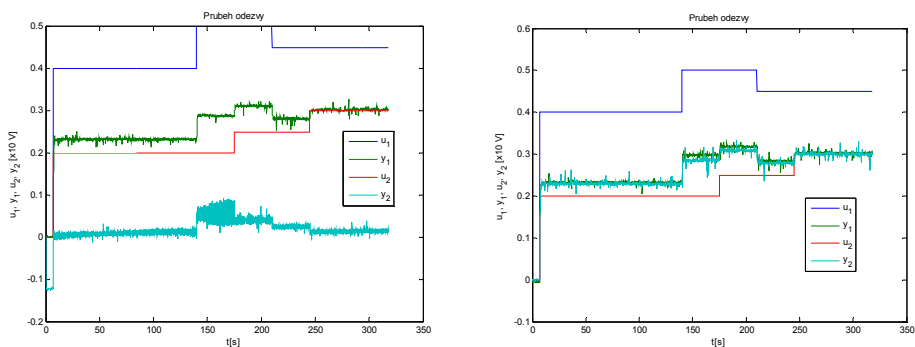
Porovnáme-li výsledky z obou obrázků, pak získáme nejpříjemnější výchylku ramene ve stupních, což je 0° , a to podle druhého obrázku. Je to dáno tím, že se tato hodnota nachází uprostřed intervalu hodnot odpovídajících možných hodnotám nastavení výchylky ramene ve stupních.



Obr. 53 Napětí reprezentující rychlost kola v závislosti na ručně nastavené výchylce ramene a pořadí změny vstupních signálů



Obr. 54 Napětí reprezentující napínání pásu v závislosti na ručně nastavené výchylce ramene a pořadí změny vstupních signálů



Obr. 55 Odezvy všech subsystémů systému

Z obrázku 55 vlevo znázorňujícího odezvy rychlosti horního kola a napínání pásů lze vyčíst, že odezva prvního subsystému, tj. rychlosti kola, je mírně zašuměna, zatímco odezva druhého subsystému, tj. napínání pásu, je mnohem více zašuměna. Z průběhu odezev je zřejmé, že na celý systém můžeme nahlížet jako na systém s významnými interakcemi. Na obrázku 55 vpravo je průběh odezev rychlostí dvou spodních kol. I zde je patrný vliv interakcí. Během experimentů, jejichž průběhy jsou uvedeny v této kapitole dále, byly vstupní parametry následující. Počáteční odhad modelu soustavy pro předidentifikaci

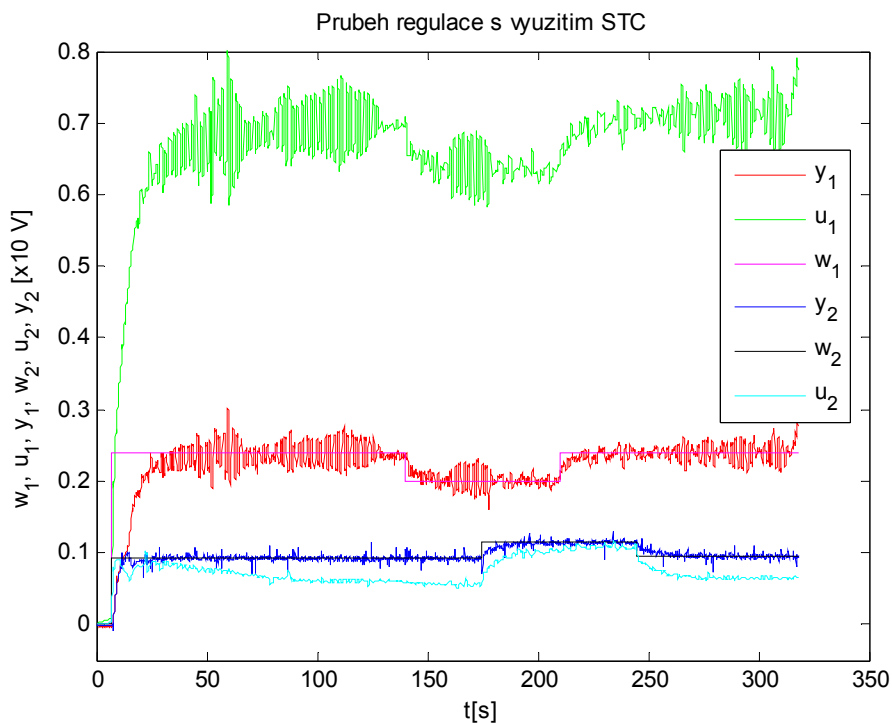
$$\mathbf{G}_{Mp}(s) = \begin{pmatrix} \frac{1}{s^2 + 2s + 1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{s^2 + 2s + 1} \end{pmatrix},$$

stejné hodnoty byly použity i pro počáteční odhad modelu on-line identifikace metodou rekurzivní instrumentální proměnné používané během regulace. Penalizační konstanty suboptimálních LQ regulátorů byly voleny

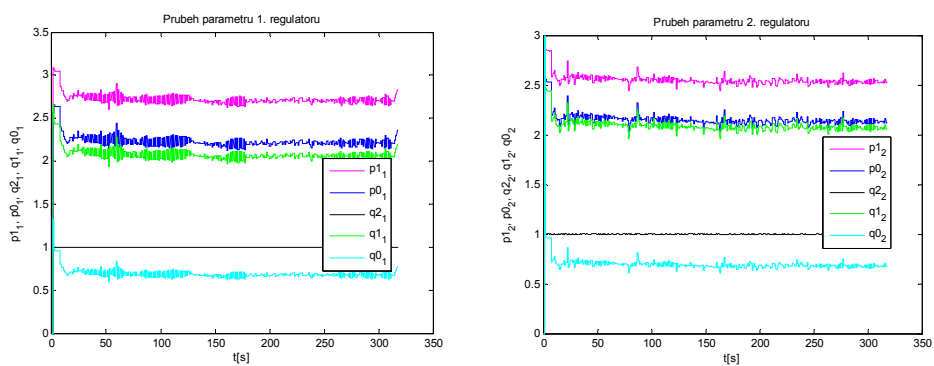
$$\mu_1 = 1, \quad \varphi_1 = 1, \quad \mu_2 = 1, \quad \varphi_2 = 0.85,$$

Doba simulace byla 1.3 násobek času poslední změny referenčního signálu. Perioda identifikace je 1 s a perioda výpočtu 0.1 s. Nyní následují průběhy regulace 4 postupy na laboratorním modelu CE108. Jedná se o STC, obrázky 56 – 58, STC se supervisorem, obrázky 59 – 61, STC s předidentifikací, obrázky 62 – 69 a STC s předidentifikací a supervisorem, obrázky 70 – 77.

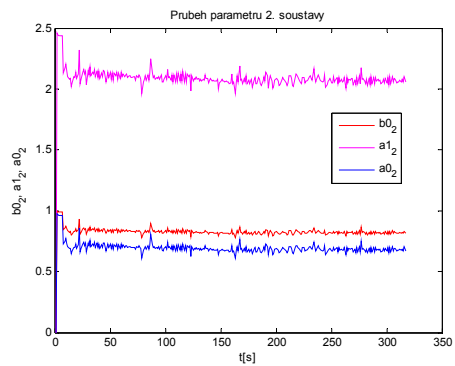
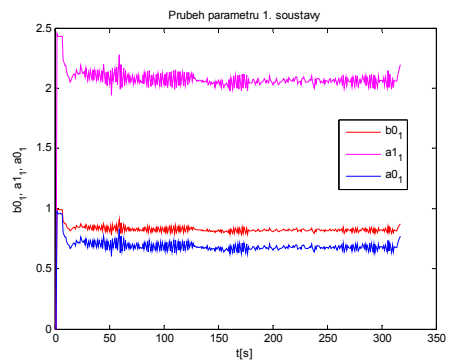
7.2 Regulace CE108 pomocí STC



Obr. 56 Regulace CE108 pomocí STC

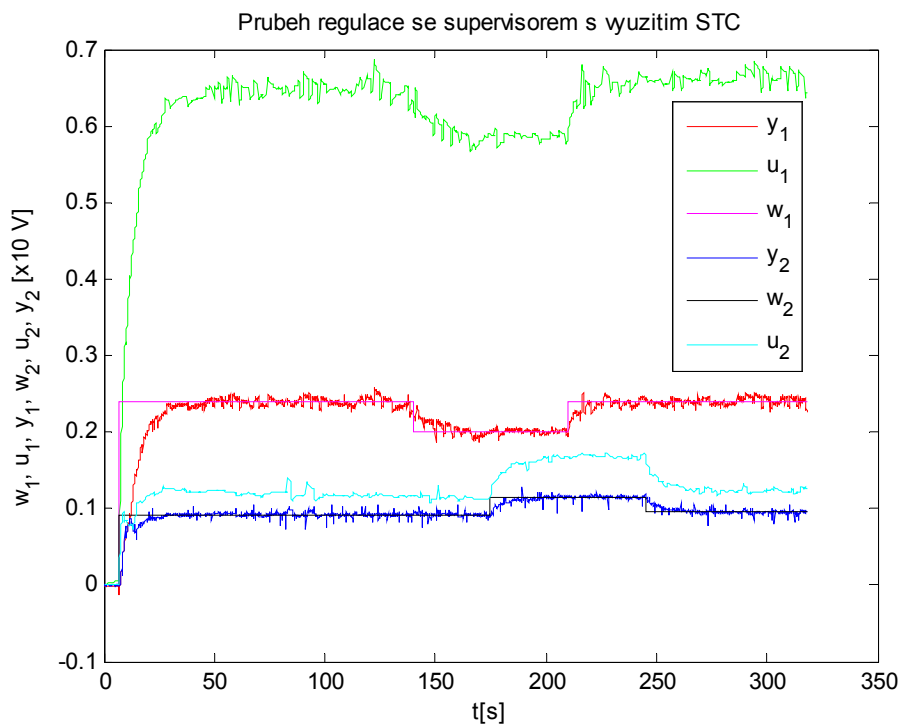


Obr. 57 Průběh parametrů 1. a 2. regulátoru

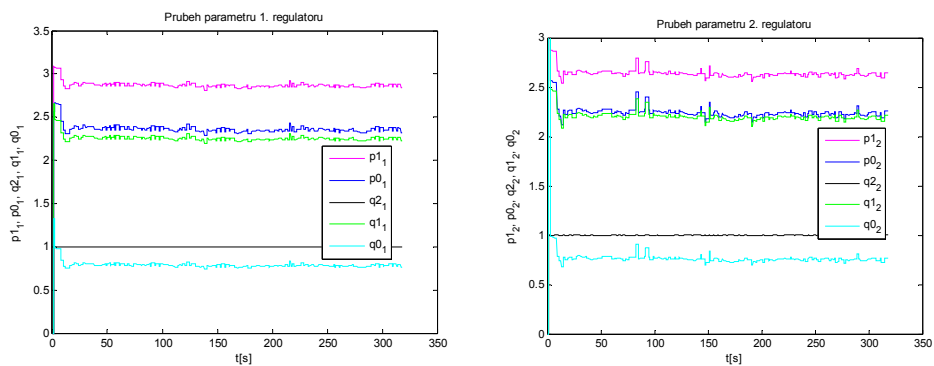


Obr. 58 Průběh parametrů 1. a 2. soustavy

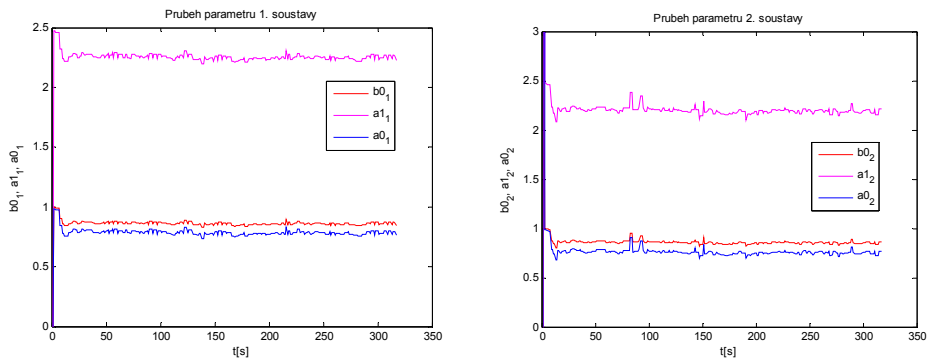
7.3 Regulace CE108 pomocí STC se supervisorem



Obr. 59 Regulace CE108 pomocí STC se supervisorem



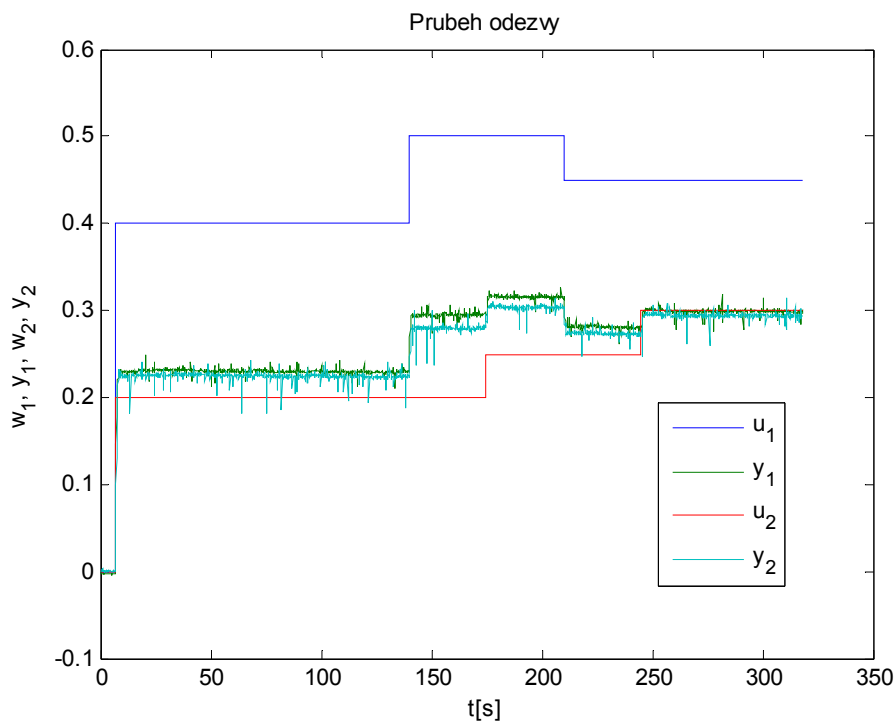
Obr. 60 Průběh parametrů 1. a 2. regulátoru



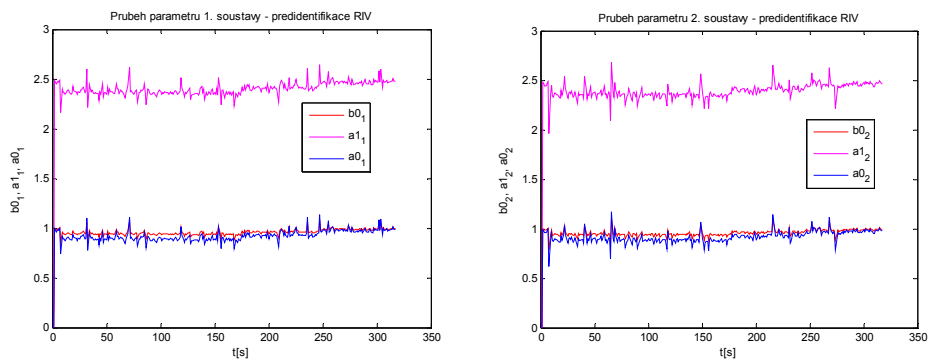
Obr. 61 Průběh parametrů 1. a 2. soustavy

Provedeme-li porovnání výsledku regulace laboratorního modelu pomocí STC, obrázky 56 – 58, a STC se supervisorem, obrázky 59 – 61, pak je z předchozích grafů zřejmé, že díky nasazení supervisoru se snížil vliv šumu na průběh regulace, což je patrné zejména u prvního subsystému. Supervisor také snížil vliv šumu na průběh on-line identifikovaných parametrů a tím i na průběh parametrů regulátoru.

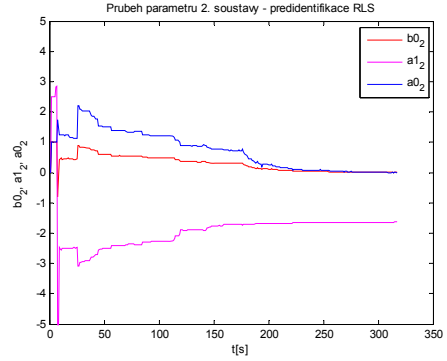
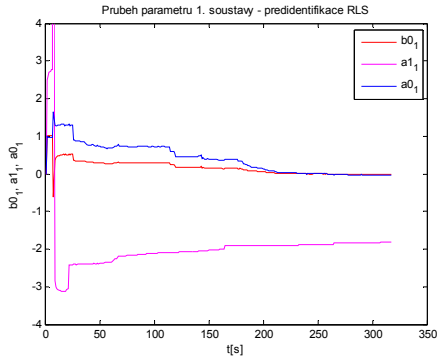
7.4 Regulace CE108 pomocí STC s předidentifikací



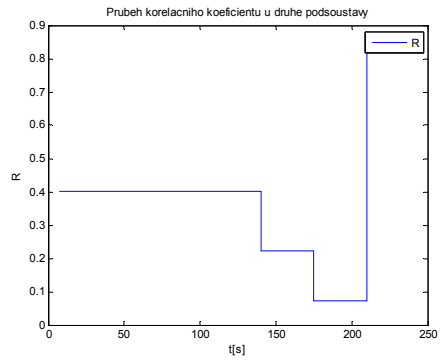
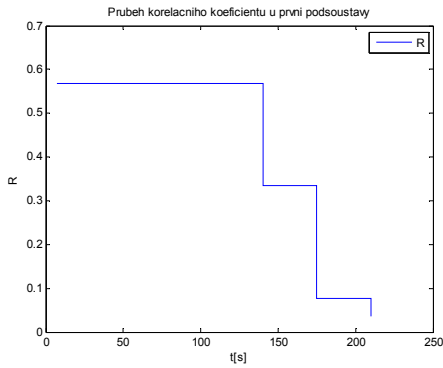
Obr. 62 Odezva systému



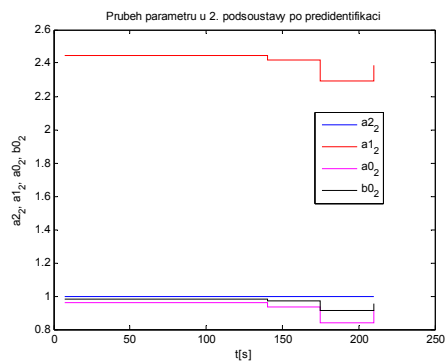
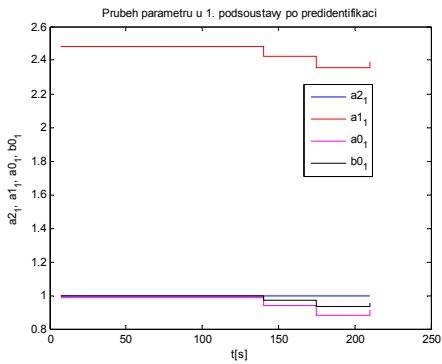
Obr. 63 Průběhy parametrů 1. a 2. soustavy – předidentifikace RIV



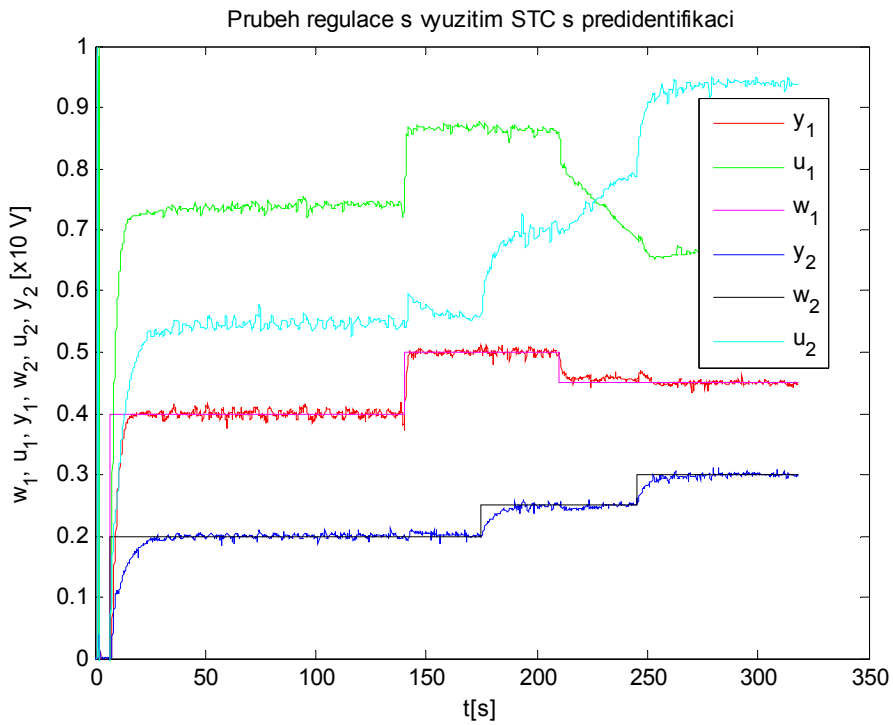
Obr. 64 Průběhy parametrů 1. a 2. soustavy – předidentifikace RLS



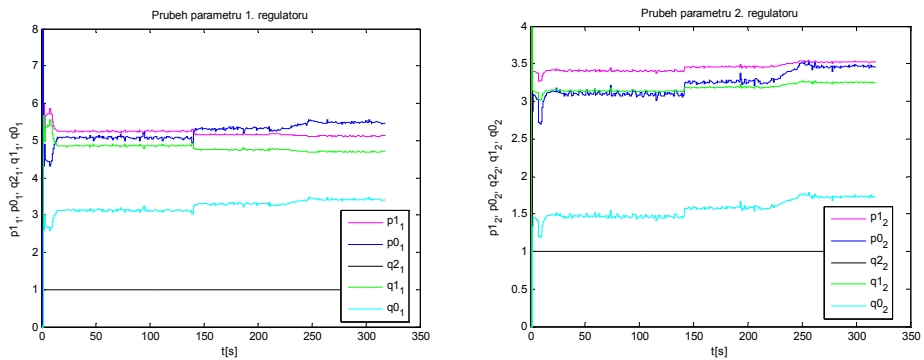
Obr. 65 Průběhy korelačních koeficientů



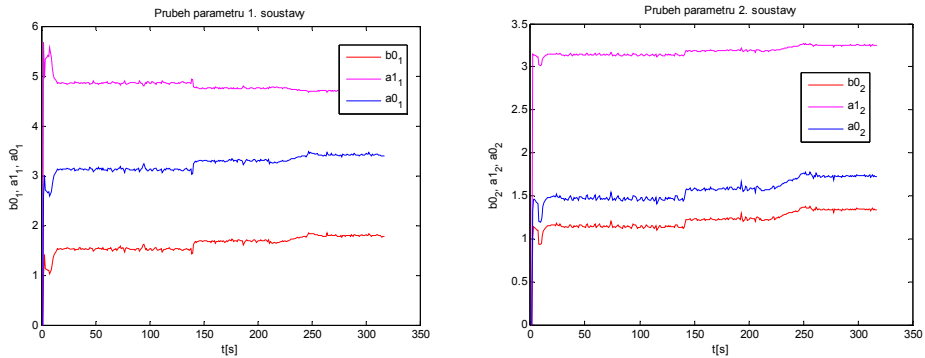
Obr. 66 Průběhy parametrů 1. a 2. soustavy po předidentifikaci



Obr. 67 Regulace CE108 pomocí STC s předidentifikací



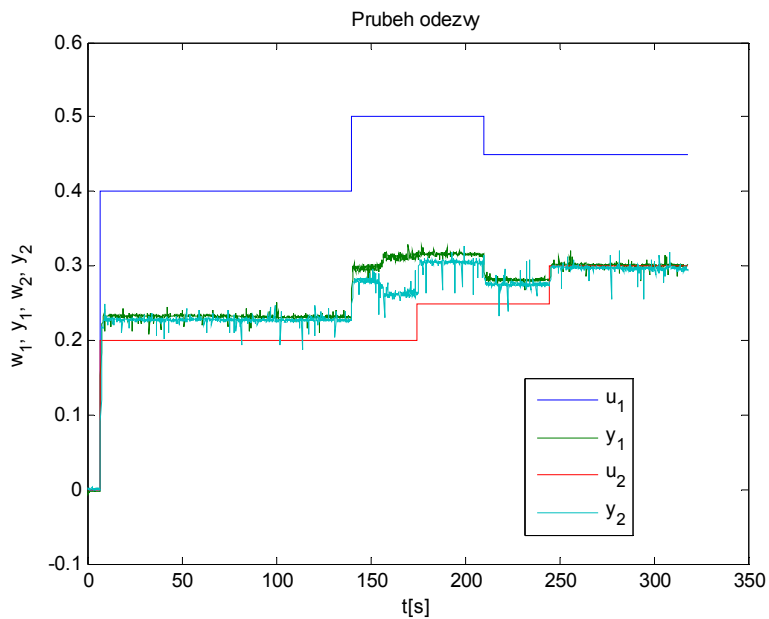
Obr. 68 Průběh parametrů 1. a 2. regulátoru



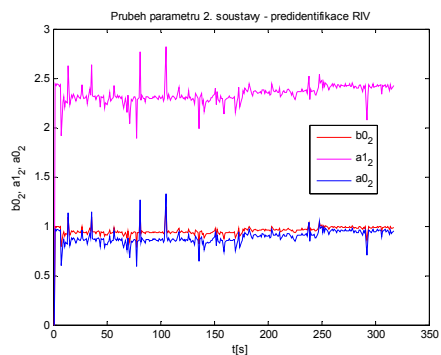
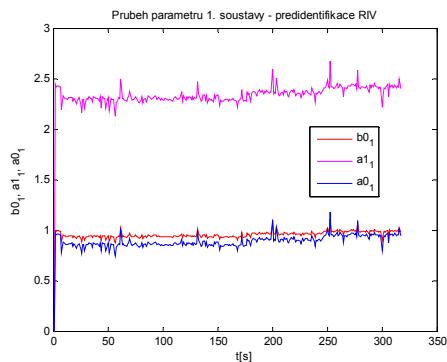
Obr. 69 Průběh parametrů 1. a 2. soustavy

Použijeme-li STC s předidentifikací, obrázky 62 – 69, potom bude rychlejší dosažení žádané hodnoty při její skokové změně, patrné je to u 1. pod systému v čase 140 s a 210 s. Také během regulace pomocí STC s předidentifikací jsou výstupní veličiny méně zatíženy šumem, než je tomu v případě prostého STC, obrázky 56 – 58.

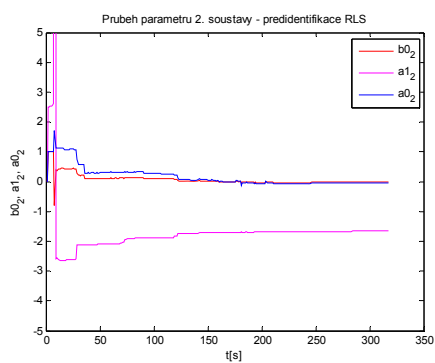
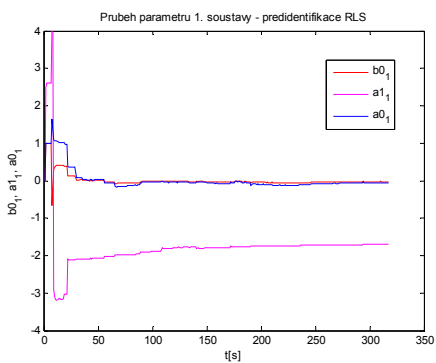
7.5 Regulace CE108 pomocí STC se předidentifikací a supervisorem



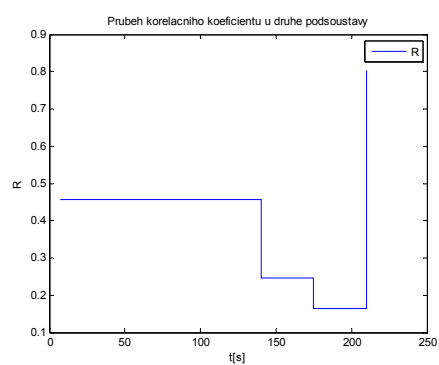
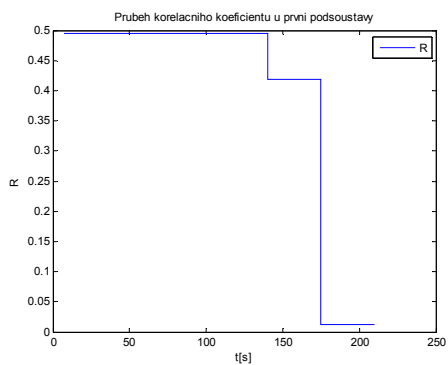
Obr. 70 Průběh odezvy



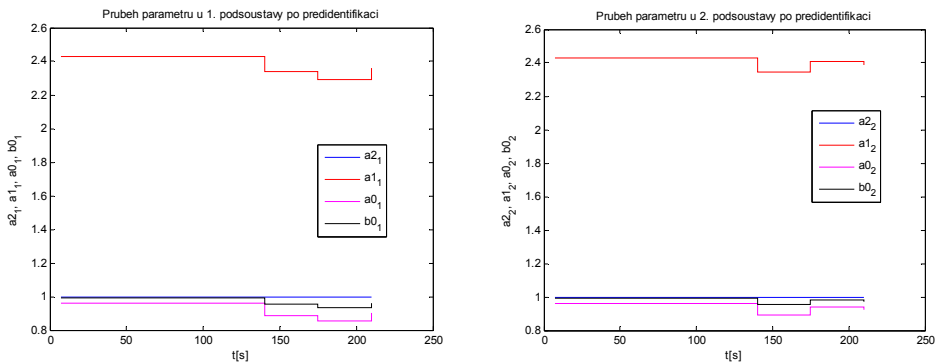
Obr. 71 Průběhy parametrů 1. a 2. soustavy – předidentifikace RIV



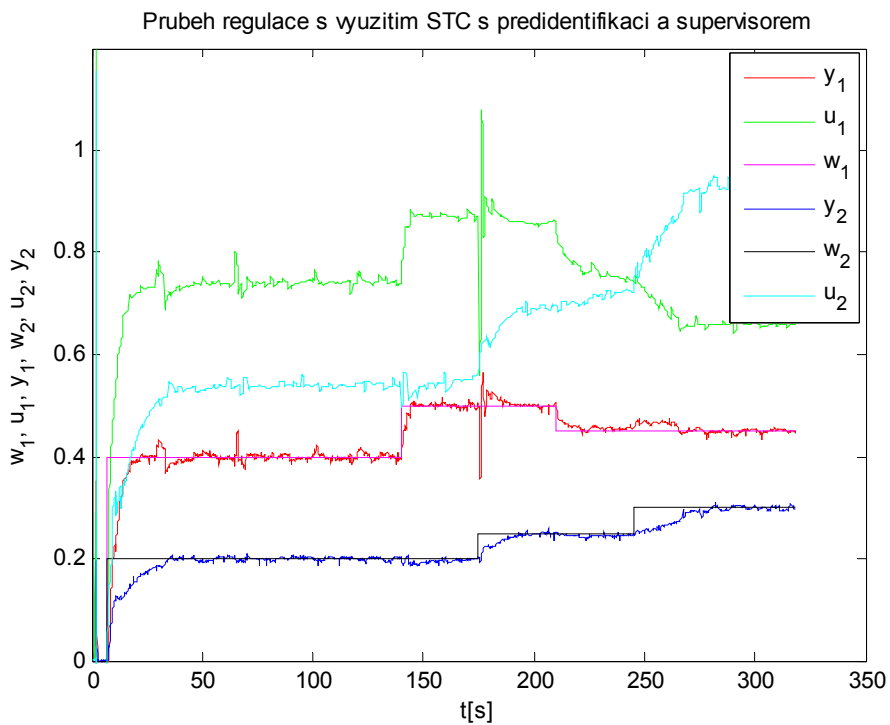
Obr. 72 Průběhy parametrů 1. a 2. soustavy – předidentifikace RLS



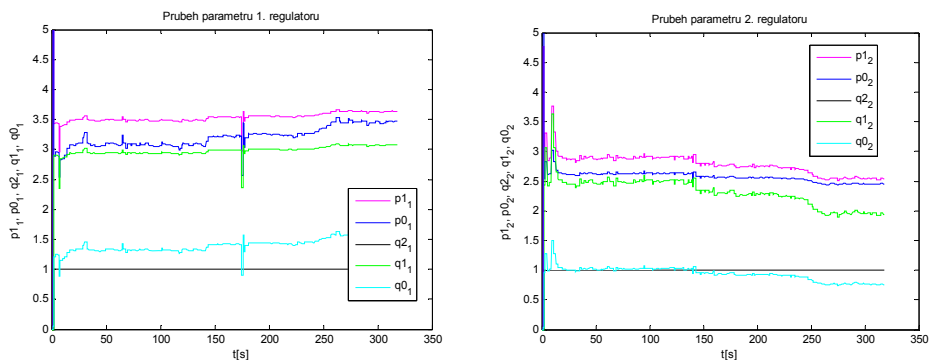
Obr. 73 Průběhy korelačních koeficientů



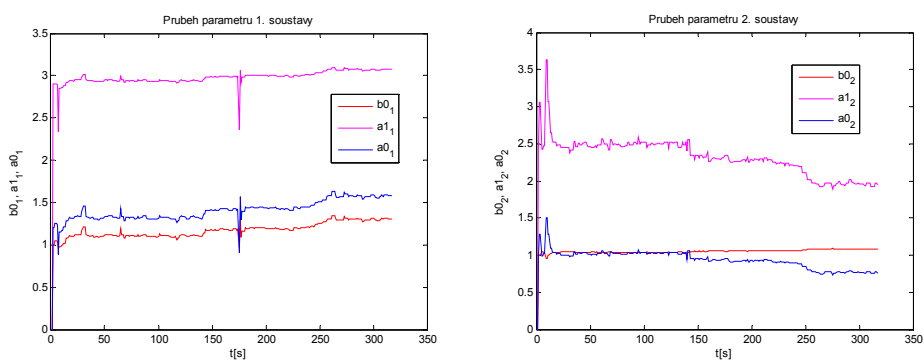
Obr. 74 Průběhy parametrů 1. a 2. soustavy po předidentifikaci



Obr. 75 Regulace CE108 pomocí STC s předidentifikací a supervisorem



Obr. 76 Průběh parametrů 1. a 2. regulátoru



Obr. 77 Průběh parametrů 1. a 2. soustavy

Použijeme-li pro regulaci laboratorního modelu STC s předidentifikací a supervisorem, obrázky 70 – 77, pak také v tomto případě je výstupní veličina méně zatížena šumem než u prostého STC, obrázky 56 – 58, ale více než u STC se supervisorem, obrázky 59 – 61, nebo STC s předidentifikací, obrázky 62 – 69.

8 VYHODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH METOD

V rámci simulačního ověřování byly realizovány 3 nové metody decentralizovaného řízení s STC. Jedná se o STC se supervisorem, STC s předidentifikací a STC se supervisorem a předidentifikací. Vytvořený software umožňuje celkem 32 variant simulací pro jedno nastavení. Zbývající metody byly realizovány za účelem porovnání s nově navrženými metodami. Jedná se o STC, neadaptivní suboptimální LQ sledování a o neadaptivní suboptimální LQ sledování s předidentifikací. U vybraných metod lze přidat poruchu na výstup, šum na výstup nebo provést aproximaci Lagrangeovým polynomem z většího úseku.

1) *STC se supervisorem*

Porovnáme-li výsledky znázorněné v grafické podobě v textu práce a přílohách P1 a P2, pak zjistíme, že v porovnání s STC bez supervisora má tato navržená metoda výstupní veličiny, průběhy parametrů regulátorů i soustavy méně zatížené šumem. Průběh akčních veličin je také méně zatížen šumem. Nejvíce je to patrné u experimentů na laboratorním modelu. Neadaptivní řízení v přítomnosti šumu dává podobný průběh jako STC se supervisorem s aproximací Lagrangeovým polynomem z většího úseku. To však platí pouze v případě, kdy u neadaptivního řízení je předem znám popis modelu regulované soustavy. Pokud se pro STC se supervisorem použije aproximace Lagrangeovým polynomem v blízkém okolí, pak je vliv šumu na regulační pochod větší než u neadaptivního řízení. Lepší výsledky než neadaptivní řízení dává neadaptivní řízení s předidentifikací. Jeho výsledný průběh je srovnatelný s STC se supervisorem.

2) *STC s předidentifikací*

Vyhodnotíme-li výsledky získané na laboratorním modelu s použitím STC s předidentifikací znázorněné v textu práce, pak zjistíme, že zašumění výstupních veličin během průběhu regulace je ještě menší než u STC se supervisorem. STC s předidentifikací je ale mnohem více citlivé na volbu intervalu aproximace Lagrangeovým polynomem než STC se supervisorem. Porovnáme-li s STC, potom navržená metoda při některých změnách žádané hodnoty má menší překmit. Nicméně před změnou žádané hodnoty dojde k podkmitu, což je způsobeno přepnutím parametrů regulátorů. Podobně je tomu v porovnání s neadaptivním řízením. Pokud se jedná o neadaptivní řízení s předidentifikací, pak to je vhodnější než STC

s předidentifikací v případě, kdy se parametry soustavy nemění v čase. Pokud se však mění, pak je naopak lepší STC s předidentifikací, které je případné změny schopno včas zachytit.

3) *STC s předidentifikací a supervisorem*

Při použití STC lze současně nasadit předidentifikaci a supervisor. Tato metoda je však ještě citlivější na volbu intervalu aproximace Lagrangeovým polynomem než STC s předidentifikací. Výsledné průběhy regulace jsou podobné průběhům STC s předidentifikací bez supervisory a proto i jejich porovnání by bylo stejné. Tuto metodu je vhodné použít i v případě silných interakcí na subsystémy.

9 ZÁVĚR

Decentralizované řízení je jedním z nejpoužívanějších přístupů při řízení mnohorozměrových soustav. Hlavním důvodem je jeho jednoduchá implementace. V případě měnicích se parametrů se jeví jako vhodné zkombinovat decentralizované a adaptivní řízení. Adaptivní řízení totiž umožňuje přizpůsobit regulační pochod měnicím se vstupním podmínkám. V tomto případě je výhodné použít postup, kdy je průběžně určován model regulované soustavy. To nám umožňuje nasazení samočinně se nastavujícího regulátoru. Nejvíce používanou metodou rekurzivní identifikace je rekurzivní metoda nejmenších čtverců.

Je-li výstupní veličina příliš zatížena šumem, pak je výhodnější použít jinou metodu, např. metodu rekurzivní instrumentální proměnné, což bylo ověřeno v této práci. Dále se práce orientovala na zlepšení výkonu a kvality regulace při použití decentralizovaného samočinně se nastavujícího regulátoru. Za tímto účelem byl v práci navržen supervisor. Ten v případě působení šumu na regulovanou soustavu sníží jeho vliv na průběh výstupní a akční veličiny. V případě regulace laboratorního modelu snížil amplitudu šumu na polovinu vůči STC. U soustav se silnými interakcemi dochází k velkým překmitům výstupní veličiny při změně žádaných hodnot. Za účelem jejich zmenšení byl v práci navržen postup označený jako předidentifikace. V práci navrženým algoritmem je možné decentralizovaným řízením řídit i soustavy se znatelnými interakcemi.

Během rekurzivní identifikace je u samočinně se nastavujících regulátorů ve spojité oblasti nutné určit derivace akční a výstupní veličiny. Tyto derivace totiž nejsou přímo měřitelné. Běžným postupem je použití filtru, kterým se nechá signál projít. Jeho nevýhodou je nutnost mít jeho konstanty blízké skutečnému popisu soustavy. V této práci byl navržen jiný přístup. Akční i vstupní veličiny jsou aproximovány ve svém okolí regresním polynomem, jehož analytický popis je dopředu znám. Není problém tedy vypočítat jeho derivace. Byl použit Lagrangeův polynom, protože umožňuje přesný výpočet i pro data získaná s proměnnou periodou vzorkování. V případě volby dostatečně velkého intervalu aproximace je vliv šumu na regulaci stejný jako u neadaptivního řízení. Na základě opakovaných měření bylo zjištěno, že velikost intervalu se volí minimálně jako trojnásobek periody identifikace. Pro aproximaci polynomem není třeba apriorní informace jako v případě filtrů.

Pro simulační a experimentální ověření byl vytvořen program v prostředí MATLAB v6.5. Program je realizován výhradně formou skriptů a funkcí v M jazyce, nevyužívá nijak

SIMULINKu. Byly vytvořeny dvě verze programu s ohledem na dobu výpočtu. První verze je optimalizována na výpočetní náročnost. Pro zrychlení výpočtu byl vytvořen nový řešitel diferenciálních rovnic. Dále byly použity techniky časové optimalizace, jako je vektorizace a předalokace, maximalizace nasazení funkcí na úkor skriptů a minimalizace délky zdrojového kódu v rámci hlavního výpočetního cyklu. U druhé verze byl přidán dialog informující o aktuálním stavu výpočtu v atraktivním vzhledu, ale na úkor rychlosti výpočtu.

Na základě simulačního řízení a řízení na laboratorním modelu lze říci, že navržená metoda rozšiřuje možnosti nasazení decentralizovaného samočinně se nastavujícího regulátoru. V případě působení šumu pak supervisor zlepšuje průběh všech výstupních parametrů a veličin.

LITERATURA

- [1] ALBERTOS, P., SALA, A.: *Multivariable Control Systems*. Springer - Verlag. London, 2004.
- [2] ANDERSSON, J., MARKLUND, J. (2000). Decentralized inventory control in a two-level distribution system. *European Journal of Operational Research*, **39**, pp. 483-506.
- [3] ASCHEMANN, H., SAWODNY, O., BULACH, A., HOFER, E.P.: (2002). Model Based Trajectory Control of a Flexible Turntable Ladder. In. *Proc. American Control Conference 2002*, Anchorage, Alaska, U.S.A., pp. 921-926.
- [4] BI, G., CAI, W.J., WANG, Q.G., HANG, C.C., LEE, E.L., SUN, Y., LIU, K.D., ZHANG, Y., ZOU, B. (2000). Advanced controller auto-tuning and its application in HVAC systems. *Control Eng. Practice*, **8**, pp. 633-644.
- [5] BOBÁL, V., BÖHM, J., PROKOP, R., FESSL, J. (1999). *Praktické aspekty samočinně se nastavujících regulátorů: Algoritmy a implementace*. VUTIUM, VUT Brno, Brno, ISBN 80-214-1299-2.
- [6] CAO, Y.Y., SUN, Y.X., MAO, W.J. (1998). Output feedback decentralized stabilization: ILMI approach. *Systems & Control Letters*, **35**, pp. 184-194.
- [7] CHALUPA, P. (2003). *Discrete Decentralized Control Systems*. PhD. Thesis, TBU in Zlín, Zlín.
- [8] CHEN, D., SEBORG, D.E. (2003). Design of decentralized PI control systems based on Nyquist stability analysis. *Journal of Process Control*, **13**, pp. 27-39.
- [9] CHEN, W.H., BALLANCE, D.J. (2002). On a switching control scheme for nonlinear systems with ill-defined relative degree. *Systems & Control Letters*, **47**, pp. 159-166.
- [10] CHO, K.H., LIM, J.T. (1999). Mixed centralized/decentralized supervisory control of discrete event dynamic systems. *Automatica*, **35**, pp. 121-128.
- [11] COLBAUGH, R., GLASS, K. (1996). Decentralized Adaptive Control of Electrically-driven Manipulators. *Computers Elect. Engng*, **22**, pp. 383-401.
- [12] COLBAUGH, R., GLASS, K. (1998). Decentralized Adaptive Control of Nonholonomic Mechanical Systems. *Computers & Electrical Engineering*, **24**, pp. 135-136.
- [13] CORRADO, J.R., HADDAD, W.M., BERSTEIN, D.S. (1999). H_2 – optimal synthesis of controllers with relative degree two. *Automatica*, **35**, pp. 1169-1173.

- [14] CUI, H., JACOBSEN, E.W. (2002). Performance Limitations in Decentralized Control. *Journal of Process Control*, **12**, pp. 485-494.
- [15] CUI, S., UKAI, H., KANDO, H., NAKAMURA, K., FUJITA, H. (1999). Decentralized Control of Large Scale Power System by H-infinity Based Excitation Control System. In: *IFAC World Congress 1999 Proceedings*, Beijing, P. R. China. CD-ROM, O-7c-06, Elsevier Science.
- [16] DOSTÁL, P. (1997). An approach to control of processes of chemical technology. Inaugural dissertation. TU Brno, Brno.
- [17] EGI, N. (1997). New bio-process control scheme: decentralized autonomous control system. *Journal of Biotechnology*, **52**, pp. 283-288.
- [18] EL ADEL, M., MAKOUDI, M., RADOUANE, L. (1999). Decentralized adaptive control of linear interconnected systems based on Laguerre series representation. *Automatica*, **35**, pp. 1873-1881.
- [19] EL KASHLAN, A., EL GENEIDY, M. (1996). Design of Decentralized Control for Symmetrically Interconnected Systems. *Automatica*, **32**, pp. 475-476.
- [20] GAGNON, E., POMERLEAU, A., DESBIENS, A. (1998). Simplified, ideal or inverted decoupling? *ISA Transactions*, **37**, pp. 265-276.
- [21] GARCIA, G., DAAFOUZ, J., BERNUSSOU, J. (2002). The infinite time near optimal decentralized regulator problem for singularly perturbed systems: a convex optimization approach. *Automatica*, **38**, pp. 1397-1406.
- [22] GUAN, Z.H., CHEN, G., YU, X., QIN, Y. (2002). Robust decentralized stabilization for a class of large-scale time-delay uncertain impulsive dynamical systems. *Automatica*, **38**, pp. 2075-2084.
- [23] GÜNDES, A.N., KABULI, M.G. (1996). Reliable Stabilization with Integral Action in Decentralized Control Systems. *Automatica*, **32**, pp. 1021-1025.
- [24] HALEVI, Y., PALMOR, Z.J., EFRATI, T. (1997). Automatic tuning of decentralized PID controllers for MIMO processes. *Journal of Process Control*, **7**, pp. 119-128.
- [25] HARAKAWA, T., KANO, R., OGAI, H., NAKAMURA, R., SEKIGUCHI, K., KUROSAWA, R. (1999). Development of Strip Tension Stabilization by Decentralized Control Strategy Based on Advanced Mill Drive System Suppressing Resonant Vibrations in Hot Strip Finisher Mill. In: *IFAC World Congress 1999 Proceedings*, Beijing, P. R. China. CD-ROM, O-7b-04, Elsevier Science.

- [26] HESPANHA, J.P., LIBERZON, D., MORSE, A.S. (2003). Hysteresis-based switching algorithms for supervisory control of uncertain systems. *Automatica*, **39**, pp. 263-272.
- [27] HU, W., MEI, S., LU, Q., SHEN, T., YOKOYAMA, A. (2002). Nonlinear adaptive decentralized stabilizing control of multimachine systems. *Applied Mathematics and Computations*, **133**, pp. 519-532.
- [28] JETTÉ, I., ZAHEER-UDDIN, M., FAZIO, M. (1998). PI-control of Dual Duct Systems: Manual Tuning and Control Loop Interaction. *Energy Convers. Mgmt*, **39**, pp. 1471-1482.
- [29] JOHNSTON, R.L. (1982). *Numerical methods*. John Wiley & Sons, New York, USA.
- [30] KONISHI, K., KOKAME, H. (1999). Decentralized delayed-feedback control of a one-way coupled ring map lattice. *Physica D*, **127**, pp. 1-12.
- [31] KOSHIJIMA, I., TOKI, A. (1997). Design of Autonomous Decentralized Multi-effect Evaporating Systems. *Computers chem. Engng*, **21**, pp. S107-S112.
- [32] LEE, S.H., LIM, J.T. (2000). Switching control of H-infinity gain scheduled controllers in uncertain nonlinear systems. *Automatica*, **36**, pp. 1067-1074
- [33] LIU, X., HUANG, G. (2001). Global decentralized robust stabilization for interconnected uncertain nonlinear systems with multiple inputs. *Automatica*, **37**, pp. 1435-1442.
- [34] LOH, E.J., CHIU, M.S. (1997). Robust decentralized controller design for unstable systems. *Chemical Engineering Science*, **52**, pp. 2299-2311.
- [35] MAKOUDI, M., RADOUANE, L. (1999). Robust decentralized adaptive control for non-minimum phase systems with unknown and/or time varying delay. *Automatica*, **35**, pp. 1417-1426.
- [36] MENSLER, M. (1999). *Analyse et étude comparative de méthodes d'identification des systèmes à représentation continue : Développement d'une boîte à outils logicielle*. PhD. thesis, CRAN, Université Henri Poincaré, Nancy, France.
- [37] NAPOLITANO, M.R., AN, Y., SEANOR, B.A. (2000). A fault tolerant flight control system for sensor and actuator failures using neural networks. *Aircraft Design*, **3**, pp. 103-128.
- [38] PALMOR, Z.J., HALEVI, Y., KRASNEY, N. (1995). Automatic Tuning of Decentralized PID controllers for TITO processes. *Automatica*, **31**, pp. 1001-1010.

- [39] PAVELKA, F., KLÍMEK, P. (2000). *Aplikovaná statistika*. VUT v Brně, FaME ve Zlíně, Zlín, ISBN 80-214-1545-2
- [40] PERŮTKA, K. (2005). *MATLAB – Základy pro studenty automatizace a informačních technologií*. UTB ve Zlíně, Zlín.
- [41] POMERLEAU, D., POMERLEAU, A. (2001). Guide lines for the tuning and the evaluation of decentralized and decoupling controllers for processes with recirculation. *ISA Transactions*, **40**, pp. 341-351.
- [42] RAO, G.P., UNBEHAUEN (2006): Identification of continuous-time systems. *IEE Proc.-Control Appl.*, Vol. 152, No. 2, pp. 185-220.
- [43] SAMYUDIA, Y., LEE, P.L., CAMERON, I.T., GREEN, M. (1995). A new approach to decentralised control design. *Chemical Engineering Science*, **50**, pp.1695-1706.
- [44] SCALI, C., FERRARI, F. (1999). Performance of control systems based on recycle compensators in integrated plants. *Journal of Process Control*, **9**, pp. 425-437.
- [45] SCHMIDT, H., JACOBSEN, E.W. (2003). Selecting control configurations for performance with independent design. *Computers & Chemical Engineering*, **27**, pp. 101-109.
- [46] SEO, J.H., JO, C.H., LEE, S.H. (1999). Decentralized H_∞ - controller design. *Automatica*, **35**, pp. 865-876.
- [47] SKOGESTAD, S. POSTLETHWAITE, I.: *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design*. John Wiley, Chichester, 2005.
- [48] STANKOVIĆ, S.S., ŠILJAK, D.D. (2001). Contractibility of overlapping decentralized control. *Systems & Control Letters*, **44**, pp. 189-200.
- [49] SUN, Z., GE, S.S., LEE, T.H. (2002). Controllability and reachability criteria for switched linear systems. *Automatica*, **38**, pp. 775-786.
- [50] TAKAI, S., USHIO, T. (2002). A modified normality condition for decentralized supervisory control of discrete event systems. *Automatica*, **38**, pp. 185-189.
- [51] TAN, G.T., CHIU, M.S. (2001). A multiple-model approach to decentralized internal model control design. *Chemical Engineering Science*, **56**, pp. 6651-6660.
- [52] TÖRGREN, M., WIKANDER, J. (1996). A decentralization methodology for real-time control applications. *Control Eng. Practice*, **4**, pp. 219-228.

- [53] UZTÜRK, D., AKAR, U. (1997). Centralized and decentralized control of retrofit heat-exchanger network. *Computers chem. Engng*, **21**, pp. S373-S378.
- [54] WANG, Q.G., ZOU, B., LEE, T.H., BI, Q. (1997). Auto-tuning of Multivariable PID Controllers from Decentralized Relay Feedback. *Automatica*, **33**, pp. 319-330.
- [55] WANG, Y., GUO, G., HILL, D.J. (1997). Robust Decentralized Nonlinear Linear Controller Design for Multimachine Power Systems. *Automatica*, **33**, pp. 1725-1733.
- [56] WATANABE, T. (2002). Robust Decentralized Turbine-Governor Control Subject to Saturation Nonlinearity. In. *Proc. American Control Conference 2002*, Anchorage, Alaska, U.S.A., pp. 1948-1953.
- [57] WEN, C., SOH, Y.C. (1997). Decentralized Adaptive Control Using Integrator Backstepping. *Automatica*, **33**, pp. 1719-1724.
- [58] XIE, S., XIE, L. (2000). Decentralized global robust stabilization of a class of interconnected minimum-phase nonlinear systems. *Systems & Control Letters*, **41**, pp. 251-263.
- [59] YANG, G.H., ZHANG, S.Y. (1996). Decentralized Robust Control for Interconnected Systems with Time-varying Uncertainties. *Automatica*, **32**, pp. 1603-1608.
- [60] ZHAI, G., IKEDA, M., FUJISAKI, Y. (2001). Decentralized H_∞ - controller design: a matrix inequality approach using a homotopy method. *Automatica*, **37**, pp. 1275-1289.
- [61] ZHANG, Y., WEN, C., SOH, Y.C. (2000). Robust decentralized stabilization of interconnected systems with guaranteed transient performance. *Automatica*, **36**, pp. 907-915.
- [62] ZHIVOGLYADOV, P.V., MIDDLETON, R.H. (2002). Switching controller design via convex polyhedral Lyapunov functions. *Automatica*, **38**, pp. 1439-1448.
- [63] ZHIVOGLYADOV, P.V., MIDDLETON, R.H. (2003). Stability and switching control design issues for a class of discrete time hybrid systems. *Automatica*, **39**, pp. 981-987.
- [64] ZHU, Y., BACKX, T. (1993). *Identification of Multivariable Industrial Processes for Simulation, Diagnosis and Control*. Springer-Verlag Ltd., London, United Kingdom

PUBLIKAČNÍ A VÝZKUMNÉ AKTIVITY

Příspěvky na konferencích:

- 1) BOBÁL, V., PERŮTKA, K., DOSTÁL, P. (2001). Decentralized Adaptive Continuous-Time Control of Coupled Drives Apparatus. In: *Proc. 7th IFAC Workshop "Adaptation and learning in Control and Signal Processing"*, Como, Italy, pp. 57-62.
- 2) PERŮTKA, K., BOBÁL, V. (2001). Decentralized Adaptive Continuous-Time Control of TITO systems. In: *Proc. 15th Conference PROCESS CONTROL '01*, Štrbské pleso, Slovakia.
- 3) PERŮTKA, K. (2001). A Method of Setting the Penalization Constants in the Suboptimal Linear Quadratic Method. In *Proc. XXVI. ASR '2001 Seminar "Instruments and Control"*, Ostrava.
- 4) PERŮTKA, K., BOBÁL, V. (2002). Adaptive decentralized control with using dynamics inversion method. In: *Proc. of 13th International Conference on Process Control '02*, Kouty nad Desnou.
- 5) PERŮTKA, K., BOBÁL, V. (2002). Decentralized Adaptive Approach to Control of MIMO Systems. In: *Proc. of the 5th International Conference Control of Power & Heating Systems 2002*, Academia centrum Zlín, Zlín.
- 6) PERŮTKA, K., BOBÁL, V. (2002). Decentralized Adaptive Control Toolbox for MATLAB: Alpha version. In: *Proc. of 5th Portuguese Conference on Automatic Control, CONTROLO 2002*, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, pp. 446-451.
- 7) PERŮTKA, K., BOBÁL, V., NAVRÁTIL, P. (2002). Decentralized Adaptive Control: Influence of Identification Algorithm on Control. In: *Proc. of 3rd International Carpathian Control Conference ICC 2002*, Malenovice, pp. 241-246.
- 8) PERŮTKA, K., NAVRÁTIL, P., ADÁMEK, M., BOBÁL, V. (2002). Comparison of decentralized and multidimensional adaptive control using delta models. In: *Proc. of 13th International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Learning from Nature"*, Vienna, Austria, pp. 421-422.

- 9) VAŠEK, V., BLIŽŇÁK, M., PERŮTKA, K. (2002). Real-Time Applications in Windows NT. In: *Proc. of 3rd International Carpathian Control Conference ICCC 2002*, Malenovice, pp. 797-802.
- 10) PERŮTKA, K., BOBÁL, V., DOSTÁL, P. (2003). Adaptive Suboptimal LQ Control of High Order Systems. In: *Proc. of 4th International Carpathian Control Conference ICCC 2003*, Grandhotel Praha, High Tatras, Slovakia, pp. 544-547.
- 11) PERŮTKA, K., BOBÁL, V., DOSTÁL, P. (2003). Suboptimal LQ Control of High Order Systems. In: *Proc. & Summaries Volume of 14th International Conference on Process Control '03*, Štrbské Pleso, High Tatras, Slovakia, pp. 154.
- 12) PERŮTKA, K., BOBÁL, V., DOSTÁL, P., VOJTĚŠEK, J. (2003). Decentralized Continuous-Time Suboptimal Linear Quadratic Tracking Control of High Order Symmetrical Systems. In: *Proc. of 14th International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Reconstruction and Development"*, Sarajevo, Croatia.
- 13) PERŮTKA, K., BOBÁL, V., NAVRÁTIL, P. (2003). Comparison of Adaptive Decentralized and Multivariable Control on Coupled Drives Apparatus. In: *Proc. & Summaries Volume of 14th International Conference on Process Control '03*, Štrbské Pleso, High Tatras, Slovakia, pp. 113.
- 14) PERŮTKA, K., BOBÁL, V., DOSTÁL, P. (2004). Decentralized Suboptimal Continuous-Time LQ Control: Usage of instrumental Variable Approach. In: *Proc. of 5th International Carpathian Control Conference ICCC 2004*, Volume I, Zakopane, Poland, pp. 165-170.
- 15) PERŮTKA, K., BOBÁL, V., DOSTÁL, P. (2004). Computer Aided Programming: Tool for Automatic Writing of Matrix Commands in MATLAB. In: *Proc. of 5th International Carpathian Control Conference ICCC 2004*, Volume I, Zakopane, Poland, pp. 171-176.
- 16) PERŮTKA, K., DOSTÁLEK, P., BOBÁL, V., DOSTÁL, P., PROKOP, R. (2004). Decentralized Continuous-Time Control: Using of Instrumental Variable Approach and Inversion Dynamics Method. In: *Annals of DAAAM for 2004 and Proc. of 15th International DAAAM Symposium*, Vienna, Austria, pp. 343-344.
- 17) PERŮTKA, K., FAHMY, S.F.F., PALKA, J. (2004). Computer Aided Programming: Tool for Automatic Writing of Polynomial, Interpolation and Basic Data Analysis Commands in MATLAB. In: *Annals of DAAAM for 2004 and Proc. of 15th International DAAAM Symposium*, Vienna, Austria, pp. 345-346.

- 18) PERŮTKA, K., TOMAŠTÍK, M. (2005). Computer Aided Education: Support of subject taught by our department. In: *Proc. of 6th International Carpathian Control Conference ICCC 2005*, Volume I, Miskolc-Lillafüred, Hungary, pp. 439-444.
- 19) PERŮTKA, K., BOBÁL, V., TOMAŠTÍK, M. (2005). Decentralized suboptimal continuous-time LQ internal model control. In: *Proc. of 6th International Carpathian Control Conference ICCC 2005*, Volume II, Miskolc-Lillafüred, Hungary, pp. 327-332.
- 20) PERŮTKA, K., NAVRÁTIL, P. (2005). Decentralized control: New part of CAAC System. In: *Proc. of 9th International research/expert conference "Trends in the development of machinery and associated technology" TMT 2005*, Antalya, Turkey, pp. 1565-1568.
- 21) PERŮTKA, K., BOBÁL, V., ADÁMEK, M. (2005). Decentralized control of Time-Delay Systems with Off-line Multi-model identification and controlled region partition. In: *Proc. of 9th International research/expert conference "Trends in the development of machinery and associated technology" TMT 2005*, Antalya, Turkey, pp. 1561-1564.
- 22) PERŮTKA, K. (2005). Computer Aided Education: Set of programs supporting education of MATLAB. In: *Proc. of 15th International Conference on Process Control '05*, Štrbské Pleso, High Tatras, Slovakia, CD-ROM, 5 pages.
- 23) PERŮTKA, K., BOBÁL, V. (2005). Decentralized Control with Off-line Multi-model Identification and Controlled Region Partition. In: *Proc. of 15th International Conference on Process Control '05*, Štrbské Pleso, High Tatras, Slovakia, CD-ROM, 3 pages.
- 24) PERŮTKA, K., BOBÁL, V., DOSTÁL, P. (2005). Decentralized Self-tuning Control with Multi-step Prediction of Laboratory Apparatus. In: *Proc. of 15th International Conference on Process Control '05*, Štrbské Pleso, High Tatras, Slovakia, CD-ROM, 5 pages.
- 25) PERŮTKA, K. (2006). Decentralized reduced-order switching control with pre-identification: Theoretical preliminaries. In: *Annals of DAAAM for 2006 and Proc. of 17th International DAAAM Symposium*, Vienna, Austria, pp. 301-302.
- 26) PERŮTKA, K., HECZKO, M. (2006). Computer aided education of programming with aid of complex game in MATLAB. In: *Annals of DAAAM for 2006 and Proc. of 17th International DAAAM Symposium*, Vienna, Austria, pp. 303-304.

- 27) PERŮTKA, K. (2006). Computer aided education: Object oriented programming in MATLAB. In: *Proc. of 7th International Carpathian Control Conference ICC 2006*, Rožnov pod Radhoštěm, pp. 421-424.
- 28) PERŮTKA, K., BUBENÍKOVÁ, M. (2006). Control using CE120 Controller in MATLAB. In: *CD-ROM Proc. of 7th International Scientific-Technical Conference on Process Control '06*, Kouty nad Desnou, R066a, pp. 1 - 8
- 29) PERŮTKA, K. (2006). Fast and standard running code in MATLAB: Comparison. In: *CD-ROM Proc. of 7th International Scientific-Technical Conference on Process Control '06*, Kouty nad Desnou, R066b, pp. 1 - 11
- 30) PERŮTKA, K. (2006). Approach to Improve Identification of Speed of Vulcanization. In: *CD-ROM Proc. of 7th International Scientific-Technical Conference on Process Control '06*, Kouty nad Desnou, R066c, pp. 1- 7

Publikace v časopise:

- 1) PERŮTKA, K., BOBÁL, V. (2003). An approach to decentralized adaptive control. *Archives of Control Sciences*, **13**, pp. 1-12.

Grantové projekty:

- 1) PERŮTKA, K., BOBÁL, V. (2002). Adaptivní decentralizované systémy řízení. Grantový projekt FRVŠ MŠMT České republiky, G1 31/2002.

Skripta:

- 1) PERŮTKA, K. (2005). MATLAB – Základy pro studenty automatizace a informačních technologií, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, ISBN 80-7318-355-2, 303 stran.

Vyzvané přednášky:

- 1) PERŮTKA, K. (2004). Decentralized Control and Continuous-Time Identification, University of Applied Science, Cologne, Germany.

Letní školy:

- 1) Účastník letní školy IFAC SUMMER SCHOOL v Praze pořádané při IFAC WORLD CONGRESS in Prague, 2005.

Členství v organizačních výborech konferencí:

- 1) Člen organizačního výboru 7th International Conference Control of Power & Heating Systems 2006, Zlín, Czech Republic

PŘÍLOHY

Příloha P1 – Ukázka možností vytvořeného software na komplexním příkladě

V této příloze jsou znázorněny výsledky simulací všech metod, které jsou součástí vytvořeného software. Všechny simulace byly v této příloze realizovány pro stejné vstupní parametry a to pouze pro jeden zvolený systém. Cílem bylo vytvořit kompletní ukázkou možností vytvořeného software. Příloha je vzhledem ke svému rozsahu pouze v elektronické podobě na CD-ROM.

Příloha P2 – Regulace laboratorního modelu CE108 pomocí software disertační práce

V příloze P2 jsou znázorněny výsledky regulace laboratorního modelu CE108 pomocí metod, které jsou součástí software pro regulaci tohoto laboratorního modelu. Spolu s výsledky jsou zobrazeny také dialogy s výchozími počátečními hodnotami. V této příloze je uvedena regulace s aproximací polynomem z krátké úseku, zatímco v textu práce je aproximace z většího úseku. Stejně jako i u přílohy P1 je i příloha P2 pouze v elektronické podobě na CD-ROM.

Příloha P3 – Různé vzhledy dialogu během výpočtu

Příloha P3 znázorňuje různé vzhledy dialogu zobrazeného během výpočtu, které se náhodně vybírají při každém volání. Cílem těchto dialogů bylo uživateli software zpříjemnit čekání na výsledek. Příloha P3 je pouze v elektronické podobě na CD-Rom

Příloha P4 – Videozáznam regulace

Na přiloženém CD-ROM je kromě textových příloh také videozáznam průběhu regulace laboratorního modelu metodami navrženými a použitými v této práci. Je ve složce `video`, kde je jak ve zkrácené podobě určené k prezentaci, tak také v nezkrácené podobě. Video je kódované videokodekem Xvid.