Vysoká škola strojní a textilní v Liberci

nositelka Řádu práce

Fakulta textilní

Obor 31 - 20 - 8

Katedra technické kybernetiky

ADAPTIVNÍ ŘÍZENÍ JEDNOROZMĚRNÉHO ARMAX MODELU A UPLATNĚNÍ PRO REGULACI HMOTNÉ NESTEJNOMĚRNOSTI VLÁKNA

Dana Sládková

Vedoucí práce: Ing. Libor Tůma
VŠST Liberec, KTK

KTK ASŘ TF - 112

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	49
Počet příloh	1
Počet obrázků	3

V Liberci dne 23.5.1986

Katedra: technické kybernetiky Školní rok: 1985/86

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

pro s. Danu Sládkovou

obor 31-20-8 ASŘ ve spotřebním průmyslu

Vedoucí katedry Vám ve smyslu nařízení vlády ČSSR č. 90/1980 Sb., o státních závěrečných zkouškách a státních rigorózních zkouškách, určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: Adaptivní řízení jednorozměrného ARMAX modelu a uplatnění pro regulaci hmotné nestejnoměrnosti vlákna

Zásady pro vypracování:

1. Zvládnout algebraickou metodu syntézy řízení.
2. Sestudovat algebraickou metodu identifikace uzavřeného ARMAX modelu.
3. Sestavit program spojení identifikace a syntézy řízení jednorozměrného ARMAX modelu.
4. Program ověřit na zvolených příkladech.
5. Posoudit možnost nasazení pro regulaci hmotné nestejnoměrnosti výsledného vlákenného útvaru z průtahového systému.

Rozsah grafických prací:

Rozsah průvodní zprávy: 40 - 50 stran

Seznam odborné literatury:

1/ Kučera,V.: Algebraická teorie diskrétního lineárního řízení. ACADEMIA Praha, 1978.

2/ Sawarogi,Y., Soeda,T., Nakamiro,T.: Classical Methods and Ti Series Estimation. Pergamon Press, 1981.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Libor Tůma

Datum zadání diplomové práce: 4.10.1985

Termín odevzdání diplomové práce: 23.5.1986

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
fakulta textilní
Hálkova 6
461 17 LIBEREC

Prof. Ing. Bořivoj Hanuš, DrSc.
Vedoucí katedry

Doc. Ing. Vladimír Moravec,
Děkan

V Liberci dne 30.9. 19 85

MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ

"Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury."

V Liberci dne 23. května 1986

Hladková

OBSAH

1. ÚVOD

K hlavním úkolům vědeckotechnického rozvoje, které byly stanoveny XVII. sjezdem KSČ, patří stále ve větší míře uplatňování automatizovaných systémů řízení, organizace celostátního automatizovaného systému shromažďování a zpracování informací, budování soustavy optimálního plánování a řízení národního hospodářství.

V současné době se věnuje velká pozornost otázkám řízení. Proces řízení výroby lze definovat jako plynulý cílevědomý sociálně ekonomický a organizačně technický proces, uskutečňovaný pomocí různých metod a technických prostředků v zájmu dosažení optimálních technickoekonomických výsledků. Zdokonalováním soustavy řízení na základě širokého uplatňování výpočetní techniky je prvořadým úkolem celostátního významu. Znamená to tedy vypracovat komplex ekonomickomatematických modelů, udávající kvantitativní, číselnou charakteristiku všech základních zákonitostí, vazeb a procesů v socialistickém národním hospodářství.

Teorie i praxe řízení stojí před nutností zvětšit kapacitu samotného řídícího systému. Jedinou cestou je zvyšovat produktivitu práce v oblasti řízení použitím nových technických prostředků, kterými jsou dnes elektronické počítače a na nich založené automatizované systémy řízení.

Existují dva základní typy systémů řízení, v nichž lze použít samočinných počítačů: systém řízení technologických procesů v širokém smyslu slova (např. řízení letadla, tavby rudy ve vysoké peci, barvení textilií) a druhý je systém organizačního řízení (řízení podniků, průmyslového objektu).

Technologické procesy jsou obvykle velmi složité, což vede ke složitému matematickému modelu. Takový model nelze pro syntézu algoritmu řízení použít a musí být proto zjednodušen, přičemž musí být zaručena shoda v chování původního a zjednodušeného modelu.

V praxi se obvykle vystačí s poměrně jednoduchými modely, pokud se jejich parametry určují přímo v pracovních podmínkách. Je tedy účelné se zabývat syntézou algoritmů, které jsou schopny akumulovat zkušenosti a využívat je ke zlepšování své činnosti. To je problém samočinně se nastavujících regulátorů a adaptivních systémů řízení.

Adaptivním systémem řízení nazýváme systém, kde na základě změny parametrů a struktury systémů, nebo změnou vstupního signálu generovaného na základě průběžné informace o vstupech a výstupech je možno dosáhnout optimálního stavu systému při neúplné nebo malé počáteční znalosti o systému, nebo při měnících se podmínkách činnosti systému.

Moje diplomová práce se zabývá adaptivním řízením soustavy, kterou popisujeme jako jednorozměrný ARMAX model a možností uplatnění v technologickém procesu. Konkrétně se jedná o uplatnění v textilním průmyslu při regulaci hmotné nestejnoměrnosti vlákna.

2. POPIS METODY NÁVRHU ADAPTIVNÍ REGULACE JEDNOPARAMETROVÉ SOUSTAVY

Návrh adaptivní regulace jednoparametrové soustavy v podobě, jak je předpokládán v této diplomové práci, vychází z teoretických prací, které řeší identifikaci systému a syntézu řízení diskrétního systému na základě algebraického přístupu. Jednoparametrovou soustavou se rozumí takový systém, který lze popsat diferenční rovnicí

$$y_n + a_1 y_{n-1} + \ldots + a_{NA} y_{n-NA} = b_0 u_{n-j} + b_1 u_{n-j-1} + \ldots + b_{NB} u_{n-NB-j} + c_0 d_n + c_1 d_{n-1} + \ldots + c_{NC} d_{n-NC} \qquad (1)$$

Označíme-li dále polynomy

$$A = 1 + a_1 s + a_2 s^2 + \ldots + a_{NA} s^{NA}$$
$$B = b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + \ldots + b_{NB} s^{NB}$$
$$C = c_0 + c_1 s + c_2 s^2 + \ldots + c_{NC} s^{NC}$$

kde s je komplexní proměnná chápána ve smyslu obrazu operátoru zpoždění.
Můžeme rovnici (1) napsat ve tvaru

$$A y = s^j B u + C d \qquad (2)$$

kde y - je posloupnost pořadnic výstupní veličiny systému, o které předpokládáme, že je stacionární a ergodická

u - je posloupnost pořadnic vstupní veličiny systému

d - je posloupnost nekorelovaných náhodných veličin (bílý šum), pro něž $E(d_n) = 0 \quad E(d_n^2) = 1$

j - dopravní zpoždění systému

Rovnici (2) nazýváme popisem ARMAX modelu.

Dále uvažujeme, že soustava je regulována regulátorem, který není optimální, který známe a který reguluje vstup náhodné poruchy d.

Pro popis regulátoru volíme diferenční rovnici

$$q_0 u_n + q_1 u_{n-1} + \ldots + q_{NP} u_{n-NP} = p_0 y_n + p_1 y_{n-1} + \ldots + p_{NP} y_{n-NP}$$

kterou zavedením polynomů P, Q zapíšeme ve tvaru

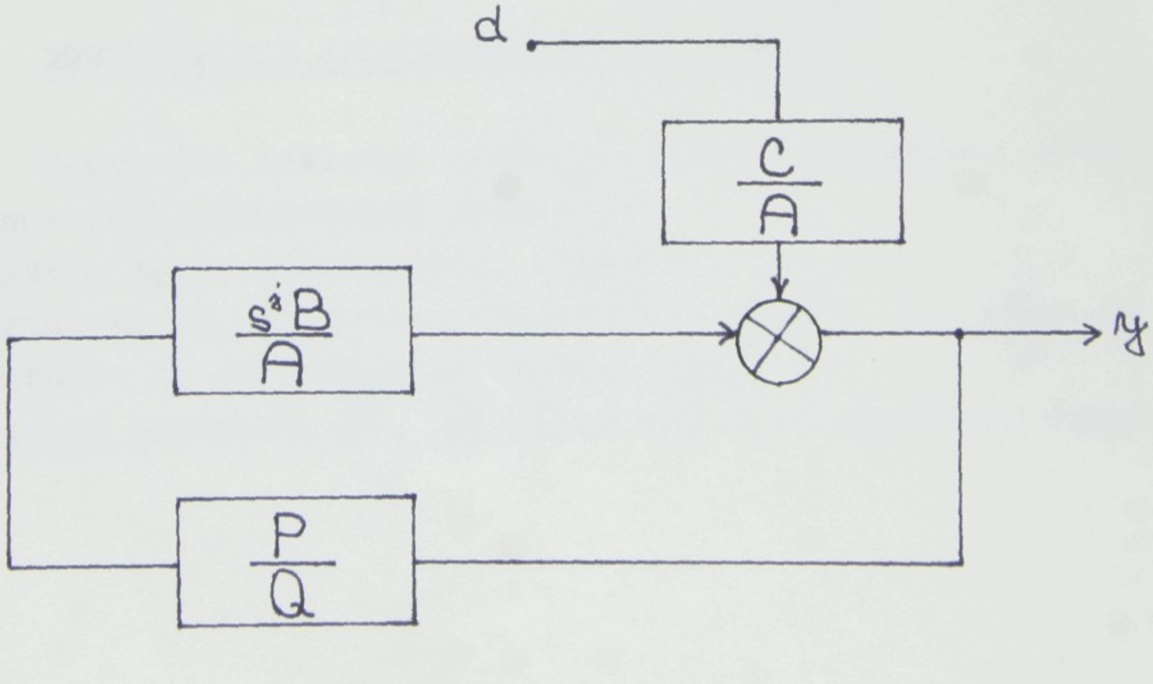
$$Q u = P y \qquad (3)$$

Dosazením (3) do (2) dostáváme

$$(AQ - s^j BP) \cdot y = CQ \cdot d \qquad (4)$$

tj. obrazový zápis diferenční rovnice zpětnovazebné regulační smyčky jako závislost výstupní veličiny y a náhodné poruchy d (s vlastností bílého šumu) vstupující do soustavy.

Zápis rovnice (4) můžeme blokově znázornit:



Úkolem je nyní určit takový zpětnovazební regulátor, tj. určit koeficienty polynomů P, Q v rovnici (3), aby regulační proces byl optimální z hlediska minima kvadratického kriteria

$$J = \sum_{i=0}^{\infty} y_i^2 + \varkappa \sum_{i=0}^{\infty} u_i^2 \tag{5}$$

kde konstanta $\varkappa$ je tzv. penalizace (váha) akční veličiny. Tento úkol můžeme rozdělit na dva samostatné celky:

a) identifikace systému ARMAX modelem, přičemž stupně polynomů A, B, C v rovnici (2) jsou apriorně známé a úkolem je stanovit hodnoty jednotlivých koeficientů těchto polynomů, při známém zapojení zpětnovazevního regulátoru popsaného rovnicí (3) a za předpokladu, že výstup y je stacionární a ergodický.

b) návrh syntézy řízení pro získaný ARMAX model tak, aby kriterium (5) bylo minimální, tj. určit stupně a optimální hodnoty koeficientů polynomů P, Q v rovnici (3).

Tyto dílčí úkoly byly samostatně řešeny a budou dále i samostatně popisovány.

2.1. IDENTIFIKACE JEDNOPARAMETROVÉ SOUSTAVY

Zopakujme základní předpoklady pro uvažovanou identifikaci jednoparametrové soustavy:

- výstup y je stacionární, ergodický
- vstup u je dán známou diferenční rovnicí $u = \frac{P}{Q} y$
- porucha d má charakter bílého šumu
- stupně polynomů A, B, C v (2) jsou apriorně známé.

Rovnici (4) můžeme zapsat ve tvaru

$$X \cdot y = W \cdot d \qquad (6)$$

kde zřejmě

$$X = AQ - s^{\dot{k}} BP \qquad (7)$$

$$W = CQ \qquad (8)$$

Řešíme-li však diofantickou rovnici

$$RQ - S s^{\dot{k}} P = 1 \qquad (9)$$

pro neznámé polynomy S , R dostáváme hledané polynomy

$$A = R \cdot X \qquad\qquad B = S \cdot X$$

z rovnic (9) a (7).

Při známých polynomech P , Q se pak úloha identifikace systému redukuje na úlohu identifikace přenosu - diferenční rovnice zpětnovazebné regulační smyčky (6). Hledáme tedy hodnoty koeficientů polynomů X , W , přičemž stupně těchto polynomů jsou známé (dány stupni polynomů A , B , C , P , Q a zpožděním $\dot{k}$) z rovnic (7), (8). Označme NX - stupeň polynomu X , NW - stupeň polynomu W . Konečná identifikace ARMAX modelem je pak řešení rovnic (7), (8).

Pozn.: V případě známého C je identifikaci X možno řešit např. metodou maximální věrohodnosti (aposteriorní rozdělení vektoru koeficientů X je normální). Při neznámém C vzniká složitost, která se projevuje v tom, že aposteriorní simultánní rozdělení vektorů X , C není normální.

Pro další popis zapišme rovnici (6) v diferenčním normovaném tvaru

$$y_n + x_1 y_{n-1} + x_2 y_{n-2} + \dots + x_{NX} y_{n-NX} = \qquad (10)$$
$$= w_0 d_n + w_1 d_{n-1} + \dots + w_{NW} d_{n-NW}$$

Algoritmus samotné identifikace rovnice (10) je řešen metodou korelační funkce (viz./1/) a pomocí polynomiální algebry.

Zaveďme následující označení:

k_i : korelační funkce výstupního signálu nebo-li $k_i = E\, y_{n+i}\, y_n$

b_i : vzájemná korelační funkce výstupního signálu y_{n+i} a bílého šumu d_n tj. $b_i = E\, y_{n+i} \cdot d_n$ (zřejmě $b_i = 0$ pro $i < 0$)

H_{K1}^{K2} : je-li H obecně racionální funkce a zapíšeme-li Laurentův rozvoj v okolí nuly jako posloupnost ve tvaru $H = \sum_{i=-\infty}^{\infty} h_i \cdot s^i$ pak H_{K1}^{K2} je $h_{K1} s^{K1} + h_{K1+1} s^{K1+1} + \dots + h_{K2} s^{K2}$ a tedy $\frac{1}{s^{K1}} H_{K1}^{K2}$ má tvar $h_{K1} + h_{K1+1} s + \dots + h_{K2} s^{K2-K1}$

$\bar{G}$: $G(1/s)$

Dále proveďme následující operace:

Rovnici (10) postupně vynásobíme hodnotami $y_n, y_{n-1}, \dots, y_{n-NX-NW}, d_n, d_{n-1}, \dots, d_{n-NW}$ a provedeme operaci E (střední hodnota). Vzhledem k tomu, že d je bílý šum dostaneme:

$$k_0 + x_1 k_{-1} + x_2 k_{-2} + \dots + k_{-NX} x_{NX} = w_0 b_0 + w_1 b_1 + \dots + w_{NW} b_{NW}$$

(10.1)

$$k_1 + x_1 k_0 + x_2 k_{-1} + \dots + x_{NX} k_{-NW+1} = w_1 b_1 + \dots + w_{NW} b_{NW}$$
$$\vdots \qquad\qquad \vdots \qquad\qquad \vdots$$
$$k_{NW} + x_1 k_{NW-1} + x_2 k_{NW-2} + \dots + x_{NX} k_{NW-NX} = w_{NW} b$$

$$k_{NW+1} + x_1 k_{NW} + \dots + x_{NX} k_{NW-NX+1} = 0$$
$$\vdots$$
$$k_{NW+NX} + x_1 k_{NW+NX+1} + \dots + x_{NX} k_{NW} = 0 \qquad (10.2)$$

pro $NW \leq NX$

$$b_0 = w_0$$
$$b_1 + x_1 b_0 = w_1 \qquad (10.3)$$
$$\vdots \qquad \ddots$$
$$b_{NW} + x_1 b_{NW-1} + \dots + x_{NW} b_0 = w_{NW}$$

pro $NW > NX$ je systém rovnic (10.3) ve tvaru:

$$b_0 = w_0$$
$$b_1 + x_1 b_0 = w_1$$
$$\vdots \qquad \ddots$$
$$b_{NX} + x_1 b_{NX-1} + \dots + x_{NX} b_0 = w_{NX}$$
$$b_{NX+1} + x_1 b_{NX} + \dots + x_{NX} b_1 = w_{NX+1}$$
$$\vdots \qquad \ddots$$
$$b_{NW} + x_1 b_{NW-1} + \dots + x_{NX} b_{NW-NX} = w_{NW}$$

Systém rovnic (10.2) odpovídá vlastně tzv. modifikovaným Yule-Walkerovým rovnicím a lze jej řešit jako soustavu lineárních rovnic pro neznámé x_1 až x_{NX}. Při pevné hodnotě $x_0 = 1$ tak dostáváme identifikovaný polynom X - označme

$$\hat{X} = 1 + \hat{x}_1 s + \ldots + \hat{x}_{NX} s^{NX}$$

Systém rovnic (10.1)a (10.3) vede na soustavu kvadratických rovnic a pro jejich řešení využijeme možností polynomiální algebry, např. rovnice (10.1) můžeme napsat ve tvaru

$$(W \cdot \bar{B})_0^{NW} = \frac{1}{s^{NX}} \left(X \cdot K \right)_{NX}^{NX+NW} \qquad (11)$$

kde $B = b_0 + b_1 s + \ldots + b_{NW} s^{NW}$

$$K = k_{-NX} + k_{1-NX} s + \ldots + k_0 s^{NX} + k_1 s^{NX+1} + \ldots + k_{NX+NW} s^{2 \cdot NX + NW}$$

upravíme-li rovnici (11) tak, že na levé i pravé straně rovnice dostaneme posloupnost mocnin s, pak rovnosti koeficientů pro stejné mocniny s, tj. s^0 až s^{NW} dávají právě systém rovnic(10.1).

Obdobně systém rovnic (10.3) zapíšeme ve tvaru

$$(X \cdot B)_0^{NW} = W$$

a odtud

$$B = \left(\frac{W}{X} \right)_0^{NW} \qquad (12)$$

Ukažme platnost tohoto tvrzení:

Zavedeme-li dále libovolnou řadu T, který nemá záporné mocniny s , pak $\quad B = \frac{W}{X} - s^{NW+1} \cdot T$

dosadíme-li totiž do (12) pak

$$\left[X\left(\frac{W}{X} - s^{NW} T\right) \right]_0^{NW} = W_0^{NW} = W$$ čímž je tvrzení dokázáno

Dosadíme-li dále (12) do (11), dostaneme

$$\left[W\left(\frac{\overline{W}}{X}\right)_0^{NW} \right]_0^{NW} = G \qquad (13)$$

kde

$$G = \frac{1}{s^{NX}} \left(X \cdot K\right)_{NX}^{NX+NW}$$

a odtud úpravou rovnice (13)

$$\left[\overline{W} \left(\frac{W}{X}\right)_0^{NW} \right]_{-NW}^0 = \overline{G}_{-NW}^0$$

a dále tedy

$$\left[\overline{W} \left(\frac{W}{X} - s^{NW+1} \cdot T\right) \right]_{-NW}^0 = \left(\frac{\overline{W} W}{X}\right)_{-NW}^0$$

Zavedením polynomu T_1 stejných vlastností jako polynom T

pak $\quad \overline{W} W = \overline{G} X + s\, T_1 X$

a tedy

$$\left(\overline{W} W\right)_{-NW}^0 = \left(\overline{G} X\right)_{-NW}^0$$

Vynásobíme-li tuto rovnici členem s^{NW}, dostaneme

$$\left(s^{NW}\, \overline{W} W\right)_0^{NW} = \left(s^{NW}\, \overline{G} X\right)_0^{NW} \qquad (14)$$

Zřejmě je-li $\overline{W} = W(1/s)$, pak $s^{NW}\, \overline{W} = w_{NW} + w_{NW-1} s + \ldots + w_0 s^{NW}$,

označíme-li např. $\widetilde{H} = s^{NH}\, \overline{H}$, kde NH je stupeň polynomu H , pak (14) píšeme ve tvaru

$$(\tilde{W}W)_0^{NW} = (\tilde{G}X)_0^{NW} \tag{15}$$

Dosadíme-li za polynom X řešení rovnic (10.2) $\hat{X}$ a za G pravou stranu rovnice (11) - také s dosazením $\hat{X}$, získáme reflexí pravé strany rovnice (15) "stabilní část" symetrického polynomu $\tilde{W}W$.

Má-li polynom W nestabilní kořeny, označíme-li součin nestabilních kořenových dvojčlenů jako ^{-}W a stabilních jako ^{+}W, $(W = {}^{-}W \cdot {}^{+}W)$, pak $\tilde{W}W = {}^{+}\tilde{W} \cdot {}^{-}\tilde{W} \cdot {}^{+}W \cdot {}^{-}W$ a "stabilní část" tohoto výrazu je zřejmě $^{+}W \cdot {}^{-}\tilde{W}$.

Konečným úkolem identifikace však je určení polynomů A, B, C. Polynomy A, B získáme pomocí řešení diofantické rovnice (9) a rovnice (7). Řešení rovnice (9) je však nekonečně mnoho, proto vybíráme to pro něž platí $\partial R < \partial(s^1 P)$ a $\partial S < \partial Q$ a které je jediné (symbol ∂ značí stupeň polynomu).

Označíme-li $\hat{R}$ a $\hat{S}$ jako hledané jediné řešení, pak je lze vyjádřit vztahy

$$\frac{R}{s^1 P} = T + \frac{\hat{R}}{s^1 P} \quad \text{a} \quad \frac{S}{Q} = T + \frac{\hat{S}}{Q}$$

kde T je polynom bez záporných mocnin s.

Hledané polynomy A, B pak dostaneme z rovnice (7) dosazením $\hat{X}$

$$A = \hat{X} \cdot \hat{R} \quad \text{a} \quad B = \hat{X} \cdot \hat{S}$$

Polynom C získáme následujícím postupem:

je-li $W = CQ$ (viz.(6)), pak $\tilde{W}W = \tilde{C}\tilde{Q}CQ = \tilde{C}C\tilde{Q}Q$

dosazením a úpravami v rovnici (15) pak dostaneme výraz

$$(\tilde{C}C)_0^{NC} = \left[\frac{(\tilde{G}X)_0^{NW}}{\tilde{Q}Q} \right]_0^{NC} \qquad (16)$$

kde pravá strana rovnice je polovinou symetrického polynomu $\tilde{C}C$ a hledaný polynom C získáme reflexí $\tilde{C}C$.

2.2. NÁVRH SYNTÉZY ŘÍZENÍ

Řešení syntézy řízení pro identifikovaný ARMAX model vychází z výzkumné zprávy KTK /3/. Použitý matematický aparát - algebraické řešení optimálního řízení demonstrované na obecné algebraické struktuře - je podrobněji popsán v práci /3/ a /4/. Ukažme zde tedy pouze hlavní odvozené vztahy, popř. jejich úpravu pro uvažované použití.

Úkolem je nalézt takový zpětnovazebný regulátor v diferenčním tvaru

$$q_0 u_n + q u_{n-1} + \dots + q_{NQ} u_{n-NQ} = p_0 y_n + \dots + p_{NP} y_{n-NP}$$

aby kvadratické kriterium regulačního pochodu bylo minimální.

$$\min J = \sum_{i=0}^{\infty} y_i^2 + \mathcal{H} \sum_{i=0}^{\infty} u_i^2$$

Vztah mezi výstupem y a vstupem u je dán diferenční rovnicí, kterou můžeme zapsat v obrazovém tvaru

$$Ay = s^j Bu + Cd$$

a kde podobně můžeme vyjádřit $u = \frac{P}{Q} y$

Obecně můžeme rovnici ARMAX modelu rozepsat na tvar

$$A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot y = s^j \cdot B_1 \cdot B_2 \cdot A_3 \cdot u + Cd$$

kde polynomy A_1, B_1 obsahují pouze stabilní kořenové činitele, polynomy A_2, A_3, B_2 pouze nestabilní kořenové činitele polynomu A resp. B, přičemž polynom A_3 je obsažen zároveň v polynomu A a B.
Pro další popis uvažujeme jen ty systémy, kdy $A_3 = 1$ a tedy rovnici

$$A_1 A_2 \cdot y = s^{\dot{s}} B_1 B_2 \cdot u + C d \tag{17}$$

dosadíme-li obecně za $u = R y$, kde R je racionální funkce proměnné s, dostáváme úpravami (17) výraz

$$y = \frac{1}{A_2 - \frac{s^{\dot{s}} B_1 B_2 R}{A_1}} \cdot \frac{C}{A_1} \tag{18}$$

Nechť Q je racionální funkce proměnné s. Dalším úkolem bude stanovit vztah $Q = Q(R)$, $R = R(Q)$ tak, aby R bylo fyzikálně realizovatelné pro každé stabilní Q a aby y bylo lineární vzhledem k Q.
Přenos Q získáme takto:
Řešíme diofantickou rovnici pro neznámé libovolné mnohočleny F, G.

$$F A_2 + G s^{\dot{s}} B_2 = 1 \tag{19}$$

potom

$$y = (F + s^{\dot{s}} B_2 Q) \frac{C}{A_1} \tag{20}$$

kde

$$Q = \frac{G + F \frac{B_1}{A_1} R}{A_2 - \frac{A_1 B_2}{A_1} s^{\dot{s}} R} = Q(R) \tag{21}$$

odtud

$$R = \frac{Q A_2 - G}{F + s^{\dot{s}} Q B_2} \cdot \frac{A_1}{B_1} = R(Q) \tag{22}$$

Nyní můžeme psát podle (20) a $u = Ry$ s dosazením (22)

$$J = \left\| \frac{C}{A_1} (F + s^j B_2 Q) \right\|^2 + \varkappa \left\| \frac{C}{B_1} (QA_2 - G) \right\|^2 \qquad (23)$$

kde F, G je řešení rovnice (19).

Označme dále zápisem $\langle X, Y \rangle$ skalární součin racionálních funkcí X, Y definovaný:

$$\langle X, Y \rangle = \frac{1}{2\pi i} \int_C X(s) \cdot Y(1/s) \frac{ds}{s}$$

kde C - je jednotková kružnice

pak rovnici (23) můžeme vyjádřit ve tvaru

$$J = \left\langle \frac{CB_2}{A_1} \cdot Q, \frac{CB_2}{A_1} \cdot Q \right\rangle + \varkappa \left\langle \frac{CA_2}{B_1} \cdot Q, \frac{CA_2}{B_1} \cdot Q \right\rangle +$$

$$+ 2 \left\langle \frac{CF}{A_1}, \frac{s^j CB_2}{A_1} \cdot Q \right\rangle - 2\varkappa \left\langle \frac{CG}{B_1}, \frac{CA_2}{B_1} \cdot Q \right\rangle +$$

$$+ \left\langle \frac{CF}{A_1}, \frac{CF}{A_1} \right\rangle + \varkappa \left\langle \frac{CG}{B_1}, \frac{CG}{B_1} \right\rangle =$$

$$= \langle LQ, LQ \rangle + 2 \langle LQ, M \rangle + \langle K, K \rangle$$

kde L je dáno faktorizací

$$L\bar{L} = C\bar{C} \, \frac{B\bar{B} + \varkappa A\bar{A}}{A_1\bar{A}_1 \, B_1\bar{B}_1}$$

a tedy $L = \dfrac{CP}{A_1 B_1}$, kde P získáme reflexí

$$P\bar{P} = B\bar{B} + \varkappa A\bar{A}$$

dále

$$M = \frac{C\bar{C}}{\bar{L}} \cdot \frac{FB_1\bar{B} - \varkappa s^j GA_1\bar{A}}{s^j A_1\bar{A} \cdot B_1\bar{B}}$$

$$K\bar{K} = C\bar{C} \cdot \frac{F\bar{F}B_1\bar{B}_1 + \varkappa G\bar{G}A_1\bar{A}_1}{A_1\bar{A}_1 \, B_1\bar{B}_1}$$

a tedy pro optimální Q dostáváme $Q = -\frac{1}{L} M_+$

kde M_+ obsahuje stabilní členy součtového rozkladu racionální funkce M.

Zapíšeme-li $M = M_1 - M_2$; $M_1 = \frac{CF\bar{B}}{s^j \bar{P} A_1}$; $M_2 = \varkappa \frac{CG\bar{A}}{\bar{P} B_1}$

pak $M_+ = M_{1+} - M_{2+}$

a tedy $$M_{1+} = \frac{CF\bar{B}}{s^j \bar{P} A_1} + \left(\frac{H_1}{s^j \bar{P} A_1} \right)_+$$

součtový rozklad H_1 řešíme jako diofantickou rovnici

$R_1 s^j \bar{P} + S_1 A_1 = H_1$ pro neznámé R, S a pro $\partial R < \partial A_1$

se stabilním členem $\frac{R_1}{A_1} = \left(\frac{H_1}{s^j \bar{P} A_1} \right)_+$

obdobně

$M_{2+} = \varkappa \left(\frac{CG\bar{A}}{\bar{P} B_1} + \left(\frac{H_2}{\bar{P} B_1} \right)_+ \right)$ pro $R_2 \bar{P} + S_2 B_1 = H_2$

takže

$$Q = -\frac{1}{L} M_+ = -\frac{A_1 B_1}{CP} \left(\frac{CF\bar{B}}{s^j \bar{P} A_1} + \frac{R_1}{A_1} - \varkappa \frac{CG\bar{A}}{\bar{P} B_1} - \varkappa \frac{R_2}{B_1} \right) = \frac{N}{CP}$$

a dosazením do (22) dostáváme výsledný vztah pro R

$$R = \frac{NA_2 - GCP}{s^j NB_2 + FCP} \cdot \frac{A_1}{B_1}$$

přičemž výraz $(NA_2 - GCP)$ je dělitelný B_1

a $(s^j NB_2 + FCP)$ je dělitelný A_1

Pozn.: Jestliže pro reflexi výrazu $B\bar{B} + \varkappa A\bar{A}$ doplníme polynomy A, B na společný stupeň NP, kde $NP = \max(NA, NB)$, pak

$$N = -A_1 B_1 \left(\frac{C F \tilde{B}}{s^{2} \tilde{P} A_1} + \frac{R_1}{A_1} - \varkappa \frac{C G \tilde{A}}{\tilde{P} B_1} - \varkappa \frac{R_2}{B_1} \right)$$

3. SESTAVENÍ ALGORITMU A PROGRAMU ADAPTIVNÍ REGULACE

Na základě odvozených vztahů v kapitole 2. je sestaven algoritmus úlohy adaptivního řízení jednoparametrové soustavy se stacionárním, ergodickým výstupem. Algoritmus má sloužit jako výchozí pro sestavení programu v některém z vyšších programovacích jazyků. Proto je členěn do dílčích algoritmů, které pak jsou strukturově řetězeny v zastřešujících algoritmech. Předkládaná diplomová práce zahrnuje realizaci těchto algoritmů v programovacím jazyce FORTRAN IV. Pro přehlednost jsou přepisy jednotlivých dílčích algoritmů do programu uváděny současně s popisem algoritmů. Popis použití výsledného programu adaptivní regulace a příklad výpočtu jsou pak uvedeny v samostatné kapitole.

Algoritmus úlohy adaptivní regulace rozdělme do následujících dílčích algoritmů:

a) Zastřešující - řídící algoritmus
b) Algoritmus identifikace soustavy
c) Algoritmus návrhu řízení
d) Dílčí algoritmy pro identifikaci a návrh řízení regulované soustavy.

Pojmem "zastřešující algoritmus" máme na mysli takový program, který řeší připojení adaptivního regulátoru k regulované soustavě a zajišťuje posloupnost řešení algoritmů identifikace a regulace soustavy. Tento program je nutno řešit samostatně dle možností pro připojení ke konkrétní technologické soustavě a dle typu použitého programovacího jazyku. Aby bylo možno algoritmus adaptivní regulace odzkoušet na zvoleném matematickém modelu zvolené regulované soustavy, je tento "zastřešující algoritmus" nahrazen v diplomové práci programem, který zajišťuje vstup základních údajů (popis matematického modelu a apriorní parametry adaptivní regulace), simulaci regulačního pochodu a volání výpočtu identifikace a návrhu řízení. Část programu pro výpočet simulace regulačního pochodu je řešena jako samostatný podprogram (popis podprogramu v části 3.3.), což umožňuje nahradit příkaz volání této procedury příslušným příkazem pro styk řídícího počítače s jednotkou styku s prostředím (např. řešením zapojení mikropočítače a A/Č, Č/A převodníků) a tedy použitím sestaveného programu v jazyce FORTRAN.

Algoritmus řídící výpočet na zvoleném matematickém modelu pak můžeme zapsat jako posloupnost následujících úkonů (při popisu všech následujících algoritmů je použito symboliky, která odpovídá významu symbolů v kapitole 2.).

1) Sestavení matematického modelu ve tvaru

$$X \cdot y = W \cdot d$$

tj. určení koeficientu polynomů X a W ze známých polynomů A, B, C, P, Q (viz. (7), (8)) a zpoždění j .

2) Simulace regulačního pochodu - řešení diferenční rovnice

$$y_k = -x_1 y_{k-1} - \ldots - x_{NX} y_{k-NX} + w_0 d_k + \ldots + w_{NW} d_{k-NW}$$

pro $k = 0, \ldots, N$

kde N je zvolený počet kroků identifikace, tj. počet pořadnic výstupu y pro výpočet identifikace.

- výpočet hodnot korelační funkce k_i, přičemž střední hodnota $E\, y_{m+i} \cdot y_m$ je nahrazena odhadem

$$\frac{1}{N-i} \sum_{k=0}^{N-i} y_{k+i} \cdot y_k \qquad \text{pro } i = 0, \ldots, N1$$

kde $N1$ je dáno výrazem: $N1 = NX + NW + 1$

3) Výpočet identifikace systému ve tvaru

$$X \cdot y = W \cdot d$$

z hodnot korelační funkce k_i a při známém zpětnovazebném regulátoru $u = \frac{P}{Q} y$

4) Návrh nového řízení soustavy

$$u = \frac{P}{Q} y$$

ze známého popisu soustavy $A y = s^1 B u + C d$

kde A, B, C je implicitně dáno polynomy X, W a známým starým řízením P, Q.

5) Určení přenosu zpětnovazebné regulační smyčky

$$X \cdot y = W \cdot d$$

kde pro výpočet X, W jsou A, B, C dány matematickým modelem a P, Q z bodu 4).

Algoritmus pokračuje bodem 2).

3.1. ALGORITMUS IDENTIFIKACE SOUSTAVY

Pro identifikaci soustavy s výstupem y a vstupem u, který je dán vztahem $Qu = Py$, kde P, Q jsou známé mnohočleny, je řešena při popisu soustavy ARMAX modelem úloha identifikace koeficientů polynomů X, W ze vztahu

$$X \cdot y = W \cdot d$$

(viz. kapitola 2.), přičemž stupně NX, NW polynomů X, W jsou dány a je znám přenos zpětnovazebného regulátoru.

Algoritmus řeší identifikaci na základě korelační funkce k_i, jejíž hodnoty jsou odhadnuty jako hodnota skalárního součinu vektoru hodnot y a "posunutého" vektoru $s^i y$. Z toho zřejmě plyne, že

$$k_{-i} = k_i$$

Řešení soustavy rovnic (10.2) pak zapíšeme ve tvaru $A \cdot x = q$ a úpravou na čtverec dostaneme řešení:

$$x = (A^T A)^{-1} \cdot A^T \cdot q$$

s chybou ε

Pozn.: Pro zpřesnění výpočtu (snížení chyby ε) je vhodné volit systém rovnic (10.2) jako "předurčený systém" s přidáním rovnic v počtu NL a tvaru

$$\begin{array}{ccccccc} k_{NW+NX+1} & + & x_1 k_{NW+NX} & + \ldots + & x_{NX} k_{NW+1} & = & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ k_{NW+NX+NL} & + & x_1 k_{NW+NX-1+NL} & + \ldots + & x_{NX} k_{NW+NL} & = & 0 \end{array}$$

Na základě ověřovacích výpočtů je pro další algoritmus voleno $NL = 1$ a tedy rozměr vektoru $q\,(NX+1)$ a matice $A\,(NX+1, NX)$.

Tedy vektor
$$x^T = (x_1, x_2, \ldots, x_{NX})$$
vektor
$$q^T = (-k_{NW+1}, -k_{NW+2}, \ldots, -k_{NW+NX+1})$$

$$\text{matice } A = \begin{bmatrix} k_{NW}, & k_{NW-1}, & \dots, & k_{NW-NX+1} \\ k_{NW+1}, & k_{NW}, & \dots, & k_{NW-NX+2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{NW+NX}, & k_{NW+NX-1}, & \dots, & k_{NW+1} \end{bmatrix}$$

Identifikovaný polynom X má pak tvar

$$X = 1 + x_1 s + x_2 s^2 + \dots + x_{NX} s^{NX}$$

Dále řešením rovnic (13) a (15) a konečným řešením rovnice (16) získáme polovinu symetrického polynomu $C\tilde{C}$. Řešení rovnice (16) provádíme "obráceným" dělením tj. dělení začínáme od absolutních členů polynomů čitatele a jmenovatele. Hledané koeficienty polynomu W pak získáme vynásobením polynomu Q a stabilního polynomu C (reflexi $C\tilde{C}$).

Podprogram IDENT

řeší identifikaci zpětnovazebné regulační smyčky.

```
SUBROUTINE IDENT (AX, X, W, Q, NX + NW, NX, NW, NQ)
```

AX	=	vektor hodnot korelačních funkcí k_i	$(AX(1)=k_0, ..)$
X	=	vektor koeficientů polynomu X	$(X(1)=1, X(2)=x_1, ..)$
W	=	vektor koeficientů polynomu W	$(W(1)=w_0, ..)$
Q	=	vektor koeficientů polynomu Q	$(Q(1)=q_0, ..)$
NX	=	počet koeficientů polynomu X	
NW	=	počet koeficientů polynomu W	
NQ	=	počet koeficientů polynomu Q	

3.2. ALGORITMUS NÁVRHU ŘÍZENÍ

Na základě znalosti přenosu zpětnévazebné regulační smyčky $Xy = Wd$ s dopravním zpožděním systému j, přenosem regulátoru $Qu = Py$ řeší algoritmus návrh optimálního regulátoru $\hat{Q}u = \hat{P}y$ ve smyslu minima funkcionálu

$$J = \sum_{i=0}^{\infty} y_i^2 + \varkappa \sum_{i=0}^{\infty} u_i^2$$

Řešení je provedeno algebraickým přístupem dle kapitoly 2.
Soustava je chápána jako ARMAX model ve tvaru

$$Ay = s^j Bu + Cd$$

kde d je náhodná porucha vstupující do soustavy s charakterem bílého šumu.

Algoritmus zapíšeme v následujících bodech:

1) Rozklad známých polynomů X, W, kde $X = AQ - Bs^jP$ pro známé P, Q - řešení pomocí diofantické rovnice $RQ - Ss^jP = 1$ za splnění podmínky

$$\partial R < \partial(s^jP) \quad a \quad \partial S < \partial Q$$

polynom $W = CQ$ pro známé Q.
Tj. určíme koeficienty polynomů A, B, C a dále jejich rozklad na stabilní polynomy A_1, B_1 a nestabilní A_2, B_2.

$$A = A_1 \cdot A_2 \qquad B = B_1 \cdot B_2$$

2) Řešíme diofantickou rovnici pro neznámé F, G

$$FA_2 + Gs^jB_2 = 1$$

a reflexi polynomu

$$Z\tilde{Z} = B\tilde{B} + \varkappa A\tilde{A}$$

kde Z obsahuje pouze stabilní kořeny.

3) Provádíme dělení

$$\frac{C \cdot F \cdot \tilde{B}}{s^j \cdot \tilde{Z} \cdot A_1} = G_1 + \frac{H_1}{s^j \cdot \tilde{Z} \cdot A_1} \quad a \quad \frac{C \cdot G \cdot \tilde{A}}{\tilde{Z} \cdot B_1} = G_2 + \frac{H_2}{\tilde{Z} \cdot B_1}$$

kde polynomy G_1, G_2 nemají záporné mocniny operátoru a tedy zřejmě platí $\partial H_1 < \partial(s^j \cdot \tilde{Z} \cdot A_1)$ a $\partial H_2 < \partial(\tilde{Z} \cdot B_1)$

4) Řešíme diofantické rovnice

$$R_1 \cdot s^j \cdot \tilde{Z} + S_1 A_1 = H_1 \quad \text{a} \quad R_2 \cdot \tilde{Z} + S_2 B_1 = H_2$$

pro neznámé R_1, R_2, S_1, S_2

a za podmínek $\partial R_1 < \partial A_1$ a $\partial R_2 < \partial B_{21}$

a dále dělení

$$\frac{A_2 \cdot N - GCZ}{B_1} = \hat{P} + \frac{0}{B_1} \; ; \quad \frac{s^j B_2 N + FCZ}{A_1} = \hat{Q} + \frac{0}{A_1}$$

kde $N = -A_1 B_1 \cdot (G_1 - \varkappa \cdot G_2) - R_1 B_1 + \varkappa \cdot R_2 A_1$

5) Řešení optimálního regulátoru $u = \frac{P}{Q} y$

$P = \hat{P} \quad Q = \hat{Q}$

Není-li dělení v bodě 4) polynomy A_1, B_1 "beze zbytku", není získaný regulátor optimální ve smyslu daného kriteria.

6) Určíme hodnotu kvadratického kriteria

$$J = \sum_{i=0}^{\infty} y_i^2 + \varkappa \sum_{i=0}^{\infty} u_i^2$$

výpočtem

$$J = \left\| \frac{CQ}{AQ - s^j BP} \right\|^2 + \varkappa \left\| \frac{CP}{AQ - s^j BP} \right\|^2$$

kde $\|X\|^2$ značí kvadrát normy racionální funkce (viz. popis 3.3.).

<u>Podprogram REGOB</u>

řeší návrh optimálního řízení ARMAX modelu regulátorem ve tvaru $u = \frac{P}{Q} y$

SUBROUTINE REGOB (X, W, P, Q, NX, NW, NP, NQ, JS, GAPA)

X = vektor koeficientů polynomu X (X(1)=1, X(2)=x_1, ..)
W = vektor koeficientů polynomu W (W(1)=w_0, ..)
P = vektor koeficientů polynomu P (P(1)=p_0, ..)
Q = vektor koeficientů polynomu Q (Q(1)=q_0, ..)
NX = počet koeficientů polynomu X
NP = počet koeficientů polynomu P
NW = počet koeficientů polynomu W
NQ = počet koeficientů polynomu Q
JS = hodnota zpoždění systému j
GAPA = penalizace vstupní veličiny u v kvadratickém kriteriu

3.3. PODPROGRAMY POUŽÍVANÉ PŘI IDENTIFIKACI A NÁVRHU ŘÍZENÍ

3.3.1. Podprogram doplnění dvou polynomů na společný řád

SUBROUTINE ALFA (A, B, NA, NB, N)
Podprogram vybere z polynomů A , B polynom s menším počtem koeficientů a doplní ho nulami na počet koeficientů N .
N je větší z hodnot NA, NB .

Parametry:

A = vstupně - výstupní parametr
B = vstupně - výstupní parametr
NA = počet koeficientů vstupního polynomu A
NB = počet koeficientů vstupního polynomu B
N = počet koeficientů výstupních polynomů A, B

3.3.2. Podprogram dělení dvou polynomů sestupně

SUBROUTINE DPSE (A, B, C, N, M, NM)
Podprogram dělí polynom A polynomem B. Jestliže polynom B má větší počet koeficientů M než má polynom $A(N)$, pak výsledný polynom je roven nule a $NM=1$.
Je-li $NA > NB$, pak se provede dělení na pomocnou proměnnou $W(I)$.
Výstup je $C(NM) = \dfrac{A(N)}{B(M)}$, kde $NM = N - M + 1$

Parametry:

A = vstupní polynom
B = vstupní polynom
C = výstupní polynom
N = počet koeficientů polynomu A
M = počet koeficientů polynomu B
NM = počet koeficientů polynomu C

3.3.3. Podprogram faktorizace polynomu

SUBROUTINE FAKT (A, B, FN, N, GAPA)
Podprogram řeší reflexi symetrického polynomu G, tj. jeho rozklad na součin $G = F \cdot \tilde{F}$, kde F obsahuje stabilní kořeny polynomu G.

G je dáno vztahem

$$
\begin{aligned}
G_0 &= 2 \cdot Z_m \\
G_1 &= 2 \cdot Z_{m-1} \\
&\vdots \\
G_m &= 2 \cdot Z_0
\end{aligned}
$$

kde polynom Z je buď pro $\varkappa > 0.5$ roven výrazu $Z = A\tilde{A} + \varkappa B\tilde{B}$ nebo je pro $\varkappa \leq 0.5$ totožný s polynomem B : tj. $Z = B$

Algoritmus:

je blokový tj. hledané koeficienty polynomu F se postupně blíží - konvergují od zvolené počáteční hodnoty k určité hodnotě. Je-li polynom F řádu N :

$$F = f_1 + f_2 s + f_3 s^2 + \ldots + f_N s^{N-1}$$

pak počáteční hodnotu jednotlivých koeficientů volíme

$$f_1 = 1 \quad ; \quad f_i = 0 \qquad i = 2, \ldots, N$$

Jeden krok algoritmu reflexe tj. přepočet koeficientů f_i lze zapsat:

1) Volíme pomocnou proměnou $FN = F$ a tedy $f_{ni} = f_i$

$$i = 1, \ldots, N$$

2) Řešíme posloupnost rovnic

$$^{j+1}f_{ni} = {}^{j}f_{ni} + p_j \cdot {}^{j}f_{n_{N-j-i+2}}$$

pro $j = 1, \ldots, N-1$ a pro každé j platí: $i = 1, \ldots, N-j$
a kde

$$p_j = \frac{^{j}f_{n_{N-j+1}}}{^{j}f_{n_1}}$$

3) Řešíme soustavu lineárních rovnic $S \cdot Y = G$ s neznámým polynomem Y .
Matice S je trojúhelníková a má tvar:

$$\begin{bmatrix} 2 \cdot {}^{N}f_{n_1} & 0 & 0 & \ldots & 0 \\ & ^{N}f_{n_1} & ^{N-1}f_{n_2} & \ldots & ^{1}f_{n_{N-1}} \\ & & ^{N-1}f_{n_1} & \ldots & ^{1}f_{n_{N-2}} \\ & 0 & & & \vdots \\ & & & & ^{1}f_{n_1} \end{bmatrix}$$

4) Řešíme posloupnost rovnic: $^{j+1}y_i = {}^{j}y_i + p_{N-j} \cdot {}^{i}y_{j-i+2}$

pro $i = 1, \ldots, j+1$

a $^{j+1}y_i = {}^{j}y_i$ pro $i = j+2, \ldots, N$
$j = 1, \ldots, N-1$

přičemž $^{1}y_i = y_i$, kde koeficienty y_i jsou počítány v bodě 3)
(koeficienty polynomu Y)

5) Určíme nový polynom F

$$F_{nové} = \frac{1}{2} (F_{staré} + X)$$

kde koeficienty polynomu X jsou totožné s hodnotami $^{N-1}y_i$ v bodě 4)

$$x_i = {}^{N-1}y_i \qquad i = 1, \ldots, N$$

a tedy

$$f_{i\,nové} = \frac{1}{2} (f_{i\,staré} + {}^{N-1}y_i) \qquad i = 1, \ldots, N$$

6) Je-li výraz $\|F_{nové}\| - \|F_{staré}\|$ v absolutní hodnotě větší nežli zvolená konstanta ε a absolutní hodnota prvků $^{j}f_1$ (počítané v bodě 2) pro $j = 1, \ldots, N-1$) je větší nežli ε pokračujeme bodem 1).
V opačném případě výpočet ukončíme a hledaný polynom FN je roven polynomu $F_{nové}$ v bodu 5).
Norma $\|F\|$ značí $\sqrt{\sum_{i=1}^{N} f_i^2}$

a hodnotu ε volíme dostatečně malou dle požadované přesnosti výpočtu.

Parametry:

A = vstupní polynom
B = vstupní polynom

FN = výstupní parametr
N = počet koeficientů polynomů A , B , FN
GAPA = váha kvadratického kriteria pro $\varkappa > -0.5$

3.3.4. Podprogram zvýšení řádu polynomů o hodnotu JS

SUBROUTINE GAMA (A, B, N, M, JS, K)
Podprogram zvýší řád polynomu $A(N)$ o hodnotu JS a uloží tento polynom na $B(K)$, kde $K = N + JS$.
Výstup: $B = {}^{j}s \cdot A$

Parametry:

A = vstupní polynom
B = výstupní polynom
N = počet koeficientů polynomu A
M = počet koeficientů polynomu B
JS = hodnota, o kterou se zvyšuje řád vstupního polynomu A
K = řád výstupního polynomu

3.3.5. Podprogram nalézání nejvyššího nenulového členu

FUNKCION KL (A, N)
Podprogram sníží stupeň polynomu $A(N)$ na takovou hodnotu, kdy prvek s nejvyšším indexem má absolutní hodnotu větší než 10^{-7}.

Parametry:

A = vstupní polynom
N = počet koeficientů vstupního polynomu A

3.3.6. Podprogram násobení dvou polynomů

SUBROUTINE NAPO (A, B, C, N, M, NM, NK)

Podprogram násobí polynom $A(N)$ polynomem $B(M)$ a ukládá výsledek na pomocnou proměnnou $W(NW)$. Potom pomocí podprogramu FUNKCION KL (W, NM) najde nejvyšší nenulový člen NK.

Výstup: $A(N) \cdot B(M) = C(NK)$

Parametry:

A	=	vstupní polynom
B	=	vstupní polynom
C	=	výstupní polynom
N	=	počet koeficientů polynomu A
M	=	počet koeficientů polynomu B
NM	=	počet koeficientů pomocné proměnné W
NK	=	počet koeficientů výstupního polynomu C

3.3.7. Podprogram určení normy $X = \|P/Q\|^2$

SUBROUTINE NORM (P, Q, NP, NQ, X)

Podprogram pomocí podprogramu ALFA nejdříve doplní polynomy $P(NP)$ a $Q(NQ)$ na společný řád N.

$Q = q_0 + q_1 s + \ldots + q_m s^m$; nechť Q je stabilní

$$H = \begin{bmatrix} q_0 & & \\ q_1 & q_0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \\ q_m & q_1 & q_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & & q_m \\ & q_m & q_{m-1} \\ & & \\ q_m & q_{m-1} & q_0 \end{bmatrix}$$

$$W = P\tilde{P} = w_0 + w_1 s + \ldots + w_m s^m$$

$$\vec{w} = (w_0, w_1, \ldots, w_m)^T$$

$$\vec{X} = H^{-1} \cdot \vec{w} \quad ; \quad \left\| \frac{P}{Q} \right\|^2 = 2 \cdot \frac{XN}{q_0}$$

Parametry:

P = vstupní polynom
Q = vstupní polynom
NP = počet koeficientů polynomu P
NQ = počet koeficientů polynomu Q
X = výstupní parametr - norma

3.3.8. Podprogram Euclidova algoritmu

SUBROUTINE REDIFO (C1, C2, AD, BD, N, M)
Podprogram řeší diofantickou rovnici ve tvaru

$$AD \cdot C_1 + BD \cdot C_2 = 1$$

kde AD a BD jsou neznámé polynomy.

Algoritmus:

Nejdříve vytvoříme matici $\mathbb{C}$ z polynomů C_1, C_2 tak, že polynom C_1 tvoří první řádek matice a C_2 druhý řádek matice. Počet sloupců je určen větším počtem koeficientů z polynomů C_1, C_2 a druhý polynom je na tento počet N doplněn nulami.

Matice $\mathbb{A}$ resp. $\mathbb{B}$ má také dva řádky, přičemž první prvek prvního řádku je 1 a ostatní nuly. Matice $\mathbb{B}$ má první prvek druhého řádku 1 a ostatní nuly. Počet sloupců je stejný jako u matice $\mathbb{C}$.

Např. pro $C_1 = c_{11} + c_{12} S + c_{13} S^2 + c_{14} S^3$

a $C_2 = c_{21} + c_{22} S$

matice $\mathbb{C}$, $\mathbb{A}$, $\mathbb{B}$ mají tvar:

$$\overset{\mathbb{C}}{\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & 0 & 0 \end{bmatrix}} ; \overset{\mathbb{A}}{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}} ; \overset{\mathbb{B}}{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}$$

a označíme-li počet sloupců N, pak $N=4$.

Vlastní algoritmus výpočtu se sestává z postupné eliminace prvků matice $\mathbb{C}$, a to od nejvyššího sloupcového indexu k nejnižšímu, lineární kombinací prvního nebo druhého řádku matice $\mathbb{C}$.
tj. musí platit pro libovolné $K \in \langle 1, N \rangle$

$$c_{1j} = 0 \wedge c_{2j} = 0 \qquad \text{pro } j = K, \dots, N$$

a eliminaci provádíme vždy na $K-1$ sloupci.
Každý krok eliminace se provádí na všech maticích tj. $\mathbb{A}$, $\mathbb{B}$, $\mathbb{C}$.
Např. eliminujeme prvek c_{1l}, přičemž nenulový prvek druhého řádku s nejvyšším sloupcovým indexem je c_{2m} (musí platit $l \geq m$) a označíme-li dále

$$\frac{c_{1l}}{c_{2m}} = q \quad ; \quad l - m = r$$

pak

$$c_{1i} = c_{1i} - q \cdot c_2(i-r)$$
$$a_{1i} = a_{1i} - q \cdot a_2(i-r)$$
$$b_{1i} = b_{1i} - q \cdot b_2(i-r)$$

$$i = r+1, r+2, \dots, l$$

Algoritmus končí tehdy, je-li alespoň jeden prvek prvního sloupce matice $\mathbb{C}$ roven nule.
Získáváme toto řešení:

$$AD \cdot C_1p + BD \cdot C_2p = CD$$

a

$$AC \cdot C_1p + BC \cdot C_2p = 0$$

kde AD, BD jsou polynomy, jejichž koeficienty jsou číselně rovny prvkům v řádcích matic $\mathbb{A}$, $\mathbb{B}$, které odpovídají řádku matice $\mathbb{C}$ s alespoň jedním nenulovým prvkem na konci algoritmu - polynom z prvků tohoto řádku matice $\mathbb{C}$ označme jako CD. Polynomy C_1p, C_2p jsou počáteční polynomy diofantické rovnice (19), AC, BC jsou pak polynomy odpovídající řádku matice $\mathbb{C}$ jen s nulovými koeficienty.

Pozn.: Absolutní členy polynomů odpovídají prvkům prvního sloupce matic. Zřejmě pro CD platí, že je společným jmenovatelem polynomů C_1p, C_2p.

Parametry:

C1	=	vstupní polynom
C2	=	vstupní polynom
AD	=	výstupní parametr
BD	=	výstupní parametr
N	=	počet koeficientů polynomů C_1, C_2, AD, BD

3.3.9. Podprogram sestavení polynomu $B(p) = A(1/p)$

SUBROUTINE VLNK (A, B, N)

Podprogram udělá z polynomu A polynom B tak, že $B(J) = A(I)$, kde $I \in \langle 1, N \rangle$ a $J = N - I + 1$.

Výstup:

$$B = \tilde{A}$$

Parametry:

A = vstupní polynom

B = výstupní polynom

N = počet koeficientů polynomů A, B

3.3.10. Podprogram inverze matice $A = A^{-1}$

SUBROUTINE PINV (A, N, D, L, M)

Podprogram je převzat z knihovny standartních programů počítače EC-1033.

Parametr A je vstupně-výstupní parametr a tedy podprogram řeší inverzi ve tvaru $A = A^{-1}$.

Popis dalších parametrů:

D = determinant vstupní matice A

N = řád matice

L, M = pomocné vektory typu INTEGER rozměru N

3.3.11. Podprogram tisku daného polynomu

SUBROUTINE TISK (A, N)

Podprogram tiskne polynom A(N).

Parametry:

A = vstupně-výstupní parametr

N = počet koeficientů polynomu A

3.3.12. Podprogram generátoru náhodných čísel

REAL FUNKCION URND (IY)
Podprogram generuje náhodné číslo v normálním rozdělením v intervalu $\langle 0;1 \rangle$.

IY = pomocný parametr, který nesmí být během použití podprogramu URND pro generaci náhodných čísel měněn - tj. je mu přiřazena určitá počáteční hodnota, která je dále měněna podprogramem URND.

3.3.13. Podprogram pro graf

SUBROUTINE GRAF (G, NG)
Podprogram vyjadřuje grafickou závislost výstupní veličiny y na vstupní veličině u.

3.3.14. Podprogram simulace

SUBROUTINE SIMUL (A,B,C,P,Q,AX,NA,NV,NC,NP,NQ,N1,N,NG,IY,JS)
Algoritmus podprogramu simulace regulačního pochodu je naznačen v kapitole 3.bod 2).

Parametry:

A,B,C,P,Q = vstupní polynomy
AX = výstupní korelační vektor
NA,NB,NC,NP,NQ= počet koeficientů polynomů A, B, C, P, Q
N1 = počet koeficientů polynomu AX
N = počet pořadnic veličiny y resp. u
NG = počet sloupců matice G
IY = parametr generátoru náhodných čísel
JS = zpždění j

4. POPIS POUŽITÍ PROGRAMU

4.1. VSTUPNÍ SOUBORY PROGRAMU

Tvar vstupního souboru určuje vstupní parametr M .

A) Je-li $M=1$ je posloupnost vstupních dat následující:

	čtecí formát
M	I2
NA, (A(I), I = 1, NA)	I2 7* F9.5 7* F9.5
NB, (B(I), I = 1, NB)	I2 7* F9.5 7* F9.5
NC, (C(I), I = 1, NC)	I2 7* F9.5 7* F9.5
NP, (P(I), I = 1, NP)	I2 7* F9.5 7* F9.5
NQ, (Q(I), I = 1, NQ)	I2 7* F9.5 7* F9.5
N, JS, GAPA, NK, IY	I7 I2 F5.2 I2 I2

kde proměnné NA, NB, NC, NP, NQ určují stupně polynomů A, B, C, P, Q zvýšené o jedničku tj. určují počet koeficientů těchto polynomů.

Vstupní parametry odpovídají zápisu diferenční rovnice ARMAX modelu (17) následujícím polynomům

$$A = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3$$
$$B = B_1 \cdot B_2 \cdot A_3$$
$$C = C \quad ; \quad P = P \quad ; \quad Q = Q$$

Ostatní parametry:

N = počet pořadnic veličin y resp. u

JS = zpoždění j

GAPA = určuje váhovou konstantu kvadratického kriteria

NK = počet cyklů adaptivní regulace

IY = parametr generátoru náhodných čísel - libovolně volitelné celé číslo

B) Je-li $M \neq 1$, pak vstupní data zadáváme ve tvaru:

	čtecí formát
M	I2
NX, (X(I), I = 1, NX)	I2 7* F9.5 7* F9.5
NW, (W(I), I = 1, NW)	I2 7* F9.5 7* F9.5
NP, (P(I), I = 1, NP)	I2 7* F9.5 7* F9.5
NQ, (Q(I), I = 1, NQ)	I2 7* F9.5 7* F9.5
N, JS, GAPA, NK, IY	I7 I2 F5.2 I2 I2

kde proměnné NX, NW, NP, NQ určují stupně polynomů X, W, P, Q zvýšené o jedničku.
Parametry N, JS, GAPA, NK, IY viz. bod A).

4.2. VÝSTUPY PROGRAMU

4.2.1. Protokoly o výpočtu

Program standartně tiskne vstupní údaje programu a dílčí výsledky výpočtu:

- koeficietny diferenční rovnice zpětnovazebné regulační smyčky - polynomy X, W
- teoretické kvadratické kriterium regulačního pochodu
- identifikace přenosu regulační smyčky - korelační vektor výstupního signálu

Dále může obsahovat údaje:

- je-li v programu identifikace matice A (viz. kapitola 3.1.) singulární, pak se tiskne její determinant
- není-li dělení v podprogramu regulace (viz. kapitola 3.2., bod 4)) polynomy A_1, B_1 "beze zbytku", pak se vytiskne - zbytek ve jmenovateli, zbytek v čitateli

- jestliže při řešení diofantické rovnice podprogramem Euclidova algoritmu (viz. kapitola 3.3.8.), je zjištěno, že polynomy $C_{1}p$ a $C_{2}p$ jsou soudělné,(náš požadavek je, aby byly nesoudělné) vytiskne se jejich společný dělitel

4.2.2. Konečné výsledky programu identifikace a návrhu řízení

Standartně se tiskne:
- grafická závislost výstupní veličiny y na vstupní u
- kriterium simulace na určitém počtu regulačních kroků
- identifikovaný vektor X a vektor W
- čitatel a jmenovatel regulátoru
- teoretická hodnota kvadratického kriteria při zapojení optimálního regulátoru na identifikované soustavě
- ukončení výpočtu - korelační vektor AX

4.3. OMEZENÍ PROGRAMU

$\partial A < 9$ (∂ - stupeň polynomu)

$\partial B < 9$

$\partial C < 9$

$\partial P < 9$

$\partial Q < 9$

$$\partial X = \max(\partial AQ;\ j + \partial BP) = \max(\partial A + \partial Q;\ j + \partial B + \partial P) < 19$$

$$\partial W = \partial CQ = \partial C + \partial Q < 19$$
$$\partial AX = \partial X + \partial W < 49$$

4.4. PŘÍKLAD POUŽITÍ PROGRAMU

a) Na modelu soustavy s následujícím popisem si ukážeme strukturu vstupních dat.

Popis modelu:

Diferenciální rovnice ARMAX modelu

$$y_n + 1{,}6\, y_{n-1} + 0{,}64\, y_{n-2} = u_{n-j} + 1{,}6\, u_{n-j-1} +$$
$$+ 0{,}64\, u_{n-j-2} + 5 d_n + 4 d_{n-1}$$

má-li tato diferenciální rovnice odpovídat zápisu

$$Ay = s^j Bu + Cd$$

pak polynomy A, B, C, zadáváme-li data formou A) viz. kapitola 4.1.- tj. $M = 1$, mají tvar:

```
_3  1.00    1.60    0.64
_1  1.00
_2  5.00    4.00
```

Diferenciální rovnice zapojeného zpětnovazebného regulátoru

$$u_n - 0{,}6\, u_{n-1} = 0{,}1\, y_n + 0{,}1\, y_{n-1}$$

odpovídá rovnici $Qu = Py$

v případě, že polynomy P, Q mají tvar:

```
_2  0.10    0.10
_2  1.00   -0.60
```

Hodnoty N, JS, GAPA, NK, I4 jsou zadány podle již uvedeného formátu vstupních dat a pro $N = 1000$, $\varkappa = 0.1$ zapíšeme

_ 1000 2 0.10 10 1

Pozn. - _značí první pozici na štítku

b) V případě, kdy pracujeme s popisem uzavřené regulační smyčky soustava - regulátor, a tedy známe diferenciální rovnici popisující tuto regulační smyčku (viz. (6)).

$$y_n + y_{n-1} - 0{,}42\, y_{n-2} - 0.484\, y_{n-3} = 5 d_n + d_{n-1} - 2{,}4\, d_{n-2}$$

kde polynomy X, W jsou dány formou B) zadávání vstupních dat (viz. kapitola 4.1.), tj. pro $M \neq 1$

_4	1.00	1.00	-0.42	-0.484
_3	5.00	1.00	-2.4	

Parametry P, Q, N, JS, GAPA, NK, IY jsou zadány stejně jako u modelu tj. u bodu a).

Protokol o výpočtu pro tento konkrétní příklad je uveden jako příloha k diplomové práci.

5. MOŽNOST NASAZENÍ ADAPTIVNÍ REGULACE PRO REGULACI HMOTNÉ NESTEJNOMĚRNOSTI VÝSLEDNÉHO VLÁKENNÉHO ÚTVARU Z PRŮTAHOVÉHO SYSTÉMU

Pro praktické použití uvedeného algoritmu adaptivní regulace pro regulaci výstupního stacionárního a ergodického signálu je jako vhodný vybrán mykací a posukovací stroj, jehož výstupní veličina v podobě regulovatelného pramene na požadovanou hodnotu pramene má právě uvedené vlastnosti tj. ergodičnost a stacionárnost.

Popišme dnes používaný automatický vyrovnavač nestejnoměrnosti Uster Card Controll (UCC-L), který slouží k vyrovnávání hmotné nestejnoměrnosti na dlouhých úsečkách. Při tomto vyrovnávání vzniká tzv. mrtvý čas, tj. čas potřebný k překonání vzdálenosti mezi regulačním a měřícím místem. Jestliže vznikne náhlá odchylka v jemnosti dochází k postupnému vyrovnávání, což je ukončeno až po projití určité délky pramene, jež odpovídá několikanásobku příslušné vzdálenosti tzv. mrtvému času. U mykacího stroje je mrtvý čas dán i tzv. recirkulací materiálu na hlavním bubnu, takže příslušná délka pramene, po níž dochází k vyrovnávání tzv. korekční délka je Lk = 25 - 30 m. /5/

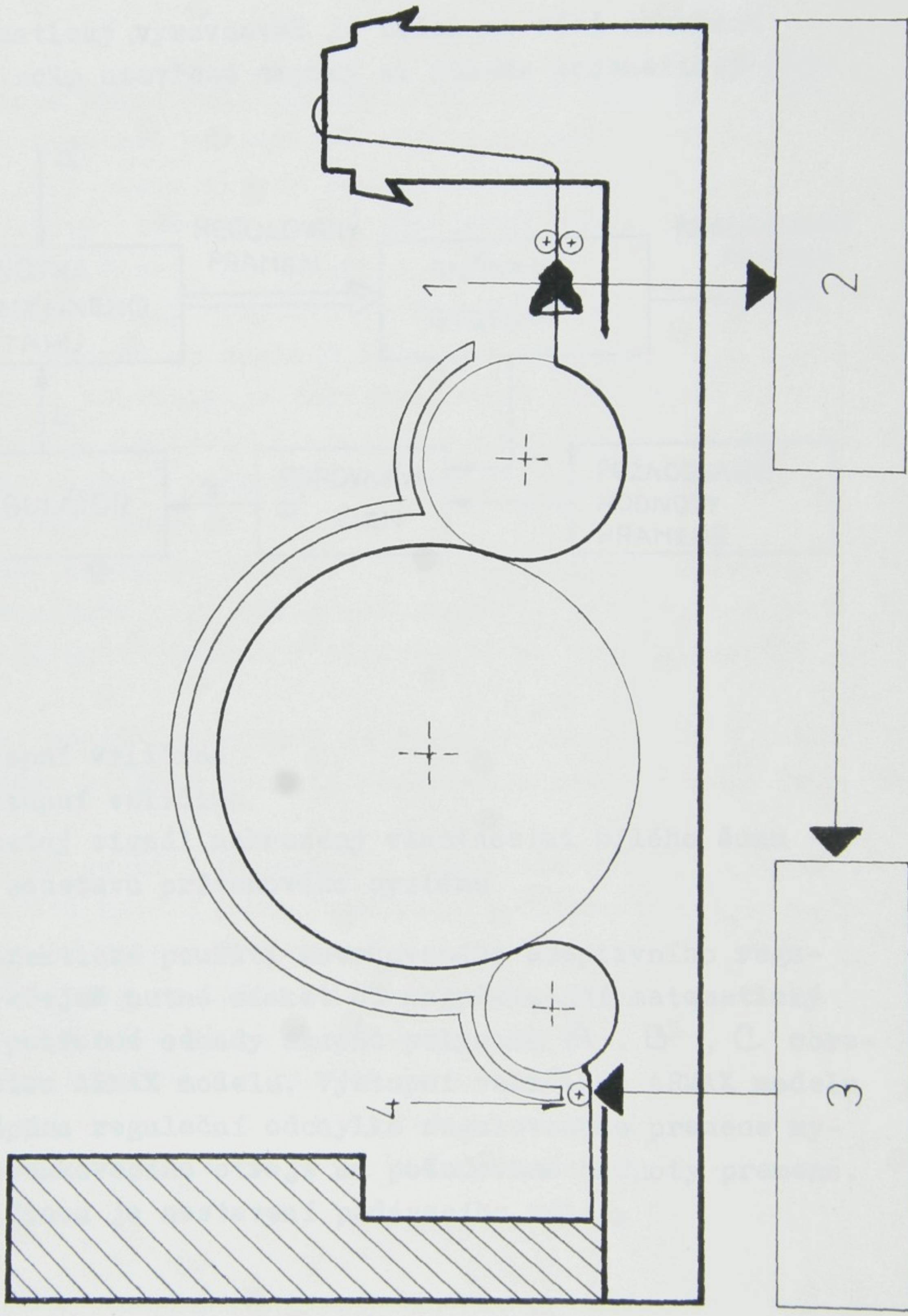
Na obrázku je funkční schema automatického vyrovnavače UCC-L.

1 - pneumatický měřící orgán

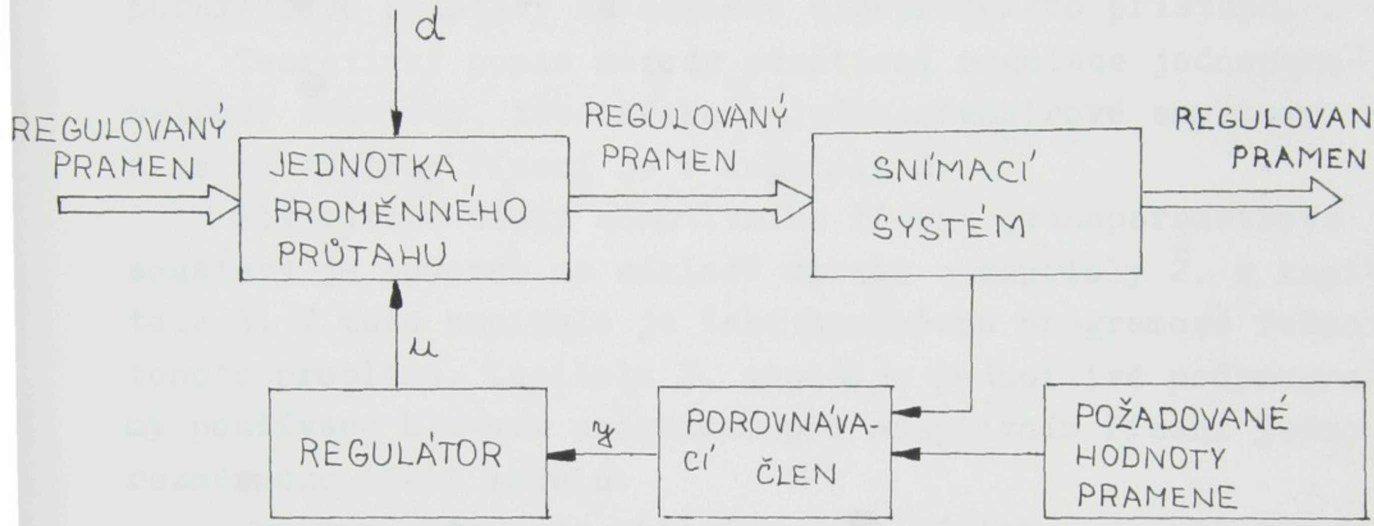
2 - regulační elektronika

3 - regulační náhon

4 - podávací válec


1
2
3
4

Tento automatický vyrovnavač je řešen na bázi uzavřené smyčky. Princip uzavřené smyčky si můžeme schematicky znázornit:



u - vstupní veličina

y - výstupní veličina

d - náhodný signál nahrazený vlastnostmi bílého šumu na soustavu průtahového systému

Pro praktické použití navrhovaného adaptivního regulátoru je zřejmě nutné získat co nejpřesnější matematický model tj. potřebné odhady stupňů polynomů A , B , C obrazového zápisu ARMAX modelu. Výstupní veličinou ARMAX modelu je pak chápána regulační odchylka regulovaného pramene mykacího a posukovacího stroje od požadované hodnoty pramene. Akční veličinou je nastavení podávacího válce.

6. ZÁVĚR

Diplomová práce řeší problém adaptivní regulace jednoparametrové soustavy na základě algebraického přístupu.

Teoretický popis metody adaptivní regulace jednoparametrové soustavy, identifikace jednoparametrové soustavy a návrh syntézy řízení je v kapitole 2.

Algoritmus úlohy adaptivního řízení jednoparametrové soustavy je odvozen na základě vztahů z kapitoly 2. v kapitole 3. V této kapitole je také naznačeno programové řešení tohoto problému. Kapitola 3. popisuje jednotlivé podprogramy používané hlavním programem při adaptivním řízení jednorozměrného ARMAX modelu.

Program, který je přiložen jako příloha, je odladěn na modelu soustavy. Pro větší názornost je výstupní veličina y graficky vyjádřena v závislosti na vstupní veličině u .

Možnost použití programu je popsána v kapitole 4., kde je také ukázán příklad použití programu a omezení jeho použití.

Praktické využití programu v textilním průmyslu konkrétně pro regulaci hmotné nestejnoměrnosti vláken ukazuje kapitola 5. Je v ní popsán automatický vyrovnavač nestejnoměrnosti UCC-L, který se již v současné době využívá a možnost použití navrhovaného adaptivního regulátoru.

Přesnost adaptivního řízení je závislá na volbě parametru N , což je počet pořadnic veličiny y resp. u . Tato přesnost je nepřímo úměrná druhé odmocnině z veličiny N .

Získané experimentální výsledky ukazují :

Metodu je vhodné použít v jednom kroku, kdy vždy vykazuje zmanšení kriteriálního funkcionálu. Při dalším kroku zpravidla dochází ke zhoršení, což je způsobeno známou okolností, že dobře řízený proces se špatně identifikuje.

Ukazuje se dosti velká variabilita při různých realizacích šumu,vstupujícího do soustavy.

Bylo by vhodné pro nasazení odzkoušené metody vypracovat vhodný detekční algoritmus, který by nasadil adaptivní postup pouze v případě detekované změny parametru.

Závěrem bych chtěla poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Liboru Tůmovi za všestrannou pomoc a odborné vedení.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:

/1/ Sawarogi, Y., Soeda, T., Nakamiro, T.: Classical Methods and Time Series Estimation; Trends and progress in Syst. identifiation. Pergamon Press, 1981.

/2/ Kracík, V.: Poznámka k identifikaci ARMAX modelu. Referát Bratislava, 1984.

/3/ Hanuš, B., Kracík, V., Tůma, L.: Algebraická syntéza řízení diskrétního systému. Výzkumná zpráva KTK 0133, Liberec, 1983.

/4/ Hanuš, B.: Optimalizace systému řízení. Liberec, VŠST 1981.

/5/ Ursiny, P.: Spřádání bavlnářským způsobem I. Předpřádání. Liberec, VŠST 1985.