

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových
inženýrských studií

Katedra řídicí techniky

Studijní program: 2612 M – Elektrotechnika a informatika

Obor: 2612 T – Automatické řízení a inženýrská informatika

Akademický rok: 2002 / 2003

Spojité regulátor s diskrétním estimátorem proměnné struktury

Continuous action controller with discrete estimator of
variable structure

Rozsah práce:

Počet stran: 50

Počet obrázků: 53

Počet příloh: 1

Vypracoval: Jaroslav Dytrych

Vedoucí diplomové práce: Ing. Libor Tůma, CSc.

Konzultant: Prof. Ing. Bořivoj Hanuš, DrSc.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o využití mé DP a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užit své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci dne 3.9.2003

Podpis:

Poděkování :

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Liboru Tůmovi CSc. z Katedry řídicí techniky za odborný dohled a cenné rady pro vypracování diplomové práce.

Anotace :

Diplomová práce se zabývá problematikou stavové regulace s využitím diskretních přírůstkových estimátorů, které odhadují hodnoty neměřitelných stavových veličin na reálné soustavě.

Hlavním úkolem je návrh a ověření vlastností přepínacího algoritmu pro výběr optimálních stavových regulátorů proměnné struktury na základě vyhodnocení velikosti absolutních hodnot estimačních chyb přírůstkových diskretních estimátorů.

Návrh byl simulačně ověřen na regulované soustavě s měnícími se parametry pro tři provozní režimy.

Abstract :

This diploma thesis deals with problems of state regulation with utilize discrete incremental estimator, which estimates values immeasurable state variables on real system.

General part of work is program design and check quality switching algorithm for selection optimal state controllers with variable structure on the basis of evaluation size absolute value estimate errors of discrete incremental estimators.

Project was simulated and checked on controlled system with variable parameters for three mode of operation.

Obsah:

1. Úvod	6
2. Řízení ve stavovém prostoru	7
2.1. Stav systému	7
2.2. Stavový popis.....	7
2.2.1. Převod diskretního přenosu na stavový popis	9
2.3. Estimace stavu.....	10
2.3.1. Deterministický estimátor	10
2.3.2. Přírůstkový estimátor	11
2.4. Regulátor.....	12
2.4.1. Spojitý stavový regulátor	13
2.4.1.1. Návrh spojitého stavového regulátoru.....	14
2.4.1.2. Softwarová podpora návrhu spojitého stavového regulátoru	14
2.4.2. Diskretní stavový regulátor	14
2.4.2.1. Návrh diskretního stavového regulátoru	15
2.4.2.2. Softwarová podpora návrhu diskretního stavového regulátoru	15
2.5. Dynamika systému.....	15
2.5.1. Časová afinita.....	16
3. Návrh a realizace modelu systému	17
3.1. Návrh dynamické soustavy.....	17
3.1.1. Diskretní stavový popis soustavy.....	17
3.1.2. Spojitý model soustavy	19
3.1.3. Změna dynamiky soustavy.....	20
3.1.3.1. Blok S-Function	20
3.1.3.2. Změna parametrů soustavy v S-Function.....	20
3.2. Návrh diskretních přírůstkových estimatorů.....	21
3.2.1. Estimátor typu ARX.....	22
3.2.2. Estimátor typu ARMAX	24
3.2.3. Estimátor typu OUT	25
3.2.4. Vývoj estimační chyby ε	27
3.2.4.1. Vývoj estimační chyby při vstupu poruchy Δd_{ARX}	29
3.2.4.2. Vývoj estimační chyby při vstupu poruchy Δd_{ARMAX}	30
3.2.4.3. Vývoj estimační chyby při vstupu poruchy Δd_{OUT}	31

3.3. Návrh diskrétního stavového regulátoru proměnné struktury	32
3.4. Adaptace spojitého stavového regulátoru	34
3.5. Návrh přepínacího algoritmu	34
3.6. Kompletní model regulačního systému	36
4. Simulační ověření funkce modelu	39
4.1. Nastavení soustavy	39
4.2. Diskrétní stavový regulátor	41
4.2.1. Vstupující porucha d_{ARX}	41
4.2.2. Vstupující porucha d_{ARMAX}	42
4.2.3. Vstupující porucha d_{OUT}	42
4.3. Spojitý stavový regulátor	43
4.3.1. Vstupující porucha d_{ARX}	43
4.3.1.1. Zapnuté přepínání	43
4.3.1.2. Vypnuté přepínání	44
4.3.2. Vstupující porucha d_{ARMAX}	45
4.3.2.1. Zapnuté přepínání	45
4.3.2.2. Vypnuté přepínání	45
4.3.3. Vstupující porucha d_{OUT}	46
4.3.3.1. Zapnuté přepínání	46
4.3.3.2. Vypnuté přepínání	47
5. Závěr	48
Seznam použité literatury	49
Přílohy	50

1. Úvod

V automatickém řízení se běžně setkáváme se systémy, u nichž se budou v čase vlivem různých vstupujících poruch podstatně měnit jejich dynamické projevy. Z tohoto důvodu je poměrně složité tyto systémy optimálně regulovat jedním regulátorem. V praxi se snažíme veškerá data o dynamice systému získat z měření nebo pozorování, což z hlediska technologické i finanční náročnosti není vždy možné. Při řízení ve stavovém prostoru problém neměřitelných stavů reálné soustavy řeší estimátory. Jde o odhad (estimaci) stavového vektoru na základě výpočtů využívajících měřitelných vstupů a výstupů z regulované soustavy.

Cílem diplomové práce je nalezení takového paralelního zapojení diskrétních estimátorů, které vhodnou volbou určitých korekčních vazeb dokáží identifikovat typ poruchy vstupující do soustavy. Vytvořený přepínací algoritmus vybere diskrétní zpětnovazební stavový regulátor proměnné struktury na principu nalezení minima z velikostí absolutních hodnot vzniklých estimačních chyb. Tento regulátor je předem optimálně nastaven na jmenovitý přenos estimované soustavy a je nejlépe schopen zajistit regulaci dynamiky systému. Nakonec navrhne aplikaci diskrétních přírůstkových estimátorů pro adaptaci spojitého stavového regulátoru.

Úkolem diplomové práce je teoreticky vysvětlit problematiku řízení ve stavovém prostoru, předvést návrh zadaného problému a následně prakticky ukázat na příkladu řešení a možnosti stavové regulace soustavy s měnícími se parametry pro tři provozní režimy. Na modelu pak simulačně ověřit vliv a funkci diskrétních estimátorů s regulátory a přepínacího algoritmu na stabilitu regulované soustavy.

2. Řízení ve stavovém prostoru

2.1. Stav systému

Dynamické chování systému popisuje matematický model systému, který vyjadřuje matematické vztahy mezi vstupními, výstupními a stavovými veličinami. Vstup systému definují síly působící na dynamiku soustavy z vnějšku. Výstup je sledované chování výstupních veličin systému. Stavové veličiny určují okamžitý stav systému, který se vyhodnocuje nejen ze sil působících na jeho dynamiku v konkrétním čase, ale zahrnuje také vliv stavů systému, které nastaly v minulosti. Znalost stavu systému nám umožňuje určit současné, ale i budoucí chování daného systému.

Relace mezi popsányými veličinami se nazývá *vnitřní popis systému*. Jedná se o soustavu diferenciálních rovnic prvního řádu, které tvoří stavový popis systému.

2.2. Stavový popis

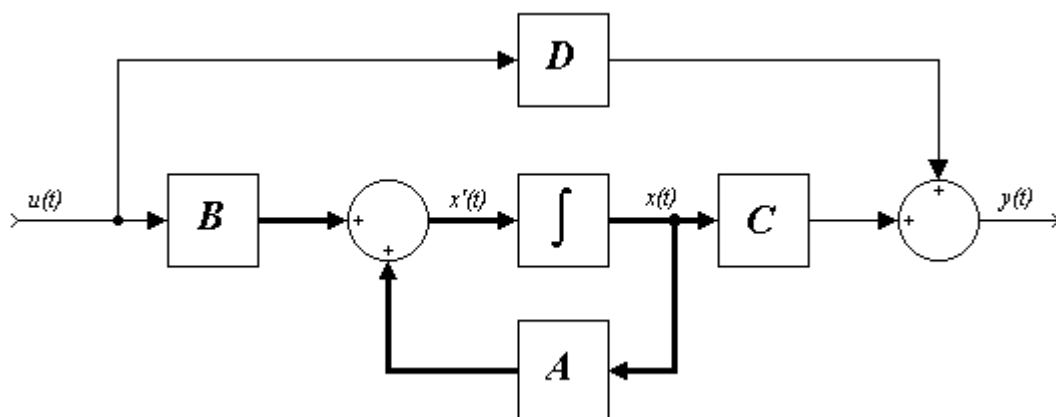
Tvar stavové rovnice pro lineární stacionární systém s jedním vstupem a jedním výstupem

a) pro *spojitý popis*

$$\mathbf{x}'(t) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \cdot u(t) \quad (2.1)$$

$$y(t) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{D} \cdot u(t) \quad (2.2)$$

kde je \mathbf{A} matice soustavy
 \mathbf{B} matice buzení
 $\mathbf{x}(t)$ vektor stavových veličin
 $u(t)$ vstupní veličina
 \mathbf{C} matice výstupu
 \mathbf{D} matice převodu
 $y(t)$ výstupní veličina



Obr. 2.1 Blokové zapojení pro stavové rovnice spojitého systému

b) pro *diskrétní popis*

$$\mathbf{x}'(k+1) = \mathbf{M} \cdot \mathbf{x}(k) + \mathbf{N} \cdot u(k) \quad (2.3)$$

$$y(k) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}(k) + \mathbf{D} \cdot u(k) \quad (2.4)$$

kde je \mathbf{M} matice soustavy

\mathbf{N} matice buzení

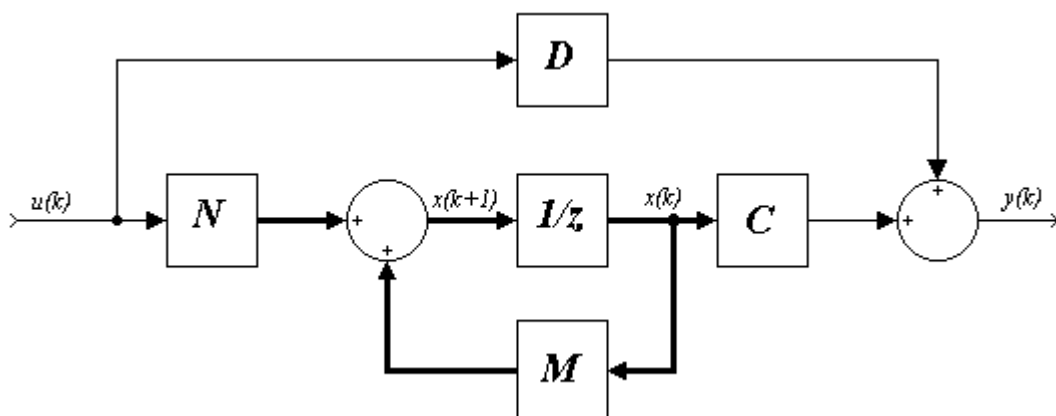
$\mathbf{x}(k)$ vektor stavových veličin

$u(k)$ vstupní veličina

\mathbf{C} matice výstupu

\mathbf{D} matice převodu

$y(k)$ výstupní veličina



Obr. 2.2 Blokové zapojení pro stavové rovnice diskrétního systému

2.2.1. Převod diskretního přenosu na stavový popis

Víme, že měřením dynamických vlastností vstupních a výstupních veličin systému získáme obrazový nebo diskretní přenos soustavy. Jedná se o *vnější* popis systému. Jelikož chceme získat informace o jednotlivých stavech systému, které využijeme při návrhu optimální regulace, musíme získat z obrazového přenosu matici buzení, stavovou matici a matici výstupu.

Ukážeme si dvě základní metody řešící daný problém.

Pro diskretní přenos

$$G(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_{n-1} \cdot z^{n-1} + b_{n-2} \cdot z^{n-2} + \dots + b_1 \cdot z + b_0}{z^n + a_{n-1} \cdot z^{n-1} + \dots + a_1 \cdot z + a_0} = \frac{Y(z)}{U(z)} \quad (2.5)$$

kde je $A(z)$ polynom stupně n

$B(z)$ polynom stupně $n-1$

odpovídá diferenční rovnice

$$y(k+n) = -a_{n-1} \cdot y(k+n-1) - \dots - a_1 \cdot y(k+1) - a_0 \cdot y(k) + b_{n-1} \cdot u(k+n-1) + b_{n-2} \cdot u(k+n-2) + \dots + b_1 \cdot u(k+1) + b_0 \cdot u(k) \quad (2.6)$$

Z diferenční rovnice (2.6) vypočteme matice

a) normální formou *řiditelnosti*

Metodou snižování řádu derivace dostaneme tvar vektoru stavu \mathbf{x} , matice systému \mathbf{M} , matice buzení \mathbf{N} , matice výstupu \mathbf{C} a matice převodu \mathbf{D} .

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \\ \vdots \\ x_{n-1}(k) \\ x_n(k) \end{bmatrix} \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \dots & -a_{n-1} \end{bmatrix} \quad \mathbf{N} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = [b_0 \quad b_1 \quad \dots \quad b_{n-1}] \quad \mathbf{D} = 0$$

(2.7)

b) normální formou *rekonstruovatelnosti*

Metodou postupných integrací dostaneme tvar vektoru stavu \mathbf{x} , matice systému \mathbf{M} , matice buzení \mathbf{N} , matice výstupu \mathbf{C} a matice převodu \mathbf{D} .

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \\ \vdots \\ x_{n-1}(k) \\ x_n(k) \end{bmatrix} \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} -a_{n-1} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -a_{n-2} & 0 & 1 & \dots & 0 \\ -a_{n-3} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ -a_1 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{N} = \begin{bmatrix} b_{n-1} \\ b_{n-2} \\ b_{n-3} \\ \vdots \\ b_1 \\ b_0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = [1 \ 0 \ \dots \ 0] \quad \mathbf{D} = 0$$

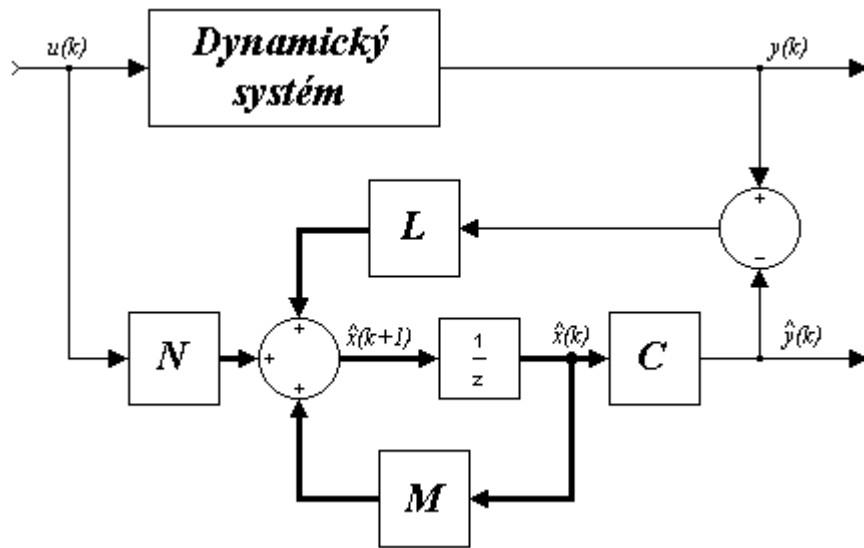
(2.8)

2.3. Estimace stavu

Informace o stavových veličinách v konkrétním časovém okamžiku získáme simulací nebo řešením stavových rovnic. Aby bylo možné sestavit matematický model formou stavových rovnic, musíme nejprve zjistit stavový vektor. V této kapitole je uvedena základní metoda, která umožní výpočet stavového vektoru pomocí návrhu stavových modelů na základě měření diskretních vstupů $u(kT)$ a výstupů $y(kT)$. Takový výpočet stavového vektoru se nazývá odhad respektive *estimace*. Blokové schéma označujeme jako *estimátor*.

2.3.1. Deterministický estimátor

Jestliže je soustava pozorovatelná a měřený výstupní signál neobsahuje žádný šum, pak tento šumový signál nepůsobí ani na stavové veličiny. Můžeme proto estimaci označit jako *deterministickou estimací* stavu. Jeden z nejznámějších deterministických estimátorů je *Lunbergerův estimátor*. Při jeho návrhu předpokládáme, že jsou známé matice systému \mathbf{M} , matice buzení \mathbf{N} , matice výstupu \mathbf{C} a měřen bude výstup ze systému $y(k)$.



Obr. 2.3 *Dynamická soustava s estimátorem stavu systému*

Z obr. 2.3 lze vyčíst rovnici estimátoru, kde matice L je neurčená matice estimátoru, která se volí tak, aby dynamika odhadu chyby konvergovala k nule v konečném čase.

Rovnice bude mít tvar

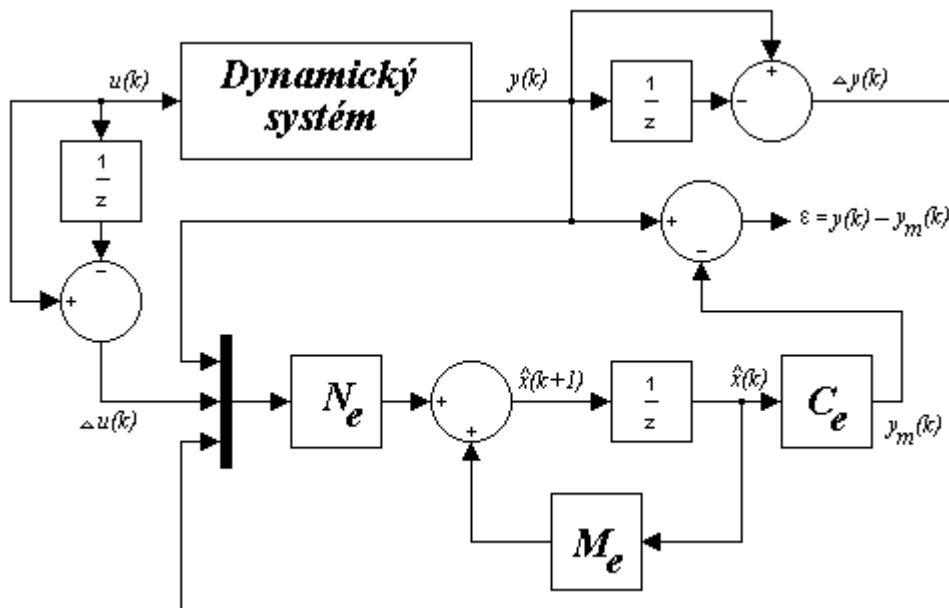
$$\hat{\mathbf{x}}(k+1) = \mathbf{M} \cdot \hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{N} \cdot u(k) + \mathbf{L} \cdot [y(k) - \mathbf{C} \cdot \hat{\mathbf{x}}(k)] \quad (2.9)$$

2.3.2. Přírůstkový estimátor

V diplomové práci jsou použity časově diskrétní *přírůstkové estimátory*. Tyto estimátory pro svou funkci využívají přírůstky stavových veličin. Jejich hlavní výhodou je, že v ustáleném stavu jsou stavové veličiny nulové.

Do estimátoru vstupuje regulovaná veličina y , její časový přírůstek Δy a přírůstek akční veličiny Δu . Výstupem z estimátoru je estimační chyba $\varepsilon = y_m - y$, kde y_m je estimovaná regulovaná veličina.

Zapojení časově diskrétního přírůstkového estimátoru je schématicky naznačeno na obr. 2.4.



Obr. 2.4 Diskrétní přírůstkový estimátor

Jestliže předpokládáme, že estimátor bude naladěn na jmenovitý přenos regulované soustavy a jeho polynomy budou shodné s polynomy soustavy, měla by chyba estimace ε , která se objeví např. po vstupu poruchy, vymizet v konečné době.

2.4. Regulátor

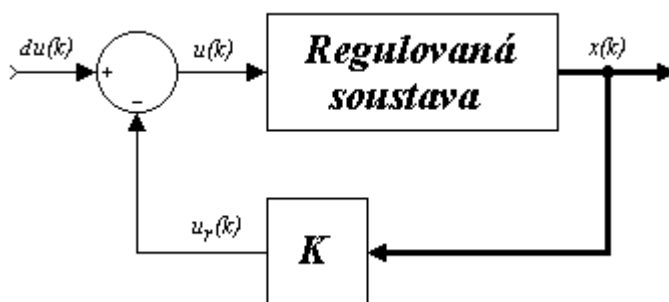
Do regulované soustavy s proměnnou strukturou a časově diskrétním estimátorem můžeme zapojit libovolný spojitý regulátor (nejčastější případ je PID regulátor). Nemusíme se však omezovat jen na spojitý PID regulátory. Chceme-li využít úplnou informaci o systému, použijeme pro výpočet akčního zásahu stavových veličin estimátoru, který je zapojen s diskrétním nebo spojitým stavovým regulátorem.

Tento akční zásah u_r můžeme vyjádřit rovnicí

$$u_r(k) = -\mathbf{K} \cdot \mathbf{x}(k) \quad u_r(t) = -\mathbf{K} \cdot \mathbf{x}(t) \quad (2.10)$$

kde je \mathbf{K} matice regulátoru
 $\mathbf{x}(k), \mathbf{x}(t)$ diskrétní resp. spojitý vektor stavu

Struktura stavového regulátoru za předpokladu, že jsou stavové veličiny měřitelné na regulované soustavě je na obr. 2.6.

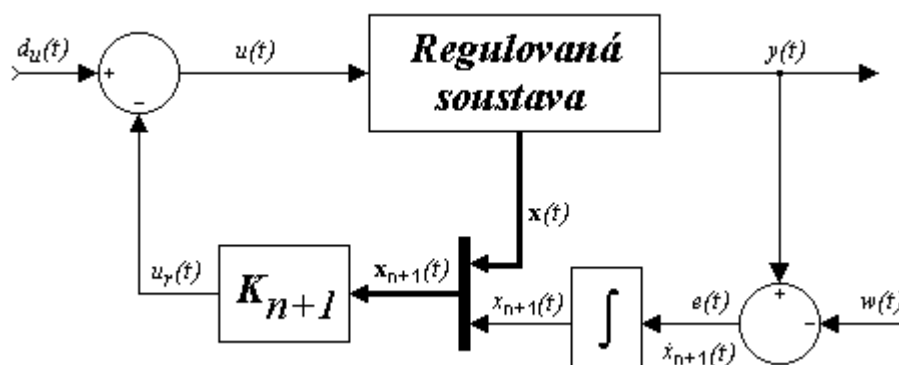


Obr. 2.6 Regulovaná soustava se stavovým regulátorem

V případě vstupu poruch nedokáže takto navržený stavový regulátor eliminovat účinek trvalých poruch (např. skokové změny poruchových veličin) a také nám nezajistí přesné změny žádané hodnoty. Abychom tyto nedostatky odstranili, musíme do spojitého regulačního obvodu přidat integrátor (viz. obr. 2.7). Pro diskretní obvod nahradíme integrátor jednotkovým zpoždovacím členem (viz. obr. 2.8). Tímto krokem se nám zvýší počet stavových veličin x a matice regulátoru K na $(n+1)$.

2.4.1. Spojitý stavový regulátor

Na obr. 2.7 je zapojení spojitého stavového regulátoru s rozšířeným stavovým vektorem.



Obr. 2.7 Stavová regulace s rozšířeným vektorem spojitého stavového regulátoru

2.4.1.1. Návrh spojitého stavového regulátoru

Pro návrh spojitého stavového regulátoru byla zvolena metoda nejmenších čtverců. Tato metoda je založena na minimalizaci kvadratického kritéria tvaru

$$J(u_r) = \int_0^{\infty} [y(t)^T \cdot \mathbf{Q} \cdot y(t) + u(t)^T \cdot \mathbf{R} \cdot u(t) + 2 \cdot y(t)^T \cdot \mathbf{N} \cdot u(t)] \cdot dt \quad (2.11)$$

kde je \mathbf{Q} , \mathbf{R} pozitivně definitní symetrické matice váhových koeficientů je pravidlem, že se volí diagonální pro usnadnění výsledných vztahů

2.4.1.2. Softwarová podpora návrhu spojitého stavového regulátoru

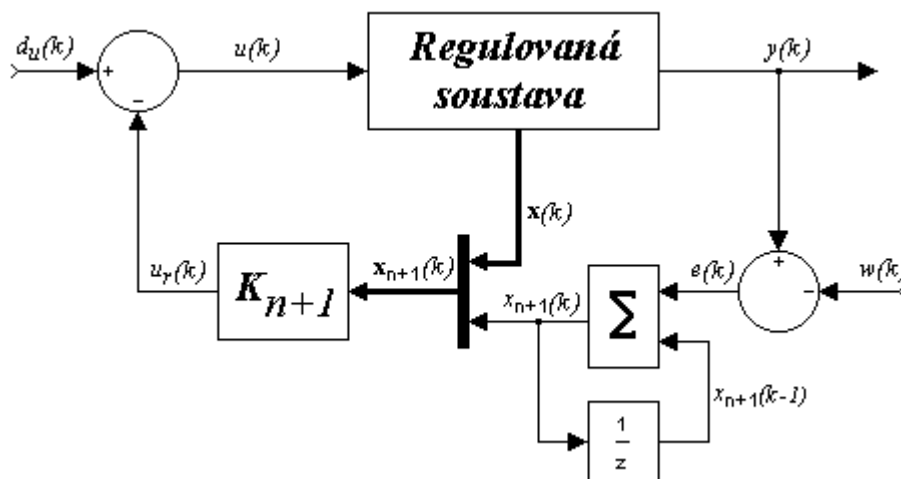
V prostředí MATLAB použijeme pro výpočet vektoru spojitého stavového regulátoru \mathbf{K} podle kvadratického kritéria funkci *lqry*.

$$\mathbf{K} = \text{lqry}(\text{sys}, \mathbf{Q}, \mathbf{R})$$

kde je \mathbf{K} vektor spojitého stavového regulátoru s optimálními parametry
 sys definuje dynamický systém (pomocí matic A,B,C,D)
 \mathbf{Q} váhová matice stavových veličin v kvadratickém kritériu
 \mathbf{R} váhový koeficient u akční veličiny v kvadratickém kritériu

2.4.2. Diskrétní stavový regulátor

Na obr. 2.8 je zapojení diskrétního stavového regulátoru s rozšířeným stavovým vektorem.



Obr. 2.8 Stavová regulace s rozšířeným vektorem diskrétního stavového regulátoru

2.4.2.1. Návrh diskretního stavového regulátoru

Pro návrh diskretního stavového regulátoru byla opět zvolena metoda nejmenších čtverců minimalizující kvadratické kritérium tvaru

$$J(u_k) = \sum_{k=1}^{\infty} [\mathbf{x}(k)^T \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{x}(k) + u(k)^T \cdot \mathbf{R} \cdot u(k) + 2 \cdot \mathbf{x}(k)^T \cdot \mathbf{N} \cdot u(k)] \quad (2.12)$$

kde je \mathbf{Q} , \mathbf{R} pozitivně definitní symetrické matice váhových koeficientů
je pravidlem, že se volí diagonální pro usnadnění výsledných vztahů

2.4.2.2. Softwarová podpora návrhu diskretního stavového regulátoru

V prostředí MATBLAB použijeme pro výpočet matice diskretního stavového regulátoru \mathbf{K} podle kvadratického kritéria funkci *dlqr*.

$$\mathbf{K} = \text{dlqr}(\mathbf{M}, \mathbf{N}, \mathbf{Q}, \mathbf{R})$$

kde je \mathbf{K} vektor diskretního stavového regulátoru s optimálními parametry

\mathbf{M}, \mathbf{N} matice systému resp. buzení

\mathbf{Q} váhová matice stavových veličin v kvadratickém kritériu

\mathbf{R} váhový koeficient u akční veličiny v kvadratickém kritériu

2.5. Dynamika systému

Dalším cílem diplomové práce by měl být návrh modelu uzavřeného regulačního obvodu, jehož dynamika vyhovuje kritériu jakosti regulace i podmínkám provozu. V praxi je však někdy složité dosažení shody mezi regulovanou soustavou a modelem. Důvodem bývá složitost obvodu nebo změna *dynamických vlastností* regulované soustavy (např. zrychlení či zpomalení, změna zesílení nebo vliv různých poruch). Tyto *neurčitosti modelu* mohou mít za příčinu, že regulační obvod nebude splňovat kritéria jakosti regulace a může dojít i k jeho nestabilitě.

Problém můžeme vyřešit robustně nastaveným regulátorem, který bude předem naladěný na některé typy pracovních režimů. Jeho výsledné regulační pochody však budou horší než u optimálně nastaveného regulátoru, který bude vyhovovat jednotlivým omezujícím podmínkám provozu.

V navrhovaném modelu bude daný problém řešit *regulátor s proměnnou strukturou*. Na základě vyhodnocení výstupů z diskrétních stavových estimátorů, které budou průběžně sledovat dynamiku systému, se bude automaticky přepínat mezi regulátory předem optimálně nastavenými na zvolené pracovním režimy soustavy.

2.5.1. Časová afinita

Jelikož předem nemůžeme odhadnout chování soustavy a typ vstupujících poruch, potřebujeme k nastavení optimálních parametrů regulátorů matematicky popsat dynamiku systému. Vyjádříme ji hodnotami parametrů přenosu, konkrétně časovými konstantami.

Při stejné regulační kvalitě budou pro různě rychlé regulační soustavy odpovídat stejně rychlé optimální regulační pochody. Jedná se o soustavy navzájem *časově afinní*.

Pro časovou funkci $y(t)$ časově afinní s funkcí $y_a(t)$ platí

$$y(t) = y_a(t / K) \quad (2.13)$$

kde je K koeficient časové afinity
 t čas

Pro přenos v Laplaceově transformaci $A(s)$ soustavy časově afinní k soustavě s přenosem $A_a(s)$ platí

$$A(s) = A_a(K \cdot s) = (K \cdot s + 1) = a_n \cdot K^n \cdot s^n + a_{n-1} \cdot K^{n-1} \cdot s^{n-1} + \dots + a_1 \cdot K \cdot s + a_0 \quad (2.14)$$

kde je n řád soustavy

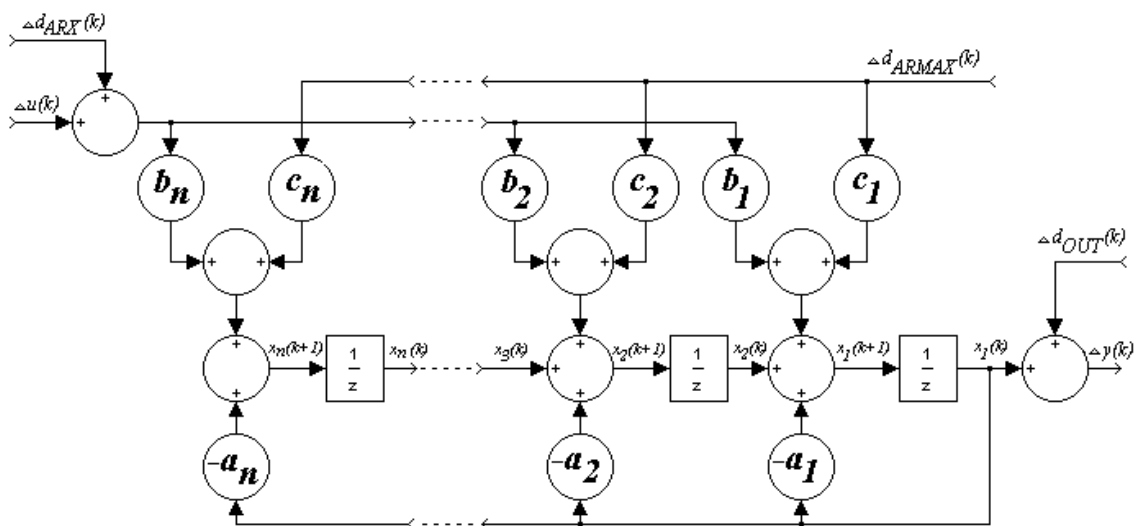
3. Návrh a realizace modelu systému

3.1. Návrh dynamické soustavy

Matematický popis dynamiky soustavy měnící se v čase nám umožní zvolená množina koeficientů časové afinity $K = \{0.6 ; 1 ; 1.5\}$, pro které vypočítáme přenosy soustavy. Pro tyto jmenovité přenosy optimálně naladíme diskrétní stavové estimátory a regulátory. Dynamiku soustavy nám budou ovlivňovat tři typy vstupujících poruch. Porucha na vstupu d_{ARX} , porucha do soustavy d_{ARMAX} a porucha na výstupu d_{OUT} .

3.1.1. Diskrétní stavový popis soustavy

K uvědomění si souvislostí s problematikou návrhu diskrétních přírůstkových estimátorů ve stavovém prostoru a návrhu spojitého modelu soustavy si nejprve uvedeme diskrétní stavový model soustavy i se vstupujícími poruchami, ze kterého vycházíme.



Obr. 3.1 Diskrétní stavový model soustavy s poruchami

Ze struktury programového schématu (viz. obr. 3.1) chceme získat matice koeficientů systému, které jsme si popsali v kapitole 2.2.1.b. Jedná se o *normální formu rekonstruovatelnosti*, tedy o metodu postupných integrací aplikovanou pro diskrétní popis systému.

Ze vzorců (2.3) a (2.4) známe stavové rovnice pro diskrétní popis regulované soustavy, které budou mít pro jednotlivé stavové veličiny tvar

$$\begin{aligned}
 x_1(k+1) &= x_2(k) - a_1 \cdot x_1(k) + b_1 \cdot \Delta u(k) + c_1 \cdot \Delta d_{ARMAX}(k) \\
 x_2(k+1) &= x_3(k) - a_2 \cdot x_1(k) + b_2 \cdot \Delta u(k) + c_2 \cdot \Delta d_{ARMAX}(k) \\
 &\vdots \\
 x_n(k+1) &= -a_n \cdot x_1(k) + b_n \cdot \Delta u(k) + c_n \cdot \Delta d_{ARMAX}(k)
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Můžeme psát, že

$$\mathbf{x}(k+1) = \begin{bmatrix} -a_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -a_2 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ -a_{n-1} & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_n & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x}(k) + \begin{bmatrix} b_1 & c_1 \\ b_2 & c_2 \\ \vdots & \vdots \\ b_{n-1} & c_{n-1} \\ b_n & c_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta d_{ARMAX}(k) \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

Z maticového tvaru (3.2) dostaneme podle tvaru (2.8) matice diskrétního stavového popisu soustavy.

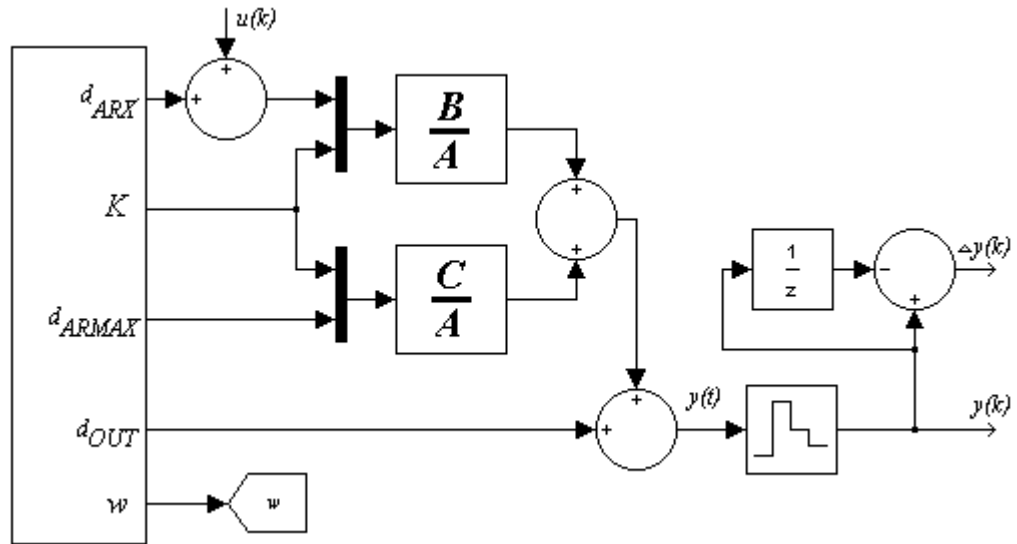
$$\mathbf{x}(k) = \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_{n-1}(k) \\ x_n(k) \end{bmatrix} \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} -a_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -a_2 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ -a_{n-1} & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_n & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{N} = \begin{bmatrix} b_1 & c_1 \\ b_2 & c_2 \\ \vdots & \vdots \\ b_{n-1} & c_{n-1} \\ b_n & c_n \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

$$\mathbf{C} = [1 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \quad \mathbf{D} = 0$$

kde je \mathbf{M} matice soustavy
 \mathbf{N} matice buzení
 $\mathbf{x}(k)$ vektor stavových veličin
 $u(k)$ vektor buzení
 $d_{ARMAX}(k)$ vektor poruchových veličin
 \mathbf{C} matice výstupu
 \mathbf{D} matice převodu

3.1.2. Spojitý model soustavy

V samotném řešení modelu systému je diskrétní stavový model soustavy, popsaný v kapitole 3.1.1., nahrazen modelem spojité soustavy s danými poruchami. Jeho realizace je uvedena na obr. 3.2.



Obr. 3.2 Spojitý model soustavy s poruchami

Ve schématu reprezentuje přenos spojité soustavy blok $\frac{B}{A}$. Chování systému bude ovlivňovat porucha na vstupu d_{ARX} , porucha na výstupu d_{OUT} a porucha vstupující do soustavy d_{ARMAX} , jejíž účinek bude aproximovat přenos bloku $\frac{C}{A}$. Dynamiku systému mění se v čase, konkrétně mění se časové koeficienty obou přenosů, zabezpečuje zvolená posloupnost koeficientů časové afinity K . Výstupní regulační veličina $y(t)$ je diskretizována vzorkovačem na $y(k)$ a je proveden její přírůstek $\Delta y(k)$. Takto upravené se použijí spolu s přírůstkem akční veličiny $\Delta u(k)$ jako vstupní veličiny diskrétních přírůstkových estimatorů.

3.1.3. Změna dynamiky soustavy

V provozu se v čase dynamika soustavy může měnit. Tuto dynamiku budou v programu určovat koeficienty časové afinity K charakteristického polynomu přenosu soustavy v bloku $\frac{B}{A}$ a při vstupu poruchy d_{ARMAX} i v bloku $\frac{C}{A}$.

Kdykoli během simulace regulačního pochodu je k zajištění přepočtu stavových proměnných regulované soustavy použit blok *S-Function*.

3.1.3.1. Blok S-Function

Bloky *S-Function*, které jsou použity v modelu vytvořeném v prostředí Simulink (pozn. součást programu MATLAB), umožňují implementovat do modelu regulačního systému vytvořené algoritmy, které se programují a ladí v MATLAB Editor/Debugger v tzv. M-Files.

Blok *S-Function* má pevně předepsanou strukturu, do které jsou zadány název funkce s parametry a vlastní zdrojový kód s výpočty. Vstupem funkce je zvolený vektor vstupů u , výstupem je vektor požadovaných výstupů sys . Uvnitř funkce počítáme s vektorem stavů x , který může nabývat veličin spojitých, diskrétních nebo obojích.

Při spuštění simulace se počet výpočtů naprogramovaných algoritmů v blocích *S-Function* provádí v závislosti na vzorkovací periodě a době trvání simulace.

3.1.3.2. Změna parametrů soustavy v S-Function

Během doby trvání simulace reaguje na změnu koeficientů časové afinity soustavy K kód programu v bloku S-Function, který při detekci této změny okamžitě přepočítává stavové veličiny regulované soustavy. Ve schématu jsou dvě soustavy pojmenované “*soustava*” a “*porucha*” (pozn. na obr. 3.2 přenos $\frac{B}{A}$ respektive $\frac{C}{A}$), pro které je programový kód analogický.

Základem algoritmu je průběžné zaznamenávání minulých hodnoty koeficientu časové afinity, který je v každém kroku simulace porovnáván s nově příchozím. Je-li podmínka splněna, tedy koeficienty jsou různé, dochází ke změně dynamiky soustavy.

Proto algoritmus vypočítá nové stavové proměnné soustavy a uloží koeficienty pro následující průchod podmínkou.

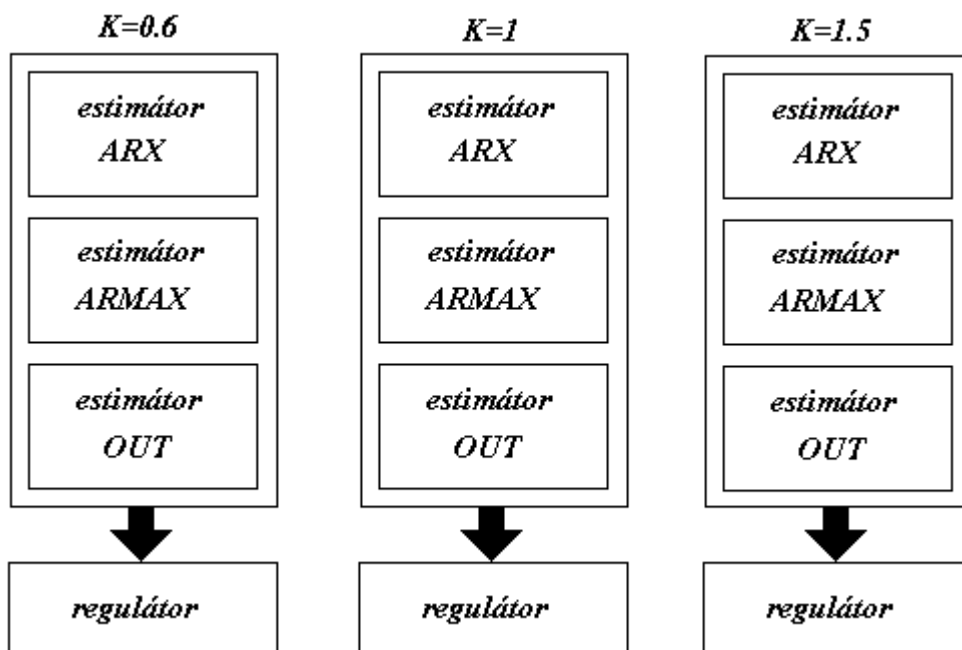
Ukázka algoritmu s popisem proměnných je v souborech *soustava.m* a *porucha.m* v příloze.

3.2. Návrh diskretních přírůstkových estimátorů

K estimaci stavu systému byly použity tři typy diskretních estimátorů. Rozdíl je v použití korekčních vazeb jednotlivých estimátorů, které po vstupu některé z poruch zajistí u daného estimátoru nejrychlejší vymizení estimační chyby na výstupu. Na základě porovnání jednotlivých průběhů estimačních chyb se rozhodne, který regulátor bude v daném okamžiku připojen k regulované soustavě. Estimátory pojmenujeme podle vstupních poruch na typ ARX, ARMAX a OUT.

V kapitole 2.3.2. je uvedeno, že do stavových přírůstkových estimátorů vstupuje regulovaná veličina y , její časový přírůstek Δy a přírůstek akční veličiny Δu . Výstupem z estimátoru je estimovaný stavový vektor x potřebný k výpočtu parametrů stavového regulátoru a estimační chyba $\varepsilon = y_m - y$, kde y_m je estimovaná regulovaná veličina.

Jelikož estimátory jsou naladěny na jmenovitý přenos regulované soustavy, musíme nejprve vypočítat jednotlivé přenosy časově afinních soustav pro zvolené časové koeficienty $K = \{0.6 ; 1 ; 1.5\}$ pro trojici estimatorů s různými korekčními vazbami. Ve výsledku to znamená, že ve schématu budou zapojeny tři trojice estimátorů a k nim příslušný počet regulátorů jak je schématicky naznačeno na obr. 3.3.

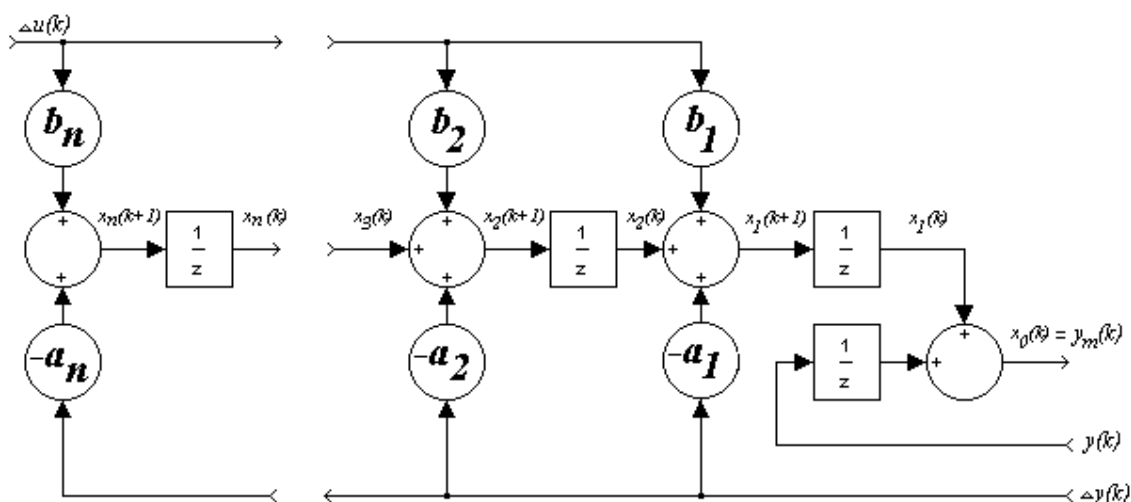


Obr. 3.3 Schéma počtu estimátorů a regulátorů použitých v obvodu

Algoritmus počítající tři časově afinní přenosy soustav s popisem je v souboru *nastav.m* v příloze.

3.2.1. Estimátor typu ARX

Estimátor typu ARX je naladěný na jmenovitý přenos regulované soustavy a vstupní poruchu d_{ARX} , ale jako jediný nevyužívá pro její detekci zvláštní korekční vazbu. Jeho diskretní stavový model, podle kterého budeme navrhovat diskretní stavový popis estimátoru, je uveden na obr. 3.4.



Obr. 3.4 Diskretní stavový model estimátoru typu ARX

Ze schématu na obr. 3.4 vyčteme tvar stavových rovnic estimátoru typu ARX.

$$\begin{aligned}
 x_0(k) &= x_1(k) + y(k-1) \\
 x_0(k+1) &= x_1(k+1) + y(k) = x_2(k) - a_1 \cdot \Delta y(k) + b_1 \cdot \Delta u(k) + y(k) \\
 x_1(k+1) &= x_2(k) - a_1 \cdot \Delta y(k) + b_1 \cdot \Delta u(k) \\
 x_2(k+1) &= x_3(k) - a_2 \cdot \Delta y(k) + b_2 \cdot \Delta u(k) \\
 &\vdots \\
 x_n(k+1) &= -a_n \cdot \Delta y(k) + b_n \cdot \Delta u(k)
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Můžeme psát maticový tvar

$$\mathbf{x}(k+1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x}(k) + \begin{bmatrix} -a_1 & b_1 & 1 \\ -a_1 & b_1 & 0 \\ -a_2 & b_2 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -a_{n-1} & b_{n-1} & 0 \\ -a_n & b_n & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta y(k) \\ \Delta u(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

Z tvaru (3.5) můžeme psát matice diskrétního stavového popisu, kde matice buzení N_e bude mít tři sloupce odpovídající třem veličinám (Δy , Δu a y) vstupujícím do estimátoru viz. kapitola 2.3.2.

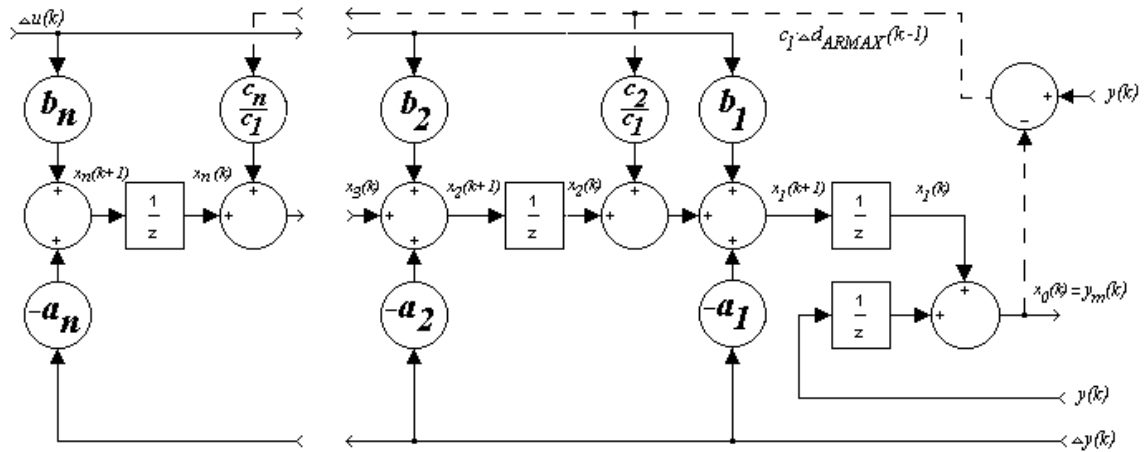
$$\mathbf{M}_e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{N}_e = \begin{bmatrix} -a_1 & b_1 & 1 \\ -a_1 & b_1 & 0 \\ -a_2 & b_2 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -a_{n-1} & b_{n-1} & 0 \\ -a_n & b_n & 0 \end{bmatrix} \tag{3.6}$$

$$\mathbf{C}_e = [1 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \quad \mathbf{D} = 0$$

Ukázka algoritmu, který naplní matice soustavy \mathbf{M}_e a matice buzení N_e pro tři vypočtené přenosy afinních soustav, je v souboru *nastav.m* v příloze.

3.2.2. Estimátor typu ARMAX

Estimátor typu ARMAX je nalaďen na jmenovitý přenosi soustavy a na vstupující poruchu d_{ARMAX} pomocí zpětné korekční vazby. Na obr. 3.5 je diskrétní stavový model estimátoru, kde je korekční vazba vyznačena čárkovaně.



Obr. 3.5 Diskrétní stavový model estimátoru typu ARMAX

Tvar stavových rovnic estimátoru typu ARMAX

$$\begin{aligned}
 x_0(k) &= x_1(k) + y(k-1) \\
 x_0(k+1) &= x_1(k+1) + y(k) \\
 x_0(k+1) &= x_2(k) - a_1 \cdot \Delta y(k) + b_1 \cdot \Delta u(k) + \frac{c_2}{c_1} \cdot (y(k) - x_0(k)) + y(k) \\
 x_1(k+1) &= x_2(k) - a_1 \cdot \Delta y(k) + b_1 \cdot \Delta u(k) + \frac{c_2}{c_1} \cdot (y(k) - x_0(k)) \\
 x_2(k+1) &= x_3(k) - a_2 \cdot \Delta y(k) + b_2 \cdot \Delta u(k) + \frac{c_3}{c_1} \cdot (y(k) - x_0(k)) \\
 &\vdots \\
 x_n(k+1) &= -a_n \cdot \Delta y(k) + b_n \cdot \Delta u(k)
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Maticový tvar stavových rovnic

$$\mathbf{x}(k+1) = \begin{bmatrix} -\frac{c_2}{c_1} & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -\frac{c_2}{c_1} & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -\frac{c_3}{c_1} & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ -\frac{c_n}{c_1} & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x}(k) + \begin{bmatrix} -a_1 & b_1 & 1 + \frac{c_2}{c_1} \\ -a_1 & b_1 & \frac{c_2}{c_1} \\ -a_2 & b_2 & \frac{c_3}{c_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -a_{n-1} & b_{n-1} & \frac{c_n}{c_1} \\ -a_n & b_n & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta y(k) \\ \Delta u(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Matice diskretního stavového popisu estimátoru

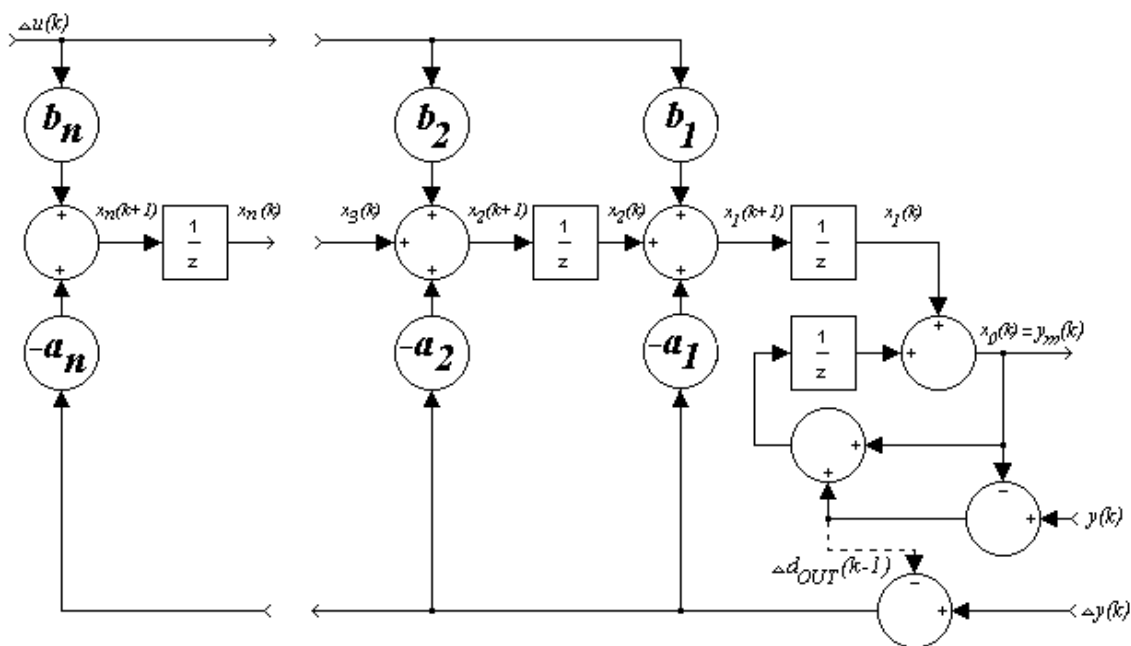
$$\mathbf{M}_e = \begin{bmatrix} -\frac{c_2}{c_1} & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -\frac{c_2}{c_1} & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -\frac{c_3}{c_1} & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ -\frac{c_n}{c_1} & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{N}_e = \begin{bmatrix} -a_1 & b_1 & 1 + \frac{c_2}{c_1} \\ -a_1 & b_1 & \frac{c_2}{c_1} \\ -a_2 & b_2 & \frac{c_3}{c_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -a_{n-1} & b_{n-1} & \frac{c_n}{c_1} \\ -a_n & b_n & 0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$\mathbf{C}_e = [1 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \quad \mathbf{D} = 0$$

Ukázka algoritmu naplnění matic soustavy \mathbf{M}_e a matic buzení \mathbf{N}_e s popisem je v souboru *nastav.m* v příloze.

3.2.3. Estimátor typu OUT

Estimátor typu OUT je nalaďen na jmenovitý přenos regulované soustavy a na poruchu na výstupu z regulované soustavy d_{OUT} pomocí korekční vazby. Na obr. 3.6 je diskretní stavový model estimátoru, kde je korekční vazba opět vyznačena čárkovaně.



Obr. 3.6 Diskrétní stavový model estimátoru typu OUT

Tvar stavových rovnic estimátoru typu OUT

$$\begin{aligned}
 x_0(k) &= x_1(k) + y(k-1) \\
 x_0(k+1) &= x_1(k+1) + y(k) \\
 x_0(k+1) &= x_2(k) - a_1 \cdot \Delta y(k) + b_1 \cdot \Delta u(k) - a_1 \cdot x_0(k) + a_1 \cdot y(k) + y(k) \\
 x_1(k+1) &= x_2(k) - a_1 \cdot \Delta y(k) + b_1 \cdot \Delta u(k) - a_1 \cdot x_0(k) + a_1 \cdot y(k) \quad (3.10) \\
 x_2(k+1) &= x_3(k) - a_2 \cdot \Delta y(k) + b_2 \cdot \Delta u(k) - a_2 \cdot x_0(k) + a_2 \cdot y(k) \\
 &\vdots \\
 x_n(k+1) &= -a_n \cdot \Delta y(k) + b_n \cdot \Delta u(k) - a_n \cdot x_0(k) + a_n \cdot y(k)
 \end{aligned}$$

Maticový tvar stavových rovnic

$$\mathbf{x}(k+1) = \begin{bmatrix} -a_1 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ -a_1 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ -a_2 & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ -a_{n-1} & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -a_n & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x}(k) + \begin{bmatrix} -a_1 & b_1 & 1+a_1 \\ -a_1 & b_1 & a_1 \\ -a_2 & b_2 & a_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -a_{n-1} & b_{n-1} & a_{n-1} \\ -a_n & b_n & a_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta y(k) \\ \Delta u(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Matice diskrétního stavového popisu estimátoru

$$\mathbf{M}_e = \begin{bmatrix} -a_1 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ -a_1 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ -a_2 & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ -a_{n-1} & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -a_n & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{N}_e = \begin{bmatrix} -a_1 & b_1 & 1+a_1 \\ -a_1 & b_1 & a_1 \\ -a_2 & b_2 & a_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -a_{n-1} & b_{n-1} & a_{n-1} \\ -a_n & b_n & a_n \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

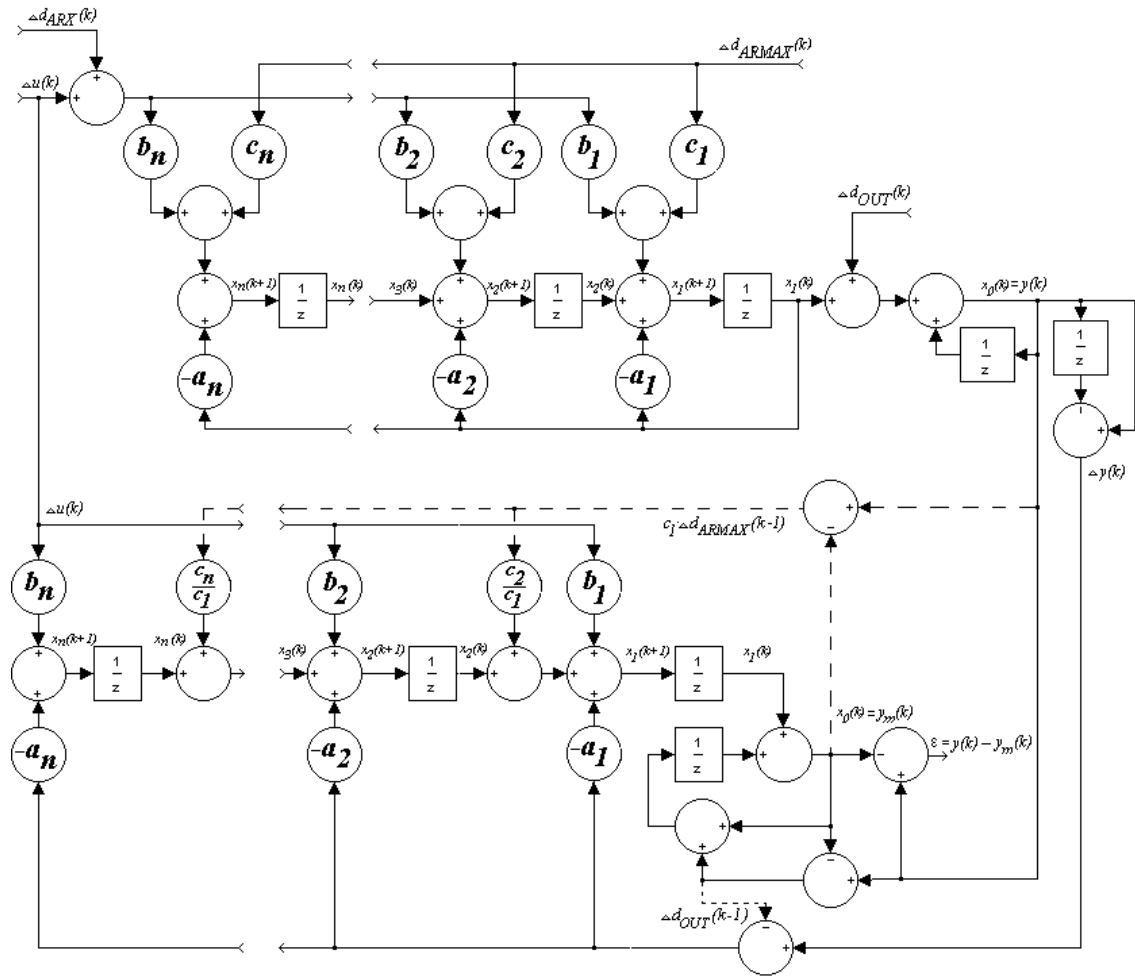
$$\mathbf{C}_e = [1 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \quad \mathbf{D} = 0$$

Ukázka algoritmu, který naplní matice soustavy \mathbf{M}_e a matice buzení \mathbf{N}_e s popisem je v souboru *nastav.m* v příloze.

3.2.4. Vývoj estimační chyby ε

Při ukázce vývoje chyb diskrétních stavových estimátorů pro dané poruchy budeme vycházet ze schématu na obr. 3.7, kde je připojen diskrétní stavový model soustavy se vstupujícími poruchami k diskrétnímu stavovému modelu estimátorů. Korekční vazby eliminující dané poruchy jsou vyznačeny čárkovaně. Výstupem z estimátoru je estimační chyba $\varepsilon = y_m - y$, kde y je regulovaná veličina a y_m je estimovaná regulovaná veličina. Na vhodně zvoleném intervalu výpočetních kroků si naznačíme vývoj estimačních chyb jednotlivých estimátorů pro tři možné typy vstupujících poruch.

Měli bychom dokázat, že absolutní hodnota estimační chyby, která vznikne na výstupu z estimátoru při vstupu některé z poruch, vymizí v konečné době. A tato doba by měla být nejkratší u estimátoru, který bude naladěný na jmenovitý přenos regulované soustavy a bude mít korekční vazbu na vstupující typ poruchy.



Obr. 3.7 Zapojení regulované soustavy s poruchami k estimatorům s korekčními členy

Názorná ukázka bude provedena početně i graficky pro první čtyři kroky vývoje estimační chyby na zvolené diskrétní soustavě s přenosem

$$F(z) = \frac{0.08 \cdot z + 0.15}{z^2 - z + 0.25} \quad (3.13)$$

s koeficienty $b_1 = 0.08$ $-a_1 = 1$ $c_1 = 2$
 $b_2 = 0.15$ $-a_2 = -0.25$ $c_2 = 1$

$T_s = 0.1$

poruchy simulujeme jako jednotkový impuls.

3.2.4.1. Vývoj estimační chyby při vstupu poruchy Δd_{ARX}

a) pro estimátor typu ARX

$$|\varepsilon(1)| = \underline{\underline{0}}$$

$$|\varepsilon(2)| = [b_1 - 0] \cdot \Delta d_{ARX} = \underline{\underline{0.08}}$$

$$|\varepsilon(3)| = [b_1 + b_1 \cdot a_1 + b_2 - (b_1 + b_1 \cdot a_1)] \cdot \Delta d_{ARX} = b_2 \cdot \Delta d_{ARX} = \underline{\underline{0.15}}$$

$$|\varepsilon(4)| = [b_1 + b_1 \cdot a_1^2 + b_1 \cdot a_2 + b_2 \cdot a_1 + b_2 - (b_1 + b_1 \cdot a_1^2 + b_1 \cdot a_2 + b_2 \cdot a_1 + b_2)] \cdot \Delta d_{ARX} = \underline{\underline{0}}$$

b) pro estimátor typu ARMAX

$$|\varepsilon(1)| = \underline{\underline{0}}$$

$$|\varepsilon(2)| = [b_1 - 0] \cdot \Delta d_{ARX} = \underline{\underline{0.08}}$$

$$|\varepsilon(3)| = \left[b_1 + b_1 \cdot a_1 + b_2 - \left(b_1 \cdot \frac{c_2}{c_1} + b_1 + b_1 \cdot a_1 \right) \right] \cdot \Delta d_{ARX} = \left[-b_1 \cdot \frac{c_2}{c_1} + b_2 \right] \cdot \Delta d_{ARX} =$$

$$= -0.08 \cdot 0.5 + 0.15 = \underline{\underline{0.11}}$$

$$|\varepsilon(4)| = [b_1 + b_1 \cdot a_1^2 + b_1 \cdot a_2 + b_2 \cdot a_1 + b_2] \cdot \Delta d_{ARX} -$$

$$- \left[b_2 \cdot \frac{c_2}{c_1} - b_1 \cdot \left(\frac{c_2}{c_1} \right)^2 + b_1 + b_1 \cdot a_1^2 + b_1 \cdot a_2 + b_2 \cdot a_1 + b_2 \right] \cdot \Delta d_{ARX} =$$

$$= \left[-b_2 \cdot \frac{c_2}{c_1} + b_1 \cdot \left(\frac{c_2}{c_1} \right)^2 \right] \cdot \Delta d_{ARX} = -0.15 \cdot 0.5 + 0.08 \cdot 0.5^2 = \underline{\underline{0.055}}$$

c) pro estimátor typu OUT

$$|\varepsilon(1)| = \underline{\underline{0}}$$

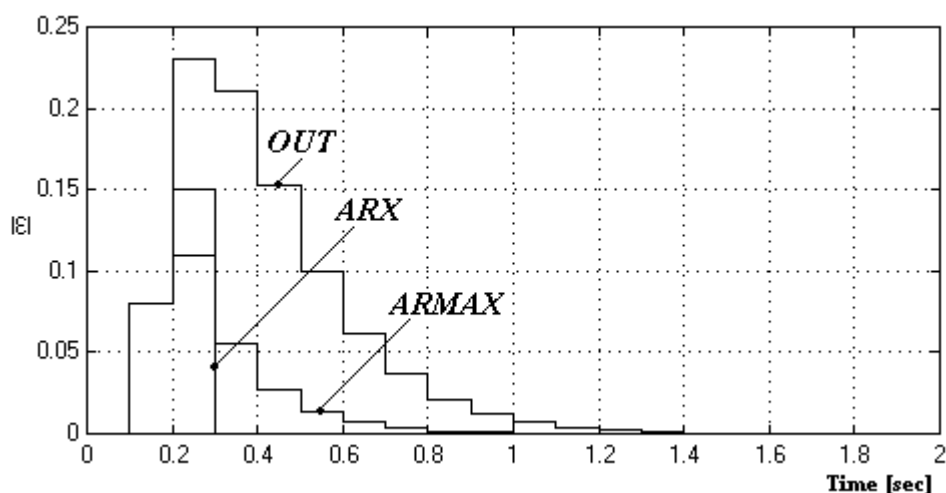
$$|\varepsilon(2)| = [b_1 - 0] \cdot \Delta d_{ARX} = \underline{\underline{0.08}}$$

$$|\varepsilon(3)| = [b_1 + b_1 \cdot a_1 + b_2 - (b_1 + b_1 \cdot a_1 - b_1 \cdot a_1)] \cdot \Delta d_{ARX} = [b_1 \cdot a_1 + b_2] \cdot \Delta d_{ARX} =$$

$$= 0.15 + 0.08 = \underline{\underline{0.23}}$$

$$|\varepsilon(4)| = [b_1 + b_1 \cdot a_1^2 + b_1 \cdot a_2 + b_2 \cdot a_1 + b_2 - (b_1 + b_2)] \cdot \Delta d_{ARX} =$$

$$= [b_1 \cdot a_1^2 + b_1 \cdot a_2 + b_2 \cdot a_1] \cdot \Delta d_{ARX} = 0.08 \cdot 1^2 + 0.08 \cdot (-0.25) + 0.15 = \underline{\underline{0.21}}$$



Obr. 3.8 Vývoj estimační chyby během poruchy Δd_{ARX}

3.2.4.2. Vývoj estimační chyby při vstupu poruchy Δd_{ARMAX}

a) pro estimátor typu ARX

$$|\varepsilon(1)| = \underline{0}$$

$$|\varepsilon(2)| = [c_1 - 0] \cdot \Delta d_{ARMAX} = \underline{2}$$

$$|\varepsilon(3)| = [c_1 + c_1 \cdot a_1 + c_2 - (c_1 + c_1 \cdot a_1)] \cdot \Delta d_{ARMAX} = c_2 \cdot \Delta d_{ARMAX} = \underline{1}$$

$$|\varepsilon(4)| = [c_1 + c_1 \cdot a_1^2 + c_1 \cdot a_2 + c_2 \cdot a_1 + c_2 - (c_1 + c_1 \cdot a_1^2 + c_1 \cdot a_2 + c_2 \cdot a_1 + c_2)] \cdot \Delta d_{ARMAX} = \underline{0}$$

b) pro estimátor typu ARMAX

$$|\varepsilon(1)| = \underline{0}$$

$$|\varepsilon(2)| = [c_1 - 0] \cdot \Delta d_{ARMAX} = \underline{2}$$

$$|\varepsilon(3)| = \left[c_1 + c_1 \cdot a_1 + c_2 - \left(c_1 \cdot \frac{c_2}{c_1} + c_1 + c_1 \cdot a_1 \right) \right] \cdot \Delta d_{ARMAX} = \left[-c_1 \cdot \frac{c_2}{c_1} + c_2 \right] \cdot \Delta d_{ARMAX} =$$

$$= -2 \cdot 0.5 + 1 = \underline{0}$$

$$|\varepsilon(4)| = [c_1 + c_1 \cdot a_1^2 + c_1 \cdot a_2 + c_2 \cdot a_1 + c_2] \cdot \Delta d_{ARMAX} -$$

$$- \left[c_2 \cdot \frac{c_2}{c_1} - c_1 \cdot \left(\frac{c_2}{c_1} \right)^2 + c_1 + c_1 \cdot a_1^2 + c_1 \cdot a_2 + c_2 \cdot a_1 + c_2 \right] \cdot \Delta d_{ARMAX} =$$

$$= \left[-c_2 \cdot \frac{c_2}{c_1} + c_1 \cdot \left(\frac{c_2}{c_1} \right)^2 \right] \cdot \Delta d_{ARMAX} = -1 \cdot 0.5 + 2 \cdot 0.5^2 = \underline{0}$$

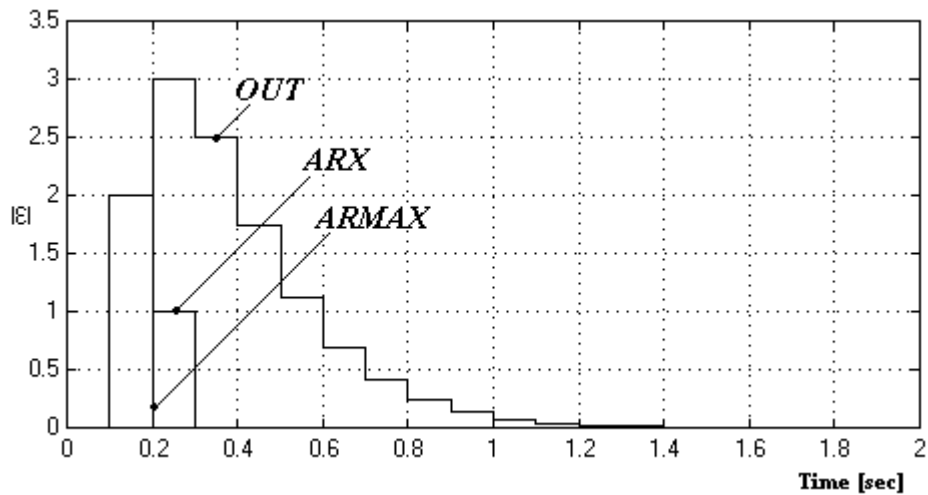
c) pro estimátor typu *OUT*

$$|\varepsilon(1)| = \underline{\underline{0}}$$

$$|\varepsilon(2)| = [c_1 - 0] \cdot \Delta d_{ARMAX} = \underline{\underline{2}}$$

$$|\varepsilon(3)| = [c_1 + c_1 \cdot a_1 + c_2 - (c_1 + c_1 \cdot a_1 - c_1 \cdot a_1)] \cdot \Delta d_{ARMAX} = [c_1 \cdot a_1 + c_2] \cdot \Delta d_{ARMAX} = 2 + 1 = \underline{\underline{3}}$$

$$|\varepsilon(4)| = [c_1 + c_1 \cdot a_1^2 + c_1 \cdot a_2 + c_2 \cdot a_1 + c_2 - (c_1 + c_2)] \cdot \Delta d_{ARMAX} = \\ = [c_1 \cdot a_1^2 + c_1 \cdot a_2 + c_2 \cdot a_1] \cdot \Delta d_{ARMAX} = 2 \cdot 1^2 + 2 \cdot (-0.25) + 1 \cdot 1 = \underline{\underline{2.5}}$$



Obr. 3.9 Vývoj estimační chyby během poruchy Δd_{ARMAX}

3.2.4.3. Vývoj estimační chyby při vstupu poruchy Δd_{OUT}

a) pro estimátor typu *ARX*

$$|\varepsilon(1)| = \Delta d_{OUT} - 0 = \underline{\underline{1}}$$

$$|\varepsilon(2)| = \Delta d_{OUT} - [1 + a_1] \cdot \Delta d_{OUT} = -a_1 \cdot \Delta d_{OUT} = \underline{\underline{1}}$$

$$|\varepsilon(3)| = \Delta d_{OUT} - [1 + a_2] \cdot \Delta d_{OUT} = -a_2 \cdot \Delta d_{OUT} = \underline{\underline{0.25}}$$

$$|\varepsilon(4)| = \Delta d_{OUT} - \Delta d_{OUT} = \underline{\underline{0}}$$

b) pro estimátory typu *OUT*

$$|\varepsilon(1)| = \Delta d_{OUT} - 0 = \underline{\underline{1}}$$

$$|\varepsilon(2)| = \Delta d_{OUT} - \Delta d_{OUT} = \underline{\underline{0}}$$

$$|\varepsilon(3)| = \Delta d_{OUT} - \Delta d_{OUT} = \underline{\underline{0}}$$

$$|\varepsilon(4)| = \Delta d_{OUT} - \Delta d_{OUT} = \underline{\underline{0}}$$

c) pro estimátor typu ARMAX

$$|\varepsilon(1)| = \Delta d_{OUT} - 0 = \underline{1}$$

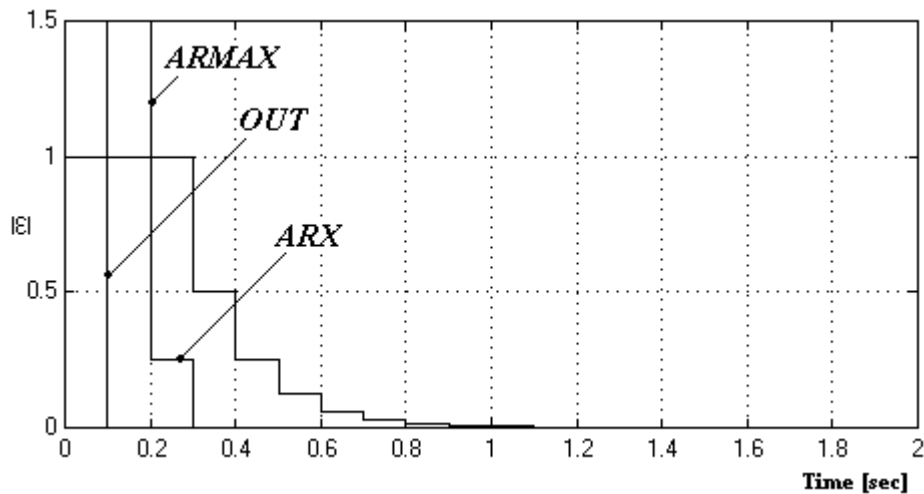
$$|\varepsilon(2)| = \Delta d_{OUT} - \left[1 + \frac{c_2}{c_1} + a_1 \right] \cdot \Delta d_{OUT} = \left[-\frac{c_2}{c_1} - a_1 \right] \cdot \Delta d_{OUT} = -0.5 - 1 = \underline{1.5}$$

$$|\varepsilon(3)| = \Delta d_{OUT} - \left[1 - \left(\frac{c_2}{c_1} \right)^2 - a_1 \cdot \frac{c_2}{c_1} + a_2 \right] \cdot \Delta d_{OUT} = \left[\left(\frac{c_2}{c_1} \right)^2 + a_1 \cdot \frac{c_2}{c_1} - a_2 \right] \cdot \Delta d_{OUT} =$$

$$= 0.5^2 + 0.5 - (-0.25) = \underline{1}$$

$$|\varepsilon(4)| = \Delta d_{OUT} - \left[1 + \left(\frac{c_2}{c_1} \right)^3 + a_1 \cdot \left(\frac{c_2}{c_1} \right)^2 - a_2 \cdot \frac{c_2}{c_1} \right] \cdot \Delta d_{OUT} = \left[-\left(\frac{c_2}{c_1} \right)^3 - a_1 \cdot \left(\frac{c_2}{c_1} \right)^2 + a_2 \cdot \frac{c_2}{c_1} \right] \cdot \Delta d_{OUT} =$$

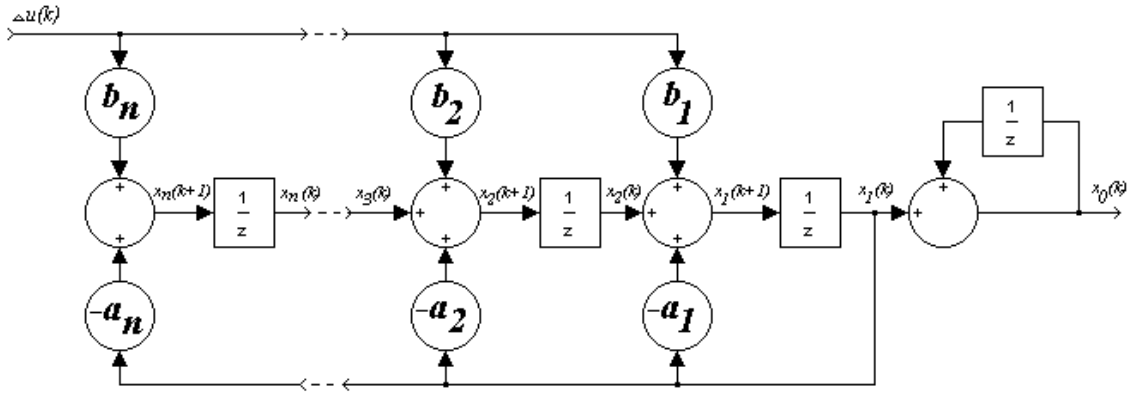
$$= -0.5^3 - 1 \cdot 0.5^2 + (-0.25) \cdot 0.5 = \underline{0.5}$$



Obr. 3.10 Vývoj estimační chyby během poruchy Δd_{OUT}

3.3. Návrh diskretního stavového regulátoru proměnné struktury

Při návrhu diskretního stavového regulátoru proměnné struktury využijeme vypočtených přenosů diskretních soustav pro tři zvolené koeficienty časové afinity K , na které budou regulátory optimálně naladěny. K výpočtu vektoru \mathbf{R}_r s optimálně nastavenými parametry regulátoru je použita funkce $dlqr$ popsaná v kapitole 2.4.2.2. Při návrhu vycházíme z diskretního stavového modelu soustavy, který je na obr. 3.11 i s akumulacním členem zvyšujícím řád soustavy na $n+1$.



Obr. 3.11 Diskrétní stavový model soustavy pro návrh regulátoru

Z obr. 3.11 můžeme psát stavové rovnice soustavy

$$\begin{aligned}
 x_0(k) &= x_0(k-1) + x_1(k) \\
 x_0(k+1) &= x_0(k) + x_1(k+1) = x_0(k) + x_2(k) - a_1 \cdot x_1(k) + b_1 \cdot \Delta u(k) \\
 x_1(k+1) &= x_2(k) - a_1 \cdot x_1(k) + b_1 \cdot \Delta u(k) \\
 x_2(k+1) &= x_3(k) - a_2 \cdot x_1(k) + b_2 \cdot \Delta u(k) \\
 &\vdots \\
 x_n(k+1) &= -a_n \cdot x_1(k) + b_n \cdot \Delta u(k)
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

Tvar stavových matic soustavy \mathbf{M} , buzení \mathbf{N} , váhové matice stavových veličin \mathbf{Q} a váhový koeficient u akční veličiny \mathbf{R} použitých ve funkci *dlqr* je následující

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & -a_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -a_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -a_2 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & -a_{n-1} & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & -a_n & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{N} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_{n-1} \\ b_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \tag{3.15}$$

$$\mathbf{R} = 0$$

Ukázka algoritmu, který naplní tyto matice a vypočte vektor \mathbf{R}_r s optimálně nastavenými parametry s popisem je v souboru *nastav.m* v příloze.

3.4. Adaptace spojitého stavového regulátoru

Princip výběru optimálního regulátoru do regulace by měl být nezávislý na typu použitého regulátoru. Jestliže máme použít spojitý regulátor, nabízí se regulátor PID, který pro správnou funkci nepotřebuje znalost stavových veličin. Chceme-li však využít úplné informace o systému, volíme spojitý stavový regulátor. Ten vyžaduje návrh nového spojitého stavového estimátoru, který ovšem bude postrádat důležité vlastnosti použitého diskrétního přírůstkového estimátoru (tzn. možnost oddělení vlivu vstupující poruchy na výslednou estimační chybu).

V návrhu je tedy ponechán diskrétní přírůstkový estimátor a při periodě vzorkování $T_s=0.1s$ je připojen k estimátoru spojitý stavový regulátor. Jeho vektor optimálních parametrů získáme použitím dostupných funkcí programu MATLAB. Nejprve vytvoříme diskrétní stavový model soustavy ze struktury diskrétních stavových matic soustavy M , N navržených viz. tvar 3.15. Tento model převedeme na model spojitý, který můžeme použít pro výpočet vektoru parametrů spojitého stavového regulátoru pomocí příkazu *lqry* viz. kapitola 2.4.1.2.

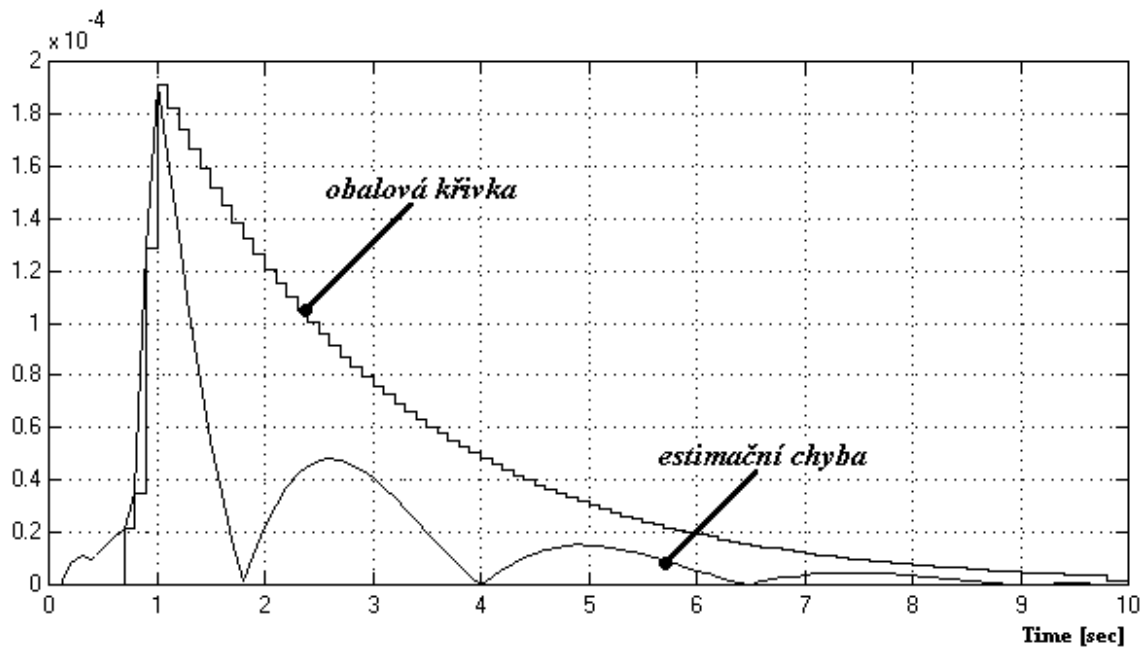
Ukázka algoritmu s popisem je v souboru *nastav.m* v příloze.

3.5. Návrh přepínacího algoritmu

Nejdůležitější část řešení diplomové práce je návrh přepínacího algoritmu, který bude na základě průběžného vyhodnocování velikostí absolutních hodnot z estimačních chyb $|\varepsilon|$ vybírat vhodný regulátor do regulace tak, aby byl výsledný regulační pochod stále optimální.

K realizaci přepínacího bloku opět použijeme funkce S-Function (viz. kapitola 3.1.3.1.), do které bude vstupovat vektor absolutních hodnot estimačních chyb a veličina zakazující nebo povolující přepínání. Z absolutních hodnot chyb nejprve vytvoříme křivky exponenciálního zapomínání – *křivky obalové*.

Obalová křivka je v okamžiku změny dynamiky systému nastavena na hodnotu vzniklé chyby. Vlivem zvoleného koeficientu exponenciálního zapomínání v čase klesá s tím, že stále překrývá absolutní hodnotu estimační chyby viz. obr. 3.12.

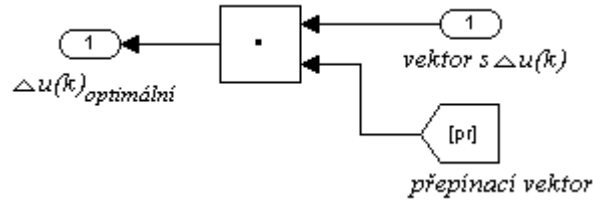


Obr. 3.12 Průběh estimační chyby a obalové křivky

Podmínka, která v algoritmu porovnává velikost amplitudy obalových křivek, určuje okamžik změny dynamiky systému. V tomto okamžiku jsou ale jednotlivé estimační chyby značně rozvážené, a proto vynulujeme velikosti obalových křivek a nastavíme určité zpoždění, po které nebude docházet k nežádoucímu přepínání mezi regulátory. Po uplynutí daných výpočtových kroků, vybere algoritmus *obalovou křivku* s minimální velikostí amplitudy a hodnotu jejího indexu nastaví do *přepínacího vektoru*. Vzniklý *přepínací vektor* realizuje samotné přepínání mezi jednotlivými regulátory a tedy volí, který přírůstek akční veličiny $\Delta u(k)$ bude zapojen do regulace viz. obr. 3.13. Jde o posloupnost indexů optimálních regulátorů, které budou nejbližší odpovídat vývoji dynamiky systému.

Je důležité předem vyladit koeficienty podle dynamiky regulované soustavy. Nastavíme-li koeficient exponenciálního zapomínání tak, že *obalová křivka* bude co nejpřesněji kopírovat vrcholy absolutních hodnot chyb, potlačíme velikost překmitů na výstupu soustavy, ale zároveň dochází k nechtěnému přepínání regulátorů v krátkých časových intervalech. Dále sledujeme míru citlivosti, kdy se na základě součtu všech estimačních chyb rozhoduje, jsou-li změny dynamiky systému stále rozhodné pro kvalitu výsledného regulačního pochodu.

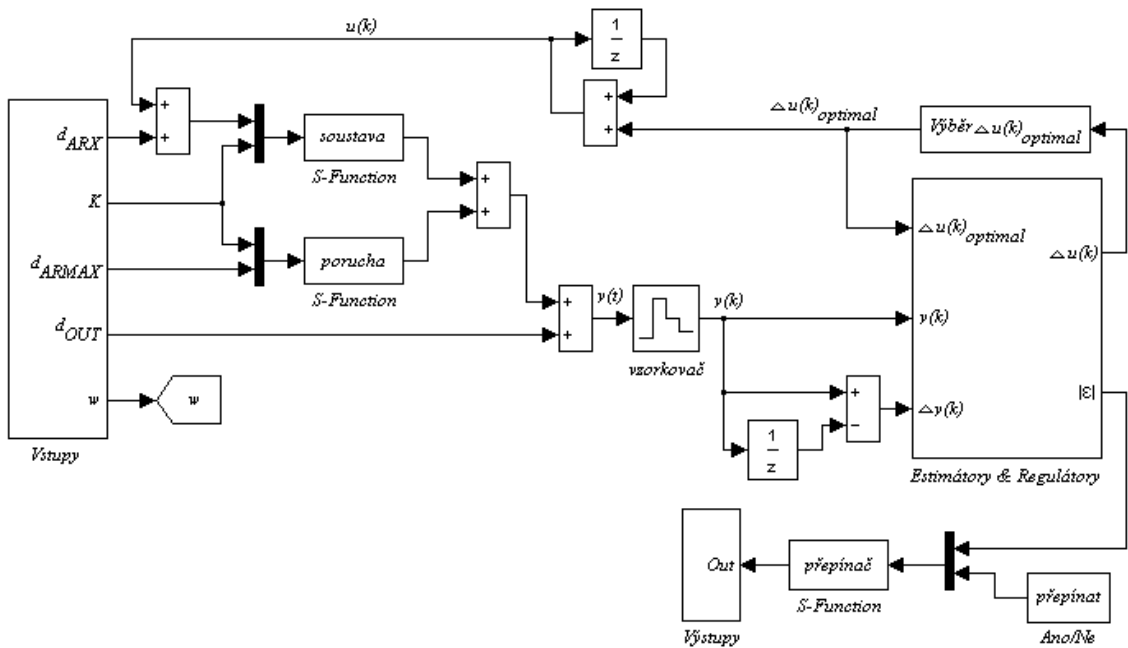
Ukázka přepínacího algoritmu s popisem proměnných je v souboru *prepinac.m* v příloze.



Obr. 3.13 Výběr optimálního akčního zásahu

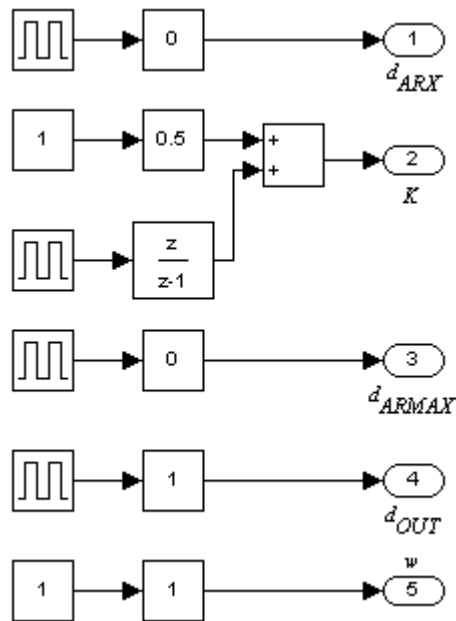
3.6. Kompletní model regulačního systému

Na obr. 3.14 je kompletní model zpětnovazebního regulačního obvodu. Na modelu je vidět zapojení bloků *S-Function* pro algoritmy řešící přepínání (viz. kapitola 3.4.), nastavení spojitého přenosu soustavy a přenosu aproximující poruchu d_{ARMAX} (viz. kapitola 3.1.2.).



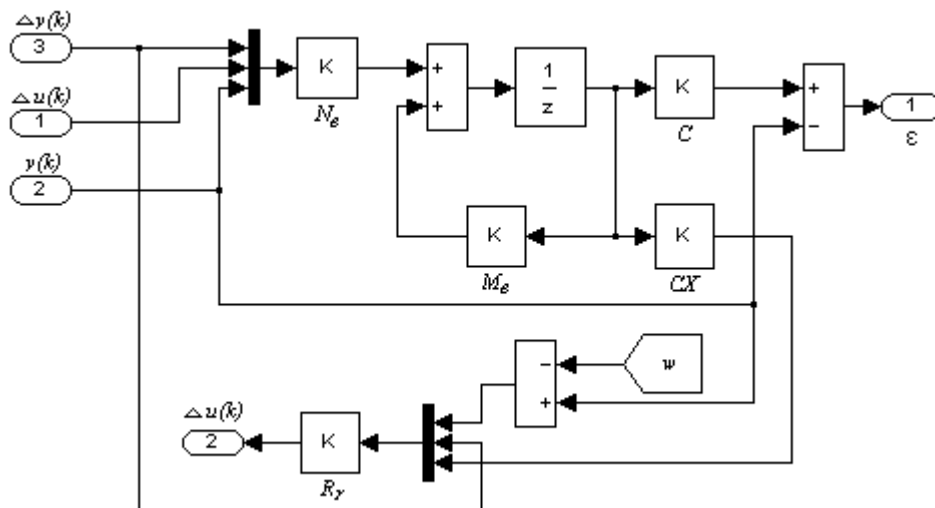
Obr. 3.14 Zpětnovazebního regulační obvod s přepínáním

Blok *Vstupy* (viz. obr. 3.15) umožňuje definovat typ vstupující poruchy, změnu koeficientů časové afinity soustavy K a velikost žádané hodnoty w .



Obr. 3.15 Nastavení typu poruchy, koeficientů časové afinity a žádané hodnoty

V bloku *Estimátory & Regulátory* je realizované paralelní zapojení devíti bloků s diskrétními přírůstkovými estimátory a regulátory naladěných na tři zvolené časově afinní soustavy (viz. kapitola 3.2.). Schéma zapojení jednoho takového bloku je na obr. 3.16.

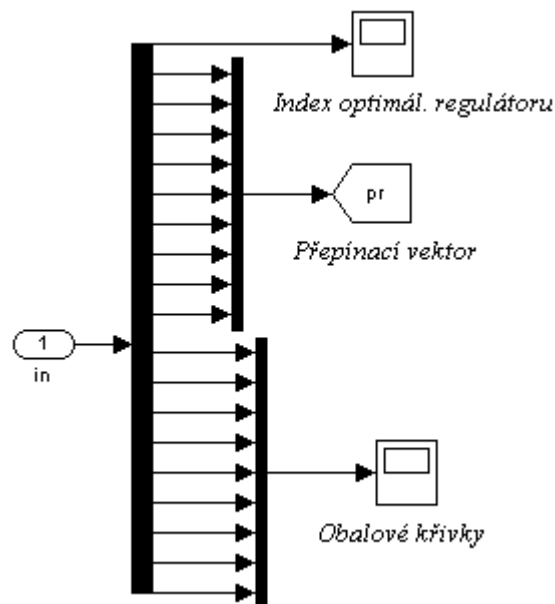


Obr. 3.16 Diskrétní přírůstkový estimátor se stavovým regulátorem

Na obrázku 3.16 je maticové zapojení diskrétního přírůstkového estimátoru (viz. kapitola 3.2.) a diskrétního nebo spojitého stavového regulátoru s optimálními parametry reprezentovaného vektorem R_r (viz. kapitola 3.3. a 3.4.). Matice CX tvaru (3.16) zabezpečuje vstup vhodných stavových proměnných z estimátoru do regulátoru.

$$\mathbf{CX} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Výstupem je estimační chyba ε , která vstupuje do přepínacího bloku. Její velikost určuje jaký časový přírůstek akční veličiny $\Delta u(k)$ bude zapojen do regulace (viz. kapitola 3.5.). Blok *Přepínat* povoluje nebo zakazuje automatické přepínání a blok *Výběr $\Delta u(k)_{optimal}$* (viz obr. 3.13) vybírá na základě vypočteného přepínacího vektoru optimální akční zásah. Nakonec blok *Výstupy* (viz. obr. 3.17), který graficky zobrazí *obalové křivky* všech estimátorů, index právě zapojeného regulátoru a naplní přepínací vektor $[pr]$.



Obr. 3.17 Zpracování výstupních signálů z přepínače

4. Simulační ověření funkce modelu

4.1. Nastavení soustavy

Pro simulaci byla zvolena nekmitavá soustava čtvrtého řádu s obrazový přenosem pro koeficient časové afinity $K=1$ tvaru

$$F(s) = \frac{1}{s^4 + 4 \cdot s^3 + 6 \cdot s^2 + 4 \cdot s + 1} \quad (4.1)$$

s kořeny charakteristického polynomu $s_1 = s_2 = s_3 = s_4 = -1$.

Volíme interval koeficientů časové afinity $K = \{0.6 ; 1 ; 1.5\}$. Proto další obrazové přenosy budou mít tvar

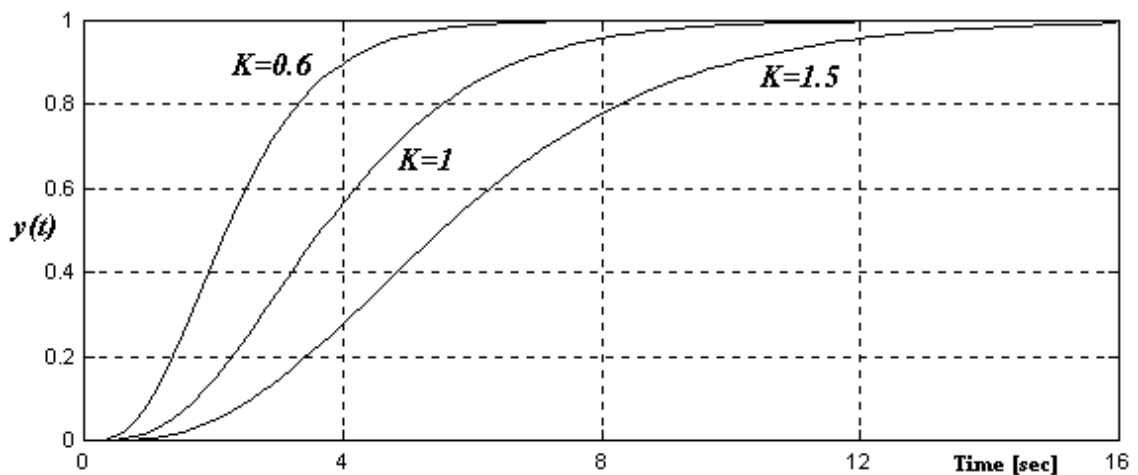
pro $K=0.6$

$$F(s) = \frac{7.716}{s^4 + 6.667 \cdot s^3 + 16.67 \cdot s^2 + 18.52 \cdot s + 7.716} \quad (4.2)$$

pro $K=1.5$

$$F(s) = \frac{0.1975}{s^4 + 2.667 \cdot s^3 + 2.667 \cdot s^2 + 1.185 \cdot s + 0.1975} \quad (4.3)$$

Přechodové charakteristiky pro jednotlivé koeficienty K jsou na obr. 4.1.



Obr. 4.1 Přechodové charakteristiky pro zvolené koeficienty časové afinity K

Simulační funkci modelu dokumentují následující grafy, které ukazují reakci systému na jednotlivé poruchy d_{ARX} , d_{ARMAX} a d_{OUT} při průběžně se měnící časové afinitě. Na časovém intervalu 400s ve zvolených krocích zvyšujeme koeficient K a

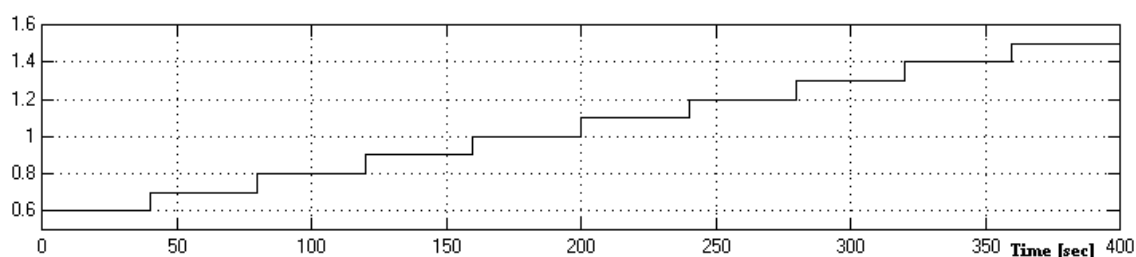
zároveň skokově měníme daný typ vstupující poruchy. Pro ověření funkce přepínače provedeme simulaci se zapnutým a vypnutým algoritmem přepínání. Výsledky regulace budeme sledovat v grafech popisujících vývoj akční veličiny a výstupní regulované veličiny. Při zapnutém přepínání budeme také sledovat vývoj indexu $i_{optimal}$, který bude identifikovat právě zapojený regulátor do regulace. Přiřazení indexů $i_{optimal}$ jednotlivým regulátorům optimálně naladěných a zapojených v závislosti na koeficientu K a typu vstupující poruchy ukazuje obr. 4.2.

	$K=0.6$	$K=1$	$K=1.5$
ARX	1	4	7
$ARMAX$	2	5	8
OUT	3	6	9

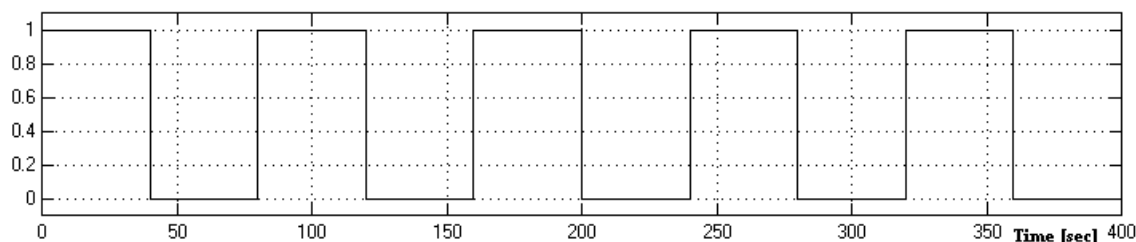
Obr. 4.2 Přiřazení indexů $i_{optimal}$ jednotlivým regulátorům

Při vypnutém algoritmu přepínání bude do regulace připojen regulátor s indexem $i_{optimal} = 3$ (naladěn na $K=0.6$ při poruše d_{OUT}). Daný regulátor byl zvolen, protože vykazuje nejlepší schopnost regulovat soustavu pro libovolný stav systému. Proto byl vybrán i jako výchozí regulátor pro simulaci se zapnutým přepínáním.

Na obr. 4.3 a 4.4 jsou grafy popisující vývoj koeficientu časové afinity K a vývoj jednotlivých poruch d_{ARX} , d_{ARMAX} a d_{OUT} , které budou pro následující simulace shodné.



Obr. 4.3 Vývoj koeficientu časové afinity K

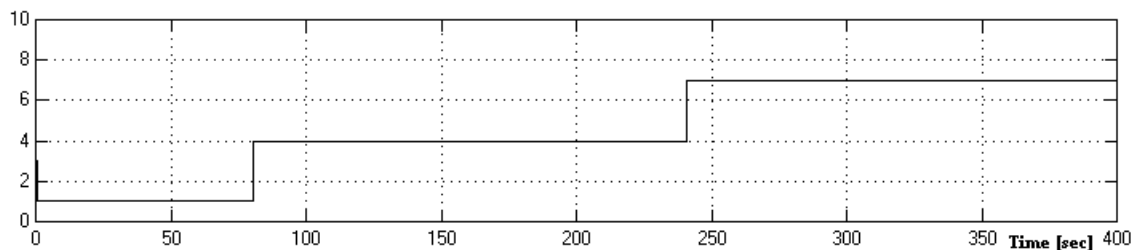


Obr. 4.4 Vývoj poruchy d_{ARX} , d_{ARMAX} a d_{OUT}

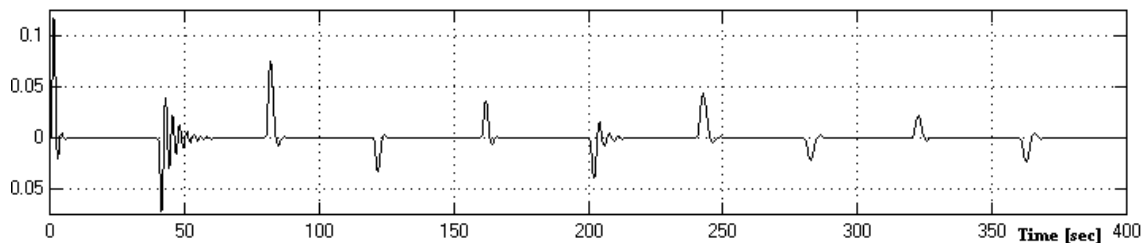
4.2. Diskrétní stavový regulátor

Jelikož jsme při řešení nejprve vycházeli z návrhu optimálního diskrétního stavového regulátoru připojeného k diskrétnímu přírůstkovému estimátoru, uvedeme si grafy ukazující vývoj regulované veličiny $y(k)$ a vývoj indexu regulátorů $i_{optimal}$ pro tři provozní režimy při zapnutém a vypnutém přepínání. Následně je budeme moci porovnat s výsledky, které bude vykazovat zapojení se spojitým stavovým regulátorem.

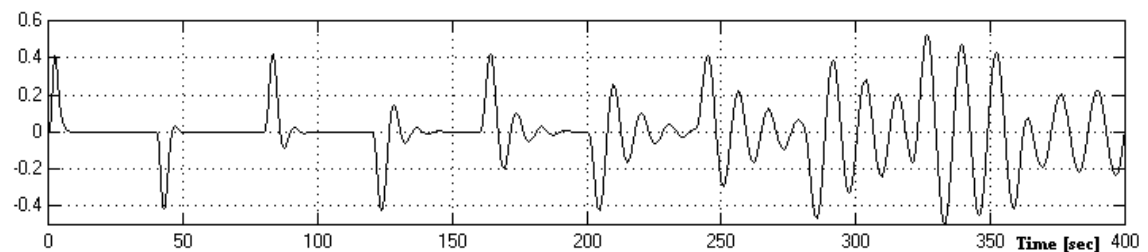
4.2.1. Vstupující porucha d_{ARX}



Obr. 4.5 Vývoj indexu regulátorů $i_{optimal}$

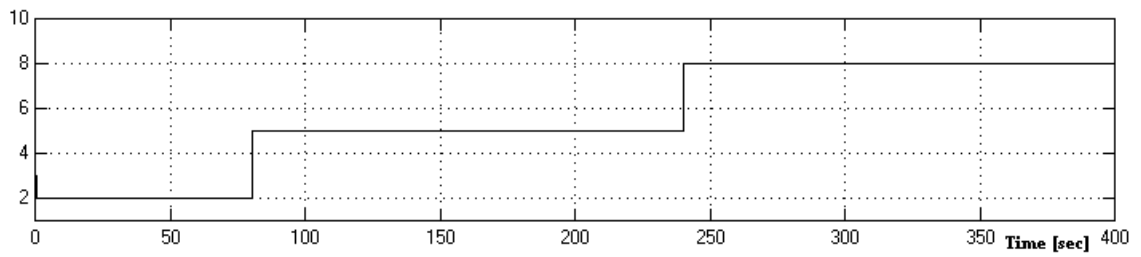


Obr. 4.6 Vývoj regulované veličiny s přepínáním

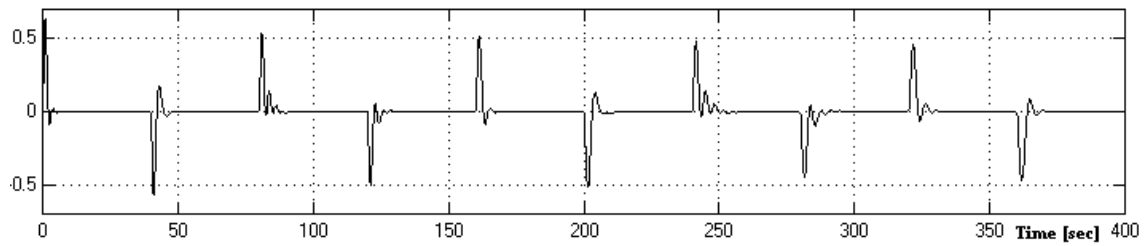


Obr. 4.7 Vývoj regulované veličiny bez přepínání

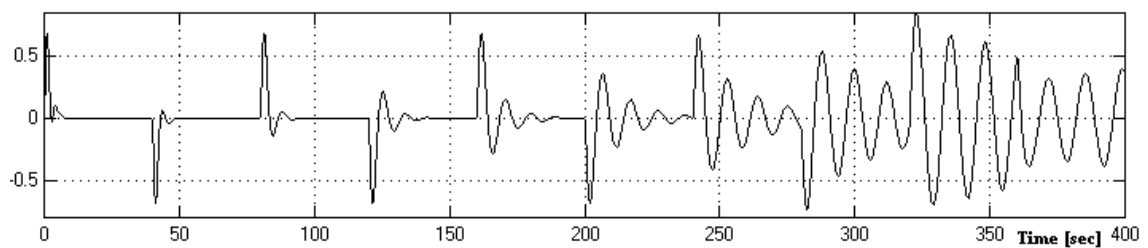
4.2.2. Vstupující porucha d_{ARMAX}



Obr. 4.8 Vývoj indexu regulátorů $i_{optimal}$

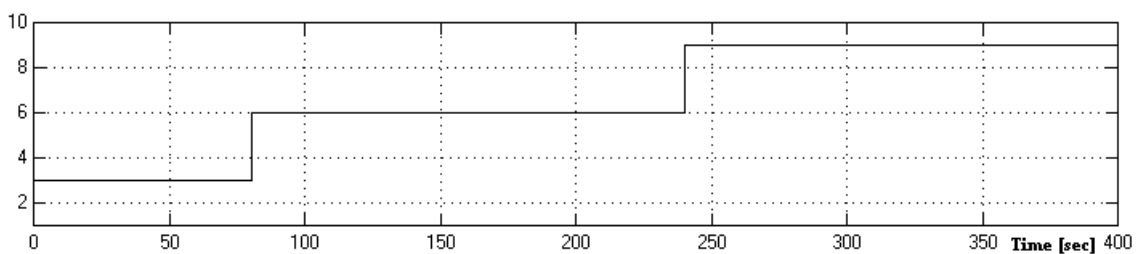


Obr. 4.9 Vývoj regulované veličiny s přepínáním

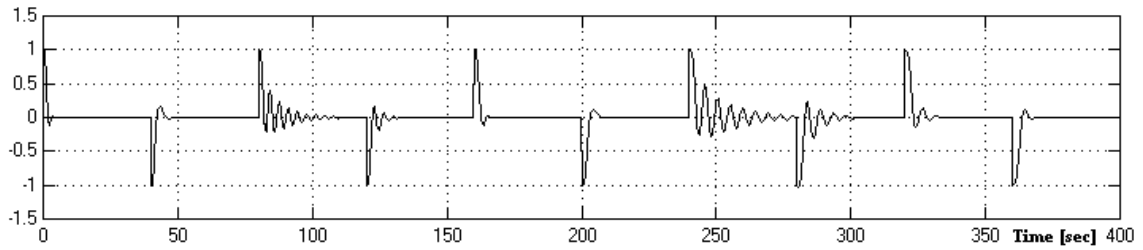


Obr. 4.10 Vývoj regulované veličiny bez přepínání

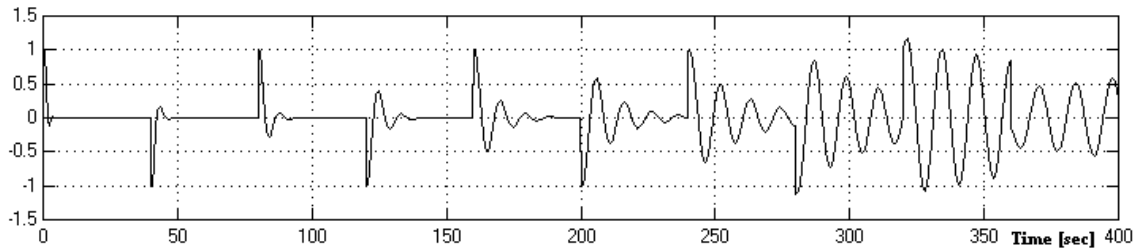
4.2.3. Vstupující porucha d_{OUT}



Obr. 4.11 Vývoj indexu regulátorů $i_{optimal}$



Obr. 4.12 Vývoj regulované veličiny s přepínáním



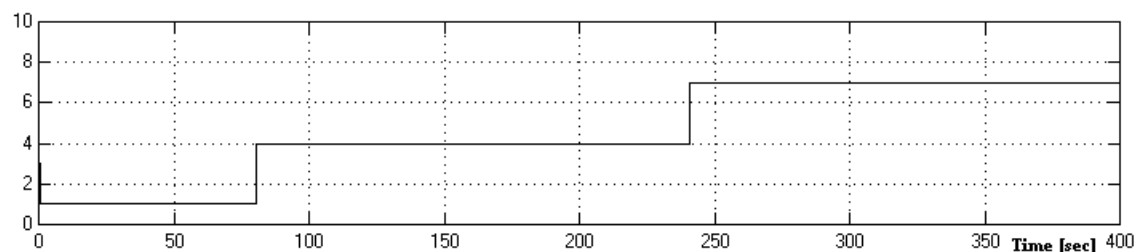
Obr. 4.13 Vývoj regulované veličiny bez přepínání

4.3. Spojitý stavový regulátor

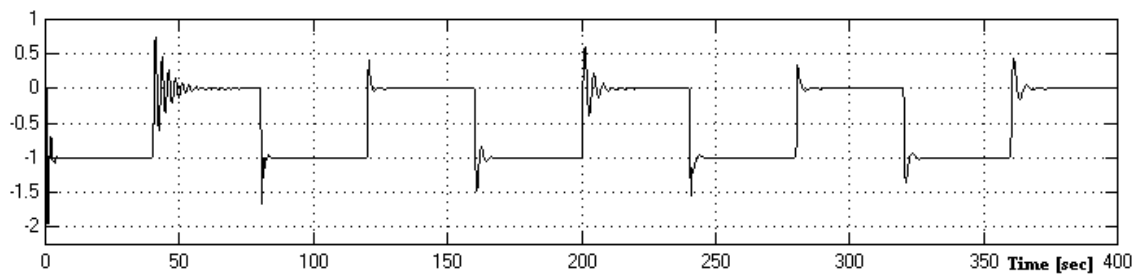
Následující grafy dokumentují funkci modelu na průběhu akční veličiny, regulované veličiny a vývoje indexu optimálních regulátorů při využití vektoru optimálních parametrů spojitého stavového regulátoru připojeného k diskrétnímu stavovému estimátoru pro tři provozní režimy při zapnutém a vypnutém přepínání.

4.3.1. Vstupující porucha d_{ARX}

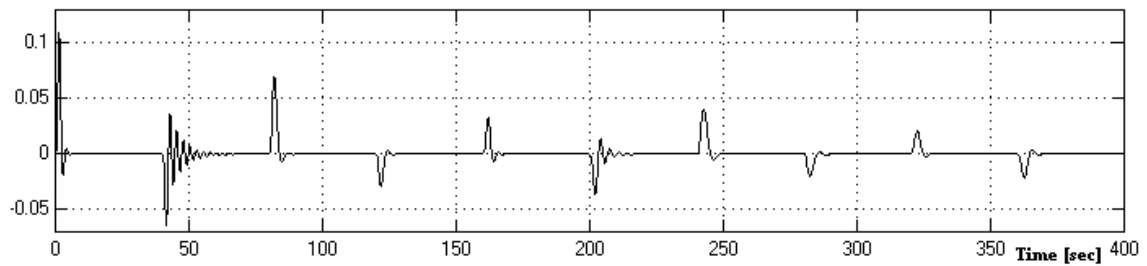
4.3.1.1. Zapnuté přepínání



Obr. 4.14 Vývoj indexu regulátorů $i_{optimal}$

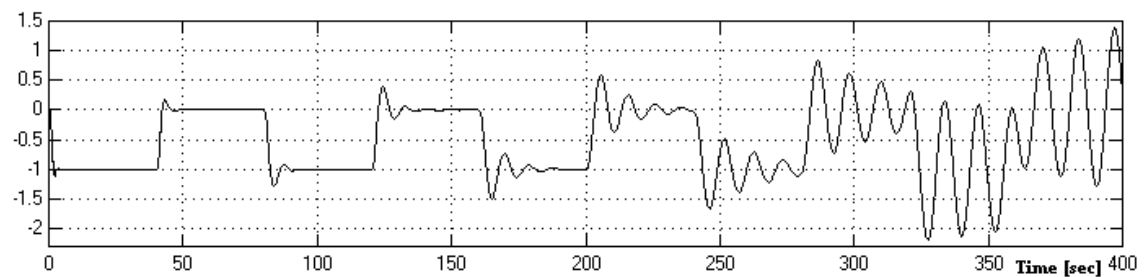


Obr. 4.15 Vývoj akční veličiny

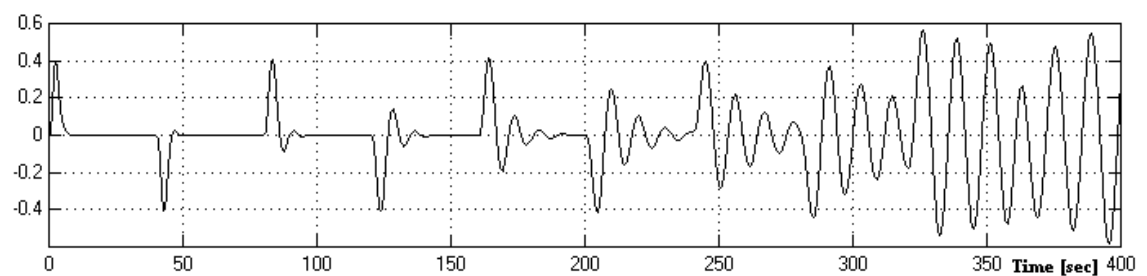


Obr. 4.16 Vývoj regulované veličiny

4.3.1.2. Vypnuté přepínání



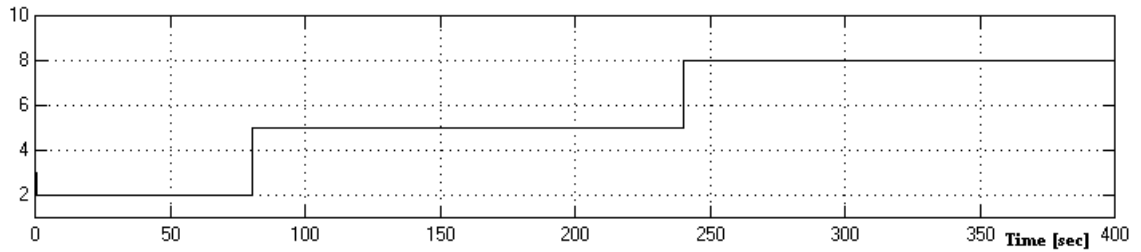
Obr. 4.17 Vývoj akční veličiny



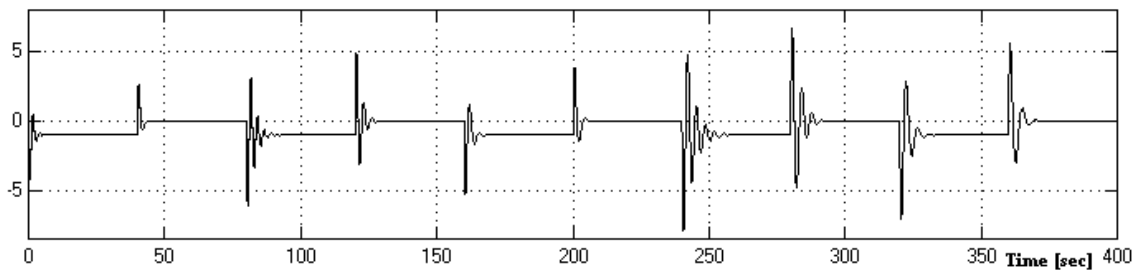
Obr. 4.18 Vývoj regulované veličiny

4.3.2. Vstupující porucha d_{ARMAX}

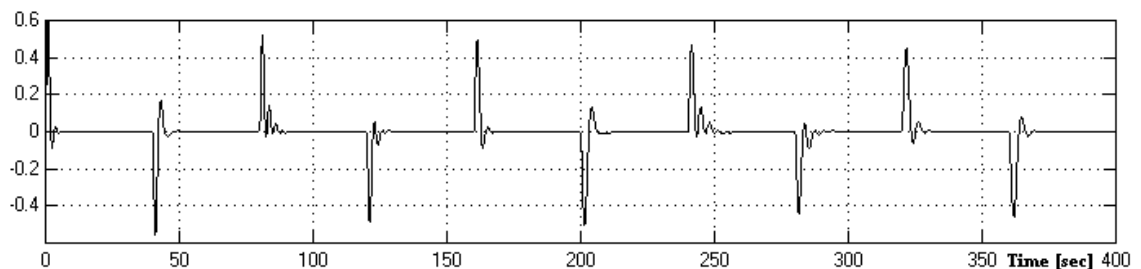
4.3.2.1. Zapnuté přepínání



Obr. 4.19 Vývoj indexu regulátorů $i_{optimal}$

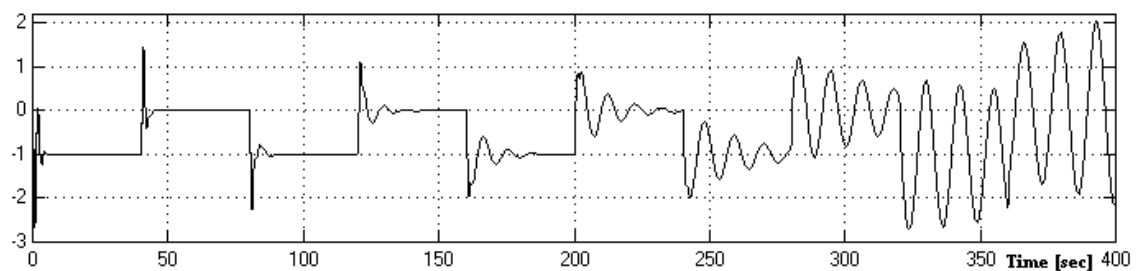


Obr. 4.20 Vývoj akční veličiny

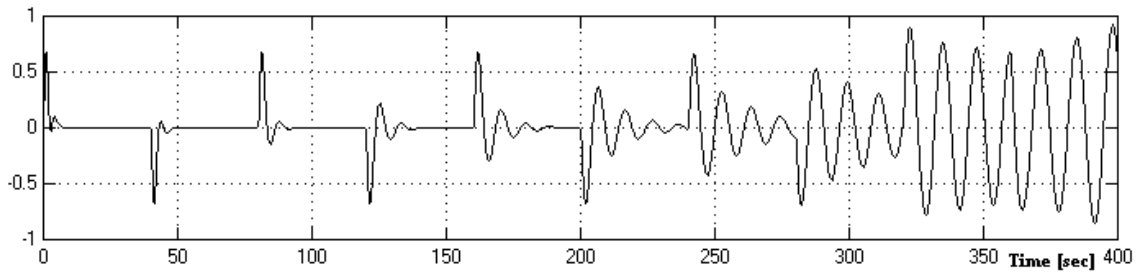


Obr. 4.21 Vývoj regulované veličiny

4.3.2.2. Vypnuté přepínání



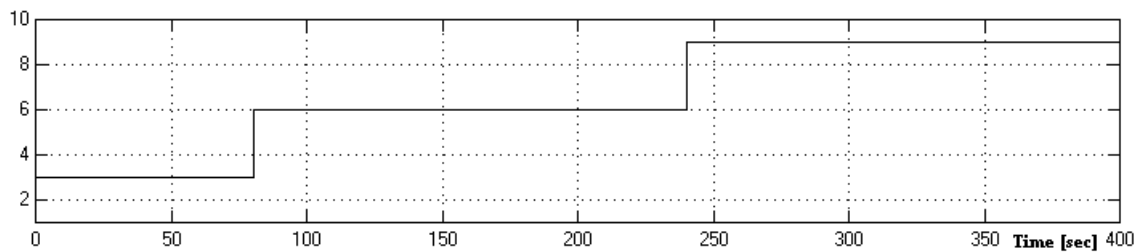
Obr. 4.22 Vývoj akční veličiny



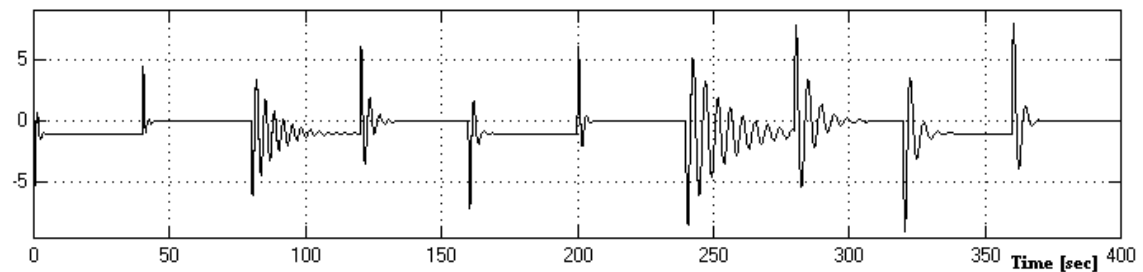
Obr. 4.23 Vývoj regulované veličiny

4.3.3. Vstupující porucha d_{OUT}

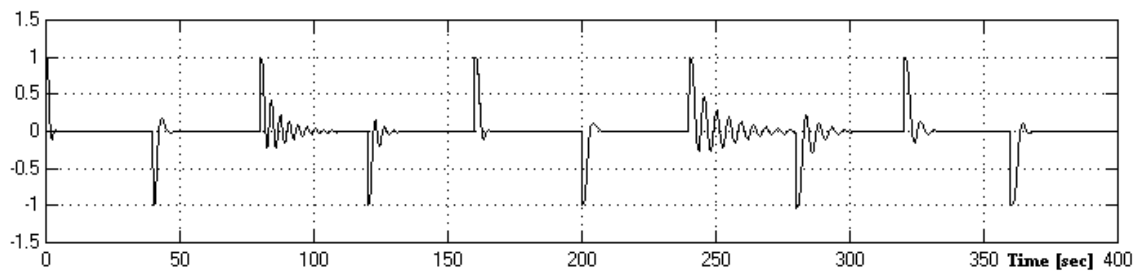
4.3.3.1. Zapnuté přepínání



Obr. 4.24 Vývoj indexu regulátorů $i_{optimal}$

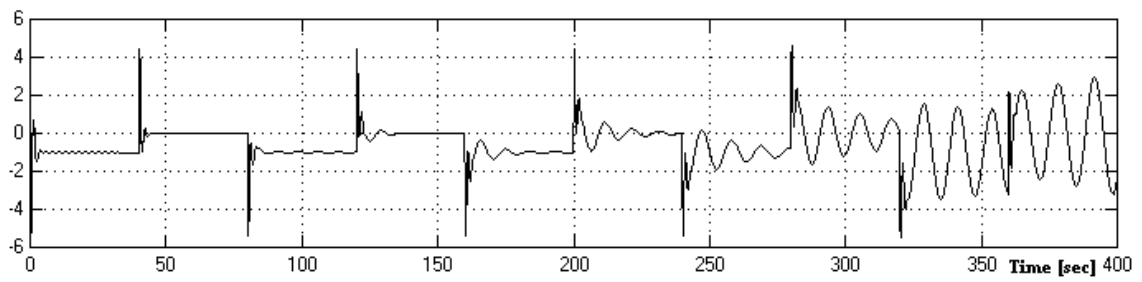


Obr. 4.25 Vývoj akční veličiny

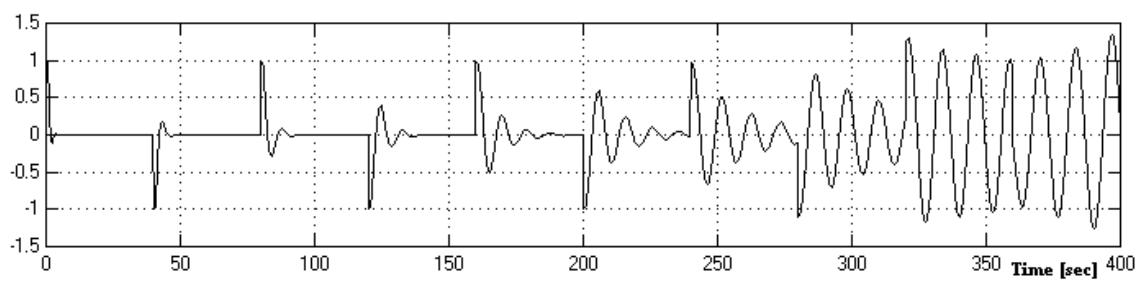


Obr. 4.26 Vývoj regulované veličiny

4.3.3.2. Vypnuté přepínání



Obr. 4.27 Vývoj akční veličiny



Obr. 4.28 Vývoj regulované veličiny

5. Závěr

Cílem diplomové práce byl návrh a ověření přepínacího algoritmu pro výběr optimálních spojitéch stavových regulátorů, na základě velikosti absolutních hodnot estimačních chyb přírůstkových diskrétních estimátorů. Návrh byl simulačně ověřen pro tři provozní režimy s měnicími se parametry soustavy.

Výsledný simulační model je navržen tak, aby bylo možné zadat jakýkoli řád regulované soustavy a podle potřeby měnit provozní režimy i parametry regulované soustavy.

Z výsledných simulací se potvrdil předpoklad, že regulační obvod pro dynamický systém s proměnnými parametry regulovaný předem naladěnými regulátory, mezi kterými přepínací algoritmus automaticky volí regulátor nejvíce se blížící k právě nastaveným parametrům regulované soustavy, vykazuje na zvoleném intervalu simulace požadované a stabilní regulační průběhy. Když do zpětné vazby připojíme regulátor s pevně nastavenými parametry (viz. kapitola 4.1.), dokáže tento regulátor pro libovolný provozní režim regulovat soustavu jen v úzkém pásmu okolo měnicího se koeficientu časové afinity, na který byl předem naladěný. Při větších změnách se výsledný regulační pochod podstatně zhoršuje a na konci zvoleného intervalu kmitá a může se stát i nestabilním.

Nahrazení diskrétních stavových regulátorů proměnné struktury spojitými, které zapojíme k diskrétním přírůstkovým estimátorům, nemá na přepínací algoritmus a výsledný regulační pochod pro zvolenou periodu vzorkování žádný vliv (viz. průběhy grafů v kapitolách 4.2. a 4.3.).

Jestliže zvyšujeme periodu vzorkování, dochází v důsledku použití diskrétního přírůstkového estimátoru v zapojení se spojitým nebo diskrétním stavovým regulátorem ke zhoršení výsledných regulačních pochodů. Proto se nabízí možnost aplikace spojitého přírůstkového estimátoru s danými korekčními vazbami, které jsou navrženy pro různé typy vstupujících poruch.

Seznam použité literatury

- [1] Strejc, V.: Stavová teorie lineárního diskrétního řízení. Academia Praha 1978.
- [2] Modrlák, O.: Základy analýzy a syntézy ve stavovém prostoru, Studijní materiál, TU Liberec.
- [3] Hanuš, B.: Spojité řízení s proměnnou strukturou, Studijní materiál, TU Liberec.
- [4] Kuo, C.B.: Automatic Control System. John Wiley & Sons, New York 1995.
- [5] Raven, F.H.: Automatic Control Engineering. McGraw-Hill, Inc., New York 1995.
- [6] Hanuš, B., Janeček, B.: Estimator of a digital controller. In 4th International workshop on "Electronics, Control, Measurement and Signals, ECMS'99", Liberec. Liberec: TU, 1999, p.55-58. ISBN 80-7083-339-4.
- [7] Hanuš, B., Janeček, B.: State controller with variable structure. In 4th International scientific-technical conference "Process Control 2000", Kouty nad Desnou, Pardubice: University of Pardubice, 2000, p.26. ISBN 80-7194-271-5.
- [8] Hanuš, B., Tůma, L.: The increment estimator for digital state controller. In 5th Workshop on "Electronics, Control, Measurement and Signals, ECMS'2001", Toulouse. Toulouse: Université Paul Sabatier, 2001, p.203-205. ISBN 80-7083-444-7.
- [9] Hanuš, B., Janeček, B., Tůma, L.: Control system with variable structure. In 5th International scientific-technical conference on "Process Control 2002", Kouty nad Desnou, Pardubice: University of Pardubice, 2002, p.81-92. ISBN 80-7149-452-1.

Přílohy

Příložený CD-ROM obsahuje navržený model zpětnovazebního regulačního obvodu, soubory potřebné ke spuštění simulace a text diplomové práce v *.pdf formátu.

Popis souborů:

<i>estimreg.mdl</i>	model zpětnovazebního regulačního obvodu
<i>nastav.m</i>	výpočet přenosů soustav, nastavení stavových estimátorů a regulátorů
<i>prepinac.m</i>	realizace přepínacího algoritmu
<i>soustava.m, porucha.m</i>	nastavení parametrů regulované soustavy během simulace