

Vysoká škola strojní a textilní v Liberci
nositelka Řádu práce

Fakulta textilní

Obor 31-20-8

Katedra technické kybernetiky

ADAPTIVNÍ REGULÁTOR PRO REGULACI CEMENTÁRENSKÉ PECE

Autor práce : Eva Šindelková
Vedoucí práce : ing. Bedřich Janeček
Konzultant : ing. Bedřich Janeček
KTK ASŘ TF - 040

Rozsah práce a příloh

Počet stran	65
Počet příloh a tabulek	10
Počet obrázků	13
Počet výkresů	-
Počet modelů nebo jiných příloh ...	-
Počet grafů	4

4.6.1982

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

s. Evu Š i n d e l k o v o u .

pro

obor automatizované systémy řízení 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 regulátor pro regulaci cementárenské pece

Zásady pro vypracování:

- 1) Prostudovat literaturu podle seznamu, přičemž se zaměřit na problematiku:
 - regulace cementárenské pece
 - návrh číslicového regulátoru, při kterém je použito popisu regulované soustavy přechodovými charakteristikami
 - identifikace lineárních dynamických soustav
 - adaptivní číslicové regulace.
- 2) Navrhnout adaptivní regulátor pro zjednodušený model cementárenské pece.
- 3) Vypracovat program pro počítač EC 1033 pro ověření vlastností navrženého adaptivního regulátoru.
- 4) Zhodnotit dosažené výsledky.

Autorské právo se řídí směnicemi
MŠK pro státní záv. zkoušky č.j. 31.
727/62-III/2 ze dne 13. července
1962-Věstník MŠK XVIII, sešit 24 ze
dne 31. 8. 1962 a 19 out z č. 115/53 Sb.

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 5
PSČ 461 17

V 18/82 T
+ PŘÍLOHA

Rozsah grafických prací:

Rozsah průvodní zprávy:

50 stran

Seznam odborné literatury:

1. Hanuš, B., Balda, M.: Základy technické kybernetiky, I. a II. část; skripta VŠST Liberec a ČVUT Praha; Liberec, Praha 1980.
2. Hanuš, B.: Základy teorie lineárního impulsního regulačního obvodu, I., II. a III. díl; skripta VŠST Liberec, 1972.
3. Hanuš, B., Janeček, B., Kracík, V., Mikulecký, B.: Metoda návrhu více-parametrových číslicových regulačních systémů. Metodická příručka, Ústav pro využití výpočetní techniky v řízení, Praha 1981.
4. Hanuš, B., Janeček, B., Kracík, V.: Adaptivní regulace - několik poznámek. Výzkumná zpráva KTK-0075; VŠST Liberec 1981.
5. Hanuš, B., Janeček, B., Kracík, V.: Adaptivní regulace s průběžnou identifikací, poznámky č.2. Výzkumná zpráva KTK-0077; VŠST Liberec 1981.
6. Pokorný, P.: Návrh adaptivního číslicového řízení s možností použití pro řízení cementárenské pece. Diplomová práce, VŠST Liberec 1981.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Bedřich Janeček

Datum zadání diplomové práce:

15.9.1981

Termín odevzdání diplomové práce:

4.6.1982



Alax

Novák

Doc. Ing. Ján Alaxín, CSc.

Vedoucí katedry

Doc. Ing. Jáchym Novák, CSc.

Děkan

v Liberci dne 10.9. 1981

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

Eva Šindelková

V Liberci 2. června 1982

Považuji za milou povinnost poděkovat konzultantovi
s.ing. Bedřichu J a n e č k o v i , za jeho cenné připo-
mínky a rady při sestavování programu a za jeho odborné
vedení při studiu problematiky diplomové práce.

OBSAH

Použitá označení	5
Úvod	7
1 Definice hlavních veličin	9
2 Metoda návrhu číslicového regulátoru, při kterém je použito popisu regulované soustavy přechodovými charakteristikami	11
2.1 Návrh číslicového řízení víceparametrové lineární soustavy podle kvadratického kritéria	11
3 Adaptivní číslicová regulace	20
4 Regulace cementárenské pece	22
5 Identifikace lineárních dynamických soustav	26
5.1 Identifikace regulované soustavy metodou nejmenších čtverců algoritmem U-D filtru	27
5.2 Identifikace regulované soustavy metodou nejmenších čtverců algoritmem inverze symetrické matice	34
6 Popis programu	39
6.1 Popis vstupních dat	41
7 Příklady průběžné identifikace váhové funkce uzavřeného regulačního obvodu	43
8 Rozbor výsledků	56
9 Závěr	60
10 Literatura	64
11 Seznam příloh	65

POUŽITÁ OZNAČENÍ

- $\underline{x}_k$ vektor kritériálních veličin
- $\underline{u}(j)$ vektor hodnot akčních veličin v krokovacím intervalu j
- $\Delta \underline{u}(j)$ vektor změn akčních veličin v průběhu celého regulačního pochodu (vektor akčních zásahů)
- $\underline{K}_{kj}$ matice váhových koeficientů pro kritériální veličiny
- $\underline{K}_{qj}$ matice váhových koeficientů pro akční zásahy
- $\underline{G}_k(j)$ matice diskrétních hodnot odezev regulované soustavy v krokovacím intervalu j na poruchy $\underline{d}$
- $\underline{d}$ vektor zvolených determinovaných poruch různého typu
- $\underline{F}(j)$ matice diskrétních hodnot odezev regulované soustavy v krokovacím intervalu j na akční zásah
- $\underline{A}$ matice koeficientů algoritmu řízení u měřených stavových veličin
- $\underline{B}$ matice koeficientů algoritmu řízení u dříve prováděných akčních zásahů
- $\underline{x}_{m(j)}$ vektor stavových veličin příslušných ke krokovému intervalu j
- $\underline{e}(j)$ vektor chyb rovnice v j -tém regulačním intervalu
- $\underline{K}_d$ diagonální matice kladných váhových koeficientů
- n řád regulované soustavy
- r počet hlavních regulovaných veličin na soustavě
- η počet vstupních veličin do soustavy
- ϑ počet výstupních veličin ze soustavy, s ohledem na jednoznačnost řízení $r = \vartheta$
- $\underline{P}$ matice neznámých regresních koeficientů
- γ koeficient zapomínání

- $\underline{V}(t)$ pomocná symetrická matice při průběžné identifikaci
algoritmem U-D filtru
- $\underline{U}(t)$ pomocná trojúhelníková matice s jedničkami na hlavní
diagonále
- $\underline{D}(t)$ pomocná diagonální matice
- $\underline{I}$ jednotková matice
- $y(j)$ výstup z regulované soustavy
- $\hat{y}(j)$ výstup z modelu regulované soustavy
- $\hat{g}_j$ odhad hodnoty váhové funkce

ÚVOD

Charakteristickým rysem vědeckotechnické revoluce je zavádění automatizace do výroby a postupné převádění přímé pracovní činnosti člověka na činnost kontrolní nebo rozhodovací o práci strojů.

Na XVI. sjezdu KSČ byly vytyčeny nejdůležitější cíle, záměry a úkoly hospodářské politiky naší země na příští období. Opírají se o návrh Hlavních směrů hospodářského a sociálního rozvoje ČSSR na léta 1981 - 1985. Jednou z hlavních myšlenek tohoto dokumentu je změna struktury naší ekonomiky, při níž je třeba důsledně respektovat objektivní tendence technického pokroku. Konkrétně to znamená soustředit pozornost na výzkumné a vývojové základny. Téměř celá jedna třetina projektů základního výzkumu se týká elektronizace, kybernetiky a robotiky. Široká aplikace mikroelektroniky v kombinaci s dalšími progresivními prvky povede k rozvoji automatizace v průmyslu.

S nynějším rozvojem výpočetní techniky stoupá velmi progresivně použití počítačů při řízení technologických procesů. Číslicový počítač přináší celou řadu výhod jako je: centralizace řízení, lehkost změn ve struktuře řízení nebo jeho jakosti a možnost použití složitějších a tím i jakostnějších forem řízení. Jednoduchost změn v procesu řízení vyplývá z toho, že způsob řízení je daný programem počítače, který je možné podle potřeb upravit. Změny je potom možné provádět během provozu beznárazově, to znamená bez rušivého vlivu na průběh technologického procesu.

Předkládaná diplomová práce se zabývá teoreticky v první částí metodou návrhu číslicového regulátoru, při které je pou-

Žito popisu regulované soustavy přechodovými charakteristikami. Pro návrh adaptivního regulátoru je velmi důležitá znalost regulované soustavy. Tu je možné získat různými způsoby identifikace lineárních dynamických soustav. Z rozmanitých možností identifikace se zaměřuje na identifikaci váhové funkce regulované soustavy. Při této identifikaci prováděné uvnitř uzavřeného regulačního obvodu dochází k určitým komplikacím spojených se vstupem budicího signálu do regulované soustavy. Práce se zabývá rozбором této problematiky. Správnost identifikace koeficientů váhové funkce je srovnávána s předem teoreticky vypočtenými hodnotami.

Pro dva způsoby identifikace je napsán program v jazyce RPP - FORTRAN odladěný na počítači RPP - 16 S, který na základě vstupních údajů provádí identifikaci váhové funkce regulované soustavy v uzavřeném regulačním obvodu.

1 DEFINICE HLAVNÍCH VELIČIN

Regulovaná soustava - je spojitá část regulačního obvodu, na které se provádí regulace a realizuje se na ní diskrétní řídicí algoritmus.

Regulované veličiny - jsou veličiny regulované soustavy, které vstupují do řídicího algoritmu a jsou udržovány na určitých hodnotách nebo v určitých mezích. Rozeznáváme dva typy regulovaných veličin - **hlavní** a **pomocné**. Pro hlavní regulované veličiny je předepsána žádaná hodnota v ustáleném stavu a regulací je udržována (lze ji měnit pomocí řídicí veličiny) u pomocných regulovaných veličin hodnota v ustáleném stavu předepsána není (nelze ji měnit pomocí řídicí veličiny).

Krokovací interval - je časový úsek regulačního pochodu, ve kterém je prováděno vzorkování výstupních veličin regulované soustavy a akčních zásahů. Zpravidla bývají všechny krokovací intervaly stejné délky a měření stavových veličin je prováděno na jejich začátku a bývá okamžitě následováno akčními zásahy.

Stavové veličiny - spolu s řídicími veličinami udávají rozvážení soustavy. V rozvážení soustavy jsou zahrnuty velikosti vstupních poruch a počáteční stav soustavy. Pro úplný popis rozvážení soustavy je zapotřebí znát $n+r$ nezávislých hodnot stavových veličin, kde r je počet nezávislých regulovaných veličin a n je řád regulované soustavy.

Kritériální veličiny - jsou veličiny, na základě jejichž průběhu během regulačního pochodu se posuzuje

jakost regulace. Nemusí patřit mezi ty fyzikální veličiny, které se na regulované soustavě měří. Mohou to být i jejich rozdíly v různých časových okamžicích nebo časové derivace. Počet kritériálních veličin je libovolný, minimálně se rovná počtu hlavních regulovaných veličin. Hodnoty kritériálních veličin se neměří, nýbrž se počítají dopředu na základě znalostí o vlastnostech regulované soustavy a o poruchách.

A k č n í z á s a h y - jsou veličiny, kterým odpovídají změny akční veličiny v krokovacím intervalu časově následující po změření hodnot výstupních veličin. V teoretickém případě tyto změny mají tvar skoku bezprostředně následujícího po vzorkování výstupních veličin na začátku krokovacího intervalu. V přístrojovém provedení odpovídá akčnímu zásahu číslicový výstup z počítače, na který je napojen tvarovač, číslico-analogový převodník, který číslicový signál změní na spojitou akční veličinu.

P o r u c h y - jsou vstupní veličiny regulované soustavy, které vyvolávají regulační pochod.

V á h o v á f u n k c e - je odezva systému na budící funkci ve tvaru jednotkového impulsu při nulových počátečních podmínkách zleva.

2 METODA NÁVRHU ČÍSLICOVÉHO REGULÁTORU, PŘI KTERÉM JE
POUŽITO POPISU REGULOVANÉ SOUSTAVY PŘECHODOVÝMI
CHARAKTERISTIKAMI.

Algoritmy řízení, využívající informaci o dynamickém chování regulované soustavy pomocí naměřených přechodových charakteristik, můžeme rozdělit podle dvou hledisek:

- 1) podle kritéria jakosti průběhu regulačního pochodu:
 - a) řízení s vyrovnaním poruchy v minimálním počtu regulačních kroků
 - b) řízení s vyrovnaním poruchy v konečném počtu regulačních kroků
 - c) kritérium minimální hodnoty váženého součtu hodnot kvadratických odchylek kritériálních veličin a akčních zásahů ve zvolených časových okamžicích
- 2) podle typu poruchy:
 - a) plně determinovaná porucha tvarem i místem vstupu
 - b) determinovaná porucha libovolného tvaru s libovolným místem vstupu do soustavy - tzv.obecná porucha
 - c) náhodná stacionární porucha

2.1 Návrh číslicového řízení víceparametrové lineární soustavy podle kvadratického kritéria.

Kvadratické kritérium jakosti regulace patří mezi nejčastěji používaná kritéria. Má své určité výhody:

- je schopno vyjádřit požadavky většiny konkrétních provozů
- jeho minimalizace vede na úlohu lineární a tedy i snadno řešitelnou.

Kritérium jakosti se vyjadřuje jako minimum funkcionálu pro r -parametrovou regulaci

$$J = \sum_{j=\eta}^{\tau} \underline{x}_k^T(j) \underline{K}_{kj} \underline{x}_k(j) + \Delta \underline{u}^T \underline{K}_{qj} \Delta \underline{u} \quad (2.1-1)$$

$\underline{x}_k(j)$ je vektor $[p, 1]$ ($p=r$) kritériálních veličin v krokovacím intervalu j

$\Delta \underline{u}$ je vektor $[r\tau, 1]$ změn akčních veličin v průběhu celého regulačního pochodu, tzv. akčních zásahů

(minimalizací kvadrátů změn akčních veličin se snižují nároky na potřebné výkony servomotorů a tlumí se regulační pochody)

$\underline{K}_{kj}$, $\underline{K}_{qj}$ matice (obvykle diagonální) váhových koeficientů, obecně proměnlivých s krokovacím intervalem j

(volbou těchto matic lze ovlivňovat průběh konkrétního regulačního pochodu)

Regulační pochod podle kvadratického kritéria při konstantních hodnotách $\underline{K}_{kj}$, $\underline{K}_{qj}$ trvá obecně nekonečně dlouho, horní hranici součtu τ je třeba volit při numerickém řešení tak, aby se regulační pochod za tuto dobu dostatečně utlumil.

Výpočet algoritmu řízení se děje na základě zadáných přechodových charakteristik pomocí maticového počtu na číslicovém počítači. S výpočtem algoritmu se provádí též výpočet optimálních akčních zásahů během regulačního pochodu a simulace regulačního pochodu s vypočteným algoritmem.

Metodu lze použít pro určení řídicího algoritmu pro vyrovnání determinované poruchy v konečném minimálním počtu kroků, pro vyrovnání obecné poruchy podle kvadratického kritéria a kritéria minimálního počtu kroků i pro vyrovnání ná-

hodné poruchy podle kvadratického kritéria.

Popis metody:

Cílem metody je získání lineárního algoritmu pro výpočet vektoru akčních zásahů $\Delta u(j)$ v každém intervalu regulačního pochodu. Akčním zásahem se rozumí změna hodnoty akční veličiny na začátku krokovacího intervalu po provedeném měření výstupních veličin regulované soustavy $y(j)$. Algoritmus je tedy v přírůstkovém tvaru. Vektor akčních zásahů v každém krokovacím intervalu má stejný rozměr $[r, 1]$ jako vektor hlavních regulovaných veličin (pro které je předepsaná požadovaná hodnota).

Akční zásahy se počítají z hodnot měřených na regulované soustavě okamžitých i starších (regulovaných veličin hlavních i pomocných).

Vektor těchto veličin představuje hodnotu stavových veličin v příslušném krokovacím intervalu. Jejich počet je roven $n+r$, kde n je řád regulované soustavy a r je počet hlavních regulovaných veličin.

Algoritmus řízení optimálně vyrovnává r nezávislých poruch, definovaných vstupem do soustavy a časovým průběhem před počátkem regulačního pochodu a dále již konstantních.

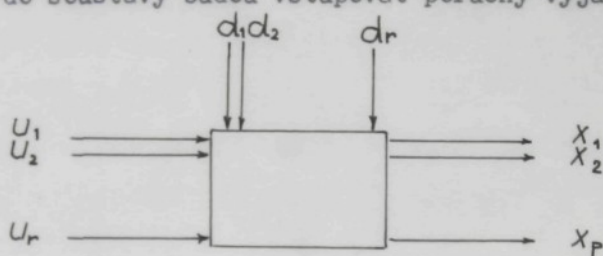
Při výpočtu algoritmu se postupuje tak, že se nejdříve pro zadané poruchy a zvolené váhové koeficienty K_{kj} , K_{qj} určí z podmínky (2.1-1) optimální regulační pochody pro kritériální veličiny, hlavní a pomocné regulované veličiny a akční zásahy.

Pokud průběhy vyhovují provozním podmínkám, určí se dále výpočtem příslušný algoritmus, jinek se výpočet optimálních regulačních pochodů musí opakovat pro jiné zvolené vá-

nové koeficienty $\underline{K}_{kj}$, $\underline{K}_{qj}$.

Pro popis regulované soustavy se používají přechodové charakteristiky získané výpočtem z matematického modelu nebo měření.

Mějme soustavu s r vstupy a p výstupy podle obr.2.1-1, přičemž do soustavy budou vstupovat poruchy vyjádřené vektorem $\underline{d}$.



obr.2.1-1

Hodnoty kritériálních veličin v j -tém krokovacím intervalu regulačního pochodu sledovaného v intervalu od $j=0$ až τ se dají zapsat ve tvaru:

$$\underline{x}_{k(j)} = \underline{G}_{k(j)} \underline{d} + \underline{F}_{(j)} \Delta \underline{u} \quad (2.1-2)$$

$\underline{d}$ je vektor $[r, 1]$ zvolených determinovaných poruch různého typu, vstupujících do soustavy v krokovacím intervalu

$$j = l_g < 0$$

$\Delta \underline{u}$ je vektor $[r, 1]$ akčních zásahů v průběhu celého sledovaného regulačního pochodu

$$\Delta \underline{u}^T = [\Delta \underline{u}^T(0), \Delta \underline{u}^T(1), \dots, \Delta \underline{u}^T(\tau-1)]$$

$\Delta \underline{u}(j)$ je vektor $[r, 1]$ akčních zásahů provedených v krokovacím intervalu j

$$\Delta \underline{u}(j) = \underline{u}(j) - \underline{u}(j-1)$$

$\underline{u}(j)$ je vektor $[r, 1]$ hodnot akčních veličin v krokovacím intervalu j

$$\underline{u}^T(j) = [u_1(j), u_2(j), \dots, u_r(j)]$$

$\underline{G}_k(j)$ je matice $[p, r]$ diskretních hodnot odezev regulované soustavy v krokovacím intervalu j na poruchy $\underline{d}$

$$\underline{G}_k(j) = \begin{bmatrix} k\varepsilon_{11}(j-1_1) & k\varepsilon_{12}(j-1_2) & \dots & k\varepsilon_{1r}(j-1_r) \\ k\varepsilon_{21}(j-1_1) & k\varepsilon_{22}(j-1_2) & \dots & k\varepsilon_{2r}(j-1_r) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k\varepsilon_{p1}(j-1_r) & k\varepsilon_{p2}(j-1_2) & \dots & k\varepsilon_{pr}(j-1_r) \end{bmatrix}$$

$k\varepsilon_{qs}(j-1_s)$ je hodnota přechodové charakteristiky v $(j-1_s)$ -tém kroku od jejího počátku pro q -tou kritériální veličinu k^x_q a s -tou poruchu d_s vstupující do regulované soustavy v krokovacím intervalu $j=1_s$

$F(j)$ je matice $[p, r]$ diskretních hodnot odezev regulované soustavy v krokovacím intervalu j na akční zásah $\Delta \underline{u}$

$$\underline{F}(j) = [\underline{G}(j), \underline{G}(j-1), \underline{G}(j-2) \dots \underline{G}(1), \underline{0}, \underline{0}]$$

$$\underline{F}(j) \Delta \underline{u} = \sum_{i=1}^j \underline{G}(i) \Delta \underline{u}(j-i) = \sum_{i=1}^j \underline{G}(j-i) \Delta \underline{u}(i)$$

$$\underline{G}(i) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}(i) & \varepsilon_{12}(i) & \dots & \varepsilon_{1r}(i) \\ \varepsilon_{21}(i) & \varepsilon_{22}(i) & \dots & \varepsilon_{2r}(i) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varepsilon_{p1}(i) & \varepsilon_{p2}(i) & \dots & \varepsilon_{pr}(i) \end{bmatrix}$$

$\varepsilon_{qs}(i)$ je hodnota přechodové charakteristiky v i -tém kroku od jejího počátku pro q -tou výstupní veličinu y_q a s -tou vstupní veličinu u_s

Po dosazení vztahu (2.1-2) za kritériální veličiny do vztahu (2.1-1) je hodnota kvadratického funkcionálu rovna

$$J = \sum_{j=\eta}^T (\underline{d}^T \underline{G}_k^T(j) + \Delta \underline{u}^T \underline{F}_j^T) \underline{K}_{kj} (\underline{G}_k(j) \underline{d} + \underline{F}_j \Delta \underline{u}) + \Delta \underline{u}^T \underline{K}_{\eta j} \Delta \underline{u} \quad (2.1-3)$$

η v dalším výpočtu volíme = 1

Úloha spočívá v nalezení takového vektoru akčních zásahů, který bude pro zadané poruchy $\underline{d}$ minimalizovat hodnotu

funkcionálu (2.1-3), přičemž akční zásahy jsou dány algoritmem řízení

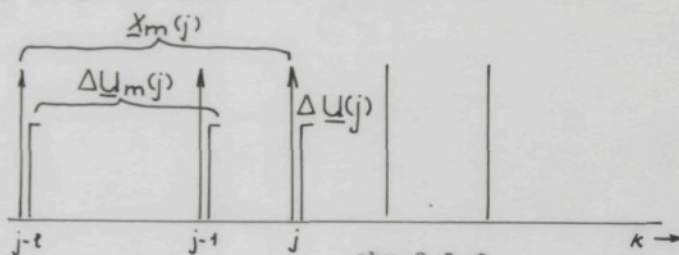
$$\Delta \underline{u}(j) = \underline{A} \underline{x}_m(j) + \underline{B} \Delta \underline{u}_m(j) \quad (2.1-4)$$

$\Delta \underline{u}_m(j)$ je vektor $[r, 1]$ akčních zásahů provedených během celého měření úplného vektoru výstupních veličin v intervalu $j=j-1$ až j

$\underline{x}_m(j)$ je vektor $[n+r, 1]$ stavových veličin příslušných ke krokovacímu intervalu j

$\underline{A}, \underline{B}$ jsou matice koeficientů algoritmu o rozměrech $[r, n+r]$, $[r, r]$

Časový diagram algoritmu řízení je na obr.2.1-2



obr.2.1-2

Algoritmus (2.1-4) je přírůstkový, to znamená, že v ustáleném stavu vektor akčních zásahů $\Delta \underline{u}(j)=0$ a proto i vektor stavových veličin $\underline{x}_m(j)$ musí být nulový.

Tímto se musíme řídit při volbě prvků vektoru $\underline{x}_m$. Lepší výsledky dává ten algoritmus, u něhož hodnoty vektoru stavových veličin jsou získávány v kratším čase.

Princip nalezení optimálního algoritmu podle kritéria (2.1-1) spočívá v nalezení minima funkcionálu (2.1-3) na prostoru koeficientů $\underline{A}, \underline{B}$. Jestliže počet veličin $\underline{x}_m(j)$ v algoritmu (2.1-4) je roven počtu stavových veličin $n+r$ regulované soustavy, pak toto minimum je shodné s minimem funkcionálu (2.1-3) na prostoru všech akčních zásahů v průběhu

celého regulačního pochodu.

Toto minimum nalezneme z podmínky:

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta u} = 0 \quad (2.1-5)$$

$$J = \sum_{j=1}^{\tau} \underline{d}^T \underline{G}_{kj}^T \underline{K}_{kj} \underline{G}_{kj} \underline{d} + \Delta u^T \underline{F}_{ij}^T \underline{K}_{kj} \underline{G}_{kj} \underline{d} + \\ \underline{d}^T \underline{G}_{kj}^T \underline{K}_{kj} \underline{F}_{ij} \Delta u + \Delta u^T \underline{F}_{ij}^T \underline{K}_{kj} \underline{F}_{ij} \Delta u + \Delta u^T \underline{K}_{qj} \Delta u$$

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta u} = \sum_{j=1}^{\tau} \underline{F}_{ij}^T \underline{K}_{kj} \underline{G}_{kj} \underline{d} + \underline{F}_{ij}^T \underline{K}_{kj} \underline{G}_{kj} \underline{d} + \\ + \sum_{j=1}^{\tau} (\underline{F}_{ij}^T \underline{K}_{kj} \underline{F}_{ij} + \underline{F}_{ij}^T \underline{K}_{kj} \underline{F}_{ij}) \Delta u + \\ + (\underline{K}_{qj}^T + \underline{K}_{qj}) \Delta u = 0$$

Předpokládáme, že $\underline{K}_{kj}$ i $\underline{K}_{qj}$ jsou diagonální, proto platí $\underline{K}_{kj}^T = \underline{K}_{kj}$ a $\underline{K}_{qj}^T = \underline{K}_{qj}$

$$-2 \sum_{j=1}^{\tau} \underline{F}_{ij}^T \underline{K}_{kj} \underline{G}_{kj} \underline{d} = \Delta u \left[2 \sum_{j=1}^{\tau} \underline{F}_{ij}^T \underline{K}_{kj} \underline{F}_{ij} + 2 \underline{K}_{qj} \right] \\ \Delta u = - \left[\sum_{j=1}^{\tau} \underline{F}_{ij}^T \underline{K}_{kj} \underline{F}_{ij} + \underline{K}_{qj} \right]^{-1} \sum_{j=1}^{\tau} \underline{F}_{ij}^T \underline{K}_{kj} \underline{G}_{kj} \underline{d} \quad (2.1-6)$$

Pro zadané poruchy $\underline{d}$ a pro takto určené akční zásahy lze snadno vypočítat průběh všech stavových veličin $\underline{x}_m(j)$ optimálního regulačního pochodu podle vztahu:

$$\underline{x}_m(j) = \underline{G}_m(j) \underline{d} + \underline{F}(j) \Delta u$$

Koeficienty optimálního regulačního algoritmu je možno stanovit z podmínky minima součtu kvadrátů odchylek.

$$\Delta u(j) = \underline{A} \underline{x}_m(j) + \underline{B} \Delta u_m(j) + \underline{e}(j)$$

$$\underline{e}(j) = \Delta u(j) - \underline{A} \underline{x}_m(j) - \underline{B} \Delta u_m(j) \quad \text{pro } j = 0 \text{ až } \tau-1$$

$$\underline{e}(j) = \Delta \underline{u}(j) - \begin{bmatrix} \underline{A} \\ \underline{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{x}_m(j), \Delta \underline{u}_m(j) \end{bmatrix}$$

$\underline{e}(j)$ je vektor $[r, 1]$ chyb rovnice (2.1-7) v j -tém regulačním intervalu

$\Delta \underline{u}(j), \Delta \underline{u}_m(j)$ jsou vektory $[r, 1]$, $[r_1, 1]$ optimálních akčních zásahů vypočtených ze vztahu (2.1-6) pro krok j

$\underline{x}_m(j)$ je vektor $[n+r, 1]$ stavových veličin odpovídajících optimálním akčním zásahům $\Delta \underline{u}$ a poruchám $\underline{d}$ pro krok j

$\underline{A}$ je matice $[r, n+r]$ koeficientů u stavových veličin

$$\underline{A}^T = [{}^1\underline{a}, {}^2\underline{a}, \dots, {}^r\underline{a}]$$

$\underline{B}$ je matice $[r, r_1]$ koeficientů u dříve provedených akčních zásahů

$$\underline{B}^T = [{}^1\underline{b}, {}^2\underline{b}, \dots, {}^r\underline{b}]$$

Matice koeficientů $\underline{A}$ a $\underline{B}$ určíme z podmínky minima váženého součtu kvadrátů chyb $e^2(j)$ pro všechny krokovací intervaly ve sledovaném regulačním pochodu a postupně pro všechny akční zásahy.

$$\begin{bmatrix} {}^1\underline{e}, {}^2\underline{e}, \dots, {}^r\underline{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^1\Delta \underline{u}, {}^2\Delta \underline{u}, \dots, {}^r\Delta \underline{u} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{x}_m, \Delta \underline{u}_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^1\underline{a}, {}^2\underline{a}, \dots, {}^r\underline{a} \\ {}^1\underline{b}, {}^2\underline{b}, \dots, {}^r\underline{b} \end{bmatrix}$$

$${}^i\underline{e} = {}^i\Delta \underline{u} - \begin{bmatrix} \underline{x}_m, \Delta \underline{u}_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^i\underline{a} \\ {}^i\underline{b} \end{bmatrix}$$

Volíme kritérium ve tvaru:

$$J = \sum_{i=1}^r J_i$$

$$J_i = {}^i\underline{e}^T \underline{K}_d {}^i\underline{e}$$

$\underline{K}_d$ je diagonální matice kladných váhových koeficientů

Provedeme minimalizaci kritéria:

$$\frac{\partial J_i}{\partial \underline{a}} = 0 \quad \underline{a} = \begin{bmatrix} {}^i\underline{a} \\ {}^i\underline{b} \end{bmatrix}$$

Z těchto podmínek získáváme koeficienty pro výpočet diferenční rovnice regulátoru

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{A} \\ \Delta \bar{B} \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} \underline{X}, \underline{U} \end{bmatrix}^T \underline{K}_d \begin{bmatrix} \underline{X}, \underline{U} \end{bmatrix} \right\}^{-1} \begin{bmatrix} \underline{X}, \underline{U} \end{bmatrix}^T \underline{K}_d \Delta \underline{U}$$

$\Delta \underline{U}$ matice $[r\tau, r]$ optimálních akčních zásahů

$$\Delta \underline{U} = \begin{bmatrix} \Delta^1 \underline{u}, & \Delta^2 \underline{u}, & \dots & \Delta^r \underline{u} \end{bmatrix}$$

$\underline{X}$ matice $[r\tau, n+r]$ hodnot stavových veličin v průběhu regulačního pochodu pro všechny determinované vstupní poruchy

$\underline{U}$ matice $[r\tau, r]$ hodnot akčních zásahů v průběhu regulačního pochodu pro všechny determinované vstupní poruchy

3 ADAPTIVNÍ ČÍSLICOVÁ REGULACE

V současné době probíhá prudký rozvoj adaptivních systémů. Protože tato oblast ještě není dostatečně prozkoumána, není ani sjednocena terminologie v tomto směru.

Velmi často se setkáváme v praxi s případy, že musíme řídit systémy s neúplnou nebo velmi malou počáteční znalostí o tomto systému. Zároveň si klademe požadavek, aby po určité době adaptace systému bylo řízení optimální nebo alespoň blízké optimálnímu.

Pod pojmem adaptivní systém chápeme systém, kde na základě změny parametrů a struktury systému popřípadě změnou vstupního signálu generovaného na základě průběžné informace o vstupech a výstupech je možno dosáhnout optimálního stavu systému při neúplné nebo velmi malé počáteční znalosti o systému, popřípadě při měnících se podmínkách činnosti systému.

Při konkrétním návrhu adaptivního systému je třeba zajistit dva základní požadavky:

- 1) Průběžné vyhodnocování vlivu prostředí na vlastnosti systému.
- 2) Vhodným způsobem eliminovat vliv prostředí a zajistit minimalizaci ztrátové funkce.

Každá adaptace totiž jako reakce systému na nové prostředí je zatížena určitou ztrátou, která se opakováním procesu adaptace ještě zvětšuje.

První podmínku je možno zajistit použitím několika různých metod:

- a) Systém s referenčním modelem - na vstup do systému je připojen paralelní model systému, který reprezentuje poža-

dované chování systému. Rozdíl mezi výstupem systému a modelem je mírou, jak dalece se chování skutečného systému shoduje s požadovaným.

b) Systém s průběžnou identifikací parametrů - v systémech je zabudován algoritmus průběžné identifikace, který průběžně odhaduje a upřesňuje parametry soustavy.

c) Systém s nepřímými metodami - vyhodnocování rozdílů mezi požadovanými a skutečnými vlastnostmi systému se provádí měřením pomocných nepřímých veličin.

Druhou podmínku je možno v podstatě splnit třemi způsoby:

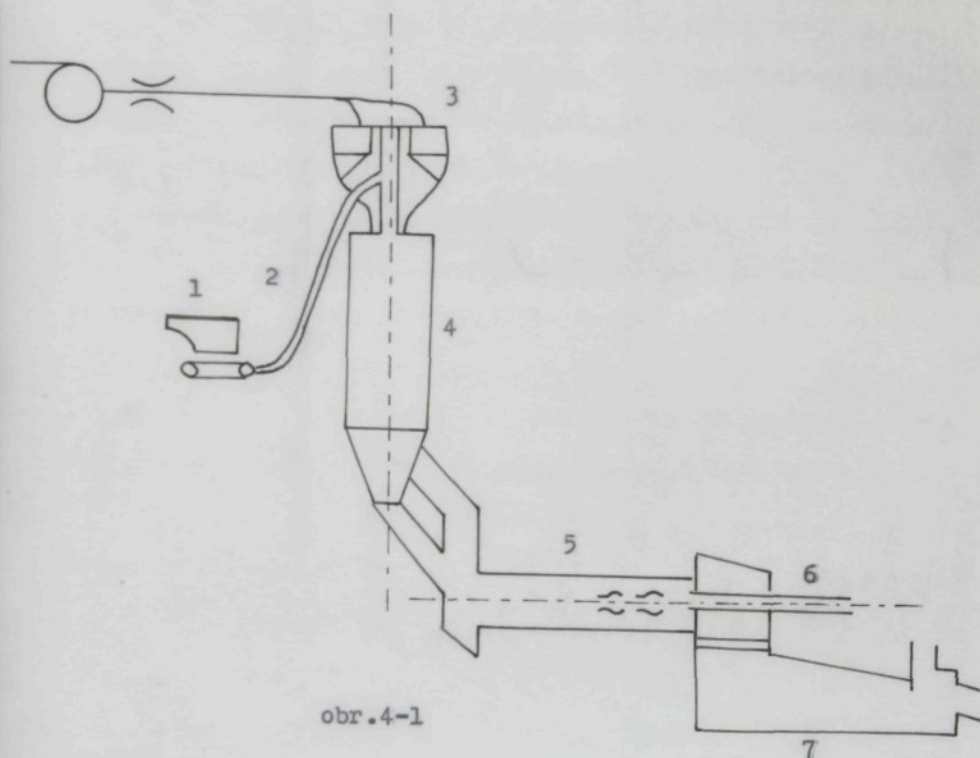
a) Vhodnou změnou nastavitelných parametrů systému. Nejčastěji se odpovídajícím způsobem nastavují parametry regulačních členů.

b) Generováním vhodného vstupního signálu systému - tak zvaným signálním nastavením, zajistíme, aby dynamické vlastnosti systému odpovídaly požadovaným.

c) Změnou struktury systému.

4 REGULACE CEMENTÁRENSKÉ PECE:

Představme si zjednodušené schéma cementářenské pecní linky podle obr.4-1



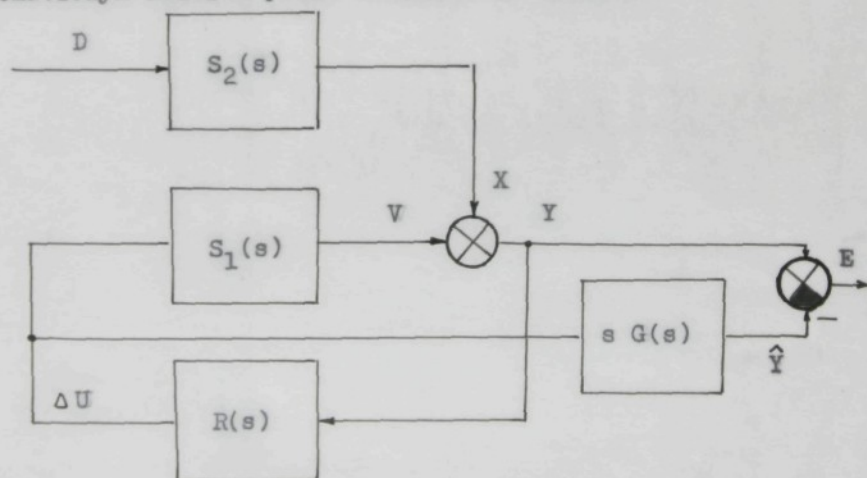
obr.4-1

- 1 podavač
- 2 pneumatické dopravní zařízení
- 3 cyklonové odlučovače
- 4 protiproudový výměník tepla
- 5 rotační pec
- 6 hořák
- 7 chladič

Surovinový prášek prochází cementárenskou pecí od podavače 1 přes pneumatické dopravní zařízení 2 do protiproudového výměníku tepla 4. Odtud padá do rotační pece 5, kde postupuje až do části, kde vypadává do chladiče 7. V hořáku 6 je spalován mazut a horké spaliny postupují pecní linkou proti směru toku surovinového prášku. V cyklónových odlučovačích 3 se odděluje od spalin strhávaný surovinový prášek, který se vrací zpět do protiproudového výměníku tepla.

Regulovaná veličina y je představována teplotou výstupních plynů za cyklónovými odlučovači, akční veličina u představuje množství zpracovávané suroviny. Poruchová veličina ΔU znamená změnu výhřevnosti paliva, popřípadě změnu účinnosti spalování.

Cementárenskou pecní linku přibližně můžeme nahradit matematickým modelem podle schematu na obr.4-2



obr.4-2

$S_1(s), S_2(s)$ jsou přenosy soustav v Z-transformaci

$R(s)$ je přenos regulátoru v Z-transformaci

$G(s)$ je váhová funkce v Z-transformaci

Regulovanou soustavu lze popsat přenosem v Z-transformaci

$$F(z) = \sum_{j=0}^{\infty} f(j) z^{-j} = Z[f(j)]$$

$F(z)$ je Z-transformace posloupnosti $f(j)$

$$s = \frac{1}{z} = z^{-1}$$

$$F(s) = \sum_{k=0}^{\infty} f(j) s^j = Z[f(j)]$$

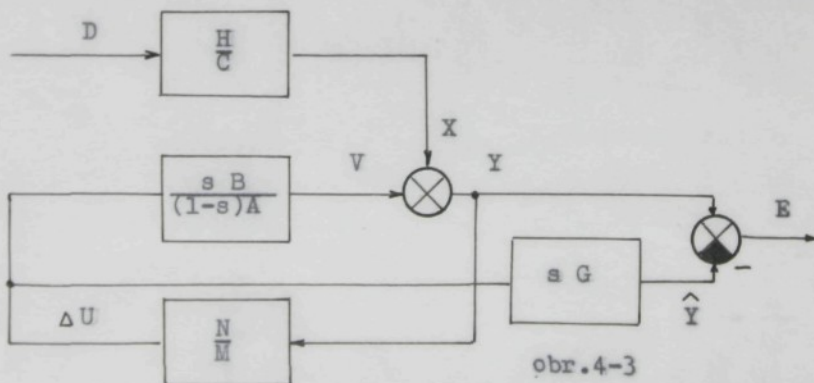
$$Y(s) = \sum_{k=0}^{\infty} y(k) s^k = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{j=0}^k g(j) u(k-j) s^k$$

$$Y(s) = g(0)u(0) + [g(0)u(1) + g(1)u(0)]s + [g(0)u(2) + g(1)u(1) + g(2)u(0)]s^2 + \dots$$

$$= u(0) \sum_{j=0}^{\infty} g(j) s^j + u(1) s \sum_{j=0}^{\infty} g(j) s^j + \dots =$$

$$= U(s) G(s)$$

Odtud plyne, že Z-transformace váhové funkce je impulsní přenos. Nahraďme schéma podle obr.4-2 schématem podle obr.4-3



$$S_1(s) = \frac{s \cdot B(s)}{A(s)} = \frac{s \cdot B}{A} \quad S_2(s) = \frac{H(s)}{C(s)} = \frac{H}{C} \quad R(s) = \frac{N(s)}{M(s)} = \frac{N}{M}$$

A, B, C, H, N, M, G nechť jsou polynomy proměnné s

$$H(s) = h_0 + h_1 s + h_2 s^2 + \dots h_n s^n$$

$$C(s) = 1 + c_1 s + c_2 s^2 + \dots c_n s^n$$

$$A(s) = 1 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots a_n s^n$$

$$B(s) = 1 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots b_n s^n$$

$$N(s) = n_0 + n_1 s + n_2 s^2 + \dots n_n s^n$$

$$M(s) = 1 + m_1 s + m_2 s^2 + \dots m_n s^n$$

Stupeň polynomů jednotlivých přenosů v čitateli volíme shodný jako ve jmenovateli roven n .

Regulovaný systém podle obr.4-3 lze popsat soustavou diferenčních rovnic ve tvaru

$$\Delta u(j) = n_0 y(j) + n_1 y(j-1) + \dots m_1 \Delta u(j-1) + m_2 \Delta u(j-2) + \dots$$

$$v(j) = a_1 v(j-1) + a_2 v(j-2) + \dots b_1 \Delta u(j-1) + b_2 \Delta u(j-2) + \dots$$

$$x(j) = c_1 x(j-1) + c_2 x(j-2) + \dots h_0 d(j) + h_1 d(j-1) + h_2 d(j-2) + \dots$$

$\Delta u(j)$ změna akční veličiny v j -tém kroku

$y(j)$ regulovaná veličina v j -tém kroku

5 IDENTIFIKACE LINEÁRNÍCH DYNAMICKÝCH SOUSTAV

Každý návrh optimálního řídicího algoritmu předpokládá znalost dynamického chování regulované soustavy.

Běžně můžeme dynamické chování regulované soustavy vyjadřovat:

matematickým zápisem - pomocí diferenciálních či diferenciálních rovnic (popřípadě soustavou takových rovnic) pro výstupní nebo stavové veličiny

- ve tvaru obrazových přenosů
v Laplaceově transformaci

- ve tvaru obrazových přenosů
v Z-transformaci

- pomocí přechodových funkcí

- ve tvaru váhové funkce

- ve tvaru frekvenční funkce

grafickým záznamem - přechodovou charakteristikou

- frekvenční charakteristikou

(popřípadě číselnou posloupností hodnot těchto charakteristik ve zvolených časových nebo frekvenčních intervalech)

Popis dynamiky lze získat v podstatě dvojím způsobem:

1) matematicko-fyzikální analýzou dějů probíhajících
v regulované soustavě

2) experimentálně

První způsob analýzy vyžaduje hluboké znalosti struktury soustavy i všech elementárních jevů v soustavě. Je tedy velmi

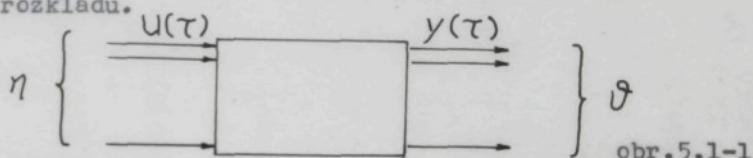
pracný a časově náročný.

Experimentální způsob vyžaduje měření hodnot vstupních a výstupních veličin soustavy a jejich vhodné zpracování. Výhodou tohoto způsobu je, že nejsou potřebné další znalosti o soustavě.

Jednou z experimentálních metod je identifikace regulované soustavy metodou nejmenších čtverců.

5.1 Identifikace regulované soustavy metodou nejmenších čtverců algoritmem U-D filtru.

Této metody se užívá pro průběžnou identifikaci. To znamená, že na základě vstupů a výstupů odhadujeme hodnoty váhových funkcí, přičemž obcházíme výpočet inverzní matice pomocí U-D rozkladu.



Lineární stochastický systém s ϑ - rozměrným výstupem $y(\tau)$ a η - rozměrným vstupem $u(\tau)$ podle obr.5.1-1 nechť je popsán regresním modelem ve tvaru:

$$y(\tau) = \underline{P}^T \underline{z}(\tau) + e(\tau) \quad (5.1-1)$$

vektor $\underline{z}^T(\tau) = [u(\tau-1), u(\tau-2), \dots, u(\tau-n)]$

matice neznámých regresních koeficientů $\underline{P}$ je složena z matic impulseních charakteristik váhových funkcí systému

$$\underline{P}^T = [G(1), G(2), \dots, G(n)]$$

matice $G(i)$ rozměru $\vartheta \times \eta$ je tvořena hodnotami impulseních charakteristik systému v diskrétním čase i , matice $\underline{P}$ je rozměru $\varepsilon \times \vartheta$, $\varepsilon = n \times \eta$, uvažujeme $\underline{G}(i) \approx \underline{0}$ pro $i > n$

$$[e(\tau), \tau = 1, 2, \dots, t]$$

je posloupnost ϑ -rozměrných vzájemně nekorelovaných náhodných vektorů s nulovou střední hodnotou a konstantní kovarianční maticí $\underline{R}$ rozměru $\vartheta \times \vartheta$

$$[e(\tau) e^T(\tau) = \underline{R}]$$

Odhad parametrů a exponenciální zapomínání.

Úkolem je průběžně odhadovat neznámé parametry $\underline{P}$ modelu (5.1-1) na podkladě měřených hodnot výstupů a vstupů

$$[y(\tau), u(\tau), \tau = t, t-1, \dots, 1]$$

Použijeme metodu nejmenších čtverců

$$\underline{e}(\tau) = \underline{y}(\tau) - \underline{P}^T \underline{z}(\tau) \quad (5.1-2)$$

$$J(t, \underline{P}) = \sum_{\tau=1}^t \underline{e}^T(\tau) \underline{\Omega} \underline{e}(\tau) \quad (5.1-3)$$

$$\min_{\underline{P}} J(t, \underline{P}) = J(t, \hat{\underline{P}}(t))$$

$\hat{\underline{P}}(t)$ je odhad matice regresních koeficientů v čase t .

Rovnici (5.1-2) můžeme graficky znázornit:

$$\underline{e}(\tau) = \underline{y}(\tau) - \underline{P}^T \cdot \underline{z}(\tau)$$

Volme matici $\underline{\Omega}$ jako diagonální

$$\underline{\Omega} = \begin{bmatrix} \omega_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \omega_2 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \omega_{\vartheta} \end{bmatrix}$$

Kritérium (5.1-3) můžeme vyjádřit:

$$J(t, \underline{P}) = \sum_{\tau=1}^t e_1^2(\tau) \omega_1 + e_2^2(\tau) \omega_2 + \dots + e_g^2(\tau) \omega_g$$

$\underline{e}_i(\tau)$ je i -tá složka vektoru $\underline{e}(\tau)$

$\underline{e}_i(\tau)$ závisí pouze na i -tém řádku matice $\underline{P}^T$

$\min J(t, \underline{P})$ nezávisí na $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_g$, takže kritérium (5.1-3) postačuje volit ve tvaru:

$$J(t, \underline{P}) = \sum_{\tau=1}^t \underline{e}^T(\tau) \underline{e}(\tau) \quad (5.1-4)$$

Dosud jsme předpokládali, že neznámé parametry $\underline{P}$ jsou v čase konstantní. V případě, že se „pomalu mění“, použijeme tzv. exponenciálního zapomínání a upravíme kritérium (5.1-4) do tvaru

$$J(t, \underline{P}) = \sum_{\tau=1}^t \underline{e}^T(\tau) \underline{e}(\tau) \gamma^{2(t-\tau)}$$

γ je koeficient zapomínání, volíme $\gamma \leq 1$

Rovnici (5.1-2) upravíme do tvaru:

$$\underline{e}(\tau) = [\underline{I}_g, -\underline{P}^T] \begin{bmatrix} y(\tau) \\ z(\tau) \end{bmatrix}$$

$\underline{I}_g$ je jednotková matice rozměru $g \times g$

$$J(t, \underline{P}) = \sum_{\tau=1}^t \gamma^{2(t-\tau)} [y^T(\tau), z^T(\tau)] \begin{bmatrix} \underline{I}_g \\ -\underline{P} \end{bmatrix} [\underline{I}_g, -\underline{P}^T] \begin{bmatrix} y(\tau) \\ z(\tau) \end{bmatrix}$$

O stopě čtvercové matice platí $\text{tr} \underline{A} \underline{B} = \text{tr} \underline{B} \underline{A}$, jelikož

$J(t, \underline{P})$ je skalár, platí $J(t, \underline{P}) = \text{tr} J(t, \underline{P})$ takže

$$J(t, \underline{P}) = \text{tr} \left\{ \sum_{\tau=1}^t \gamma^{2(t-\tau)} \underline{e}^T(\tau) \underline{e}(\tau) \right\} = \text{tr} \left\{ [\underline{I}_g, -\underline{P}^T] V(t) \begin{bmatrix} \underline{I}_g \\ -\underline{P} \end{bmatrix} \right\} = \text{tr} \{ \underline{B} \} \quad (5.1-5)$$

$$V(t) = \sum_{\tau=1}^t \gamma^{2(t-\tau)} \begin{bmatrix} y(\tau) \\ z(\tau) \end{bmatrix} [y^T(\tau), z^T(\tau)] \quad \underline{d} = \begin{bmatrix} y(\tau) \\ z(\tau) \end{bmatrix} \quad (5.1-6)$$

$V(t)$ je symetrická matice, kterou můžeme rozdělit na pole

$$\underline{V}(t) = \begin{bmatrix} \underline{V}_y(t) & \underline{V}_{zy}^T(t) \\ \underline{V}_{zy}(t) & \underline{V}_z(t) \end{bmatrix} \begin{matrix} \updownarrow \vartheta \\ \updownarrow \varepsilon \end{matrix} \quad (5.1-7)$$

Vynecháme-li argument t

$$\begin{aligned} J(P) &= \text{tr} \left\{ \begin{bmatrix} \underline{I}_\vartheta & -\underline{P}^T \\ \underline{V}_y & \underline{V}_{zy}^T \\ \underline{V}_{zy} & \underline{V}_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_\vartheta \\ -\underline{P} \end{bmatrix} \right\} \\ &= \text{tr} \left\{ \underline{V}_y - \underline{P}^T \underline{V}_{zy} - \underline{P} \underline{V}_{zy}^T + \underline{P}^T \underline{V}_z \underline{P} \right\} \end{aligned}$$

Matice $\underline{V}(t)$ je maticí pozitivně semidefinitní, neboť součin

$\underline{G}^T \underline{G}$ je maticí pozitivně semidefinitní

$\underline{x}^T \underline{G}^T \underline{G} \underline{x} = \underline{z}^T \underline{z} \geq 0$, takže i matice $\underline{B}$ ve vztahu (5.1-5) je pozitivně semidefinitní. Máme určit

$$\min_{\underline{P}} J(t, \underline{P}) = J(t, \hat{\underline{P}}(t)) = \min_{\underline{P}} \text{tr} \{ \underline{B} \}$$

Označme $\underline{B}$ min. takovou maticí, pro kterou platí, že

$\underline{B} - \underline{B}$ min. je opět maticí pozitivně semidefinitní.

Stopa matice je rovna součtu vlastních čísel matice. U symetrické pozitivně semidefinitní matice jsou všechna její vlastní čísla reálná a nezáporná, takže $\text{tr}(\underline{B} - \underline{B} \text{ min.}) \geq 0$

$$\text{tr} \underline{B} \geq \text{tr} \underline{B} \text{ min.}$$

$$\min_{\underline{P}} J(t, \underline{P}) = \text{tr} \{ \underline{B} \text{ min.} \}$$

$$\underline{B} = \underline{V}_y - \underline{P}^T \underline{V}_{zy} - \underline{V}_{zy}^T \underline{P} + \underline{P}^T \underline{V}_z \underline{P} = (\underline{P}^T \underline{V}_z - \underline{V}_{zy}^T) \underline{V}_z^{-1} (\underline{V}_z \underline{P} - \underline{V}_{zy}) + \underline{V}_y - \underline{V}_{zy}^T \underline{V}_z^{-1} \underline{V}_{zy}$$

jelikož matice $\underline{V}_z, \underline{V}_z^{-1}$ jsou pozitivně semidefinitní

$$\underline{B} \text{ min.} = \underline{V}_y - \underline{V}_{zy}^T \underline{V}_z^{-1} \underline{V}_{zy} \quad \underline{V}_z \hat{\underline{P}} - \underline{V}_{zy} = 0$$

takže odhad matice regresních koeficientů

$$\hat{\underline{P}}(t) = \underline{V}_z^{-1}(t) \underline{V}_{zy}(t) \quad (5.1-8)$$

Pro výpočet $\underline{V}(t)$ můžeme použít rekurzivní vztah, který plyne z (5.1-6)

$$\underline{V}(t) = \gamma^2 \underline{V}(t-1) + \underline{d}(t) \underline{d}^T(t) \quad (5.1-9)$$

U-D regresní filtr

Z hlediska přesnosti výpočtu $\underline{V}(t)$ na číslicovém počítači se jeví jako výhodné rozložit symetrickou matici $\underline{V}^{-1}(t)$ podle tzv. U-D rozkladu na součin trojúhelníkové matice, která má na diagonále jedničky, matice diagonální a uvedené trojúhelníkové matice transponované.

$$\underline{V}^{-1}(t) = \underline{U}(t) \underline{D}(t) \underline{U}^T(t) \quad (5.1-10)$$

$\underline{U}(t)$ je dolní trojúhelníková matice s jedničkami na hlavní diagonále a $\underline{D}(t)$ je diagonální matice.

Matice $\underline{U}(t)$ a $\underline{D}(t)$ můžeme jako matici $\underline{V}(t)$ rozdělit na pole:

$$\underline{U}(t) = \begin{bmatrix} \underline{U}_y(t) & \underline{0} \\ \underline{U}_{zy}(t) & \underline{U}_z(t) \end{bmatrix} \begin{matrix} \updownarrow \mathcal{D} \\ \updownarrow \mathcal{E} \end{matrix} \quad \underline{D}(t) = \begin{bmatrix} \underline{D}_y(t) & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{D}_z(t) \end{bmatrix} \begin{matrix} \updownarrow \mathcal{D} \\ \updownarrow \mathcal{E} \end{matrix}$$

$\xleftarrow{\mathcal{D}} \quad \xleftarrow{\mathcal{E}} \quad \xleftarrow{\mathcal{D}} \quad \xleftarrow{\mathcal{E}}$

Provedeme inverzi rovnice (5.1-10)

$$\underline{V}(t) = \underline{U}^{T-1}(t) \underline{D}^{-1}(t) \underline{U}^{-1}(t) \quad (5.1-11)$$

Inverzi matice $\underline{U}(t)$ určíme z podmínky $\underline{U}(t) \underline{U}^{-1}(t) = \underline{I}$

$$\underline{U}^{-1}(t) = \begin{bmatrix} \underline{U}_y^{-1} & \underline{0} \\ -\underline{U}_z^{-1}(t) \underline{U}_{zy}(t) \underline{U}_y^{-1}(t), & \underline{U}_z^{-1}(t) \end{bmatrix}$$

Dosadíme do rovnice (5.1-11) a v zápise vynecháme pro přehlednost argument t .

$$\underline{V} = \begin{bmatrix} \underline{U}_y^{T-1}, -\underline{U}_y^{T-1} \underline{U}_{zy}^T \underline{U}_z^{T-1} \\ \underline{0}, \underline{U}_z^{T-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{D}_y^{-1}, \underline{0} \\ \underline{0}, \underline{D}_z^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_y^{-1}, \underline{0} \\ -\underline{U}_z^{-1} \underline{U}_{zy} \underline{U}_y^{-1}, \underline{U}_z^{-1} \end{bmatrix}$$

Po roznásobení a porovnání se zápisem (5.1-7) můžeme psát

$$\underline{V}_z = \underline{U}_z^T \underline{D}_z^{-1} \underline{U}_z^{-1} ; \quad \underline{V}_{zy} = -\underline{U}_z^T \underline{D}_z^{-1} \underline{U}_z^{-1} \underline{U}_{zy} \underline{U}_y^{-1}$$

Po dosazení do vztahu (5.1-8) získáme:

$$\hat{\underline{P}} = -\underline{U}_z \underline{D}_z \underline{U}_z^T \underline{U}_z^T \underline{D}_z^{-1} \underline{U}_z^{-1} \underline{U}_{zy} \underline{U}_y^{-1}$$

$$\hat{\underline{P}} = -\underline{U}_{zy} \underline{U}_y^{-1} \quad (5.1-12)$$

Dále určíme rekurzivní vztah pro výpočet matice $\underline{U}(t)$, $\underline{D}(t)$.

Provedeme inverzi vztahu (5.1-9)

$$\begin{aligned} \underline{V}(t) &= [\underline{\mathcal{J}}^2 \underline{V}(t-1) + \underline{d}(t) \underline{d}^T(t)]^{-1} = [\underline{\mathcal{J}}^2 \underline{U}(t-1) \underline{D}(t-1) \underline{U}(t-1)^T + \underline{d}(t) \underline{d}^T(t)]^{-1} \\ \underline{V}(t) &= \underline{U}(t-1) [\underline{\mathcal{J}}^2 \underline{D}(t-1) + \underline{U}(t-1) \underline{d}(t) \underline{d}^T(t) \underline{U}(t-1)^T]^{-1} \underline{U}(t-1)^T = \\ &= \underline{U}(t-1) \frac{1}{\underline{\mathcal{J}}^2} [\underline{D}(t-1) + \underline{h} \frac{1}{\underline{\mathcal{J}}^2} \underline{h}^T]^{-1} \underline{U}(t-1)^T \quad (5.1-13) \end{aligned}$$

$$\underline{h} = \underline{U}^T(t-1) \underline{d}(t)$$

Pro úpravu inverze v (5.1-13) použijeme vztahu

$$[\underline{A} + \underline{B} \underline{C} \underline{B}^T]^{-1} = \underline{A}^{-1} - \underline{A}^{-1} \underline{B} [\underline{C}^{-1} + \underline{B}^T \underline{A}^{-1} \underline{B}]^{-1} \underline{B}^T \underline{A}^{-1} \quad (5.1-14)$$

Oplatnosti tohoto vztahu se přesvědčíme tím, že po úpravě platí

$$[\underline{A} + \underline{B} \underline{C} \underline{B}^T] [\underline{A}^{-1} - \underline{A}^{-1} \underline{B} (\underline{C}^{-1} + \underline{B}^T \underline{A}^{-1} \underline{B})^{-1} \underline{B}^T \underline{A}^{-1}] = \underline{I}$$

z porovnání vztahů (5.1-13), (5.1-14) vidíme, že matici $\underline{C}$ ze vztahu (5.1-14) odpovídá ve vztahu (5.1-13) skalár, což je výhodné, neboť potom $[\underline{C}^{-1} + \underline{B}^T \underline{A}^{-1} \underline{B}]$ je též skalár a jeho inverze je dělením.

$$[\underline{D}(t-1) + \underline{h} \frac{1}{\underline{\mathcal{J}}^2} \underline{h}^T]^{-1} = \underline{D}(t-1) - \frac{\underline{D}(t-1) \underline{h} \underline{h}^T \underline{D}(t-1)}{\underline{\mathcal{J}}^2 + \underline{h}^T \underline{D}(t-1) \underline{h}}$$

Vztah (5.1-13) přejde na tvar:

$$\underline{U}(t) \underline{D}(t) \underline{U}^T(t) = \underline{U}(t-1) \frac{1}{\underline{\mathcal{J}}^2} \left[\underline{D}(t-1) - \frac{\underline{D}(t-1) \underline{h} \underline{h}^T \underline{D}(t-1)}{\underline{\mathcal{J}}^2 + \underline{h}^T \underline{D}(t-1) \underline{h}} \right] \underline{U}(t-1)^T$$

Můžeme tedy tvrdit, že matice

$$\frac{1}{j^3} \left[\underline{D}(t-1) - \frac{\underline{D}(t-1) \underline{h} \underline{h}^T \underline{D}(t-1)}{j^3 + \underline{h}^T \underline{D}(t-1) \underline{h}} \right]$$

je maticí symetrickou, kterou můžeme rozložit na součin matice trojúhelníkové s jedničkami na diagonále, matice diagonální a transponované trojúhelníkové matice. Jestliže uvedeme diagonální matici označíme jako $\underline{D}(t)$ a trojúhelníkovou matici jako $\underline{H}$, $\underline{H}^T$ potom

$$\frac{1}{j^3} \left[\underline{D}(t-1) - \frac{\underline{D}(t-1) \underline{h} \underline{h}^T \underline{D}(t-1)}{j^3 + \underline{h}^T \underline{D}(t-1) \underline{h}} \right] = \underline{H} \underline{D}(t) \underline{H}^T$$

$$\underline{U}(t) \underline{D}(t) \underline{U}^T(t) = \underline{U}(t-1) \underline{H} \underline{D}(t) \underline{H}^T \underline{U}^T(t-1) \quad (5.1-15)$$

Z porovnání levé a pravé strany rovnice (5.1-15) plyne

$$\underline{U}(t) = \underline{U}(t-1) \underline{H}$$

Toto je základní princip UDFILU.

Jestliže budeme odhadovat parametr $\underline{P}$ systému (5.1-1) při

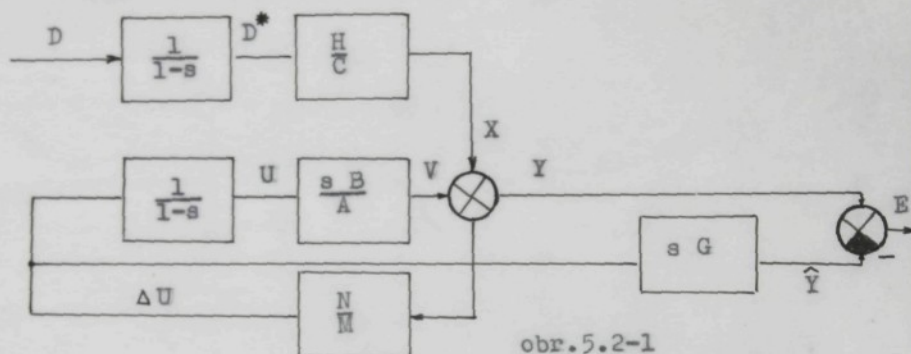
$\vartheta = 1$, $\underline{P}$ bude vektor, pak vztah (5.1-12) můžeme zapsat

$\hat{\underline{P}}(t) = -\underline{U}_{zy}(t)$ neboť $\underline{U}_y(t) = 1$. Toto vyplývá ze skutečnosti, že $\underline{U}(t)$ je trojúhelníkovou maticí s jedničkami na diagonále.

V hlavním programu je použito k průběžné identifikaci této metody pomocí podprogramu UDFIL. Uvedený podprogram má výstup upraven pro $\vartheta = 1$. Hodnota parametru $\varepsilon = \text{FRG}$ je volena jako jedna. Při prvním volání podprogramu je třeba parametr INIT obsadit nulou a v průběhu podprogramu obsadit jednotkou - což je zajištěno. Při výstupu z podprogramu jsou na vektoru $\underline{P}$ uloženy odhady parametrů $\underline{P}$.

5.2 Popis identifikace regulované soustavy metodou nejmenších čtverců při použití algoritmu inverze symetrické matice.

Mějme regulovaný obvod podle obr.5.2-1 v tomto regulovaném obvodu je zapojena regulovaná soustava s impulsním přenosem $\frac{s B}{A}$. Označme H, C, A, B, N, M, G polynomy proměnné s .



Identifikaci regulované soustavy provádějme tak, že na základě vstupů a výstupů budeme hledat hodnoty váhové funkce při minimalizaci kvadrátu rozdílu výstupů $y(j)$ regulované soustavy a výstupů $\hat{y}(j)$ modelu regulované soustavy.

Model regulované soustavy popíšeme rovnicí:

$$\hat{y}(j) = \hat{g}_1 \Delta u(j-1) + \hat{g}_2 \Delta u(j-2) + \dots$$

Výstup regulované soustavy se od výstupu modelu liší o určitou chybu předpovědi, predikce

$$y(j) = \hat{y}(j) + e(j)$$

$e(j)$ je rozdíl výstupů $y(j)$ regulované soustavy a výstupů $\hat{y}(j)$ modelu regulované soustavy

$$e(j) = y(j) - \hat{y}(j) = y(j) - \hat{g}_1 \Delta u(j-1) - \hat{g}_2 \Delta u(j-2) - \dots \quad (5.2-1)$$

Volme kritérium ve tvaru:

$$J = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e^2(j) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n [y(j) - \hat{g}_1 \Delta u(j-1) - \dots - \hat{g}_n \Delta u(j-n)]^2 \quad (5.2-2)$$

Abychom mohli jednotlivé hodnoty odhadů $\hat{g}_i$ pro $i = 1, 2, \dots, n$ určit, provedeme derivaci kritéria (5.2-2) podle jednotlivých $\hat{g}_i$. Tyto derivace položíme rovny nule.

Získáme soustavu n normálních rovnic o n neznámých:

$$\frac{\partial J}{\partial \hat{g}_1} = -\frac{2}{n} \sum_{j=1}^n [y(j) - \hat{g}_1 \Delta u(j-1) - \dots - \hat{g}_n \Delta u(j-n)] \Delta u(j-1)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \hat{g}_2} = -\frac{2}{n} \sum_{j=1}^n [y(j) - \hat{g}_1 \Delta u(j-1) - \dots - \hat{g}_n \Delta u(j-n)] \Delta u(j-2)$$

$$\vdots$$

$$\frac{\partial J}{\partial \hat{g}_n} = -\frac{2}{n} \sum_{j=1}^n [y(j) - \hat{g}_1 \Delta u(j-1) - \dots - \hat{g}_n \Delta u(j-n)] \Delta u(j-n)$$

$$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y(j) \Delta u(j-1) - \hat{g}_1 \sum_{j=1}^n \Delta u^2(j-1) - \hat{g}_2 \sum_{j=1}^n \Delta u(j-2) \Delta u(j-1) - \dots = 0$$

$$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y(j) \Delta u(j-2) - \hat{g}_1 \sum_{j=1}^n \Delta u(j-1) \Delta u(j-2) - \hat{g}_2 \sum_{j=1}^n \Delta u^2(j-2) - \dots = 0$$

$$\vdots$$

$$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y(j) \Delta u(j-n) - \hat{g}_1 \sum_{j=1}^n \Delta u(j-1) \Delta u(j-n) - \hat{g}_2 \sum_{j=1}^n \Delta u(j-2) \Delta u(j-n) - \dots = 0$$

$$\text{Označme: } \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \triangleq \sum$$

Tuto soustavu rovnic můžeme zapsat ve tvaru:

$$\begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum \Delta u^2(j-1) & \sum \Delta u(j-2) \Delta u(j-1) & \dots \\ \sum \Delta u(j-1) \Delta u(j-2) & \sum \Delta u^2(j-2) & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ \sum \Delta u(j-1) \Delta u(j-n) & \sum \Delta u(j-2) \Delta u(j-n) & \dots \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum y(j) \Delta u(j-1) \\ \sum y(j) \Delta u(j-2) \\ \vdots \\ \sum y(j) \Delta u(j-n) \end{bmatrix}$$

Zápis rovnice (5.2-1) pro $j = 1, 2, \dots, n$ tvoří soustavu regresních rovnic:

$$y(1) = \hat{g}_1 \Delta u(0) + \hat{g}_2 \Delta u(-1) + \hat{g}_3 \Delta u(-2) + \dots + e(1)$$

$$y(2) = \hat{g}_1 \Delta u(1) + \hat{g}_2 \Delta u(0) + \hat{g}_3 \Delta u(-1) + \dots + e(2)$$

$$y(3) = \hat{g}_1 \Delta u(2) + \hat{g}_2 \Delta u(1) + \hat{g}_3 \Delta u(0) + \dots + e(3)$$

$$\vdots$$

$$y(n) = \hat{g}_1 \Delta u(n-1) + \hat{g}_2 \Delta u(n-2) + \dots + e(n)$$

Soustavu regresních rovnic lze zapsat v maticovém tvaru:

$$\underline{y} = \underline{U} \hat{\underline{g}} + \underline{e}$$

Odtud plyne:

$$\underline{e} = \underline{y} - \underline{U} \hat{\underline{g}}$$

Volme kritérium ve tvaru:

$$J = \frac{1}{n} \underline{e}^T \underline{e}$$

Po dosazení dostáváme:

$$J = \frac{1}{n} (\underline{y}^T - \hat{\underline{g}}^T \underline{U}^T) (\underline{y} - \underline{U} \hat{\underline{g}})$$

Kritérium upravíme do tvaru:

$$J = \frac{1}{n} (\underline{y}^T \underline{U} - \hat{\underline{g}}^T \underline{U}^T \underline{U}) (\underline{U}^T \underline{U})^{-1} (\underline{U}^T \underline{y} - \underline{U}^T \underline{U} \hat{\underline{g}})$$

Odtud plyne:

$$\hat{\underline{g}} = (\frac{1}{n} \underline{U}^T \underline{U})^{-1} \frac{1}{n} \underline{U}^T \underline{y}$$

Zapišeme:

$$\underline{U} = [\Delta u(j), \Delta u(j-1), \Delta u(j-2), \dots] \quad (5.2-3)$$

kde $\Delta u(j)$ je vektor skčních zásahů.

Podmínka regularity matice $\underline{U}^T \underline{U}$ je dána lineární nezávislostí sloupců matice $\underline{U}$. V regulačním obvodu podle obr.5.2-1 je přenos:

$$\frac{\Delta U}{D} = \frac{1}{1-s} \frac{H}{C} \frac{N}{M} \frac{1}{1 - \frac{1}{1-s} \frac{s B N}{A M}}$$

Impulsní přenos $\frac{\Delta U}{D}$ vyjádříme ve tvaru podílu dvou polynomů $P(s) = P$, $Q(s) = Q$. Předpokládejme, že polynomy P, Q jsou nesoudělné. Jejich podíl můžeme vyjádřit řadou $T(s) = T$.

$$T = \frac{P}{Q} = \frac{\Delta U}{D} \quad T \cdot Q = P \quad (5.2-4)$$

Volíme-li stupeň polynomu P $\delta P = 2$ a stupeň polynomu Q $\delta Q = 3$, můžeme psát:

$$(p_0 + p_1 s + p_2 s^2) = (t_0 + t_1 s + t_2 s^2 + t_3 s^3 + \dots) (q_0 + q_1 s + q_2 s^2 + q_3 s^3)$$

Z rovnosti koeficientů u stejných mocnin s plyne:

$$p_0 = t_0 q_0$$

$$p_1 = q_0 t_1 + q_1 t_0$$

$$p_2 = q_0 t_2 + q_1 t_1 + q_2 t_0$$

$$0 = q_0 t_3 + q_1 t_2 + q_2 t_1 + q_3 t_0$$

$$0 = q_0 t_4 + q_1 t_3 + q_2 t_2 + q_3 t_1$$

Z předchozích vztahů je zřejmé, že hodnota t_3 je lineární kombinací hodnot t_0, t_1, t_2 , pokračujeme-li dále je patrné, že každé následující t_i ($i = 4, 5, \dots$) lze též vyjádřit jako lineární kombinaci předchozích třech hodnot

$$t_{i-1}, t_{i-2}, t_{i-3}.$$

V případě, že do regulačního obvodu podle obr.5.2-1 vstoupí porucha $d(j)$, pro níž platí:

$$d(j) = \begin{cases} 1 & \text{pro } j = 0 \\ 0 & \text{pro } j \neq 0 \end{cases}$$

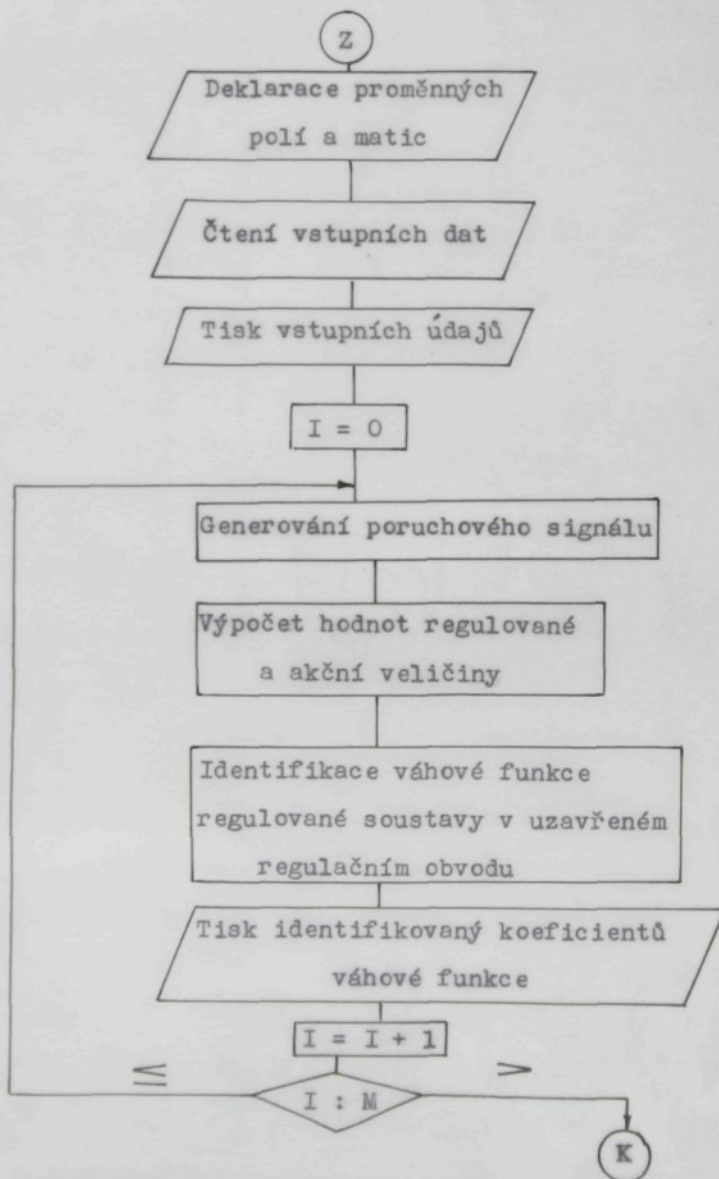
Z uvedených úvah plyne, že v matici $\underline{U}$ dané vztahem (5.2-3), bude δQ lineárně nezávislých sloupců, kde δQ je stupeň polynomu Q . V případě, že do uzavřeného regulačního obvodu

vstupuje porucha $d(j)$ v každém regulačním kroku různé velikosti, jsou vektory matice $\underline{U}$ ze vztahu (5.2-3) $\Delta \underline{u}(j)$, $\Delta \underline{u}(j-1)$, $\Delta \underline{u}(j-2)$, ... lineárně nezávislé.

6 POPIS PROGRAMU:

Pro matematický model podle obr.5.2-1 byl vytvořen program k identifikaci váhové funkce pro počítač RPP-16.

Blokové schéma programu:



Program je přizpůsoben pro M identifikačních průchoďů. Vstup budícího signálu je prováděn pomocí volání procedury FUNCTION NAH, která představuje generátor náhodných čísel. Program je uzpůsoben tak, že náhodný poruchový signál vstupuje do regulované soustavy po KR krocích. Hodnotu KR můžeme zadávat podle potřeby z psacího stroje. Volání procedury FUNCTION NAH v každém identifikačním průchoďu je zajištěno zapnutím klíče.

Pro výpočet váhové funkce pomocí U-D filtru je vytvořen podprogram UDFIL s tiskem koeficientů váhové funkce.

V další verzi programu je výpočet prováděn pomocí inverzní matice. Před prováděním inverze je volán podprogram na výpočet a tisk determinantu vytvořené matice. Pro inverzi a násobení matic jsou zabudovány podprogramy podobně jako pro tisk vektorů a matic. Kontrolní tisky se provádí v případě zapnutí příslušných klíčů počítače.

6.1 Popis vstupních dat

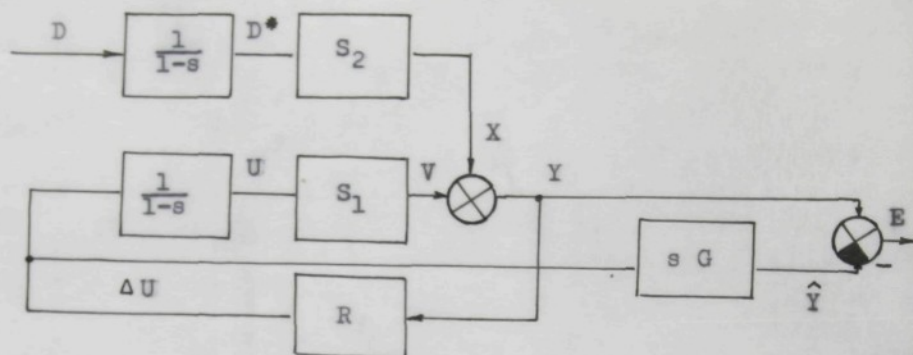
Data do programu jsou načítána instrukcemi:

```
READ READ,N,NV1,M,MR;  
DO 1 I = 1,N;  
1 READ READ,A(I);  
DO 2 I = 1,N;  
2 READ READ,B(I);  
DO 3 I = 1,N;  
3 READ READ,C(I);  
DO 13 I = 1,N;  
13 READ READ,H(I);  
DO 4 I = 1,N;  
4 READ READ,AN(I);  
DO 5 I = 1,N;  
5 READ READ,AM(I);
```

Význam jednotlivých dat:

- N maximální mocnina proměnné s v polynomech
 $A(s), B(s), H(s), C(s), N(s), M(s)$ uzavřeného regulačního obvodu podle obr.6.1-1
- NV1 počet identifikovaných váhových koeficientů
- M počet identifikačních průchodů
- MR tisk výsledků po MR identifikačních průchodech

Hodnoty dat načítaných v cyklu se získávají z diferenčních rovnic popisujících uzavřený regulační obvod podle obr.6.1-1



obr. 6.1-1

$$S_1 = \frac{V}{\Delta U} = \frac{s B}{A} \frac{1}{1-s}$$

$$v(j) = A(1)v(j-1) + A(2)v(j-2) + \dots + A(N)v(j-N) + \\ + B(1)\Delta u(j-1) + B(2)\Delta u(j-2) + \dots + B(N)\Delta u(j-N)$$

$$S_2 = \frac{X}{D^*} = \frac{H}{C}$$

$$x(j) = C(1)x(j-1) + C(2)x(j-2) + \dots + C(N)x(j-N) + \\ + H(1)d(j) + H(2)d(j-1) + \dots + H(N)d(j-N+1)$$

$$R = \frac{\Delta U}{Y} = \frac{N}{M}$$

$$\Delta u(j) = N(1)y(j) + N(2)y(j-1) + \dots + N(N)y(j-N+1) + \\ + M(1)\Delta u(j-1) + M(2)\Delta u(j-2) + \dots + M(N)\Delta u(j-N)$$

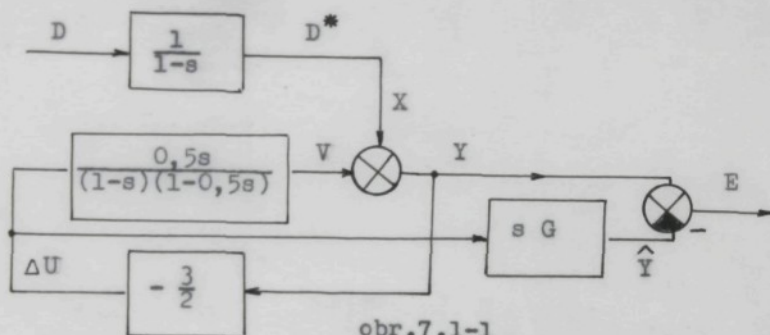
7 PŘÍKLADY PRŮBĚŽNÉ IDENTIFIKACE VÁHOVÉ FUNKCE UZAVŘENÉHO REGULAČNÍHO OBVODU

7.1 příklad

Zkoumejme případ, že do regulovaného obvodu podle obr.6.1-1 zapojíme regulátor o regulačním přenosu $r_o = -\frac{3}{2}$.

Zvolíme $\frac{H}{C} = 1$ a $\frac{sB}{(1-s)A} = \frac{0,5s}{(1-0,5s)(1-s)}$. Lze dokázat, že jde o stabilní regulační obvod.

Získáme konkrétní regulační obvod podle obr.7.1-1



obr.7.1-1

V regulačním obvodu podle obr.7.1-1 je přenos

$$\frac{E}{D} = \frac{1}{1-s} \cdot \frac{1+sG\frac{3}{2}}{1+\frac{3}{2}\frac{s}{(1-s)(2-s)}} = \frac{(2+3sG)(2-s)}{2(1-s)(2-s)+3s} \quad (7.1-1)$$

Označme přenos $\frac{E}{D}$ jako součet nekonečné řady

$$Q(s) = q(0) + q(1)s + q(2)s^2 + \dots = \sum_{j=0}^{\infty} q^2(j) s^j$$

Hledejme minimum kritéria $J = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{\infty} y(j)^2$. Lze dokázat, že toto kritérium je shodné s kritériem

$$J = G^2 \sum_{j=0}^{\infty} q^2(j).$$

Minimalizaci kritéria J chceme provést volbou koeficientů

polynomu G . Rozborem rovnice (7.1-1) zjistíme, že hodnotu $q(0)$ neovlivníme koeficienty polynomu G . Kritérium J nabyde minima, jestliže dokážeme část řady

$$q(1)s + q(2)s^2 + \dots \quad \text{položit rovnou nule.}$$

$$q(1)s + q(2)s^2 + q(3)s^3 + \dots = 0$$

Minimální hodnoty bude kritérium nabývat, jestliže je možno vyhovět podmínce

$$Q(s) - q(0) = Q(s) - Q(0) = 0$$

Z rozboru rovnice (7.1-1) vyplývá $q(0) = 1$, takže

$$Q = \frac{E}{D} = 1$$

Potom můžeme napsat:

$$(2 + s3G)(2 - s) = 2(1 - s)(2 - s) + 3s$$

Odtud dostáváme:

$$G(s) = \frac{\frac{2(1-s)(2-s)+3s}{2-s} - 2}{3s} = \frac{-1+2s}{6(1-\frac{s}{2})} \quad (7.1-2)$$

Výraz (7.1-2) lze upravit. Úprava bude vycházet z následujících úvah:

mějme nekonečnou geometrickou řadu:

$$a_0 + a_0 q + a_0 q^2 + \dots + a_0 q^{n-1}.$$

Předpokládejme, že $|q| < 1$ a existuje-li $\lim_{n \rightarrow \infty} s_n$, kde

$s_n = a_0 + a_0 q + a_0 q^2 + \dots + a_0 q^{n-1}$, potom tato řada je konvergentní a o jejím součtu platí:

$$s = a_0 \frac{1}{1-q}$$

Můžeme tedy tvrdit, že platí:

$$\frac{1}{1 - \frac{s}{2}} = 1 + \frac{s}{2} + \frac{s^2}{4} + \frac{s^3}{8} + \dots$$

Potom výraz (7.1-2) upravíme na tvar:

$$\begin{aligned}
 G(s) &= \frac{-1+2s}{6(1-\frac{s}{2})} = \frac{-1}{6(1-\frac{s}{2})} + \frac{2s}{6(1-\frac{s}{2})} = \\
 &= -\frac{1}{6}(1 + \frac{s}{2} + \frac{s^2}{4} + \frac{s^3}{8} + \dots) + \frac{s}{3}(1 + \frac{s}{2} + \frac{s^2}{4} + \frac{s^3}{8} + \dots) = \\
 &= -\frac{1}{6} + s(-\frac{1}{12} + \frac{4}{12}) + s^2(-\frac{1}{24} + \frac{4}{24}) + s^3(-\frac{1}{48} + \frac{4}{48}) + \dots \\
 &= -0,1\bar{6} + 0,25s + 0,125s^2 + 0,0625s^3 + \dots
 \end{aligned}$$

Hodnotu váhové funkce vyjádříme ve tvaru polynomu:

$$\begin{aligned}
 G(s) &= -0,1\bar{6} + 0,25000s + 0,125000s^2 + 0,06250s^3 + 0,03125s^4 + \\
 &\quad + 0,01562s^5 + 0,00781s^6 + 0,00391s^7 + 0,00195s^8 + 0,00097s^9
 \end{aligned}$$

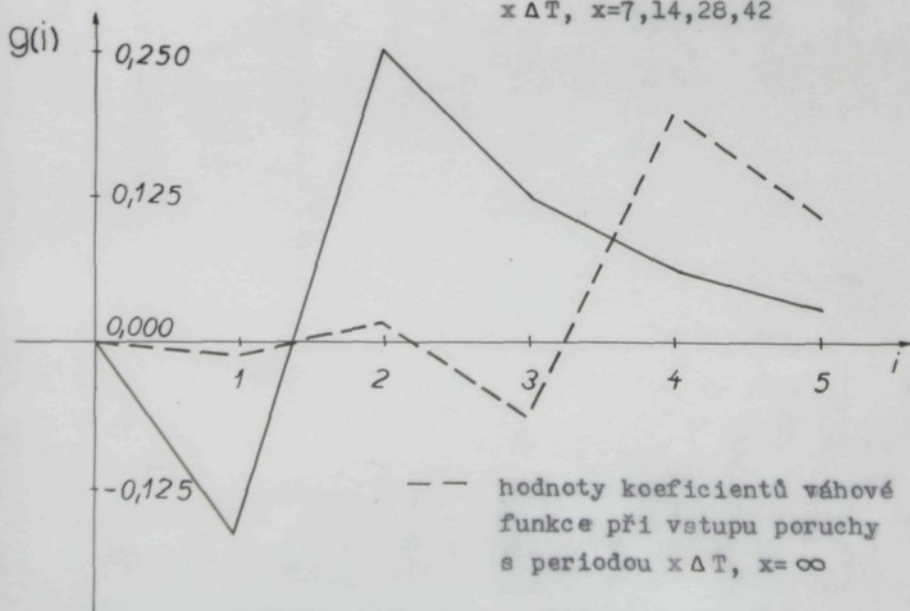
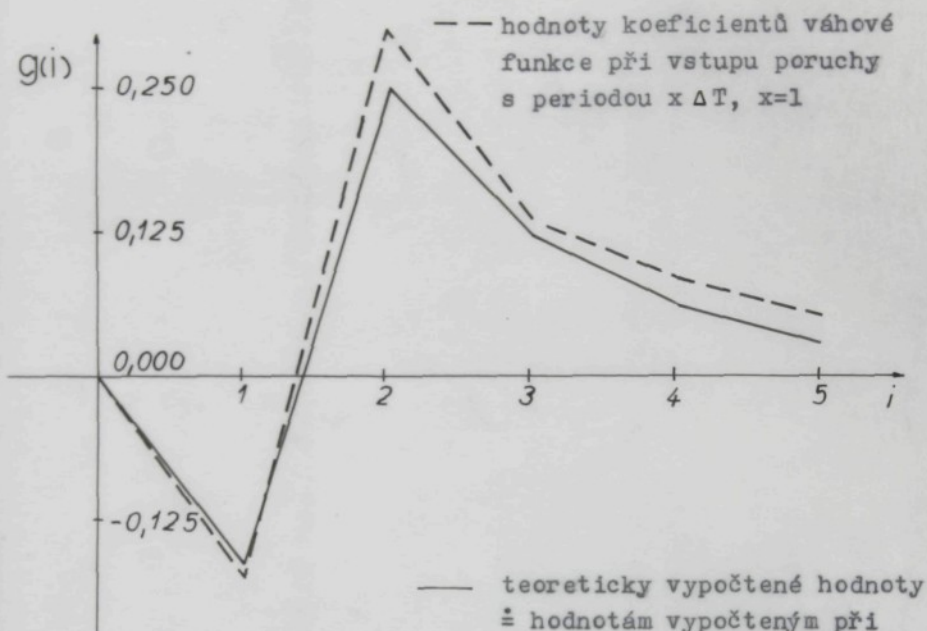
K hodnotám koeficientů polynomu $G(s)$ u jednotlivých mocnin s by se měly teoreticky po dostatečném počtu identifikačních kroků blížit hodnoty $G(1)$, $G(2)$, $G(3)$

Koeficienty váhové funkce vypočtené
v 1000. identifikačním - regulačním kroku v příkladu 7.1

Koeficienty Vstup poruchy s fce periodou $x\Delta T$	$g(1)$	$g(2)$	$g(3)$	$g(4)$	$g(5)$	$g(6)$	$g(7)$	$g(8)$	$g(9)$	$g(10)$
$x = \infty$	-0,0147	0,0120	-0,6819	0,1925	0,1111	0,0079	0,1039	-0,02045	0,0727	-0,0000
$x = 7$	-0,1652	0,2501	0,1261	0,0637	0,0299	-0,0465	0,0181	-0,0274	-0,0271	-0,0250
$x = 14$	-0,1666	0,2499	0,1250	0,0625	0,0313	0,0157	0,0079	0,0042	0,0025	0,0107
$x = 28$	-0,1666	0,2499	0,1249	0,0625	0,0312	0,0156	0,0077	0,0037	0,0016	0,0009
$x = 42$	-0,1666	0,2499	0,1250	0,0625	0,0312	0,0156	0,0078	0,0038	0,0017	0,0009
$x = 1$	-0,1743	0,2941	0,1353	0,0661	0,0548	0,0339	0,0203	0,0371	-0,0024	0,0088

tabulka č.1

Prvních pět koeficientů váhové funkce z příkladu 7.1

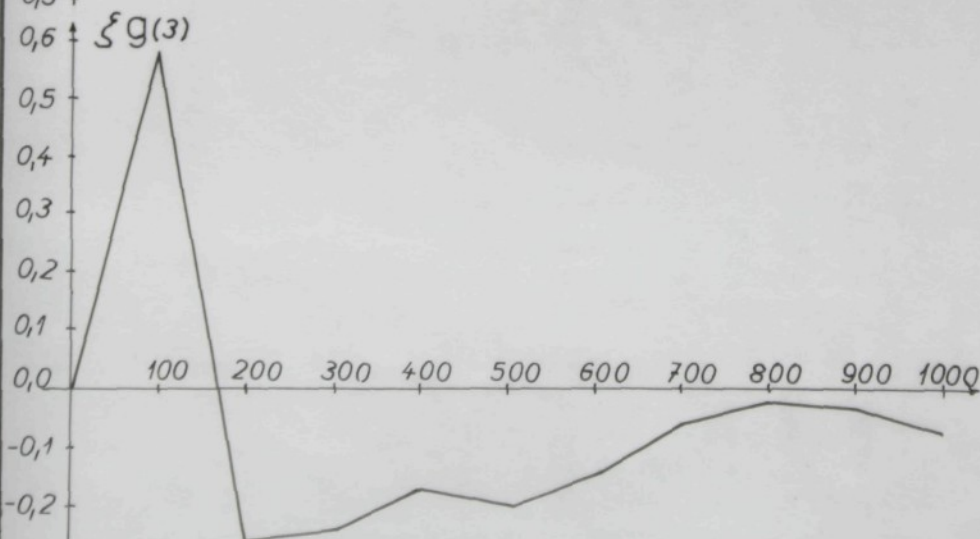
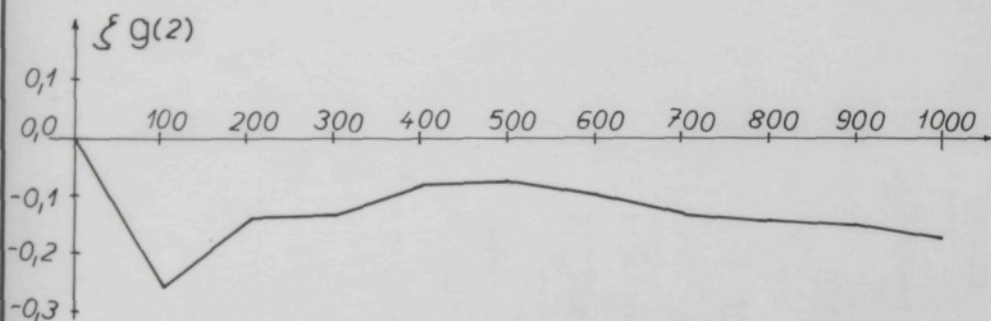
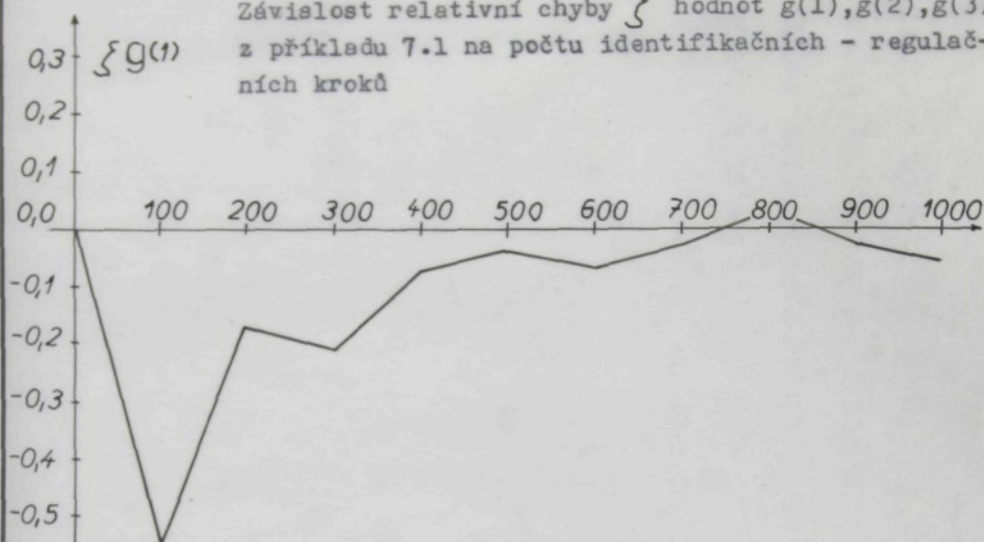


Koeficienty váhové funkce z příkladu 7.1
vstupuje-li porucha v každém identifikačním - regulačním kroku

Koef. průchod	g(1)	g(2)	g(3)	g(4)	g(5)	g(6)	g(7)	g(8)	g(9)	g(10)
100	-0,2584	0,3144	0,0522	0,1568	-0,0092	-0,0046	0,1182	0,0434	0,0507	0,0155
200	-0,1943	0,2852	0,1583	0,0823	0,0391	0,0186	0,0210	0,0375	0,0217	0,0090
300	-0,2013	0,2845	0,1554	0,0875	-0,0066	0,0517	-0,0197	0,0384	-0,0101	0,0064
400	-0,1797	0,2694	0,1464	0,0766	-0,0073	0,0295	-0,0040	0,0075	0,0049	-0,0000
500	-0,1721	0,2694	0,1506	0,0539	0,0182	0,0269	-0,0064	0,0044	0,0075	0,0066
600	-0,1766	0,2752	0,1431	0,0628	0,0222	0,0186	-0,0045	0,0112	-0,1160	0,0075
700	-0,1709	0,2832	0,1329	0,0783	0,0297	0,0287	-0,0003	0,0191	-0,0140	0,0238
800	-0,1609	0,2858	0,1278	0,0888	0,0426	0,0290	0,0054	0,0376	-0,0133	0,0193
900	-0,1708	0,2885	0,1293	0,0914	0,0433	0,0325	0,0132	0,0368	-0,0129	0,0170
1000	-0,1743	0,2941	0,1353	0,0861	0,0548	0,0339	0,0203	0,0371	-0,0024	0,0088

tabulka č.2

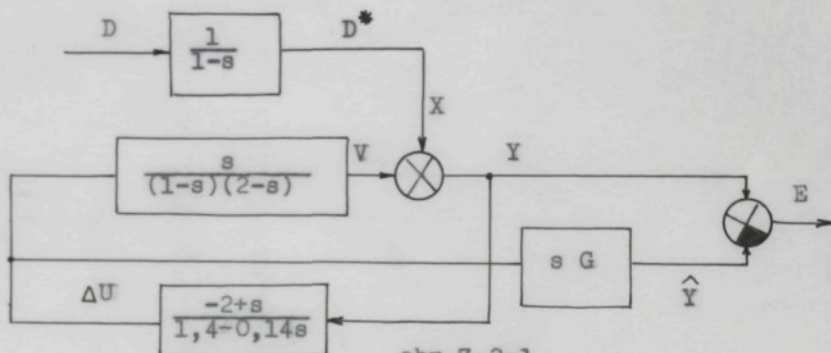
Závislost relativní chyby ξ hodnot $g(1), g(2), g(3)$
z příkladu 7.1 na počtu identifikačních - regulač-
ních kroků



7.2 příklad

Zkoumejme případ, že do regulačního obvodu podle obr.7.1-1 zapojíme regulátor se strukturou o přenosu

$\frac{N}{M} = \frac{-2+s}{1,4-0,14s}$. Lze dokázat, že se jedná o stabilní regulační obvod.



obr.7.2-1

V regulačním obvodu podle obr.7.2-1 je přenos:

$$\frac{E}{D} = \frac{1}{1-s} \cdot \frac{1 + \frac{2-s}{1,4-0,14s} sG}{1 + \frac{(2-s)}{(1,4-0,14s)(1-s)(2-s)} s} = \frac{1,4-0,14s+s(2-s)G}{(1,4-0,14s)(1-s)+s}$$

Přenos ze stejného důvodu jako v předcházejícím příkladě položíme roven 1. Potom můžeme zapsat:

$$1,4-0,14s+s(2-s)G = (1,4-0,14s)(1-s)+s$$

Odtud plyne:

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{(1,4-0,14s)(1-s)+s-1,4+0,14s}{s(2-s)} = \frac{-0,4+0,14s}{2-s} = \\ &= \frac{-0,2}{1-\frac{s}{2}} + \frac{0,07s}{1-\frac{s}{2}} \end{aligned}$$

Úpravu pro vyjádření $G(s)$ provedeme stejně jako v předchozím příkladě.

$$G(s) = -\frac{1}{5}\left(1 + \frac{s}{2} + \frac{s^2}{4} + \frac{s^3}{8} + \dots\right) + \frac{7}{100}s\left(1 + \frac{s}{2} + \frac{s^2}{4} + \frac{s^3}{8} + \dots\right)$$

$$G(s) = -\frac{1}{5} + s\left(-\frac{1}{10} + \frac{7}{100}\right) + s^2\left(-\frac{1}{20} + \frac{7}{200}\right) + \dots$$

$$G(s) = -0,20000 - 0,03000s - 0,01500s^2 - 0,00750s^3 - 0,00375s^4 - \\ - 0,00188s^5 - 0,00094s^6 - 0,00047s^7 - 0,00023s^8 - 0,00012s^9$$

K hodnotám koeficientů polynomu $G(s)$ u jednotlivých mocnin s by se měly teoreticky po dostatečném počtu identifikačních kroků blížit hodnoty $g(1)$, $g(2)$, $g(3)$

V tomto případě jsme volili regulátor s optimální strukturou, koeficienty váhové funkce vycházely příliš malé. V praxi však nemůžeme dosáhnout nikdy od počátku identifikace optimální struktury regulátoru a volili bychom regulátor s jinými koeficienty, které zajišťují stabilitu uzavřeného regulačního obvodu. Potom by zřejmě koeficienty váhové funkce, v případě buzení uzavřeného regulačního obvodu náhodným signálem, by vycházely pravděpodobně lépe.

Koeficienty váhové funkce vypočtené

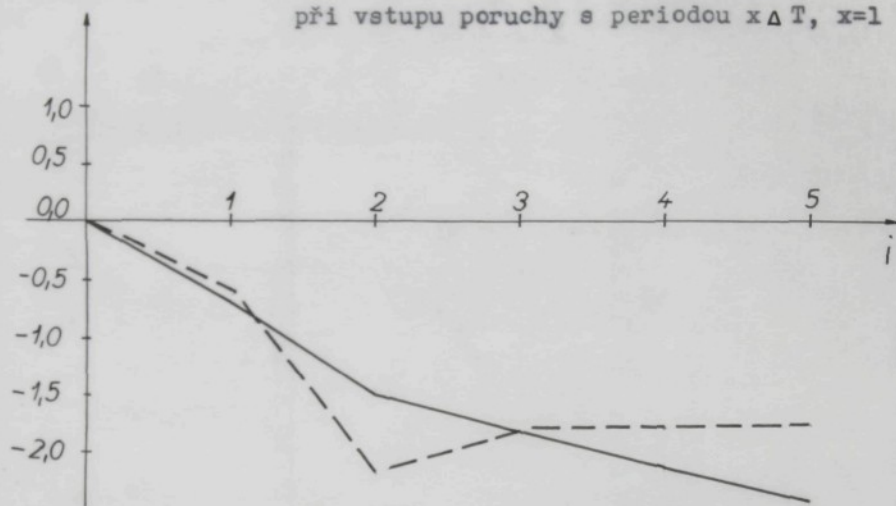
v 1000. identifikačním - regulačním kroku v příkladu 7.2

Koeficienty Vstup váhové poruchy s fce periodou ΔT	g(1)	g(2)	g(3)	g(4)	g(5)	g(6)	g(7)	g(8)	g(9)	g(10)
x = ∞	-1,5471	-1,9870	1,9491	1,4228	0,5628	-0,1449	0,0815	0,0074	0,0022	-0,0000
x = 7	-0,2162	-0,0382	-0,0188	-0,0866	-0,0052	-0,0673	-0,0089	-0,0126	-0,0099	-0,0146
x = 14	-0,2164	-0,0384	-0,0192	-0,0096	-0,0048	-0,0024	-0,0011	-0,0004	0,0001	0,0017
x = 28	-0,2164	-0,0384	-0,0192	-0,0096	-0,0048	-0,0024	-0,0012	-0,0006	-0,0003	-0,0001
x = 42	-0,2164	-0,0384	-0,0192	-0,0096	-0,0048	-0,0024	-0,0012	-0,0006	-0,0003	-0,0001
x = 1	-0,2240	0,0062	0,0134	0,0162	0,0170	0,0145	0,0110	0,0361	0,0124	-0,0043

tabulka č.3

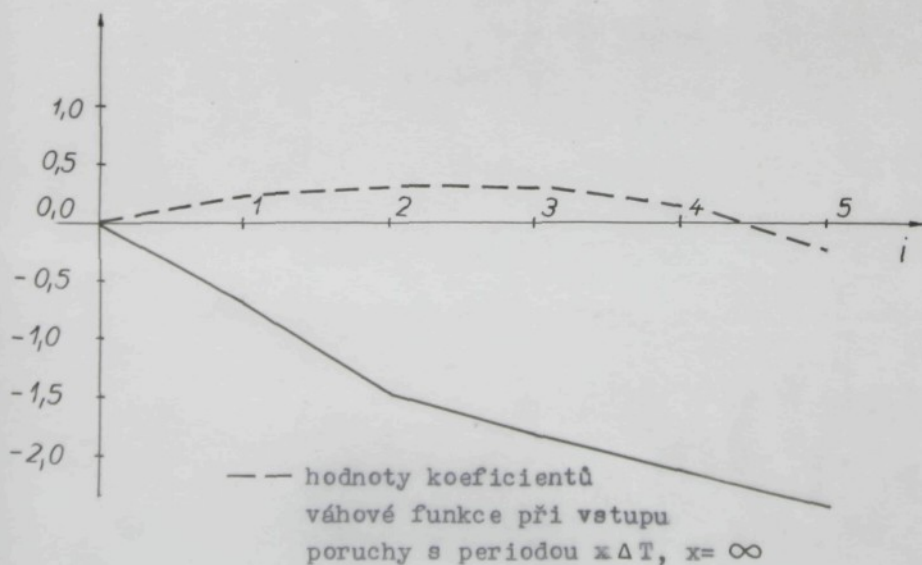
Prvních pět koeficientů váhové funkce z příkladu 7.2

$2 \log |g(i)|$ — — hodnoty koeficientů váhové funkce
při vstupu poruchy s periodou $x \Delta T$, $x=1$



— teoreticky vypočtené hodnoty $\dot{=}$ hodnotám
vypočteným při vstupu poruch s periodou
 $x \Delta T$, $x=7,14,28,42$

$2 \log |g(i)|$

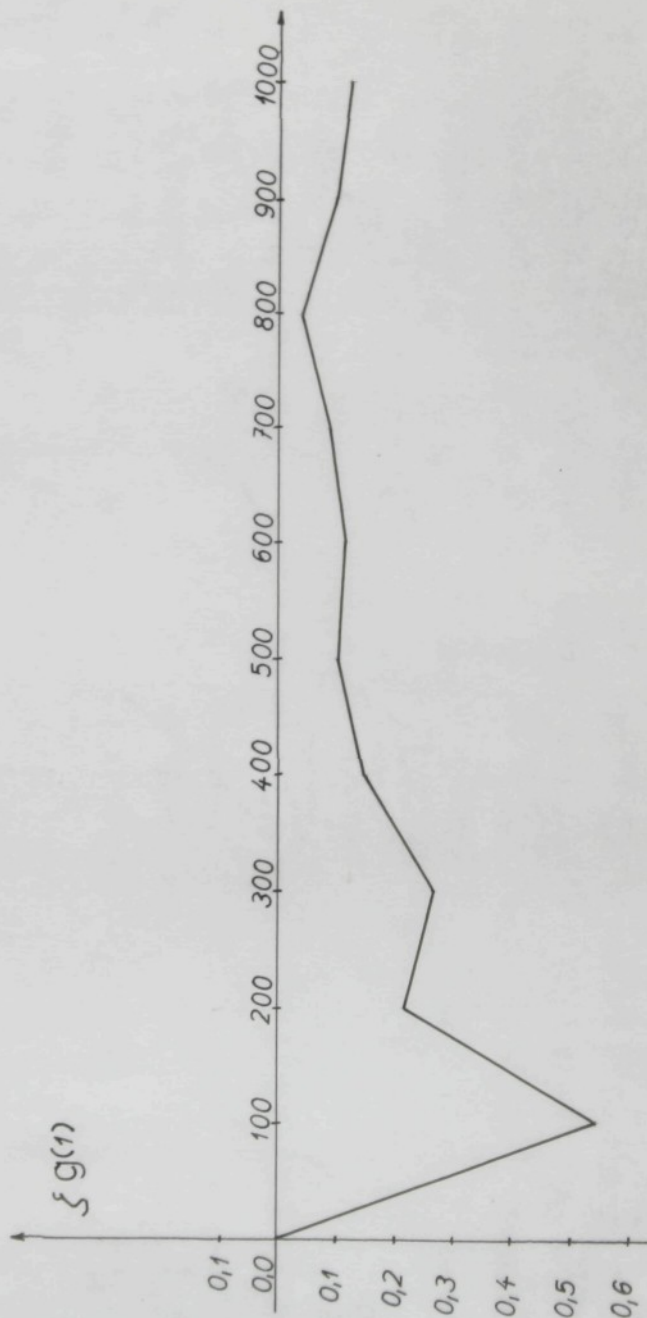


Koeficienty váhové funkce z příkladu 7.2
vstupuje-li porucha v každém identifikačním - regulačním kroku

Koef. váh. f _{ce} přechod	g(1)	g(2)	g(3)	g(4)	g(5)	g(6)	g(7)	g(8)	g(9)	g(10)
100	-0,3106	0,0003	-0,0576	0,0938	0,0014	-0,0491	0,1041	0,0939	0,1084	-0,0149
200	-0,2439	-0,0092	0,0356	0,0291	0,0020	-0,0124	0,0058	0,0480	0,0556	0,0263
300	-0,2529	-0,0154	0,0320	0,0342	-0,0426	0,0054	-0,0222	0,0390	0,0235	-0,0053
400	-0,2302	-0,0228	0,0128	0,0146	-0,0465	-0,0124	-0,0081	0,0142	0,0243	0,0010
500	-0,2220	-0,0196	0,0165	-0,0103	-0,0300	-0,0027	-0,0085	0,0061	0,0216	0,0119
600	-0,2268	-0,0153	0,0110	-0,0031	-0,0216	-0,0094	-0,0108	0,0147	0,0089	0,0020
700	-0,2209	-0,0040	0,0026	0,0070	-0,0104	0,0025	-0,0081	0,0151	-0,0051	0,0205
800	-0,2099	0,0023	-0,0034	0,0130	0,0059	0,0071	-0,0053	0,0318	-0,0010	0,0075
900	-0,2204	0,0014	0,0081	0,0191	0,0084	0,0100	0,0031	0,0339	0,0001	0,0034
1000	-0,2240	0,0062	0,0103	0,0162	0,0170	0,0145	0,0110	0,0361	0,0124	-0,0043

tabulka č.4

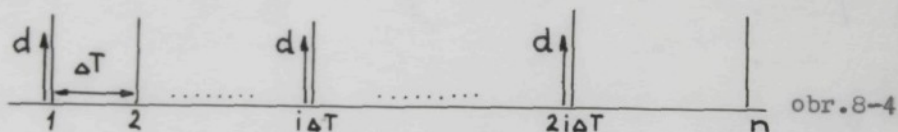
Závislost relativní chyby ξ hodnoty $g(1)$ z příkladu 7.2
na počtu identifikačních - regulačních kroků



8 ROZBOR VÝSLEDKŮ

V uvedených dvou příkladech byla prováděna identifikace v uzavřeném regulačním obvodu při vstupu poruchového signálu. Ten do regulačního obvodu vstupoval s periodou, která byla celočíselným násobkem periody regulace. Ukazuje se, že na přesnost výpočtu koeficientů váhové funkce má vliv perioda vstupujícího náhodného signálu.

Regulátor pracuje s periodou ΔT . Představme si vstup poruchy do soustavy podle obr.8-4



Do regulované soustavy vstupuje signál s periodou $x \Delta T$, který působí jako budicí signál regulačního obvodu a též jako poruchový signál při identifikaci soustavy.

V případě vstupu poruchového signálu v každém kroku ($x=1$) vypočtené hodnoty koeficientů váhové funkce jsou ve srovnání s teoretickými hodnotami značně nepřesné.

Zvýšené přesnosti dosáhneme buzením po určitém počtu kroků. Ukazuje se, že po buzení regulačního obvodu náhodným signálem po $x=28$ krocích, popřípadě po $x=42$ krocích, dosáhneme v případě identifikace deseti koeficientů váhové funkce vysoké přesnosti vzhledem k teoreticky vypočteným hodnotám.

V případě buzení regulované soustavy pouze v prvním identifikačním kroku a identifikaci pěti či deseti koeficientů váhové funkce dochází se zvyšujícím se počtem identifikačních průchodů k lineární závislosti sloupců vytvářené matice, zá-

konitě tedy hodnota determinantu této matice se blíží nule a není možné vypočítat matici inverzní. Zkreslení vypočtených hodnot koeficientů váhové funkce je patrné z grafu.

Z přiložených tabulek č.5 a č.6 je patrné, že přesnost identifikace algoritmem U-D filtru a algoritmem inverze symetrické matice je přibližně stejná. Protože identifikujeme ve skutečnosti nekonečnou řadu polynomu váhové funkce, dochází u vyšších koeficientů mocniny s k větší relativní chybě.

Srovnání identifikace algoritmem U-D filtru a algoritmem inverze symetrické matice
z příkladu 7.1 v 1000. identifikačním - regulačním kroku

	$g(1)$	$g(2)$	$g(3)$	$g(4)$	$g(5)$	$g(6)$	$g(7)$	$g(8)$	$g(9)$	$g(10)$
Identifikace algoritmem U-D filtru	-0,1735	0,2955	0,1380	0,0888	0,0558	0,0379	0,0248	0,0377	-0,0014	0,0081
Relativní chyba výpočtu	-0,0410	-0,1820	-0,1040	-0,4208	-0,7856	-1,4264	-2,1754	-3,8270	1,7179	-7,3505
Identifikace algoritmem inverze matice	-0,1743	0,2941	0,1353	0,0861	0,0548	0,0339	0,0203	0,0371	-0,0024	0,0088
Relativní chyba výpočtu	-0,0450	-0,1764	-0,0824	-0,3776	-0,7536	-1,1703	-1,5992	-3,7503	2,2307	-8,0720

tabulka č.5

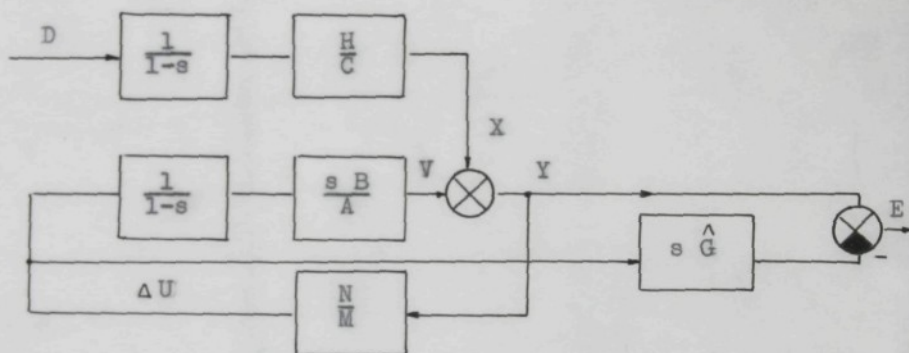
Srovnání identifikace algoritmem U-D filtru a algoritmem inverze symetrické matice
z příkladu 7.2 v 1000. identifikačním - regulačním kroku

	$g(1)$	$g(2)$	$g(3)$	$g(4)$	$g(5)$	$g(6)$	$g(7)$	$g(8)$	$g(9)$	$g(10)$
Identifikace algoritmem U-D filtru	-0,2233	0,0080	0,0137	0,0198	0,0182	0,0176	0,0159	0,0370	0,0111	-0,0061
Relativní chyba výpočtu	-0,1165	1,2666	1,9133	3,6400	3,4266	10,3617	17,9149	79,7234	49,2609	-54,4545
Identifikace algoritmem inverze matice	-0,2240	0,0062	0,0103	0,0162	0,0169	0,0145	0,0109	0,0361	0,0124	-0,0043
Relativní chyba výpočtu	-0,1200	1,2066	1,6866	3,1600	5,5067	8,7128	12,5957	77,8085	54,9130	-38,0909

tabulka č.6

9 ZÁVĚR

Problematika adaptivní regulace je velice rozsáhlá. V diplomové práci byla rozpracována část algoritmu adaptivní regulace - identifikace regulované soustavy v uzavřeném regulačním obvodu.



obr.9.1

Z obrázku vyplývá přenos:

$$\frac{E}{D} = \frac{H}{(1-s)C} \frac{1-s \hat{G}^N \hat{M}}{1 - \frac{sB}{(1-s)A} \frac{N}{M}} = \frac{HAM}{C} \frac{1-s \hat{G}^N \hat{M}}{(1-s)AM - sBN}$$

Ze stejných důvodů jako v kapitole 5.2 položíme přenos roven jedné.

$$\frac{E}{D} = 1 \quad (9.1)$$

Rovnice (9.1) je podmínkou pro minimalizaci kritéria

$$J = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e^2(j).$$

Z této rovnice jsme vypočetli teoretické koeficienty řady $\hat{G}$ a identifikaci metodou nejmenších čtverců jsme ověřili, že při zvyšujícím se počtu identifikačních kroků identifikované

koeficienty konvergují k teoretickým hodnotám. Z rozboru předcházejících rovnic též vyplývá, že

$$\hat{G} \neq \frac{sB}{(1-s)A}.$$

Vyšetření konvergence adaptivního regulátoru, který by se v každém adaptačním kroku seřizoval na základě znalosti $\hat{G}$, je velmi obtížné. Diskutujeme dále pouze možnost určení polynomů A, B, C, H na základě provedené identifikace v uzavřeném regulačním obvodu.

Upravme rovnici (9.1) do tvaru: $\frac{N}{H}$

$$(1-s) - s \frac{B}{A} \frac{N}{M} = (1-s\hat{G}) \sqrt{\frac{H}{C}} \quad (9.2)$$

Známe-li řadu $\hat{G}$, potom pro řadu, která vznikne podílem dvou libovolných polynomů $\frac{H}{C}$ určíme z rovnice (9.2) řadu $\frac{B}{A}$.

Jinými slovy, polynomy A, B, C, H nemůžeme z rovnice (9.2) jednoznačně určit.

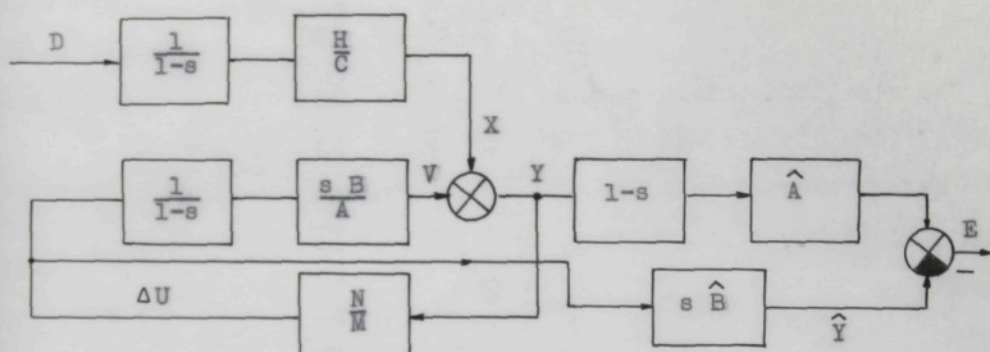
Diskutujeme problematiku identifikace soustavy v uzavřeném regulačním obvodu, použijeme-li k popisu chování soustavy diferenční rovnici. Predikční model regulované soustavy budeme sestavovat ve tvaru diferenční rovnice, jejíž Z - transformace je

$$\hat{Y} + [(1-s)\hat{A}-1] Y = s\hat{B}\Delta U \quad (9.3)$$

$\hat{Y}$ je Z - transformace veličiny $y(j)$, což je výstupní hodnota modelu v čase j . Při chybě predikce $E = Y - \hat{Y}$ rovnici (9.3) přepíšeme do tvaru:

$$E = (1-s)\hat{A} Y - s\hat{B}\Delta U \quad (9.4)$$

Zakresleme rovnici (9.4) do blokového schématu regulačního obvodu



obr. 9.2

Z obr. 9.2 vyjádříme přenos $\frac{E}{D}$:

$$\frac{E}{D} = \frac{H}{(1-s)C} \frac{(1-s)\hat{A} - s \frac{N}{M} \hat{B}}{1 - \frac{s B}{(1-s)A} \frac{N}{M}} = \frac{H A}{C} \frac{(1-s)M \hat{A} - s N \hat{B}}{(1-s)M \hat{A} - s N \hat{B}} \quad (9.5)$$

$$\dots$$

$$\frac{E}{D} = 1 \quad (9.6)$$

Z rovnic (9.5) a (9.6) vyplývá:

$$(1-s)M \hat{A} - s N \hat{B} = (1-s)M \frac{C}{H} - s N \frac{C}{H} \frac{B}{A} \quad (9.7)$$

V rovnici (9.7) si odpovídají řady

$$\hat{A} = \frac{C}{H} \quad (9.8)$$

$$\hat{B} = \frac{C}{H} \frac{B}{A} \quad (9.9)$$

Provádíme-li identifikaci metodou nejmenších čtverců, můžeme určovat pouze konečný počet koeficientů polynomů $\hat{A}, \hat{B}$. Při používání označení je nedostatek v tom, že používáme stejné označení polynomu i řady. Z textu vždy vyplývá, o který případ se jedná.

Diskutujeme, zda při zvyšujícím se počtu identifikovaných koeficientů polynomů A,B budou tyto konvergovat ke koeficientům řad (9.8) a (9.9). Při identifikaci regulované soustavy podle rovnice (9.3) bude matice $\underline{U}$ -viz kapitola 5.2, vztah (5.2-3)- mít tvar:

$$\underline{U} = \left[\Delta \underline{u}(j), \Delta \underline{u}(j-1), \dots, \underline{y}(j)-\underline{y}(j-1), \underline{y}(j-1)-\underline{y}(j-2), \dots \right] \quad (9.10)$$

Uvažujeme na příklad regulátor s diferenční rovnicí:

$$u(j) = n_0 y(j) + n_1 y(j-1) + m_1 \Delta u(j-1) \quad (9.11)$$

V předcházejícím textu -viz kapitola 5.2- je diskutováno, že při vstupu poruchy $d(j)$ v každém regulačním kroku jsou vektory $\Delta \underline{u}(j), \Delta \underline{u}(j-1), \Delta \underline{u}(j-2), \dots$ lineárně nezávislé. Z rovnice (9.11) plyne, že i vektory $\Delta \underline{u}(j), \Delta \underline{u}(j-1), \Delta \underline{u}(j-2), \dots, \underline{y}(j)-\underline{y}(j-1), \underline{y}(j-1)-\underline{y}(j-2), \underline{y}(j-2)-\underline{y}(j-3), \dots$ jsou lineárně nezávislé. Z uvedené úvahy -viz též kapitola 5.2- plyne, že při zvyšujícím se počtu identifikovaných koeficientů polynomů A,B budou tyto konvergovat ke koeficientům řad (9.8), (9.9). Z rovnic (9.8) a (9.9) je potom možno vypočítat polynomy C,H,B,A. V další diplomové práci doporučujeme provést ověření uvedených předpokladů příklady spočtenými na číslicovém počítači.

LITERATURA:

Hanuš B., Janeček B., Kracík V., Mikulecký B.

Metoda návrhu víceparametrových číslicových
regulačních systémů;

návrh metodické příručky

ÚVVTŘ Praha; výzkumná zpráva KTK - 0061,

VŠST Liberec, 1980

Hanuš B.,

Základy technické kybernetiky;

skripta VŠST Liberec, 1979

Kracík V., Janeček B., Hanousek V., Štemberk P.

Ověření podprogramu UDFIL;

výzkumná zpráva KTK - 0066, VŠST Liberec, 1980

Janeček B.

Rozbor aplikace vyšších způsobů řízení pro ener-
getické procesy;

výzkumná zpráva KTK - 0081, VŠST Liberec, 1981

Pokorný P.

Diplomová práce

VŠST Liberec, 1981

11 SEZNAM PŘÍLOH

- 1 Výpis programu pro identifikaci uzavřeného regulačního obvodu algoritmem U-D filtru
- 2 Výpis programu pro identifikaci uzavřeného regulačního obvodu algoritmem inverze symetrické matice
- 3 Výsledky identifikace příkladu 7.1 vstupuje-li porucha s periodou $x \Delta T$
($x=1$, $x=7$, $x=14$, $x=28$, $x=42$, $x=\infty$)
- 4 Výsledky identifikace příkladu 7.2 vstupuje-li porucha s periodou $x \Delta T$
($x=1$, $x=7$, $x=14$, $x=28$, $x=42$, $x=\infty$)

V 18/82 T
+ příloha