SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

FAKULTA CHEMICKEJ A POTRAVINÁRSKEJ TECHNOLÓGIE

VYUŽITIE METÓD AGREGÁCIE PRI NÁVRHU RIADENIA TECHNOLOGICKÝCH PROCESOV

Diplomová práca

FCHPT–5414–49744

2012 **Bc. Mária Dupejová**

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

FAKULTA CHEMICKEJ A POTRAVINÁRSKEJ TECHNOLÓGIE

VYUŽITIE METÓD AGREGÁCIE PRI NÁVRHU RIADENIA TECHNOLOGICKÝCH PROCESOV

Diplomová práca

FCHPT–5414–49744

Študijný program: Automatizácia a informatizácia v chémii a potravinárstve

Číslo a názov študijného odboru: 5.2.14 automatizácia

Školiace pracovisko: Oddelenie informatizácie a riadenia procesov

Vedúci záverečnej práce/školiteľ: Ing. Mária Karšaiová, CSc.

Bratislava 2012 **Bc. Mária Dupejová**

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ústav informatizácie, automatizácie a matematiky

Fakulta chemickej a potravinárskej technológie
Akademický rok: 2011/2012
Evidenčné číslo: FCHPT-5414-49744

ZADANIE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Študentka:	**Bc. Mária Dupejová**
ID študenta:	49744
Študijný program:	automatizácia a informatizácia v chémii a potravinárstve
Študijný odbor:	5.2.14 automatizácia
Vedúca práce:	Ing. Mária Karšaiová, CSc.
Miesto vypracovania:	Bratislava

Názov práce: **Využitie metód agregácie pri návrhu riadenia technologických procesov**

Špecifikácia zadania:

- využitie metód agregácie na zjednodušenie modelov dynamických systémov
- návrh riadiacich štruktúr
- simulačná aplikácia na technologický proces

Rozsah práce: cca60

Zoznam odbornej literatúry:

1. PAVÚKOVÁ, L. *Možnosti riadenia technologických procesov pomocou zjednodušených modelov.* Diplomová práca. STU, 2010.
2. VESELÝ, V. Redukcia modelu. [online]. 2010. URL: http://www.kasr.elf.stuba.sk/predmety/rstp/Prednasky/Prednasky_RSTP.pd
3. Genesio, R. – Milanese, M. : A Note on Derivation and Use of Reduced Order
4. Sizet, J. – Michailesco, G. – Bertrand, P. :Repesentation of Linear Dynamical systems by Aggregated Models

Riešenie zadania práce od: 13. 02. 2012

Dátum odovzdania práce: 19. 05. 2012

L. S.

Dupejová

Bc. Mária Dupejová
študentka

prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
vedúci pracoviska

prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
garant študijného programu

Poďakovanie

Touto cestou chcem vysloviť svoje poďakovanie mojej vedúcej diplomovej práce Ing. Márii Karšaiovej, CSc. za pomoc, odborné vedenie, cenné rady, usmernenia a čas, pri vypracovaní diplomovej práce.

ČESTNÉ VYHLÁSENIE

Čestne vyhlasujem, že som diplomovú prácu vypracovala samostatne a uviedla som všetku použitú literatúru súvisiacu so zameraním diplomovej práce.

V Bratislave, 19.5.2012

Dujejová
....
Podpis

Súhrn

Hlavnou úlohou mojej diplomovej práce je aplikovanie agregačných metód ako účinného prostriedku pre spätnoväzbové riadenie pomocou redukovaného modelu. Platí, že redukovaný systém si zachováva základne znaky pôvodného systému. Možno zvoliť viacero redukovaných modelov vzhľadom na cieľ, ktorý by mal byť použitím dosiahnutí s rôznymi agregačnými metódami. Vhodnosť riadenia pôvodného systému pomocou odpovedajúceho redukovaného modelu sa dokáže na konkrétnych prípadoch.

Kľúčové slová: redukcia modelu, agregačné metódy, spätnoväzbové riadenie

Abstract

The main objective of my dissertation is the application of aggregation methods as an effective means for feedback circuit control using a reduced model. It's true that the reduced system maintains basic features of the original system. You may choose from many reduced models, taking into consideration the objective that should be achieved with the use of different aggregation methods. The suitability for control of original system with the corresponding reduced model will be proved on specific cases.

Key words: reduction of model, aggregation methods, feedback circuit control

Obsah

Zoznám symbolov

m_3	hmotnostný tok petroleja
ϱ_3	hustota petroleja
ϑ_3	vstupná teplota petroleja
cp_3	špecifickú tepelnú kapacitu petroleja
σ	hrúbka steny
d_1	vnútorný priemer
cp_2	špecifickú tepelnú kapacitu steny
ϱ	hustota
d_3	vnútorný priemer vonkajšej rúrky
α_{12}	koeficient prestupu tepla prúdením zo steny do petroleja
α_{32}	koeficient prestupu tepla prúdením z vody do steny
m_1	hmotnostný tok vody
cp_1	špecifickú tepelnú kapacitu vody
ϑ_1	vstupná teplota vody

Zoznám tabuliek

Zoznam obrázkov

Zoznam príloh

Elektronická verzia diplomovej práce sa nachádza na priloženom CD

Úvod

Agregácia bola vyvinutá a zároveň ako prvá sa používala v ekonomickej oblasti. Až neskôr sa začala používať v elektrotechnickom, informačnom, biochemickom a chemickom odbore. Mnohí ekonómovia sa zaoberali otázkou vhodnosti analógie medzi makroekonomickými a mikroekonomickými vzťahmi. Úvahy o normatívnom poňatí agregácie boli vyvinuté za predpokladu, že medzi mikro a makro modelmi prevláda súhra.

Analyzovaním Simona a Andyho štruktúry dynamických ekonomických systémov, ktoré boli popísané a reprezentované rozložiteľnými maticami sa ukázalo, že bežné správanie by mohlo byť opísané dynamickým podsystémom. Po určitom čase spojenia medzi systémami ovládajú správanie sa systému. ktorý si zachováva stav rovnováhy v každom podsystéme. Tieto výsledky oprávňujú zanedbať slabé väzby v štúdiách čiastkovej rovnováhy. Postupné delenie pre agregáciu ekonomických modelov s výhradou minimalizovať náklady podľa daných kritérií navrhol Fischer [1][5].

Použitie agregačných metód v modeli zjednodušenia a kontroly veľkého množstva dynamických systémov propagoval aj Aoki. Ďalší vývoj a štúdie boli vypracované na podnet mnohých výskumných prác. Ostatné techniky modelu redukcie, zjednodušenia a priblíženia sú už dnes k dispozícii [4].

Prvá časť mojej diplomovej práce je venovaná všeobecnému oboznámeniu sa so zjednodušujúcimi metódami a vlastnosťami agregovaného systému. Druhá časť práce je venovaná aplikácií jednotlivých agregačných metód na stabilný a nestabilný systém a tiež na reálne systémy a to trojkapacitný a dvojkapacitný rúrkový výmenník tepla .

1. Agregácia

Agregácia je možnosť riadiť systém znížením rádu systému použitím redukovaného modelu a navrhnúť riadenie z redukovaného systému a riadiť pôvodný systém.

Redukovaný model si zachová vlastnosti pôvodného systému. Nakoľko existujú rôzne agregačné metódy, je možné voliť redukovaný model vzhľadom na cieľ, ktorý sa má dosiahnuť. Metódy agregácie majú uplatnenie aj v hierarchickom riadení, kde sa môže zjednodušovať jednotlivé podsystémy a tým sa zjednoduší aj celá štruktúra hierarchického riadenia. Návrh riadenia pre takéto systémy nebude potom optimálne ale suboptimálne riadenie [2].

1.1 Metódy zjednodušenia

Metódy zjednodušenia vedú k tomu, že sa celý systém zjednoduší tak , aby sa neznížila kvalita riadenia. Zjednodušenie systému znamená zjednodušenie matematického modelu s cieľom získania jednoduchšej štruktúry riadenia. Takými zjednodušujúcimi metódami sú agregačné metódy. Tieto metódy zavádzajú iný stavový priestor premenných, ktoré zahŕňajú určité kvalitatívne vlastnosti pôvodného systému.

Ďalšie metódy, ktoré sa môžu považovať za zjednodušujúce sú poruchové metódy. Poruchové metódy v sebe zahŕňajú určité postupy, pri ktorých sa vzniknuté dynamické interakcie v systéme neuvažujú. Použitie týchto metód sa uplatňuje pri systémoch, ktoré môžu byť nahradené jednoduchším systémom. Matematicky, rozdiel v odozve medzi skutočným a redukovaným systémom je modelovaný ako poruchový člen pôsobiaci neskôr.

Poruchové metódy majú slabé väzby i silné väzby. Princíp slabých väzieb spočíva v matematickom vyjadrení poruchy, ktorá vystupuje na pravej strane diferenciálnej rovnice. Princíp silných väzieb spočíva v matematickom vyjadrení poruchy, ktorá na rozdiel od slabých väzieb vystupuje na ľavej strane diferenciálnej rovnice [1].

1.1.1 Metóda presnej agregácie

V tejto časti je opísaná jedna z agregačných metód , ktorá sa používa na zjednodušenie veľkých dynamických systémov či lineárnych takisto i nelineárnych.

Dynamický systém je opísaný tými to rovnicami:

$\mathbf{x}'(t) = A\,\mathbf{x}(t) + B\,\mathbf{u}(t)$ 1.1

$\mathbf{y}(t) = C\,\mathbf{x}(t)$ 1.2

kde

x(t) je vektor stavových veličín v čase t rozmeru n
u(t) je vektor riadiacich veličín v čase t rozmeru m
y(t) je vektor výstupných veličín v čase t rozmeru p

Matica A je matica systému, ktorá je n x n rozmerná, matica B je matica vstupu, ktorá ma rozmer n x m a matica C je matica výstupu, ktorá ma rozmer p x n. Trojica týchto matíc ABC je pozorovateľná. Dynamický systém možno nahradiť odpovedajúcim agregovaným modelom v tvare :

$\mathbf{z}'(t) = F\,\mathbf{z}(t) + G\,\mathbf{u}(t)$ 1.3

$\mathbf{w}(t) = H\,\mathbf{z}(t)$ 1.4

kde

z(t) je vektor agregovaných stavových veličín v čase t rozmeru r
w(t) je vektor agregovaných výstupných veličín v čase t rozmeru q

Stavový opis v tvare agregovaného modelu považujem za dobrý, ak pre vstupy u(t) sú agregované výstupy w(t) dobrou aproximáciou pôvodných výstupov y(t) a platí, že $m \le r \le n$

Obidve spomínané modely využívajú rovnaké vstupno-výstupné informácie. Vzťah medzi pôvodným a redukovaným modelom je vyjadrený nasledovne:

$\mathbf{z}(t) = L\,\mathbf{x}(t)$ 1.5

Matica L je agregačná matica, ktorá ma rozmer r x n a možno ju navrhnúť viacerými spôsobmi. Táto matica vyberá iba určité časti z vektora x(t). Vzťah medzi pôvodným a redukovaným modelom vyplýva s nasledujúcich rovníc:

$FL = LA$ 1.6

$G = LB$ 1.7

$\mathbf{z}(0) = L\,\mathbf{x}(0)$ 1.8

Riešenie pre rovnicu (1.6) je pseudoinverzná matica, vychádzajúca z riešenia pomocou metódy najmenších štvorcov a je nasledovné:

$F = LAL^T[LL^T]^{-1}$ 1.9

Matica L sa určí aby boli zachované vlastné čísla pôvodného systému[4].

1.1.2 Metóda modálnej agregácie

Dôležitou vlastnosťou modálnej agregácie je, že v agregovanom modeli sa zachováva *k* dominantných vlastných čísel pôvodného systému. Sú známe viaceré metódy modálnej agregácie [4].

Prvý krok riešenia modálnej agregácie je nájsť modálnu maticu k matici, ktorú získame takto:

$A= M_A J_A M_A^{-1}$ 2.0

J_A je Jordanová matica, ktorá má na hlavnej diagonále vlastné čísla matice A. Vlastné čísla sú zoradené v matici J_A.

M_A modálna matica k matici A .

$M_A = \begin{bmatrix} M_R & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}$ 2.1

kde M_R má rozmery redukovaného systému

Zvolením matice P = [I_{lxl} $0_{lx(n-l)}$]

a agregačnú maticu vypočítam takto:

$L= M_R P M_A^{-1}$ 2.2

matice agregovaného systém sú:

$A_r=M_R P J_A P^T M_A^{-1}$ 2.3

$B_r= M_R P M_A^{-1} B$ 2.4

kde matica A_r má rozmer 1x1 a matica B_r má rozmer 1xm.

1.1.3 Vyvážená realizácia

Algoritmus pre túto metódu má dve časti . Prvá časť sa zaoberá transformáciou stavového modelu na vyváženú realizáciu, druhá časť je redukcia modelu. Prostredie MATLAB umožňuje použiť príkazu balreal na realizáciu tejto metódy .

```
[SYSb,G1,T,Ti] = balreal(sys)
```
2.6

sys - pôvodná prenosová funkcia.

Ti - inverzná transformačná matica

T - transformačná matica

G1 - diagonálna matica

SYSb - transformovaný systém v stavovom priestore

1.2 Vlastnosti agregovaného systému

Chyba redukcie je zadefinovaná rovnicou:

$$e(t) = z(t) - Lx(t) \qquad 3.1$$

a potom $e(t) = 0$ pre všetky $t \geq 0$ $\mathbf{z}(0) = L\,\mathbf{x}(0)$ alebo ak $e(t) \to \infty$ pre $t \to \infty$ pre $\mathbf{z}(0) \neq L\,\mathbf{x}(0)$ a F bude vybratá asymptotická stabilná matica. Kvadratický funkcionál s váhovými maticami Q a R, ktorého minimalizáciou sa získa optimálne riadenie .

$$\min J_a = \frac{1}{2}\int_0^t [z^t(t)Q_r z(t) + u^t(t)Ru(t)] \qquad 3.2$$

a zákon riadenia pre redukovaný model je

$$u(t) = -R^{-1}GK_r z(t) \qquad 3.3$$

kde K_r je pozitívne definitné riešenie rovnice

$$K_rF + F^T K_r - K_rG\,R^{-1}G\,K_r + Q_r = 0 \qquad 3.4$$

pre maticu Q_r platí

$$Qr = [LL^T]^{-1}\,LQL^T[LL^T]^{-1} \qquad 3.5$$

Ak sa použije transformácia

$$x(t) = T\,y(t) \qquad 3.6$$

kde $J_a = T^{-1}AT$ a $S = T^{-1}B$

a výber agregačnej matice je:

$$L = [I_r : 0_{rx(n-r)}]T^{-1} \qquad 3.7$$

kde $n > r$ je rád pôvodného a redukovaného modelu a T je transformačná matica zabezpečujúca zachovanie hlavných vlastností pôvodného systému v redukovanom modeli a je možné zabezpečiť, aby póly uzavretého systému ostali v určitej obmedzenej oblasti. Modifikuje sa pôvodný funkcionál a odpovedajúci funkcionál redukovaného modelu bude

$J_r = \frac{1}{2}\int_0^t [z^t(t) Q_r z(t) + u^t(t) R u(t)] \quad = \frac{1}{2}\int_0^t [z_a^T(t) Q_a z(t) + u_a^T(t) R_a u(t)]\, dt$

Redukovaný model a matica zosilnení

$z_a(t) = [F - I_r]\, z_a(t) + G\, u_a(t)$ 3.8

$Z = R^{-1} G K_a$ 3.9

kde K_a je riešením maticovej rovnice:

$K_a F + F^T K_a - K_a G R^{-1} G K_a + (Q_a + 2\alpha I_r) = 0$ 4.0

2. Experimentálna časť

V tejto časti aplikujem uvedené metódy na stabilný a nestabilný systém a na technologické procesy . Tieto metódy sa môžu aplikovať na viacero iných technologických procesov.

2.1 Aplikovanie agregačných techník na stabilný systém

Na nasledujúcom príklade boli aplikované agregačné metódy na stabilný systém, ktorého matematický model v stavovom priestore vyplýva z konštrukčných, fyzikálnych a chemických vlastnosti procesu.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -3 & 1 & 2 \\ 2 & -4 & 0 \\ 2 & 0 & -2 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{bmatrix} u(t)$$

S maticou váhových koeficientov

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

a

R= [1]

2.1.1 Aplikácia presnej agregácie

Ako prvé som vypočítala vlastné hodnoty matice A_s, ktoré musia byť obsiahnuté v agregovanej matici F.

vlastné čísla [-0.2215 -5.4893 -3.2892]

ako je zrejme z vlastných čísel matice A_s je systém stabilný. Výpočet transformovanej matice T v prostredí MATLAB pomocou príkazu:

```
[T,D]=eig(As)
```

Kde D je matica s vlastnými číslami matica na diagonále a transformačná matica T je

$$T=\begin{bmatrix} -0.6269 & -0.5651 & -0.2972 \\ -0.3318 & 0.7588 & -0.8361 \\ -0.7049 & 0.3239 & 0.4610 \end{bmatrix}$$

Inverzná matica T^{-1} je:

$$T^{-1}=\begin{bmatrix} -0.6634 & -0.1756 & -0.7460 \\ -0.7935 & 0.5328 & 0.4548 \\ -0.4569 & -0.6428 & 0.7088 \end{bmatrix}$$

pomocou nej bola navrhnutá agregačná matica L je :

L = [-0.6634 -0.1756 -0.7460]

vypočítané hodnoty redukovaných matíc F a G :

F = -0.2215

G = -1.4920

Dynamický model je:

$z'(t)= -0.2215z(t) -1.4920\, u(t)$

potom modifikovaný tvar váhovej matice Qr :

Qr = 0.9733

Riccatiho rovnica tohto agregovaného modelu je :

$-2.2261K_a + 1.5569\, K_a^2 + 2.9733 = 0$

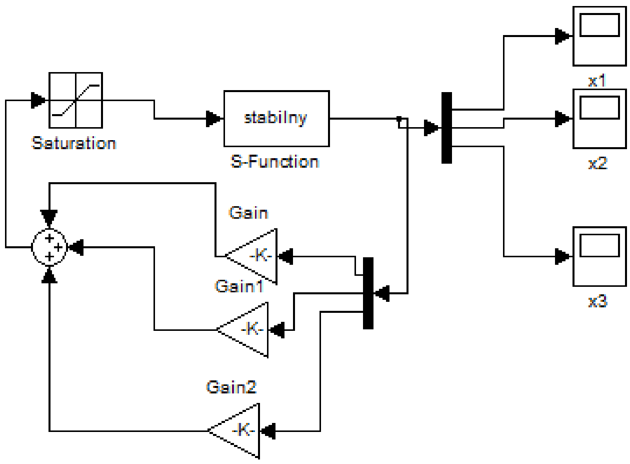
A výsledkom Riccatiho rovnice je:

$K_a = 2.3233$

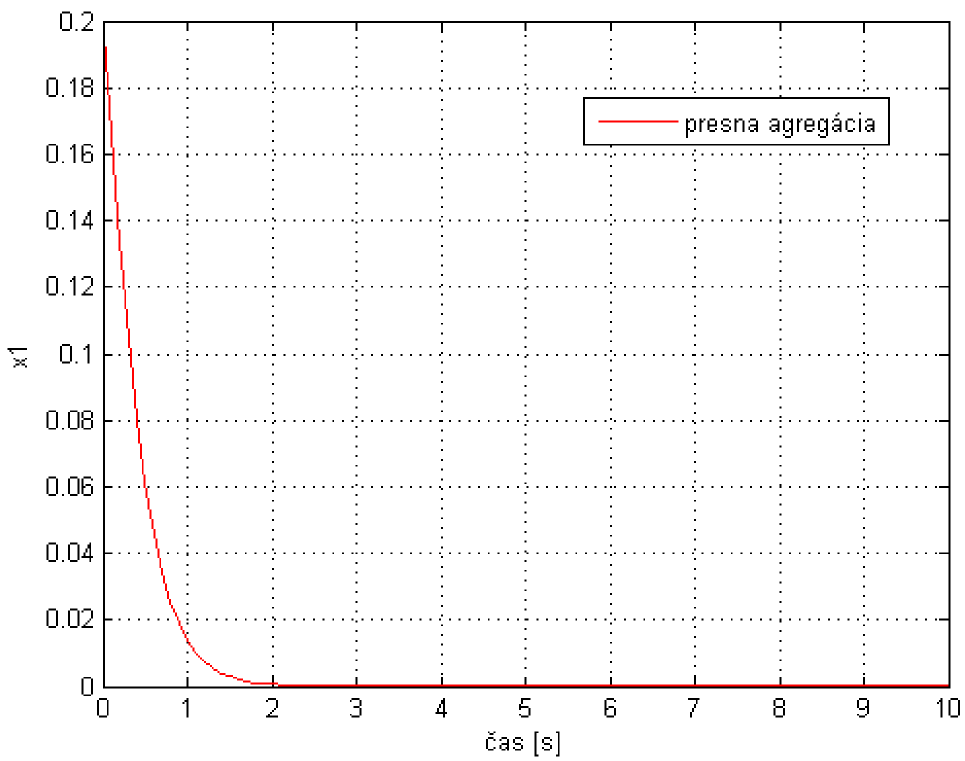
A nakoniec zákon riadenia vyzerá takto :

$u(t)=-1.5412x_1(t) - 0.4079x_2(t) - 1.7332x_3(t)$

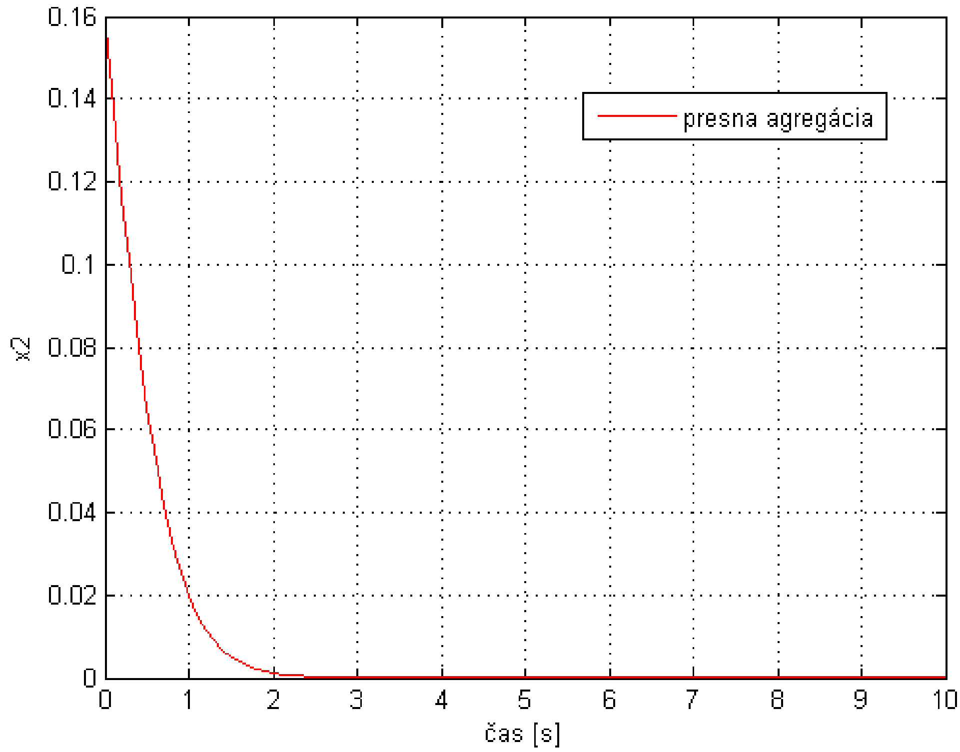
Schéma riadenia stabilného systému je znázornená na Obr. 1, kde akčných zásah vstupuje do s-funkcie a výstupy systému sú zobrazené na obr.2 až obr.4



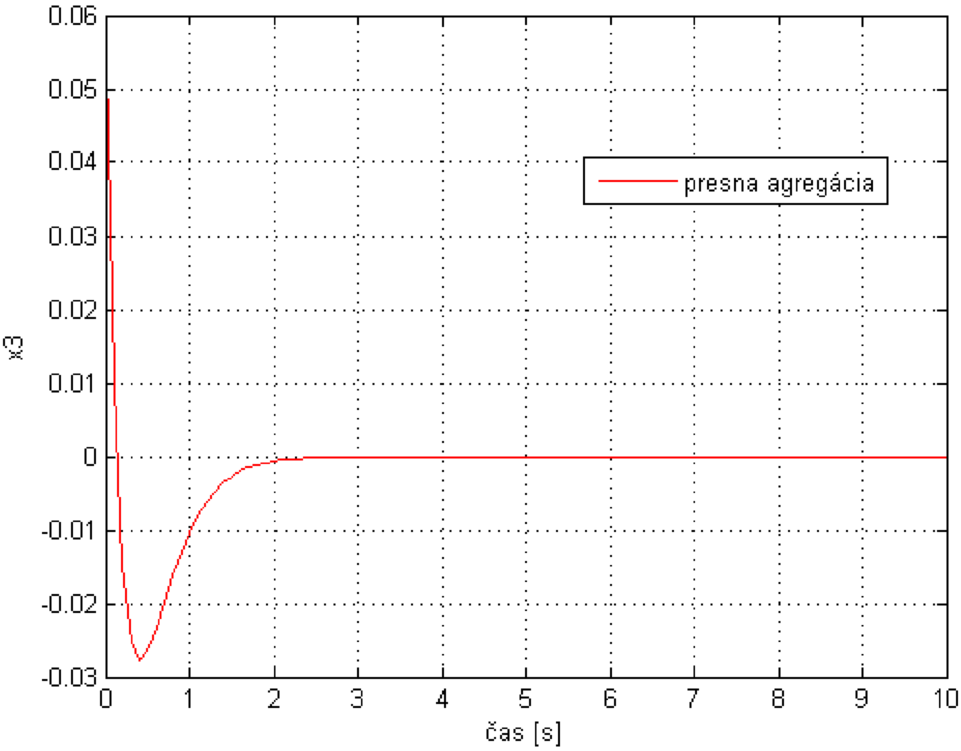
Obr.1 Schéma riadenia stabilného systém



Obr.2 Výstup stabilného systém x_1 pri použití presnej agragácie



Obr.3 Výstup stabilného systému x2 pri použití presnej agregácie



Obr.4 Výstup stabilného systému x3 pri použití presnej agregácie

2.1.1 Aplikácia modálnej agregácie

Pre porovnanie agregačných metód bol vypočítaný zákon riadenia aj využitím modálnej agragácie. Jordanová matica s vlastnými číslami matice A_s obsiahnutých na diagonále, bola navrhnutá pomocou príkazu v prostredí MATLAB

```
[Ma,Ja]=jordan(As)
```

$$J_A=\begin{bmatrix} -0.2215 & 0 & 0 \\ 0 & -3.2892 & 0 \\ 0 & 0 & -5.4893 \end{bmatrix}$$

a modálna matica k matici A_s podľa rovnice 2.1

$$M_A=\begin{bmatrix} 0.4158 & 0.1358 & 0.4484 \\ 0.2201 & 0.3820 & -0.6021 \\ 0.4676 & -0.2106 & -0.2570 \end{bmatrix}$$

Potom agregačná matica je

L= [0.4158   0.1101   0.4676]

Kde Mr je rozmer redukovaného systému 1x1 a $P=[I_{1x1}\ 0_{1\ x(n-1)}]$.

Matice redukovaného systému sú:

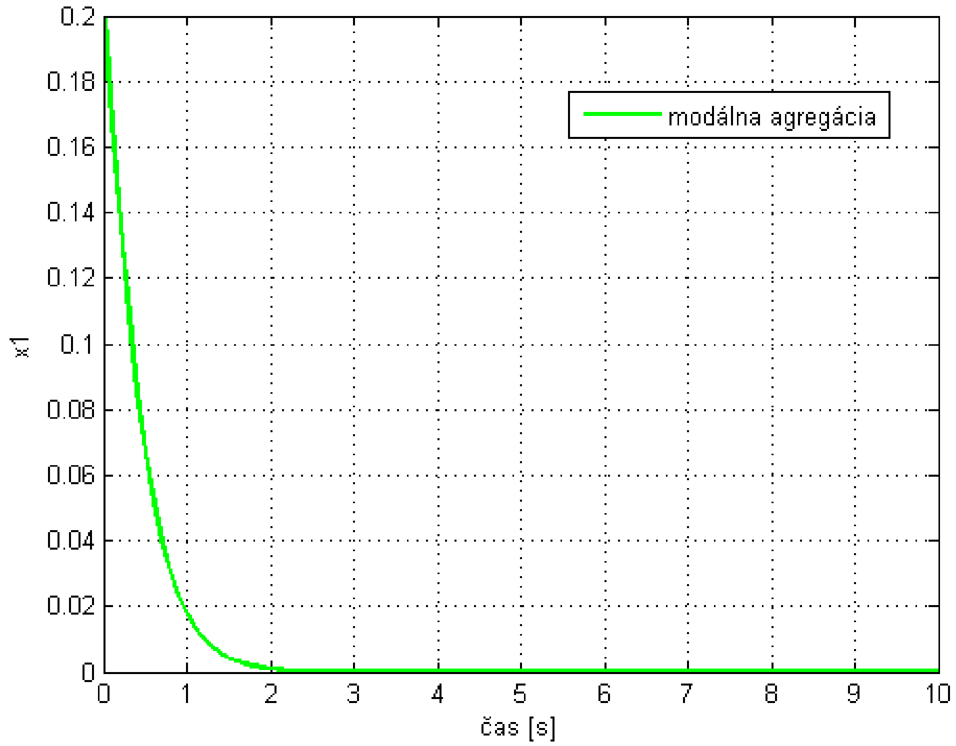
Ar = -0.2215

Br = 0.9353

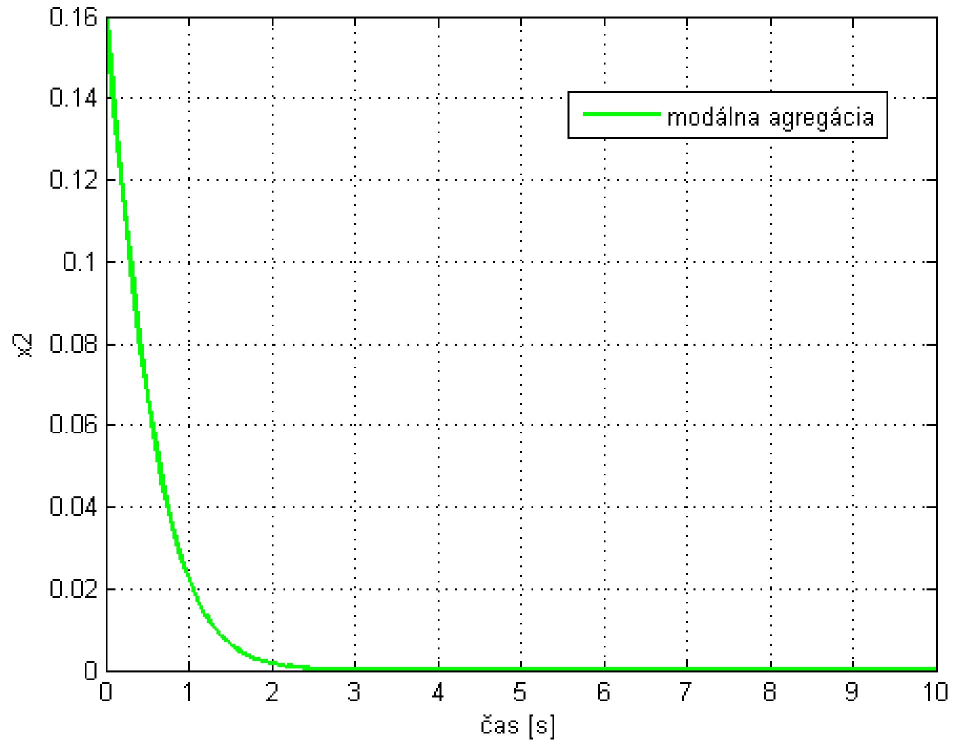
Zákon riadenia je :

$u(t)= 1.2916x_1(t)+ 0.3418x_2(t) +1.4525x_3(t)$

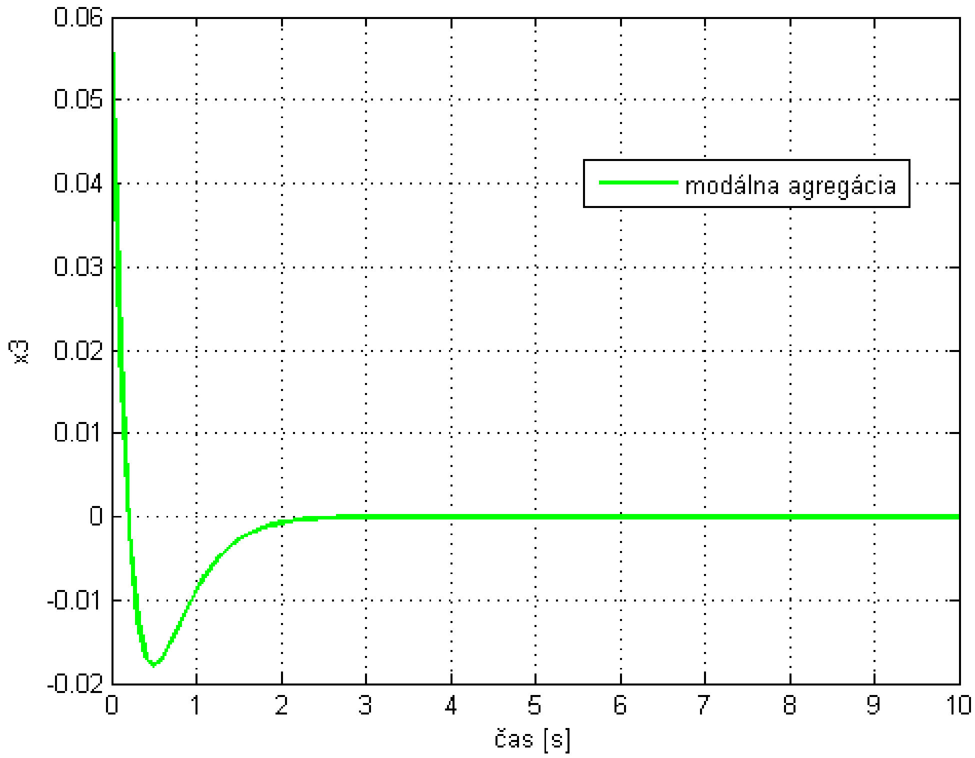
Na Obr.5 až Obr.7 sú znázornené výstupy stabilného systému pri použití modálnej agregácie.



Obr.5 Výstup stabilného systému x_1s použitím modálnej agregácii



Obr.6 Výstup stabilného systému x_2 s použitím modálnej agregácii



Obr.7 Výstup stabilného systému x3 s použitím modálnej agregácii

2.1.2 Aplikácia vyváženej realizácie

Stavový opis stabilného systému bol transformovaný na prenosovú funkciu.

```
[SYSb,G1,T,Ti] = balreal(sys)
```

$$G(s)=\frac{2s^2+18s+44}{s^3+9s^2+20s+4}$$

$$T=\begin{bmatrix} -0.6634 & -0.1756 & -0.7460 \\ -0.7935 & 0.5328 & 0.4548 \\ -0.4569 & -0.6428 & 0.7088 \end{bmatrix}$$

Inverzná matica je T^{-1}

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} 0.7066 & 0.2334 & 0.7634 \\ -0.0394 & -0.7983 & 0.3053 \\ -0.5023 & 0.7634 & 0.1023 \end{bmatrix}$$

Pomocou tejto matice ja navrhnutá matica L je:

L= [0.7066 0.2334 0.7634]

vypočítane redukované matice F a G.

F = -4.4105

G = -2.3219

tak dynamický model je

$z'(t)$=-4.4105z(t) - 2.3219u(t)

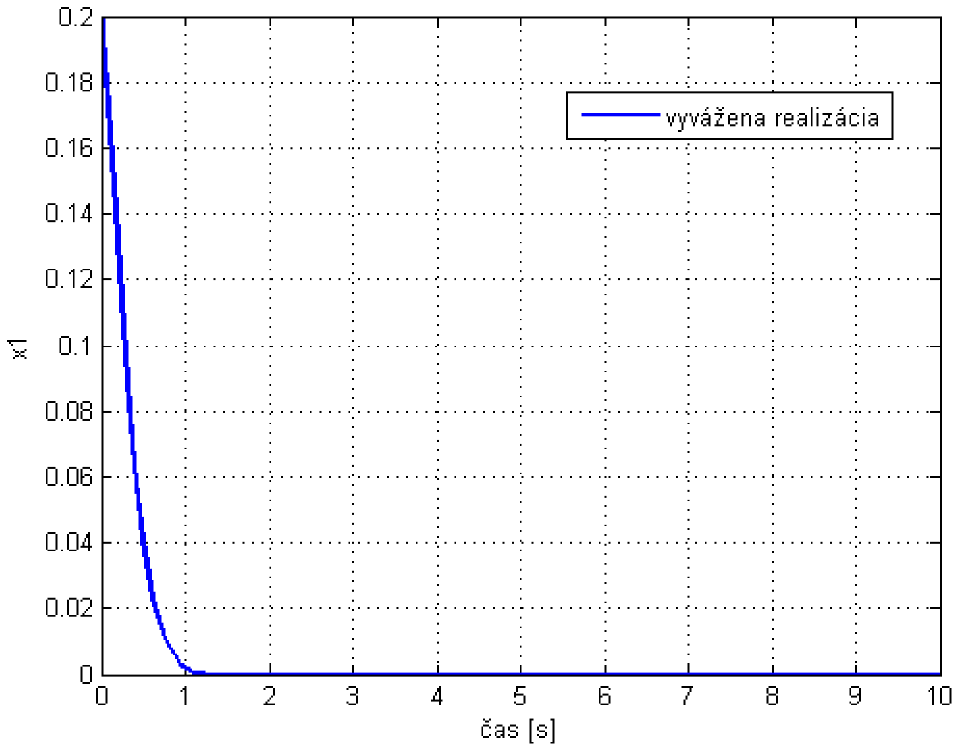
$$A_{vs} = \begin{bmatrix} -0.2091 & 0.1696 & -0.0560 \\ -0.1696 & -2.3963 & 1.6773 \\ -0.0560 & -1.6773 & -6.3947 \end{bmatrix}$$

$$B_{vs} = \begin{bmatrix} 1.5267 \\ 0.6106 \\ 0.2047 \end{bmatrix}$$

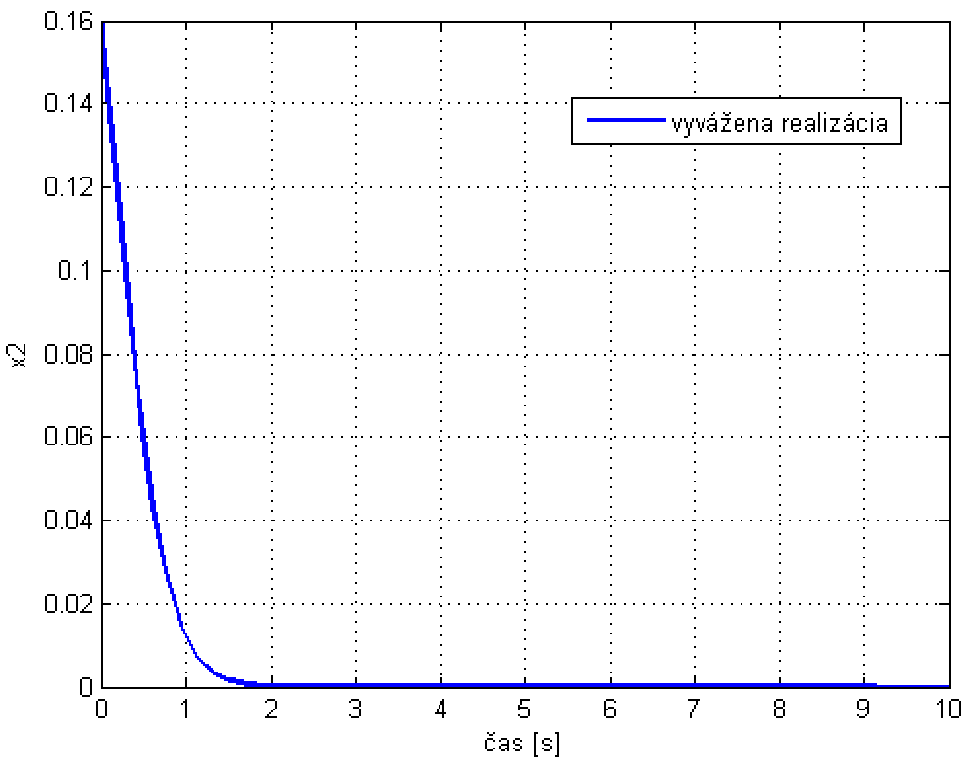
C_{vs}= [1.5267 -0.6106 0.2047]

Zákon riadenia vyzerá nasledovne:

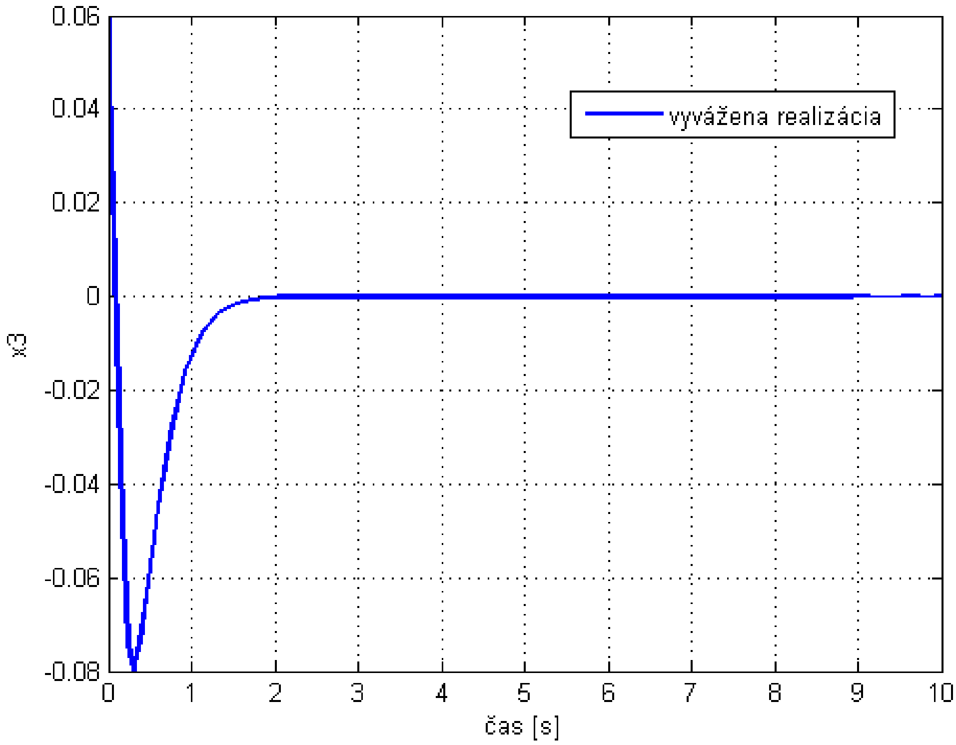
u(t) = 1.9338x_1(t) -3.4337x_2(t) -4.1818x_3(t)



Obr.8 Výstup stabilného systému x_1 pri použití metódy vyváženej realizácie



Obr.9 Výstup stabilného systému x_2 pri použití metódy vyváženej realizácie



Obr.10 Výstup stabilného systému x_3 pri použití metódy vyváženej realizácie

2.1.3 Aplikácia redukcie modelu

Vyvážená realizácia pôvodného systému je opísaná maticami

$$A_{vs} = \begin{bmatrix} -0.2091 & 0.1696 & -0.0560 \\ -0.1696 & -2.3963 & 1.6773 \\ -0.0560 & -1.6773 & -6.3947 \end{bmatrix}$$

$$B_{vs} = \begin{bmatrix} 1.5267 \\ 0.6106 \\ 0.2047 \end{bmatrix}$$

C_{vs}= [1.5267 -0.6106 0.2047]

D_{vs} = [0]

Cieľom je zredukovať tento systém. Redukciu modelu dosiahnem pomocou príkazu `modred` v prostredí MATLAB. Raz som získala redukciu na druhý rád a raz na prvý rad.

```
Gs2=modred(SYSb,[3])
```

$$A_{2s}=\begin{bmatrix}-0.2086 & 0.1843\\ -0.1843 & -2.8360\end{bmatrix}$$

$$B_{2s}=\begin{bmatrix}1.5250\\ 0.6643\end{bmatrix}$$

$$C_{2s}=\begin{bmatrix}1.5250 & -0.6643\end{bmatrix}$$

$$D_{2s}=[0]$$

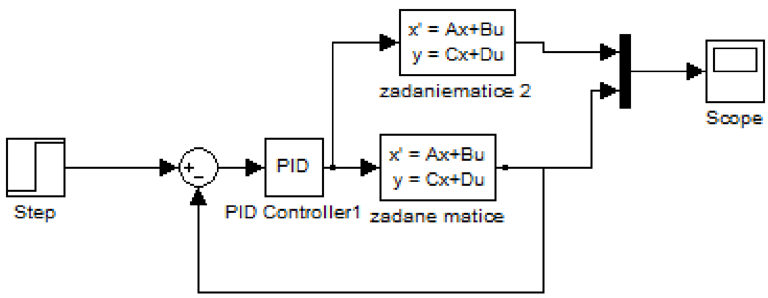
$$G_2(s)=\frac{1.884s+6.877}{s^2+3.035s+0.6256}$$

Z redukovaného modelu stavovom opise som získala vstupno-výstupnú charakteristiku 2.rádu a metódou umiestenia pólov som navrhla PI regulátor s parametrami

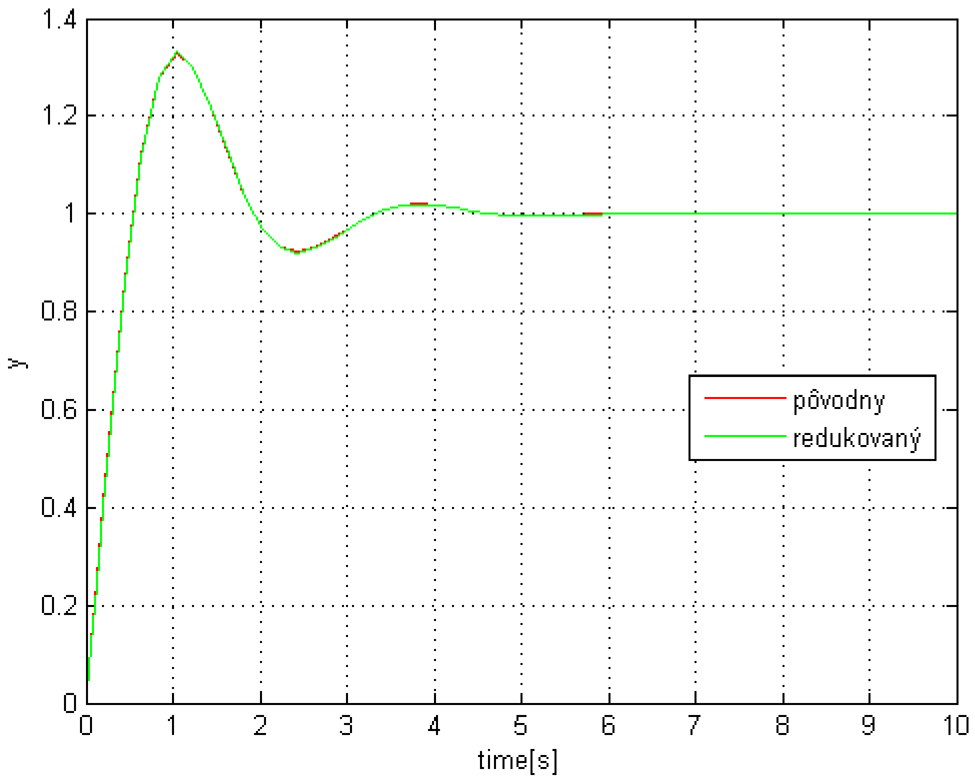
Zr= 0.95915

Ti=0.37914

Schéma agregovaného a pôvodného systému s použitím PI regulátora je znázornená na Obr.11. Žiadaná hodnota je 1. Na Obr.12 je znázornení priebeh redukovaného modelu systému druhého rádu.



Obr.11 Schéma agregovaného a pôvodného systému pomocou PI regulátora



Obr.12 Riadenie redukovaného systému na druhý rád PI regulátorom

Pre redukciu systému na systém 1.rádu bol použití príkaz v prostredí MATLAB

```
Gs1=modred(SYSb,[2 3])
```

Stavový opis a prenosová funkcia redukovaného systému je nasledovná:

A1=[-0.2205]

B1=[1.568]

C1=[1.568]

D1=[0]

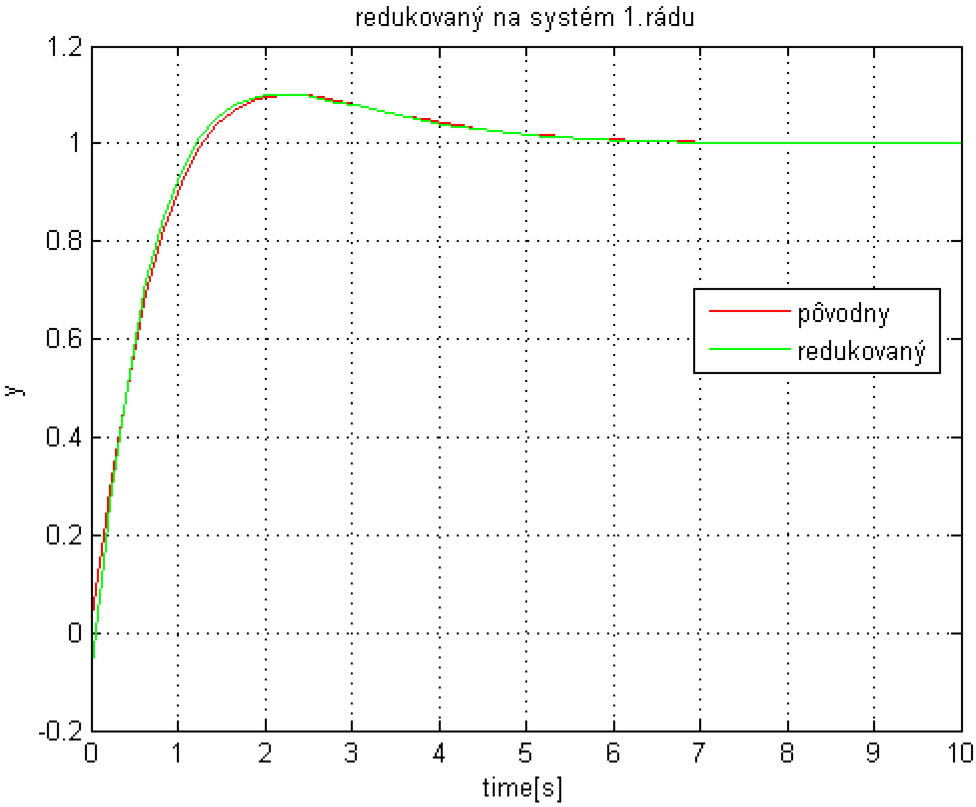
$$G_1(s)=\frac{2.459}{s+0.2205}$$

Z redukovaného modelu stavovom opise som získala vstupno-výstupnú charakteristiku 1.rádu a metódou umiestenia pólov som navrhla PI regulátor s parametrami

Zr = 0.67567

Ti = 1.639

Na Obr.13 je zobrazené riadenie redukovaného systému na 1.rád použitím navrhnutého PI regulátora. Žiadaná hodnota bola nastavená na 1.



Obr.13 Riadenie redukovaného systému na prvý rád PI regulátorom

2.2 Aplikovanie agregačných techník na nestabilný systém

Aplikovaná bola presná a modálna agregácia na nestabilný systém, ktorého matematický model v stavovom priestore vyplýva z konštrukčných, fyzikálnych a chemických vlastnosti procesu.

$$\dot{x}(t)=\begin{bmatrix}-3 & 1 & -4\\ 2 & -2 & 3\\ 5 & 6 & 5\end{bmatrix}x(t)+\begin{bmatrix}0\\0\\2\end{bmatrix}u(t)$$

S maticou váhových koeficientov

$$Q=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

a

R=[1]

2.2.1 Aplikácia presnej agregácie

Ako prvé som vypočítala vlastné hodnoty matice A_n, ktoré musia byť obsiahnuté v agregovanej matici F.

vlastné čísla [4.3850 -0.0526 -4.3323]

ako je zrejme z vlastných čísel matice A_n je systém nestabilný. Výpočet transformovanej matice T v prostredí MATLAB pomocou príkazu:

```
[T,D]=eig(An)
```

kde D je matica s vlastnými číslami matica na diagonále a transformačná matica T je

$$T=\begin{bmatrix}-0.4300 & 0.7807 & 0.7152\\ 0.2701 & -0.1373 & -0.6959\\ 0.8615 & -0.6096 & 0.0642\end{bmatrix}$$

Inverzná matica T^{-1} je

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} 1.3181 & 1.4797 & 1.3549 \\ 1.8775 & 1.9594 & 0.3230 \\ 0.1411 & -1.2492 & 0.4621 \end{bmatrix}$$

pomocou nej bola navrhnutá agregačná matica L z rovnice 2.2. Matica L je prvý riadok z matice T^{-1}

L= [1.3181 1.4797 1.3549]

Pomocou rovníc 1.6 – 1.9 boli vypočítané hodnoty redukovaných matíc F a G.

F = 4.3850

G = 2.7098

Dynamický model z rovnice 1.3 je

$z'(t)= 4.3850z(t) +2.7098u(t)$

potom modifikovaný tvar váhovej matice Qr z rovnice 3.5

Qr =0.1735

Riccatiho rovnica tohto agregovaného modelu, ktorá je opísaná rovnicou 4.0 je

$5.8806K_a +6.6016K_a^2 +6.0451 = 0$

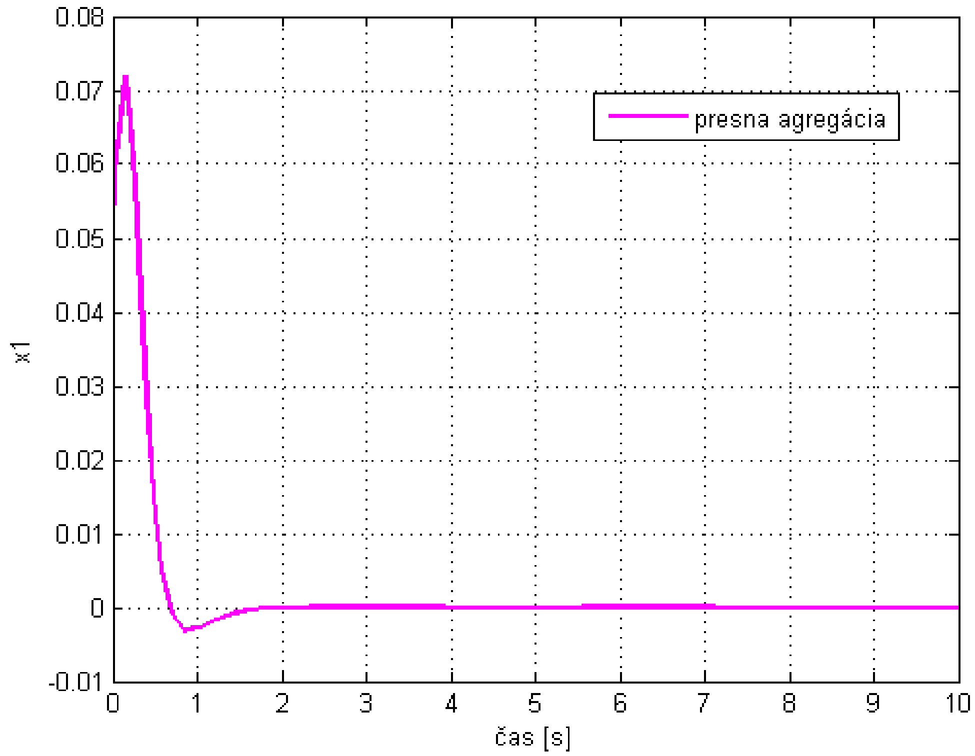
A výsledkom Riccatiho rovnice podľa rovnice 3.9

$K_a= 4.4616$

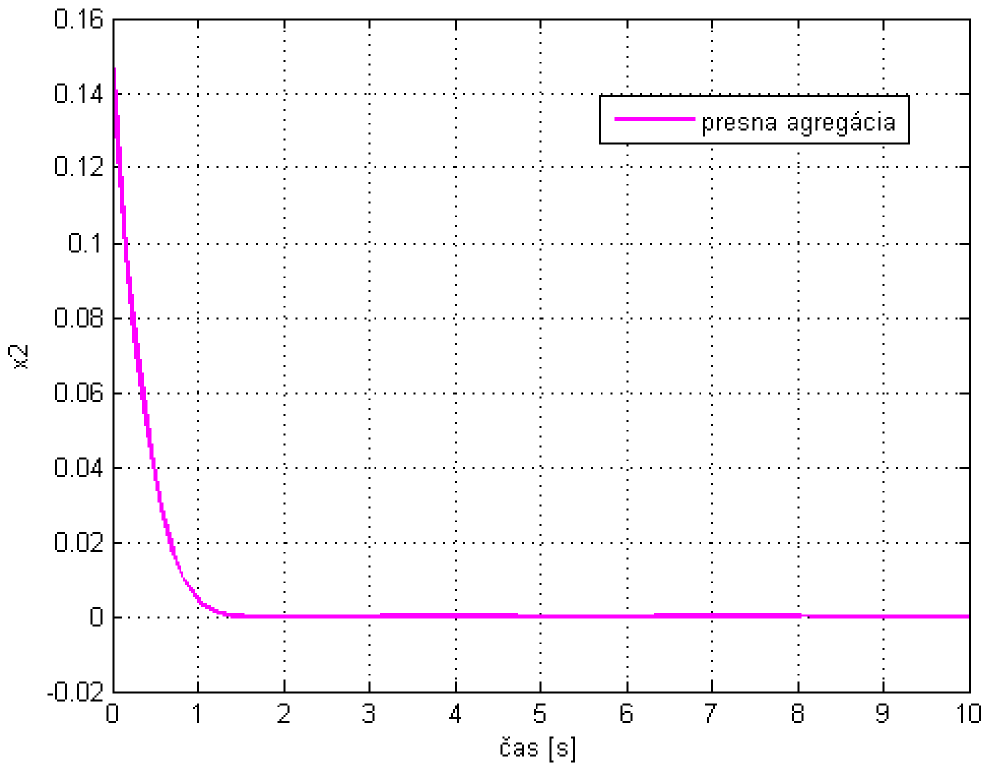
A nakoniec zákon riadenia v rovnici 3.3 je

$u(t)= 5.8806x_1(t) + 6.6016x_2(t)+ 6.0451x_3(t)$

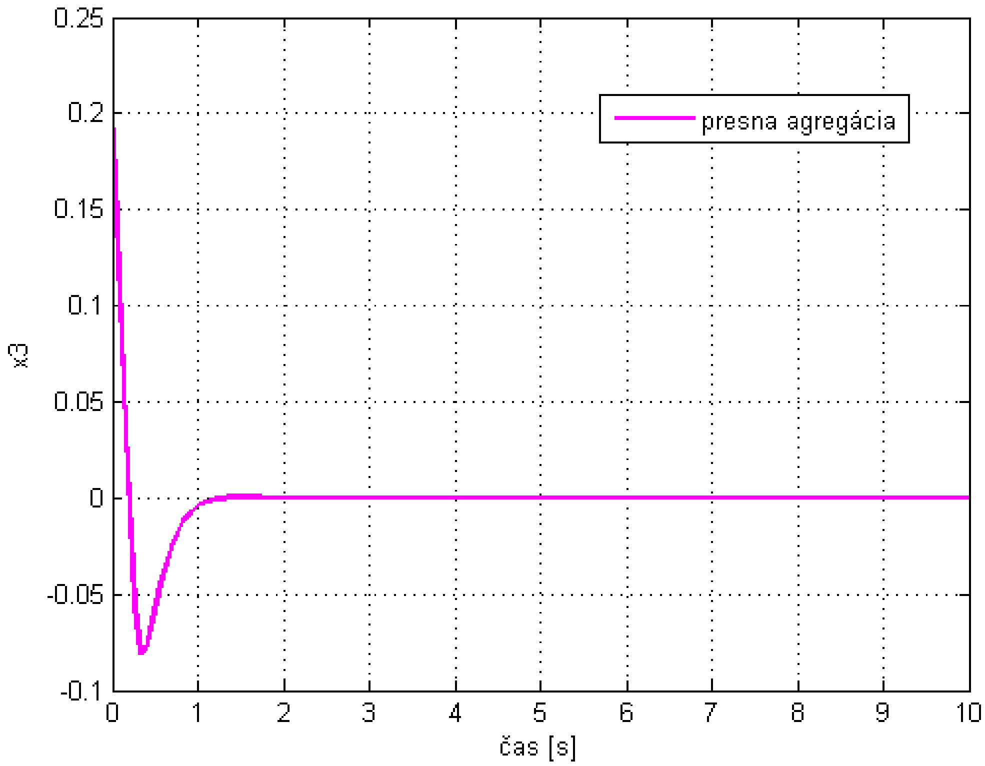
Schéma riadenia nestabilného systému je rovnaká ako schéma riadenia stabilného systému. Výstupy nestabilného systému sú zobrazené na Obr. 14 až Obr. 16. Žiadaná hodnota bola v tomto prípade rovná nule.



Obr.14 Výstup nestabilného systému x_1 pri použití presnej agregácie



Obr.15 Výstup nestabilného systému x_2 pri použití presnej agregácie



Obr.16 Výstup nestabilného systému x_3 pri použití presnej agregácie

2.2.2 Aplikácia modálnej agregácie

Pre porovnanie agregačných metód bol vypočítaní zákon riadenia aj využitím modálnej agragácie. Jordanova matica s vlastnými číslami matice A_n obsiahnutých na diagonále, ktoré vypočítane v predošlej kapitole, bola navrhnutá pomocou príkazu v prostredí MATLAB

```
[Ma,Ja]=jordan(An)
```

$$J_A = \begin{bmatrix} 4.3850 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0526 & 0 \\ 0 & 0 & -4.3323 \end{bmatrix}$$

a modálna matica k matici A_n podľa rovnice 2.1

$$M_A = \begin{bmatrix} -0.5668 & 1.4659 & 0.1010 \\ 0.3560 & -0.2577 & -0.0982 \\ 1.1355 & -1.1445 & 0.0091 \end{bmatrix}$$

Potom agregačná matica je :

L= [-0.5668   -0.6363   -0.5827]

Kde Mr je rozmer redukovaného systému 1x1 a $P=[I_{1x1}\ 0_{1\ x(n-1)}]$.

Matice redukovaného systému sú :

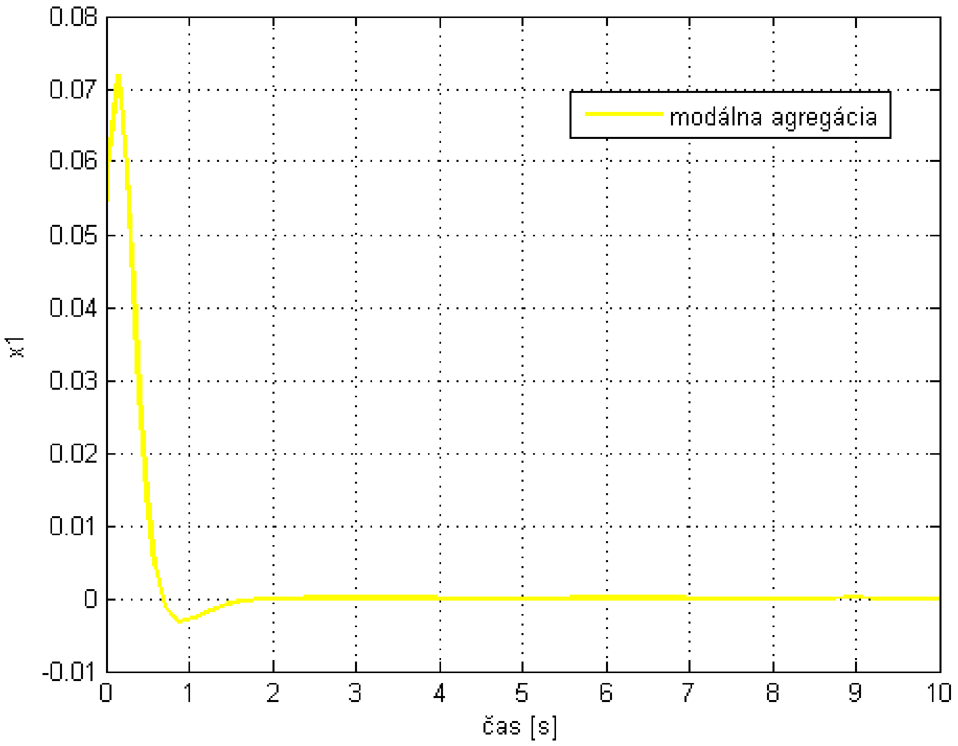
Ar = 4.3850

Br = -1.1653

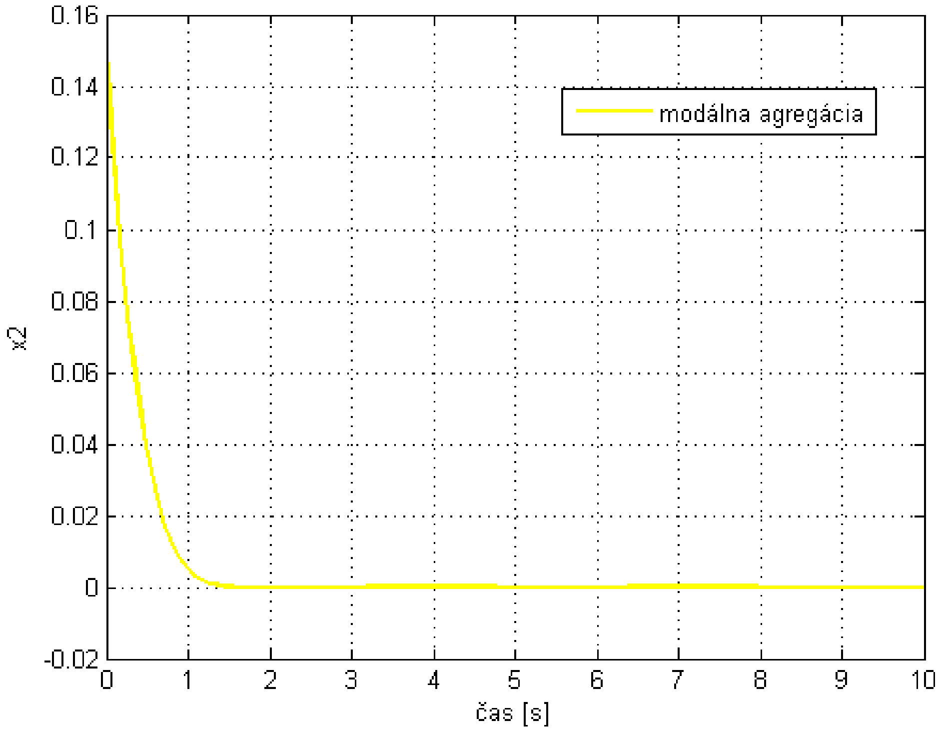
Zákon riadenia sa vypočíta podobne ako pri agregácii opísanej v 2.1 kapitole je nasledovný

$u(t)= 5.4129\ x_1(t)+ 6.0765x_2(t) +5.5643x_3(t)$

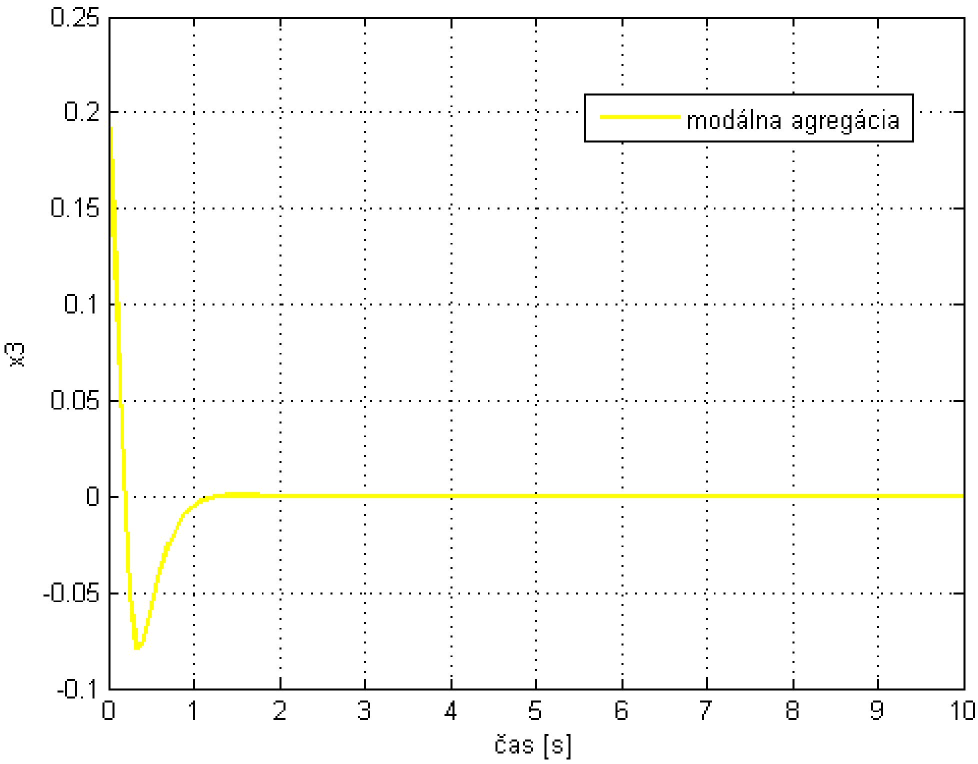
Výstupy nestabilného systému sú zobrazené na Obr. 17 až Obr. 19. Žiadaná hodnota bola v tomto prípade rovná nule.



Obr.17 Výstup nestabilného systému x_1 pri použití modálnej agregácie



Obr.18 Výstup nestabilného systému x_2 pri použití modálnej agregácie



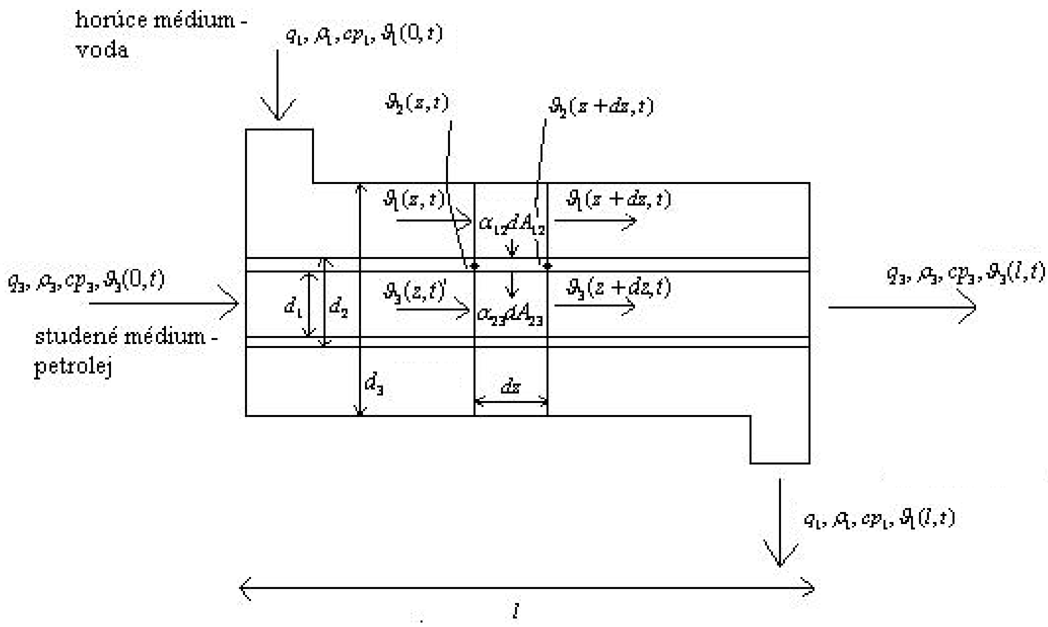
Obr.19 Výstup nestabilného systému x_3 pri použití modálnej agregácie

2.3 Trojkapacitný výmenník

V rúrkovom súprúdovom výmenníku tepla je zohrievaní petrolej horúcou vodou. Všetky potrebné údaje sú zahrnuté v tabuľke č.1. Výmenník je dokonale izolovaný. Výmenník má dĺžku 10 m.

Tabuľka č.1 Údaje o trojkapacitnom rúrkovom výmenníku

Petrolej	$m_3 [kg.s^{-1}]$	1100
	$\varrho_3 [kg.m^{-3}]$	810
	$cp_3 [J.kg^{-1}.K^{-1}]$	$2{,}1.10^3$
	ϑ_3 [°C]	20
Rúrka	σ [mm]	1.5
	d_1 [mm]	25
	$cp_2 [J.kg^{-1}.K^{-1}]$	395
	$\varrho [kg.m^{-3}]$	8930
	d_3 [mm]	50
	$\alpha_{12} [Wm^{-2}K^{-1}]$	750
	$\alpha_{32} [Wm^{-2}K^{-1}]$	1480
Horúca voda	$m_1 [kg.s^{-1}]$	400
	$\varrho_1 [kg.m^{-3}]$	8930
	$cp_1 [J.kg^{-1}.K^{-1}]$	385
	ϑ_1[°C]	75



Obr.20 Schéma trojkapacitného rúrkového výmenníka tepla

Dynamický matematický model výmenníka tepla aj s podmienkami potrebnými na jeho riešenie vyzerá takto:

Horúca kvapalina:

$$q_1\rho_1 cp_1\vartheta_1(z,t) = q_1\rho_1 cp_1\left[\vartheta_1(z,t) + \frac{\partial\vartheta_1(z,t)}{\partial z}dz\right] + \alpha_{12}dA_{12}\left[\vartheta_1(z,t) - \vartheta_2(z,t)\right] + \frac{\partial\left[dV_1\rho_1 cp_1\vartheta_1(z,t)\right]}{\partial t}$$

začiatočná podmienka: $\vartheta_1(z,t=0) = \vartheta_1(z,0) = \vartheta_1^{\,s}(z)$

okrajová podmienka: $\vartheta_1(z=0,t) = \vartheta_1(0,t) = \vartheta_{1,0}(t)$

Stena vnútornej rúrky:

$$\alpha_{12}dA_{12}\left[\vartheta_1(z,t) - \vartheta_2(z,t)\right] = \alpha_{23}dA_{23}\left[\vartheta_2(z,t) - \vartheta_3(z,t)\right] + \frac{\partial\left[dV_2\rho_2 cp_2\vartheta_2(z,t)\right]}{\partial t}$$

začiatočná podmienka: $\vartheta_2(z,t=0) = \vartheta_2(z,0) = \vartheta_2^{\,s}(z)$

Studená kvapalina:

$$q_3\rho_3 cp_3\vartheta_3(z,t) + \alpha_{23}dA_{23}\left[\vartheta_2(z,t) - \vartheta_3(z,t)\right] = q_3\rho_3 cp_3\left[\vartheta_3(z,t) + \frac{\partial\vartheta_3(z,t)}{\partial z}dz\right] + \frac{\partial\left[dV_3\rho_3 cp_3\vartheta_3(z,t)\right]}{\partial t}$$

začiatočná podmienka: $\vartheta_3(z,t=0) = \vartheta_3(z,0) = \vartheta_3^{\,s}(z)$

okrajová podmienka: $\vartheta_3(z=0,t) = \vartheta_3(0,t) = \vartheta_{3,0}(t)$

Vzťahy pre výpočet časových konštánt, rýchlostí prúdení a zosilnení:

Časová konštanta pre horúcu kvapalinu:

$$T_1 = \frac{dV_1\rho_1 cp_1}{\alpha_{12} dA_{12}} = \quad 14.1750 \text{ s} \qquad dV_1 = \pi \frac{D_1^2}{4} dz \,; \qquad dA_{12} = \pi D_1 dz$$

Rýchlosť prúdenia pre horúcu kvapalinu:

$$\frac{q_1\rho_1 cp_1 dz}{\alpha_{12} dA_{12}} \frac{dV_1}{dV_1} = T_1 \frac{q_1 dz}{dV_1} = T_1 \frac{q_1 dz}{S_1 dz} = T_1 w_1 \Rightarrow w_1 = \frac{q_1}{S_1} = 0.7685 \text{ m/s}$$

$$T_2 = \frac{dV_2\rho_2 cp_2}{\alpha_{12} dA_{12} + \alpha_{23} dA_{23}} = 2.2705 \text{ s} \quad dV_2 = \pi \frac{D_2^2 - D_1^2}{4} dz \,; \qquad dA_{23} = \pi D_2 dz$$

Časová konštanta pre petrolej:

$$T_3 = \frac{dV_3\rho_3 cp_3}{\alpha_{23} dA_{23}} = \quad 43.4797 \text{ s} \qquad dV_3 = \pi \frac{D_3^2 - D_2^2}{4} dz$$

Rýchlosť prúdenia petroleja:

$$\frac{q_3\rho_3 cp_3 dz}{\alpha_{23} dA_{23}} \frac{dV_3}{dV_3} = T_3 \frac{q_3 dz}{dV_3} = T_3 \frac{q_3 dz}{S_3 dz} = T_3 w_3 \Rightarrow w_3 = \frac{q_3}{S_3} = 0.0824 \text{ m/s}$$

Zosilnenia:

$$Z_{21} = \frac{\alpha_{12} dA_{12}}{\alpha_{12} dA_{12} + \alpha_{23} dA_{23}} = 0.3115 \qquad Z_{23} = \frac{\alpha_{23} dA_{23}}{\alpha_{12} dA_{12} + \alpha_{23} dA_{23}} = 0.6885$$

Matematický model pre každý úsek je ustálenom stave rovnaký a v poslednom úseku je nasledovný :

$$T_1 w_1 \frac{\vartheta_{1,5}^s - \vartheta_{1,4}^s}{\Delta z} = -\vartheta_{1,5}^s + \vartheta_{2,5}^s \qquad \rightarrow \vartheta_{1,5}^s = 36.9259\ °C$$

$$0 = Z_{21}\vartheta_{1,5}^s - \vartheta_{2,5}^s + Z_{23}\vartheta_{3,5}^s \qquad \rightarrow \vartheta_{2,5}^s = 47.1162\ °C$$

$$-T_3 w_3 \frac{\vartheta_{3,5}^s - \vartheta_{3,4}^s}{\Delta z} = \vartheta_{2,5}^s + \vartheta_{3,5}^s \qquad \rightarrow \vartheta_{3,5}^s = 51.7269\ °C$$

2.3.1 Riadenie konečného úseku trojkapaciného výmenníka tepla

Ako príklad návrhu riadenie pomocou agregačných techník som uviedla matice reálneho systému pre posledný úsek:

$$A_{real}=\begin{bmatrix} -0.4548 & 0.0705 & 0 \\ 0.1372 & -0.4404 & 0.3032 \\ 0 & 0.0230 & -0.0642 \end{bmatrix}$$

$$B_{real}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.0412 \end{bmatrix}$$

2.3.1.1 Aplikácia presnej agregácie

Najprv som vypočítala vlastné hodnoty matice A_{real}, ktoré musia byť obsiahnuté v agregovanej matici F.

vlastné čísla [-0.2215 -5.4893 -3.2892]

ako je zrejme z vlastných čísel matice A_{real} reálny systém je stabilný. Výpočet transformovanej matice T v prostredí MATLAB pomocou príkazu:

```
[T,D]=eig(Areal)
```

Kde D je matica s vlastnými číslami matica na diagonále a transformačná matica T je

$$T=\begin{bmatrix} -0.5825 & -0.5995 & 0.1084 \\ 0.8119 & -0.7980 & 0.6288 \\ -0.0382 & 0.0619 & 0.7700 \end{bmatrix}$$

Inverzná matica T^{-1} je

$$T^{-1}=\begin{bmatrix} -0.8464 & 0.6067 & -0.3763 \\ -0.8410 & -0.5757 & 0.5885 \\ 0.0256 & 0.0764 & 1.2327 \end{bmatrix}$$

pomocou nej bola navrhnutá agregačná matica L. Matica L je prvý riadok z matice T^{-1}

L=[-0.8464 0.6067 -0.3763]

vypočítané hodnoty redukovaných matíc F a G sú:

F = -0.5531

G = -0.0155

Dynamický model z rovnice 1.3 je

$z'(t) = -0.5531z(t) - 0.0155u(t)$

Modifikovaný tvar váhovej matice redukovaného systému Qr z rovnice 3.5

Qr = 0.8156

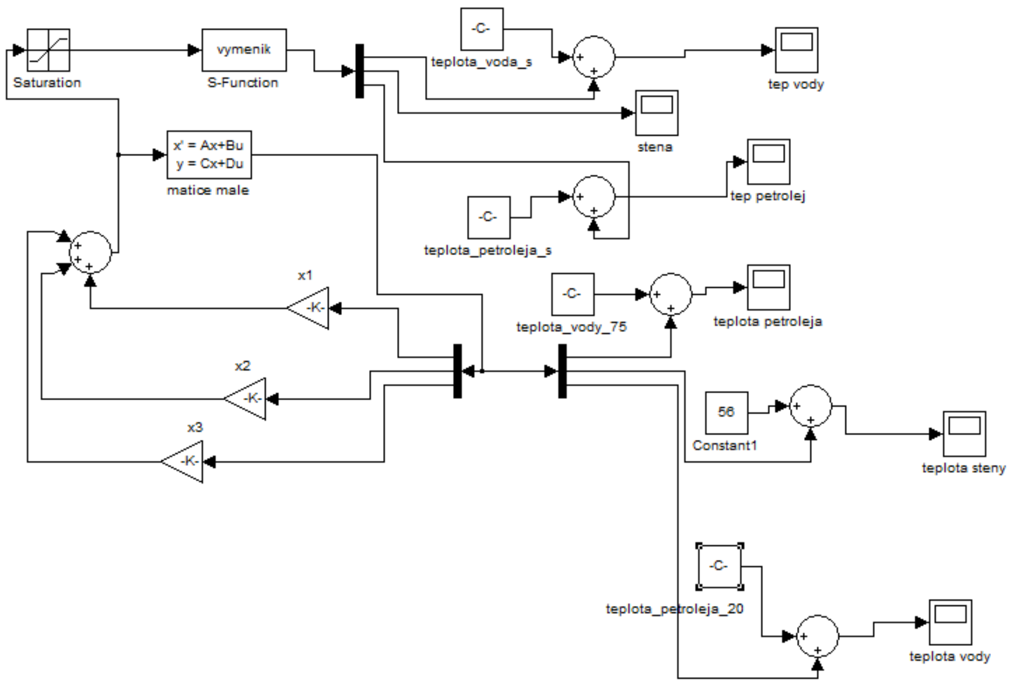
A výsledkom Riccatiho rovnice je:

$K_a = -57.6723$

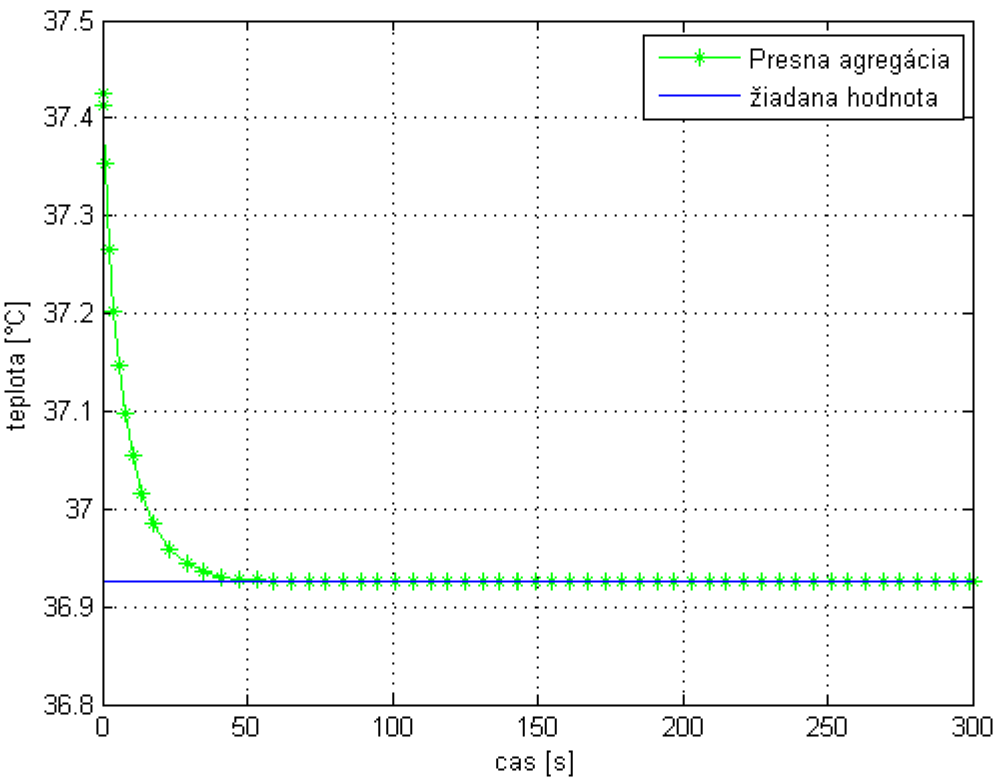
A nakoniec zákon riadenia je

$u(t) = -48.8166x_1(t) – 34.9879 x_2(t) – 21.7003x_3(t)$

Schéma riadenia systému je znázornená na Obr.21 bola rovnaká pre presnú agregáciu, modálnu agregáciu aj pre vyváženú realizáciu. Výstup systému v poslednom úseku výmenníka, čo je teplota petroleja, je zobrazený na Obr.22.



Obr. 21 Schéma riadenia trojkapacitného výmenníka



Obr.22 Priebeh teploty petroleja v poslednom úseku výmenníka pri použití presnej agregácie

2.3.1.2 Aplikácia modálnej agregácie

Pre porovnanie agregačných metód bol vypočítaný zákon riadenia aj využitím modálnej agragácie. Jordanová matica s vlastnými číslami matice A_{real} obsiahnutých na diagonále, bola navrhnutá pomocou príkazu v prostredí MATLAB

```
[Ma,Ja]=jordan(A_real)
```

$$J_A=\begin{bmatrix} -0.0454 & 0 & 0 \\ 0 & -0.3609 & 0 \\ 0 & 0 & -0.5531 \end{bmatrix}$$

A modálna matica k matici A_{real}

$$M_A=\begin{bmatrix} 0.0028 & 0.5042 & 0.4931 \\ 0.0161 & 0.6712 & -0.6873 \\ 0.0197 & -0.0520 & 0.0323 \end{bmatrix}$$

Potom agregačná matica je:

$L= [0.0028 \quad 0.0083 \quad 0.1336]$

Kde Mr je rozmer redukovaného systému 1x1 a $P=[I_{1x1}\ 0_{1\ x(n-1)}]$.

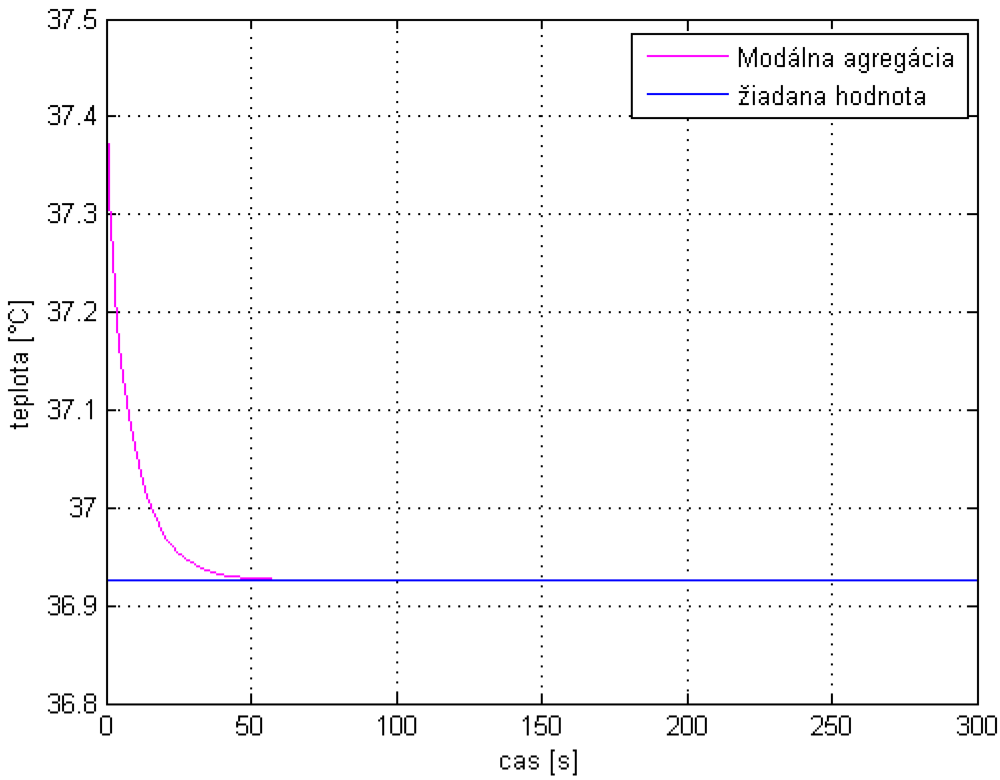
Matice redukovaného systému sú:

Ar = -0.0454

Br = 0.0055

Zákon riadenia je :

$u(t)= 0.9619\, x_1(t)+ 2.8698\, x_2(t) + 46.3363 x_3(t)$



Obr.23 Priebeh teploty petroleja v poslednom úseku výmenníka pri použití modálnej agregácie

2.3.1.3 Aplikácia vyváženej realizácie

Stavový opis trojkapacitného výmenníka bol transponovaný na prenosovú funkciu.

```
[SYSb,G1,T,Ti] = balreal(sys)
```

$$G(s)=\frac{0.04122s^2+0.0369s+0.007858}{s^3+0.9594s^2+0.2411s+0.00907}$$

$$T=\begin{bmatrix} 0.0654 & 0.2386 & 4.8456 \\ -0.5436 & -1.2765 & 0.8787 \\ 1.8107 & -0.3918 & -0.3918 \end{bmatrix}$$

Inverzná matica T^{-1} je

$$T^{-1}=\begin{bmatrix} 0.0183 & -0.1519 & 0.5060 \\ 0.1297 & -0.6938 & -0.2130 \\ 0.1997 & 0.0362 & 0.0037 \end{bmatrix}$$

agregačná matica L je:

L=[0.0183 -0.1519 0.5060]

vypočítane redukované matice F a G:

F = -0.1875

G = 0.0209

tak dynamický model je:

$z'(t)$= -0.1875z(t) +0.0209u(t)

Z pôvodného prenosu pomocou príkazu balreal, som získala vyváženú realizáciu v stavovom opise

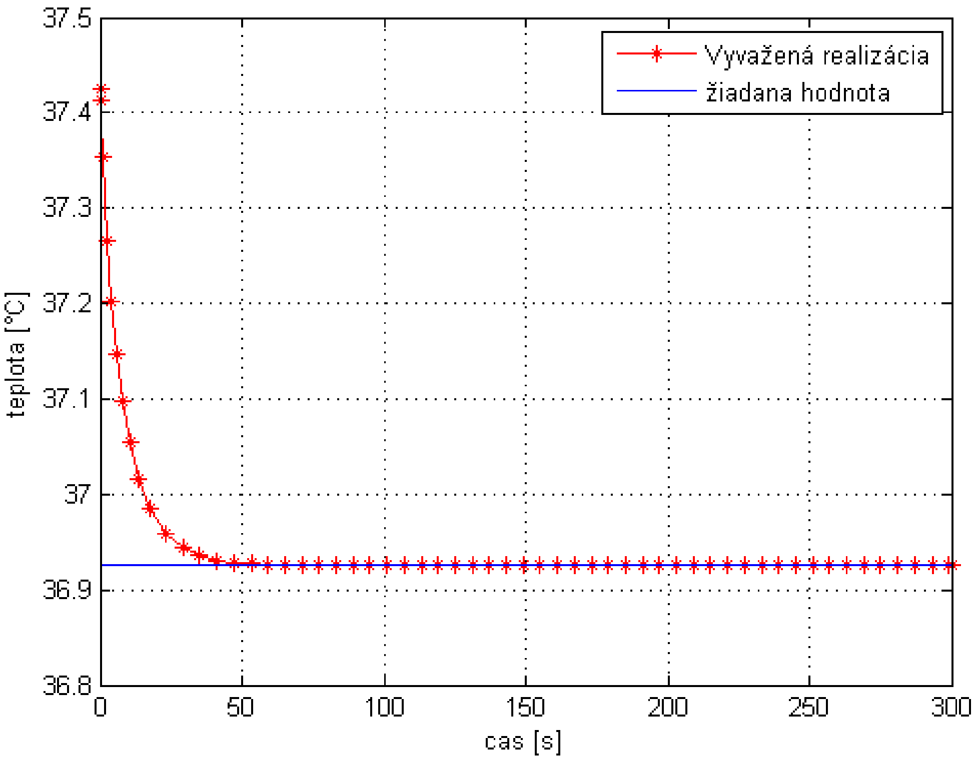
$$AA=\begin{bmatrix} -0.0462 & -0.0167 & -0.0017 \\ -0.0167 & -0.4045 & -0.0810 \\ -0.0017 & -0.0810 & -0.5087 \end{bmatrix}$$

$$BB=\begin{bmatrix} 0.1997 \\ 0.0362 \\ 0.0037 \end{bmatrix}$$

CC= [0.1997 0.0362 0.0037]

Zákon riadenia vyzerá nasledovne:

u(t)= 1.4255 x_1(t) -11.8447x_2(t) +39.4554x_3(t)



Obr.24 Riadenie teploty petroleja v poslednom úseku výmenníka pri použití vyváženej realizácie

2.3.1.4 Aplikácia redukcie modelu

Vyvážená realizácia pôvodného systému je opísaná maticami

$$AA=\begin{bmatrix} -0.0462 & -0.0167 & -0.0017 \\ -0.0167 & -0.4045 & -0.0810 \\ -0.0017 & -0.0810 & -0.5087 \end{bmatrix}$$

$$BB=\begin{bmatrix} 0.1997 \\ 0.0362 \\ 0.0037 \end{bmatrix}$$

CC= [0.1997 0.0362 0.0037]

D= [0]

Redukciu modelu dosiahnem pomocou príkazu `modred` v prostredí MATLAB. Raz som získala redukciu na druhý rád a raz na prvý rad.

Gs2=modred(SYSb,[3])

$$A_2=\begin{bmatrix}-0.04622 & -0.0164\\ -0.0164 & -0.3916\end{bmatrix}$$

$$B_2=\begin{bmatrix}0.1997\\ 0.0356\end{bmatrix}$$

$C_2=$ [0.1997 0.0356]

$D_2=$ [0]

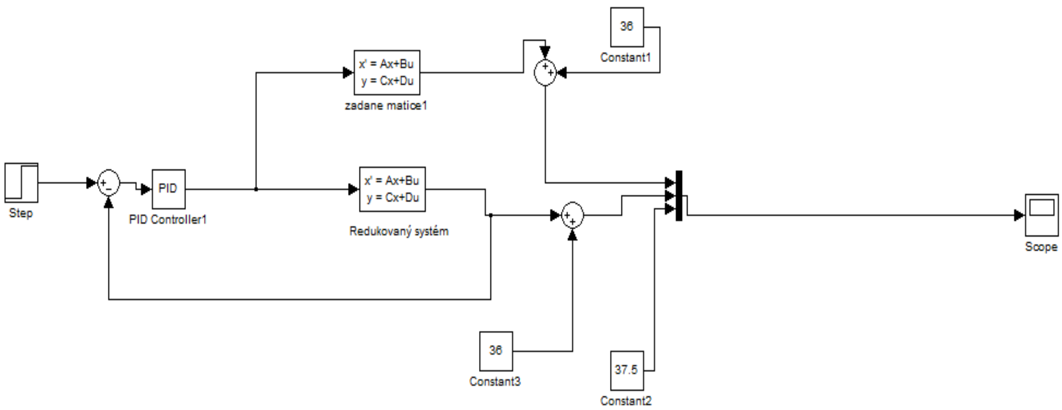
$$G_2(s)=\frac{0.04115s+0.01544}{s^2+0.4378s+0.01783}$$

Z redukovaného modelu stavovom opise som získala vstupno-výstupnú charakteristiku 2.rádu a metódou umiestenia pólov som navrhla PI regulátor s parametrami

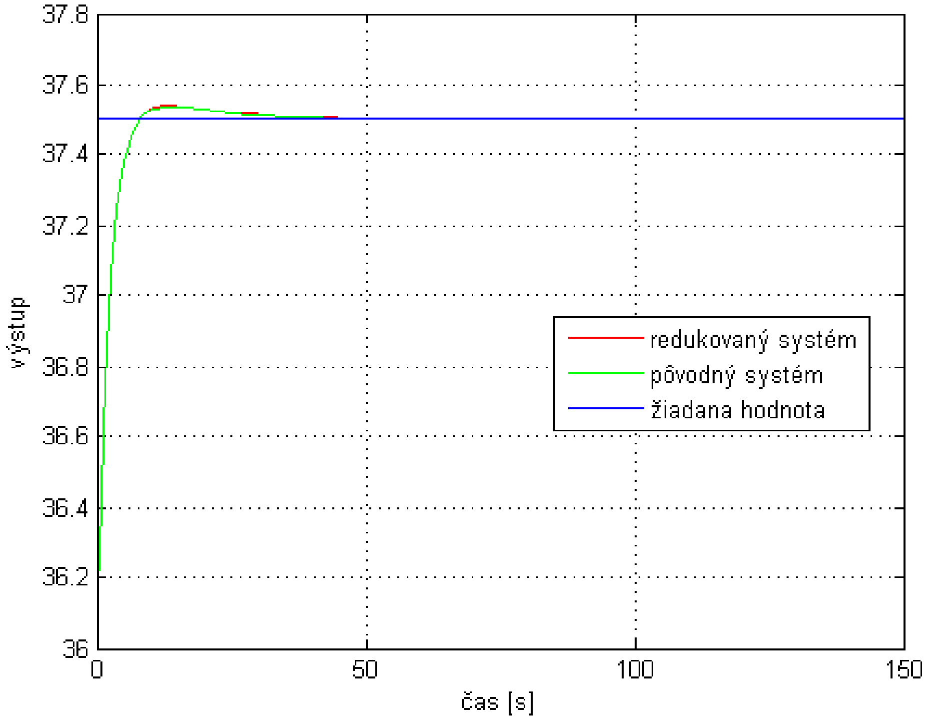
Zr= 11.2416

Ti= 14.6073

Schéma riadenia s použitím PI regulátora je znázornená na Obr.25. Žiadaná hodnota je 37.5. Na Obr.26 je znázornení priebeh redukovaného modelu systému druhého rádu.



Obr.25 Schéma agregovaného a pôvodného systému pomocou PI regulátora



Obr.26 Riadenie redukovaného systému na druhý rád PI regulátorom

Pre redukciu systému na systém 1.rádu bol opäť použitý príkaz `modred` v prostredí MATLAB

```
Gs1=modred(SYSb,[2 3])
```

Stavový opis a prenosová funkcia redukovaného systému je nasledovná:

A_1=[-0.04553]

B_1=[0.1982]

C_1=[0.1982]

D_1=[0]

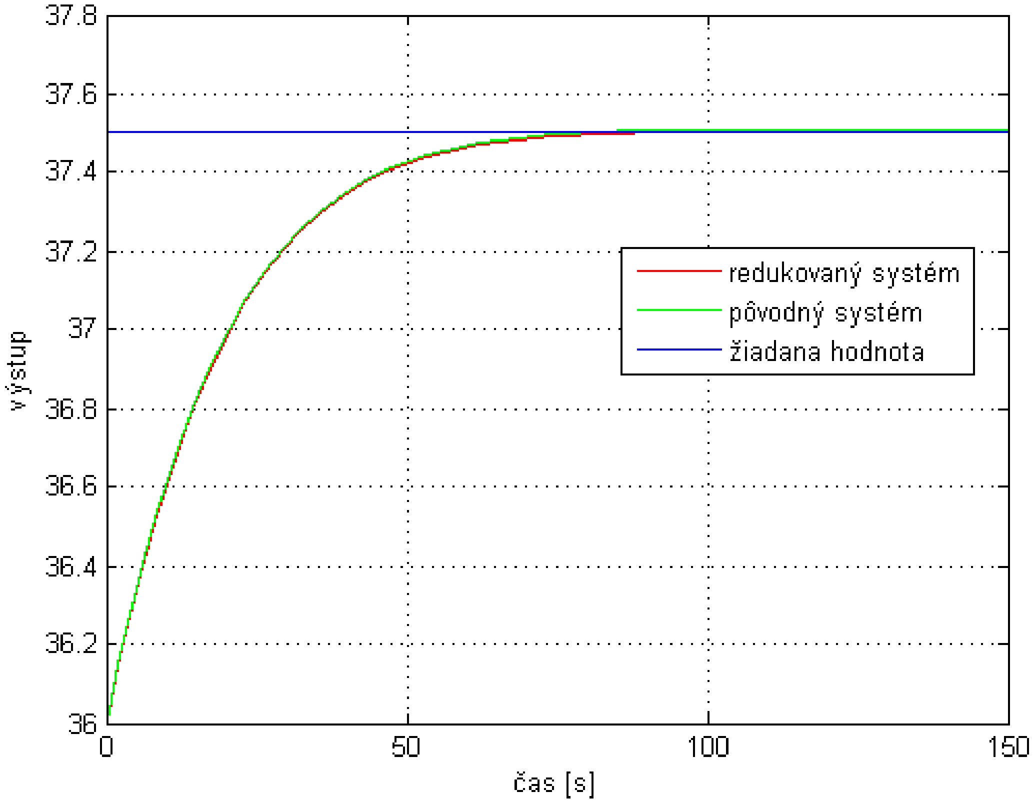
$$G_1(s)=\frac{0.03928}{s+0.04553}$$

Z redukovaného modelu stavovom opise som získala vstupno-výstupnú charakteristiku 1.rádu a metódou umiestenia pólov som navrhla PI regulátor s parametrami

Zr = 1.2917

Ti = 19.7136

Na Obr.27 je zobrazené riadenie redukovaného systému na 1.rád použitím navrhnutého PI regulátora. Žiadaná hodnota bola nastavená na 37.65 .



Obr.27 Riadenie redukovaného systému na prvý rád PI regulátorom

2.3.2 Riadenie celého trojkapacitného výmenníka

Na riadenie celého výmenníka tepla som si vybrala metódu redukcie modelu.

2.3.2.1 Aplikácia redukcie modelu

Vyvážená realizácia pôvodného systému je opísaná maticami

$$A_{V3}=\begin{bmatrix} -0.0060 & 0.0146 & 0.0013 & -0.0011 & 0 & 0.0001 \\ -0.0146 & -0.0344 & -0.0076 & 0.0063 & 0.0003 & -0.0006 \\ 0.0013 & 0.0076 & -0.0625 & 0.1218 & 0.0043 & -0.0093 \\ 0.0011 & 0.0063 & -0.1218 & -0.2930 & -0.0245 & 0.0524 \\ 0 & -0.0003 & 0.0043 & 0.0245 & -0.0685 & 0.4485 \\ 0.0001 & -0.0006 & 0.0093 & 0.0524 & -0.4485 & -0.9438 \end{bmatrix}$$

$$B_{V3}=\begin{bmatrix} -0.0665 \\ -0.0667 \\ 0.0073 \\ 0.0061 \\ -0.0003 \\ -0.0005 \end{bmatrix}$$

$$C_{V3}=[-0.0665 \quad 0.0667 \quad 0.0073 \quad -0.0061 \quad -0.0003 \quad 0.0005]$$

$$D_{V3}= [0]$$

Redukciu modelu dosiahnem pomocou príkazu `modred` v prostredí MATLAB. Raz som získala redukciu na tretí rad a na druhý rád.

```
Gs3=modred(SYSb,[4,5,6])
```

$$A_3=\begin{bmatrix} -0.0060 & 0.0145 & 0.0018 \\ -0.0145 & -0.0343 & -0.0103 \\ 0.0018 & 0.0103 & -0.1128 \end{bmatrix}$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} -0.0666 \\ -0.0665 \\ 0.0099 \end{bmatrix}$$

C_3= [-0.0665 0.0667 0.0073 -0.0061 -0.0003 0.0005]

D_3= [0]

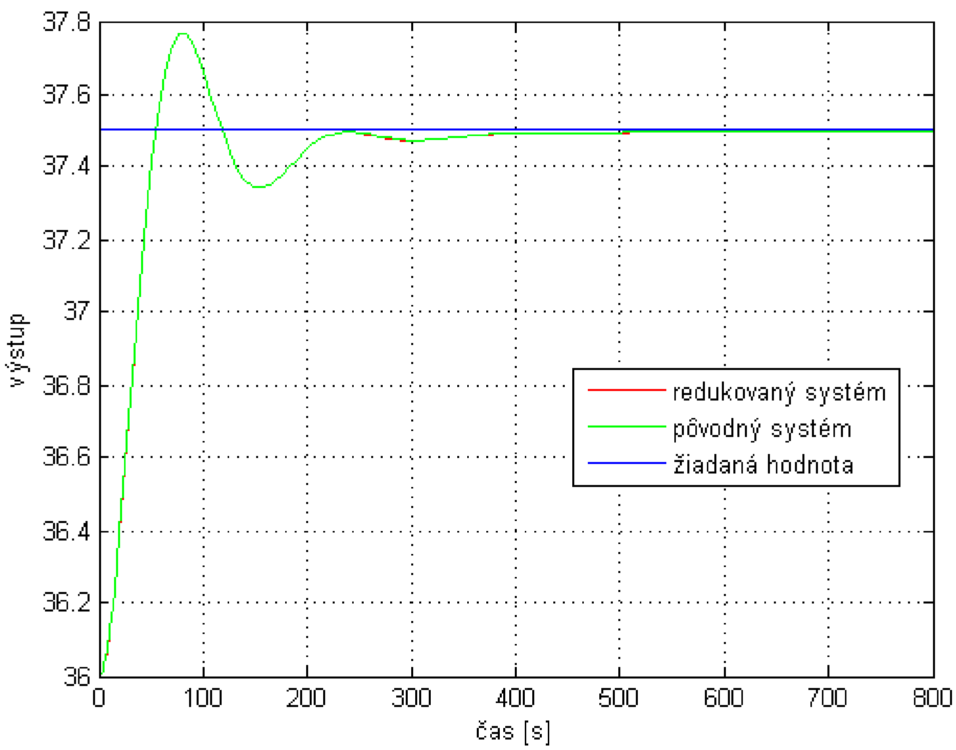
$$G_3(s) = \frac{0.0001015s^2+0.0002429s}{s^3+0.1531s^2+0.005066s+0.00004812}$$

Z redukovaného modelu stavovom opise som získala vstupno-výstupnú charakteristiku 3.rádu a metódou Ziegler – Nicolson som navrhla PI regulátor s parametrami

Zr= 6.7084;

Ti= 130.8378 ;

Schéma riadenia s použitím PI regulátora je znázornená v kapitole 2.1. Žiadaná hodnota je 37.5. Na Obr.28 je znázornení priebeh redukovaného modelu systému tretieho rádu.



Obr.28 Priebeh pôvodného a redukovaného systému na tretí rád

```
Gs2=modred(SYSb,[3,4,5,6])
```

$A_2 = \begin{bmatrix} -0.0060 & 0.0147 \\ -0.0147 & -0.0352 \end{bmatrix}$

$B_2 = \begin{bmatrix} -0.0664 \\ -0.0674 \end{bmatrix}$

$C_2 = [\ -0.0664 \quad 0.0674]$

$D_2 = [0]$

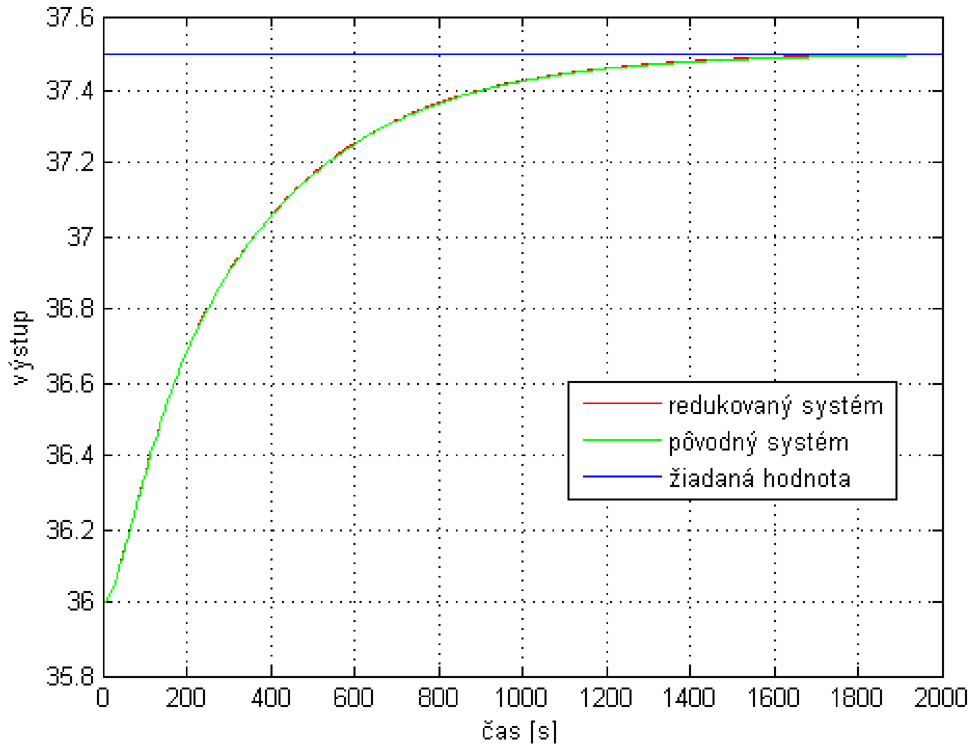
$G_2(s) = \frac{-0.0001379s+0.0002599}{s^2+0.04121s+0.0004266}$

Z redukovaného modelu stavovom opise som získala vstupno-výstupnú charakteristiku 2.rádu a metódou umiestenia pólov som navrhla PI regulátor s parametrami

Zr= 0.45156

Ti= 92.9286

Schéma riadenia s použitím PI regulátora je znázornená v kapitole 2.1. Žiadaná hodnota je 37.5. Na Obr.29 je znázornení priebeh redukovaného modelu systému druhého rádu.



Obr.29 Priebeh pôvodného a redukovaného systému na 2. rád

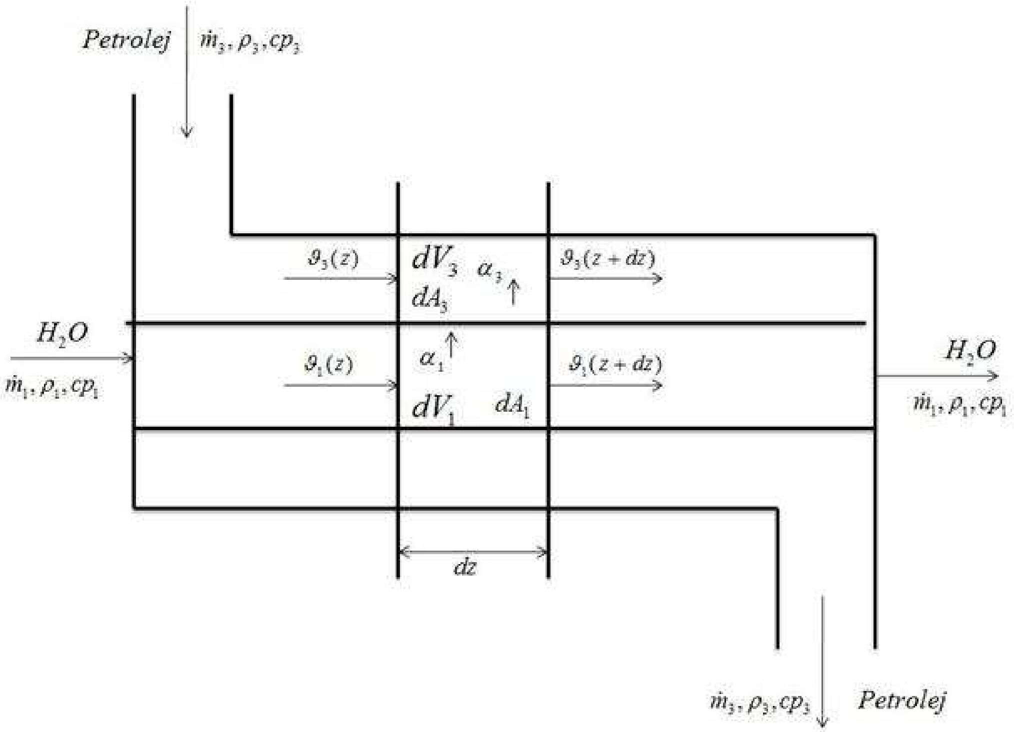
2.4 Dvojkapacitný výmenník

V rúrkovom súprúdovom výmenníku tepla je zohrievaní petrolej horúcou vodou. Všetky potrebné údaje sú v tabuľke č.2. Výmenník je dokonale izolovaný. Výmenník má dĺžku 10 m.

Tabuľka č.2 Údaje o dvojkapacitnom výmenníku

Petrolej	m_3[kg.s^{-1}]	1100
	ϱ_3 [kg.m^{-3}]	810
	cp_3 [J.kg^{-1}.K^{-1}]	$2{,}1.10^3$
	ϑ_3 [°C]	20
Rúrka	σ [mm]	1.5
	d_1 [mm]	25
	cp_2 [J.kg^{-1}.K^{-1}]	395
	ϱ [kg.m^{-3}]	8930
	d_3 [mm]	50
	α_{12}[Wm^{-2}K^{-1}]	750
	α_{23}[Wm^{-2}K^{-1}]	1480
Horúca voda	m_1 [kg.s^{-1}]	400
	ϱ_1 [kg.m^{-3}]	8930
	cp_1 [J.kg^{-1}.K^{-1}]	385
	ϑ_1[°C]	75

Na Obr.30 je znázornená schéma dvojkapacitného rúrkového výmenníka tepla. Kde stručné je znázornený priebeh prúdenia jednotlivých druhov kvapalín (petroleja a horúcej vody).



Obr.30 Schéma dvojkapacitného rúrkového výmenníka tepla

Dynamický matematický model výmenníka tepla s podmienkami :

Horúca kvapalina:

$$q_1\rho_1 cp_1 \vartheta_1(z,t) = q_1\rho_1 cp_1\left[\vartheta_1(z,t) + \frac{\partial \vartheta_1(z,t)}{\partial z}dz\right] + k_1 dA_1\left[\vartheta_1(z,t) - \vartheta_3(z,t)\right] + \frac{\partial\left[dV_1\rho_1 cp_1\vartheta_1(z,t)\right]}{\partial t}$$

začiatočná podmienka: $\vartheta_1(z,t=0) = \vartheta_1(z,0) = \vartheta_1^s(z)$

okrajová podmienka: $\vartheta_1(z=0,t) = \vartheta_1(0,t) = \vartheta_{1,0}(t)$

Studená kvapalina:

$$q_3\rho_3 cp_3 \vartheta_3(z,t) + k_3 dA_3\left[\vartheta_1(z,t) - \vartheta_3(z,t)\right] = q_3\rho_3 cp_3\left[\vartheta_3(z,t) + \frac{\partial \vartheta_3(z,t)}{\partial z}dz\right] + \frac{\partial\left[dV_3\rho_3 cp_3\vartheta_3(z,t)\right]}{\partial t}$$

začiatočná podmienka: $\vartheta_3(z,t=0) = \vartheta_3(z,0) = \vartheta_3^s(z)$

okrajová podmienka: $\vartheta_3(z=0,t) = \vartheta_3(0,t) = \vartheta_{3,0}(t)$

Vzťahy na výpočet časových konštánt a rýchlosti pre petrolej a horúcu vodu:

Horúca kvapalina :

$$T_1 = \frac{dV_1 \rho_1 c_{p1}}{kdA_{23}} = \frac{\rho_1 c_{p1}(d_1^{\ 2} - d_{23}^{\ \ 2})}{4k.d_{23}} = 50.7070 \ \text{s}$$

$$w_1 = \frac{4q_1}{\pi(d_1^{\ 2} - d_{23}^{\ \ 2})} = 0.2343 \ \text{m/s}$$

Studená kvapalina :

$$T_3 = \frac{dV_1 \ \rho_3 c_{p3}}{kdA_{23}} = \frac{d_{23}\rho_3 c_{p3}}{4k} = 59.1834 \ \text{s}$$

$$w_3 = \frac{4q_3}{\pi d_{23}^{\ \ 2}} = \ 0.2670 \ \text{m/s}$$

2.4.1 Riadenie posledného úseku dvojkapacitného výmenníka

Ako príklad návrhu riadenie pomocou agregačných techník som uviedla matice reálneho systému pre posledný úsek:

$$A_{real2} = \begin{bmatrix} 0.1369 & 0.0197 \\ 0.0169 & -0.1504 \end{bmatrix}$$

$$B_{real2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1335 \end{bmatrix}$$

2.4.1.1 Aplikácia presnej agregácie

Najprv som vypočítala vlastné hodnoty matice A_1, ktoré musia byť obsiahnuté v agregovanej matici F.

vlastné čísla [-0.1242 -0.1631]

ako je zrejme z vlastných čísel matice A_1 je systém stabilný. Výpočet transformovanej matice T v prostredí MATLAB pomocou príkazu:

```
[T,D]=eig(A1)
```

Kde D je matica s vlastnými číslami matica na diagonále a transformačná matica T je

$$T = \begin{bmatrix} 0.8408 & -0.6008 \\ 0.5414 & 0.7994 \end{bmatrix}$$

Inverzná matica T^{-1} je

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} 0.8015 & 0.6024 \\ -0.5428 & 0.8430 \end{bmatrix}$$

Matica L je prvý riadok z matice T^{-1}.

Navrhnutá agregačná matica L je:

$L= [0.8015 \quad 0.6024]$

hodnoty redukovaných matíc F a G sú:

$F = -0.1242$

$G = 0.0804$

Dynamický model je:

$z'(t)= -0.1242z(t) +0.0804u(t)$

potom modifikovaný tvar váhovej matice Qr

$Qr =0.9948$

Riccatiho rovnica tohto agregovaného modelu je :

$272.5463K_a -1.6990K_a^2 = 0$

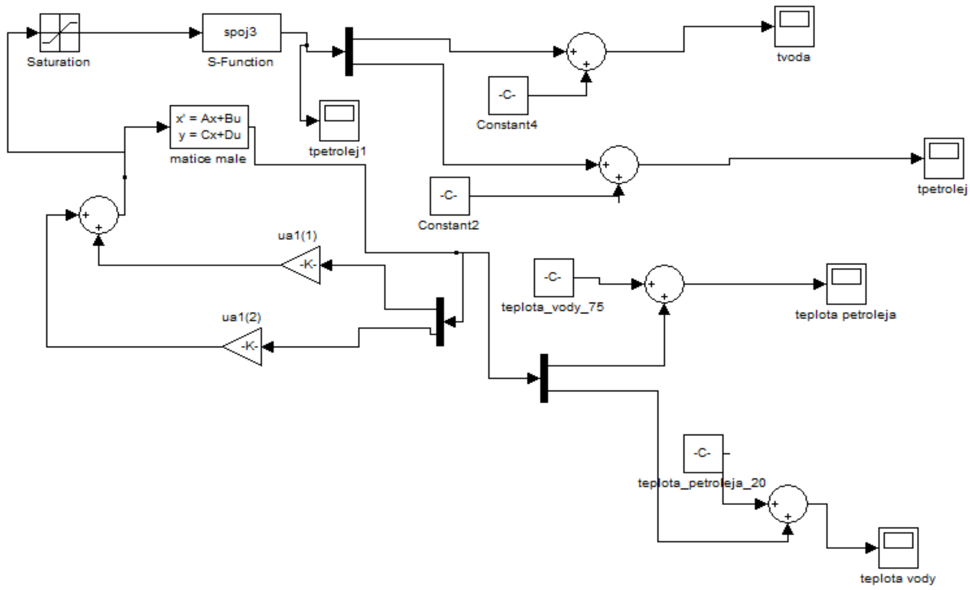
A výsledkom Riccatiho rovnice :

$K_a= 21.9182$

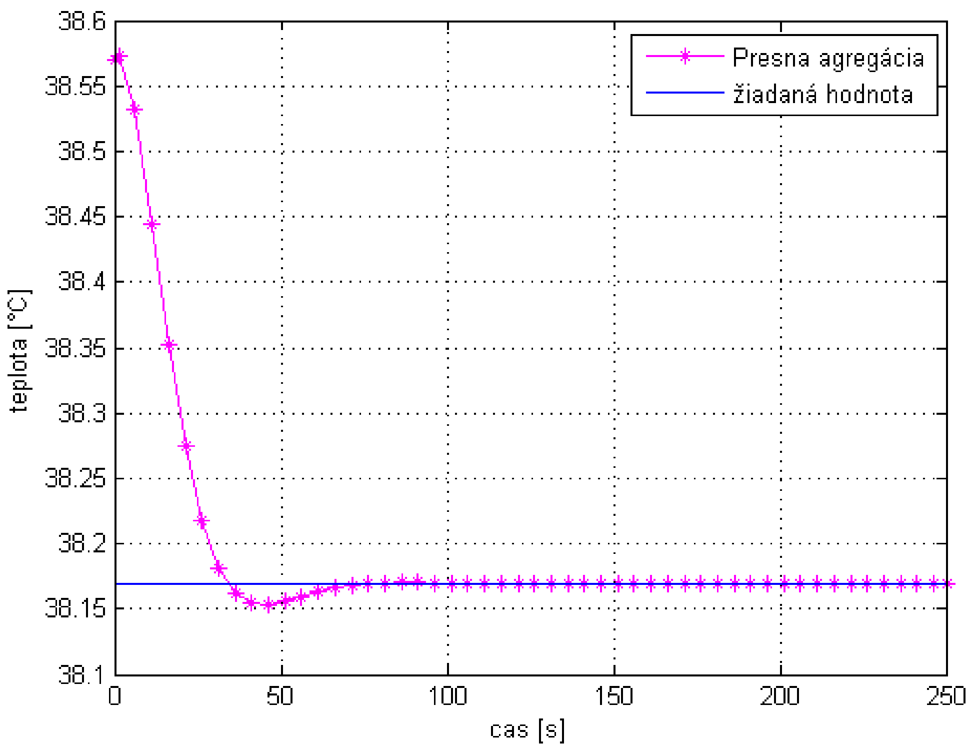
A nakoniec zákon riadenia je nasledovný :

$u(t)= 17.5674\ x_1(t) + 13.2032\ x_2(t)$

Schéma riadenia systému je znázornená na Obr.31 bola rovnaká pre presnú agregáciu, modálnu agregáciu aj pre vyváženú realizáciu. Výstup systému v poslednom úseku výmenníka, čo je teplota petroleja, je zobrazený na Obr.32.



Obr. 31 Schéma riadenia jedného úseku dvojkapacitného výmenníka



Obr.32 Priebeh teploty petroleja v poslednom úseku výmenníka pri použití presnej agregácie

2.4.1.2 Aplikácia modálnej agregácie

Pre porovnanie agregačných metód bol vypočítaný zákon riadenia aj využitím modálnej agragácie. Jordanová matica s vlastnými číslami matice A_1 obsiahnutých na diagonále, bola navrhnutá pomocou príkazu v prostredí MATLAB

```
[Ma,Ja]=jordan(A1)
```

$$J_A = \begin{bmatrix} -0.1242 & 0 \\ 0 & -0.1631 \end{bmatrix}$$

a modálna matica k matici A_1 je:

$$M_A = \begin{bmatrix} 0.6739 & 0.3261 \\ 0.4339 & -0.4339 \end{bmatrix}$$

Potom agregačná matica je

L= [0.6739   0.5065]

Kde Mr je rozmer redukovaného systému 1x1 a $P=[I_{1x1}\ 0_{1\ x(n-1)}]$.

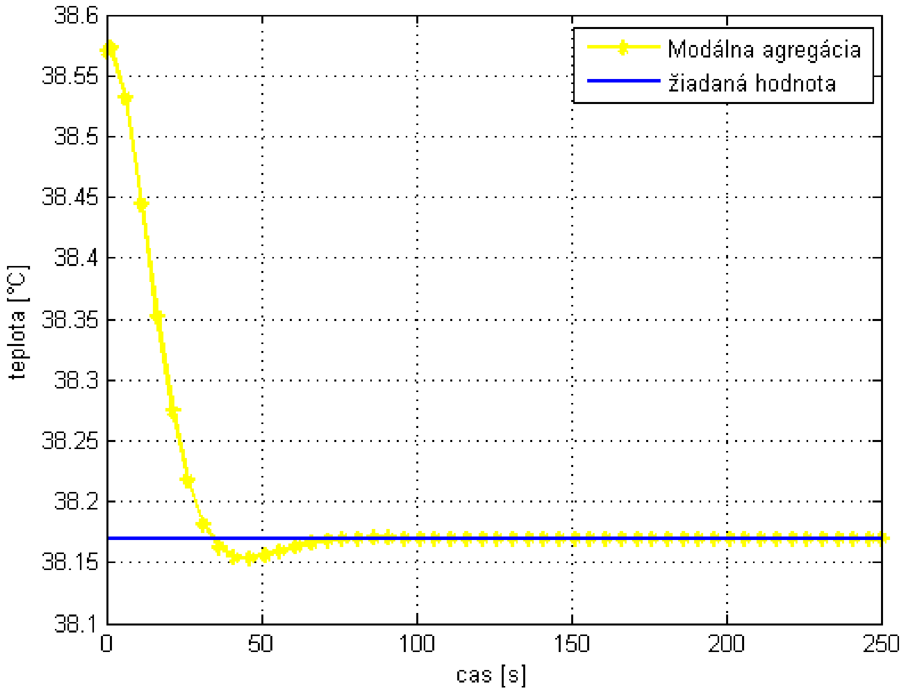
Matice redukovaného systému sú:

Ar = -0.1242

Br = 0.0676

Zákon riadenia vyzerá takto:

$u(t)= 17.5460x_1(t)+ 13.1871x_2(t)$



Obr.33 Priebeh teploty petroleja v poslednom úseku výmenníka pri použití modálnej agregácie

2.4.1.3 Aplikácia vyváženej realizácie

Stavový opis dvojkapacitného výmenníka bol transformovaný na prenosovú funkciu.

```
[SYSb,G1,T,Ti] = balreal(sys)
```

$$G(s)= \frac{0.1335s+0.01827}{s^2+0.2873s+0.02025}$$

$$T = \begin{bmatrix} -0.1627 & -2.7312 \\ -2.5281 & 0.1758 \end{bmatrix}$$

Hodnota inverznej matice T^{-1} je

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} -0.0254 & -0.3939 \\ -0.3646 & 0.0235 \end{bmatrix}$$

Pomocou tejto matice ja navrhnutá matica L, ktorá vyzerá takto:

L=[-0.0254 -0.3939]

redukované matice F a G sú nasledovne :

F = -0.1480

G = -0.0526

tak dynamický model je

$z'(t)$= -0.1480z(t) -0.0526u(t)

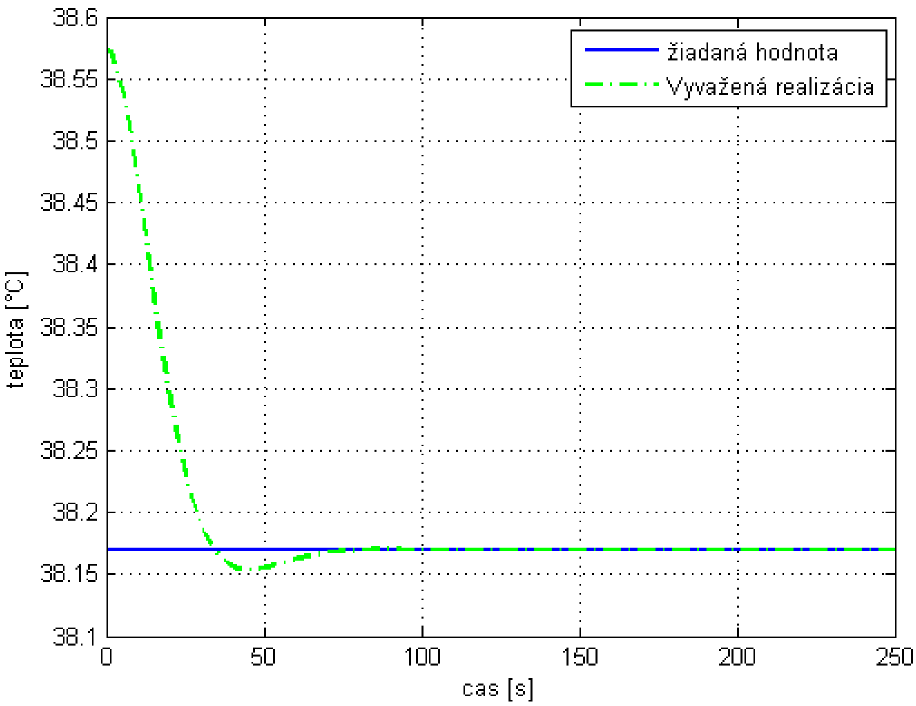
Z pôvodného prenosu pomocou príkazu balreal, som získala vyváženú realizáciu v stavovom opise

$$A_v = \begin{bmatrix} -0.1480 & 0.0190 \\ 0.0190 & -0.1393 \end{bmatrix}$$

$$B_v = \begin{bmatrix} -0.3646 \\ 0.0235 \end{bmatrix}$$

C_v= [-0.3646 0.0235]

Zákon riadenia vyzerá nasledovne: $u(t)= 0.8282x_1(t) + 12.8653x_2(t)$



Obr.34 Priebeh teploty petroleja v poslednom úseku výmenníka pri použití vyváženej realizácie

2.4.1.4 Aplikácia redukcie modelu

Vyvážená realizácia pôvodného systému je opísaná maticami

$A_v = \begin{bmatrix} -0.1480 & 0.0190 \\ 0.0190 & -0.1393 \end{bmatrix}$

$B_v = \begin{bmatrix} -0.3646 \\ 0.0235 \end{bmatrix}$

C_v= [-0.3646 0.0235]

D_v = [0]

Redukciu modelu dosiahnem pomocou príkazu `modred` v prostredí MATLAB. Získala som redukciu na prvý rad.

```
Gs1=modred(SYSb,[2])
```

A_1= [-0.1454]

B_1= [-0.3614]

C_1= [-0.3614]

D_1= [0]

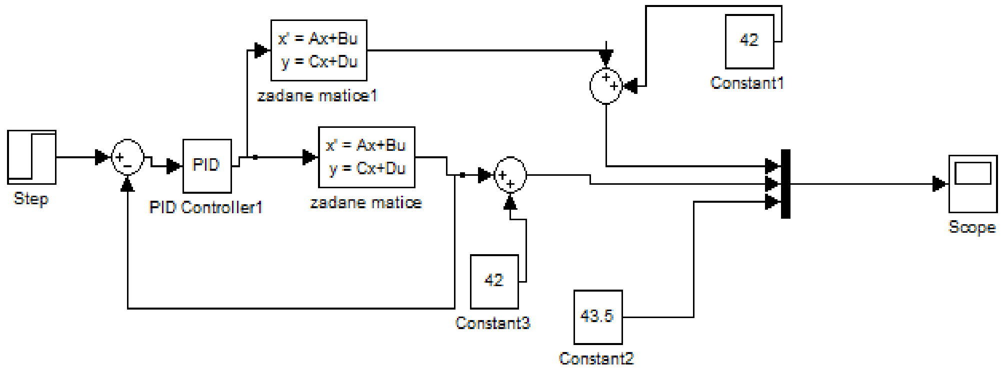
$G_1(s) = \frac{0.1306}{s+0.1454}$

Z redukovaného modelu stavovom opise som získala vstupno-výstupnú charakteristiku 1.rádu a metódou umiestenia pólov som navrhla PI regulátor s parametrami

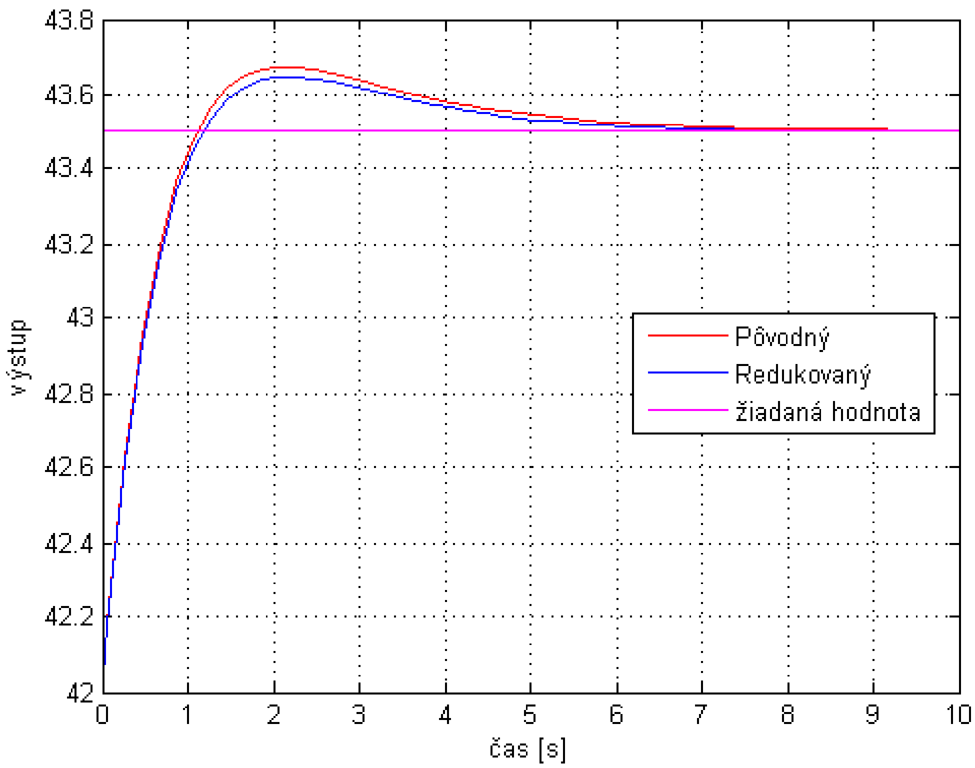
Zr= 14.2006

Ti= 1.8546

Schéma riadenia s použitím PI regulátora je znázornená na Obr.35. Žiadaná hodnota je 43.5. Na Obr.36 je znázornení priebeh redukovaného modelu systému prvého rádu.



Obr.35 Schéma agregovaného a pôvodného systému pomocou PI regulátora



Obr.36 Riadenie redukovaného systému na prvý rád PI regulátorom

2.4.2 Riadenie celého dvojkapacitného výmenníka

Na riadenie dvojkapacitného výmenníka tepla som aplikovala metódu redukcie modelu.

2.4.2.1 Aplikácia redukcie modelu

Vyvážená realizácia pôvodného systému je opísaná maticami:

$$A_{V2}=\begin{bmatrix} -0.0032 & 0.0050 & 0.0051 & -0.0005 & 0.0031 & 0.0012 & 0.0009 & -0.0005 & 0.002 & 0.0001 \\ -0.0066 & -0.0098 & 0.0056 & -0.0025 & -0.0022 & -0.0014 & 0.0007 & 0 & -0.0004 & 0 \\ -0.0068 & -0.0248 & -0.0889 & 0.0426 & -0.1114 & -0.0330 & -0.0338 & 0.0173 & -0.0030 & -0.0041 \\ 0.0014 & -0.0050 & -0.0463 & -0.0207 & 0.0068 & 0.0312 & 0.0376 & -0.0158 & 0.0013 & 0.0037 \\ 0.0036 & 0.0131 & 0.1133 & 0.1008 & -0.1839 & -0.1614 & -0.1404 & 0.0643 & -0.0134 & -0.0156 \\ -0.0013 & -0.0048 & -0.0353 & -0.0430 & 0.1627 & -0.1567 & -0.1309 & 0.1545 & -0.0356 & -0.0350 \\ -0.0013 & -0.0046 & -0.0339 & -0.0405 & 0.1453 & -0.2129 & -0.2167 & 0.2381 & -0.0381 & -0.0507 \\ -0.0006 & -0.0023 & -0.0174 & -0.0188 & 0.0649 & -0.1601 & -0.2404 & -0.5834 & 0.0321 & 0.2882 \\ 0.0002 & 0.0006 & 0.0043 & 0.0047 & -0.0163 & 0.0392 & 0.0571 & 0.2704 & -0.0536 & -0.0856 \\ -0.0002 & -0.0006 & -0.0041 & -0.0045 & 0.0157 & -0.0359 & -0.0519 & -0.2888 & 0.1067 & -0.9446 \end{bmatrix}$$

$$B_{V2}=\begin{bmatrix} -0.0184 \\ -0.0155 \\ -0.0189 \\ -0.0040 \\ 0.0104 \\ -0.0038 \\ -0.0037 \\ -0.0018 \\ 0.0005 \\ -0.0004 \end{bmatrix}$$

C_{V2}=[-0.0107 0.0155 -0.0024 0.0023 0.0009 0.0009 -0.0007 0.0001 0.0003 0]

D_{V2}= [0]

Získala som redukciu na tretí a na druhý rad. Túto redukciu modelu som dosiahla pomocou príkazu:

```
Gs3=modred(SYSb,[4,5,6,7,8,9,10])
```

$$A_3=\begin{bmatrix} 0.003249 & 0.004887 & 0.00409 \\ -0.00635 & -0.008882 & 0.01422 \\ -0.008029 & -0.02921 & -0.1239 \end{bmatrix}$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} -0.01846 \\ -0.01478 \\ -0.1239 \end{bmatrix}$$

C_3= [-0.01093 0.01474 -0.009443]

D_3=[0]

$$G_3(s)= \frac{0.0001952s^2\text{-}0.000004994s+0.0000005677}{s^3+0.136s^2+0.002011s+0.000008861}$$

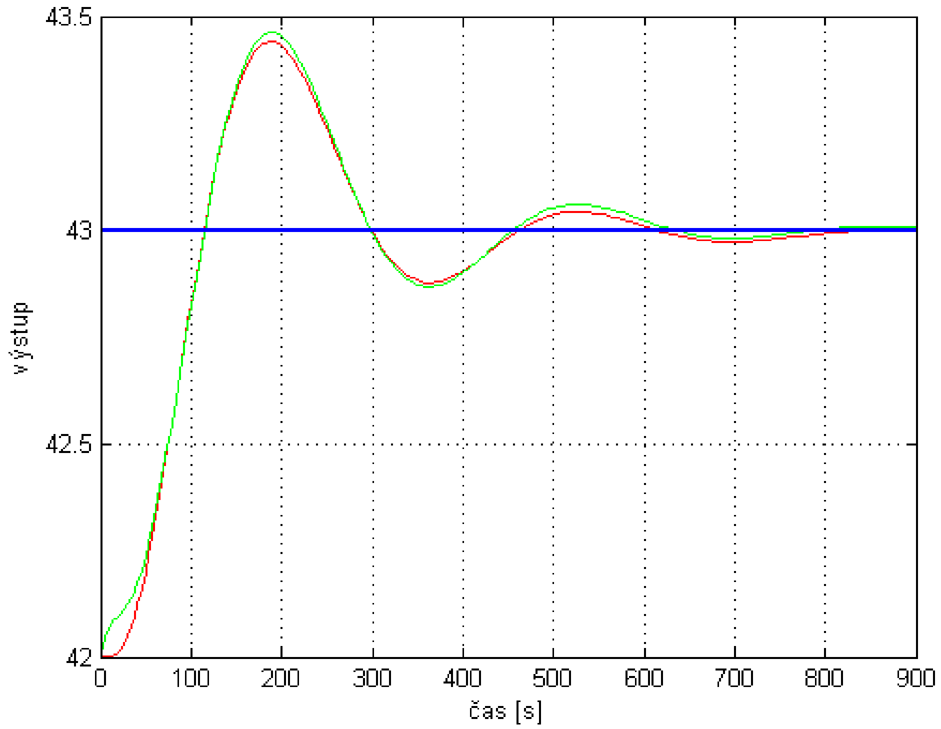
Z redukovaného modelu stavovom opise som získala vstupno-výstupnú charakteristiku 3.rádu a metódou Cohen-Coon som navrhla PID regulátor s parametrami:

Zr = 91.9858

Ti = 152.6315

D = 23.7112

Schéma riadenia s použitím PID regulátora je znázornená v kapitole 2.1. Žiadaná hodnota je 43. Na Obr.37 je znázornení priebeh redukovaného modelu systému tretieho rádu.



Obr.37 Riadenie redukovaného systému na tretí rád PID regulátorom

```
Gs2=modred(SYSb,[3,4,5,6,7,8,9,10])
```

$$A2=\begin{bmatrix} -0.003514 & 0.003923 \\ -0.007271 & -0.01223 \end{bmatrix}$$

$$B2=\begin{bmatrix} -0.0192 \\ -0.01735 \end{bmatrix}$$

C2= [-0.01032 0.01697]

D_2 = [0]

$$G_2(s)=\frac{-0.00009629s+0.0000044}{s^2+0.0157s+0.0000715}$$

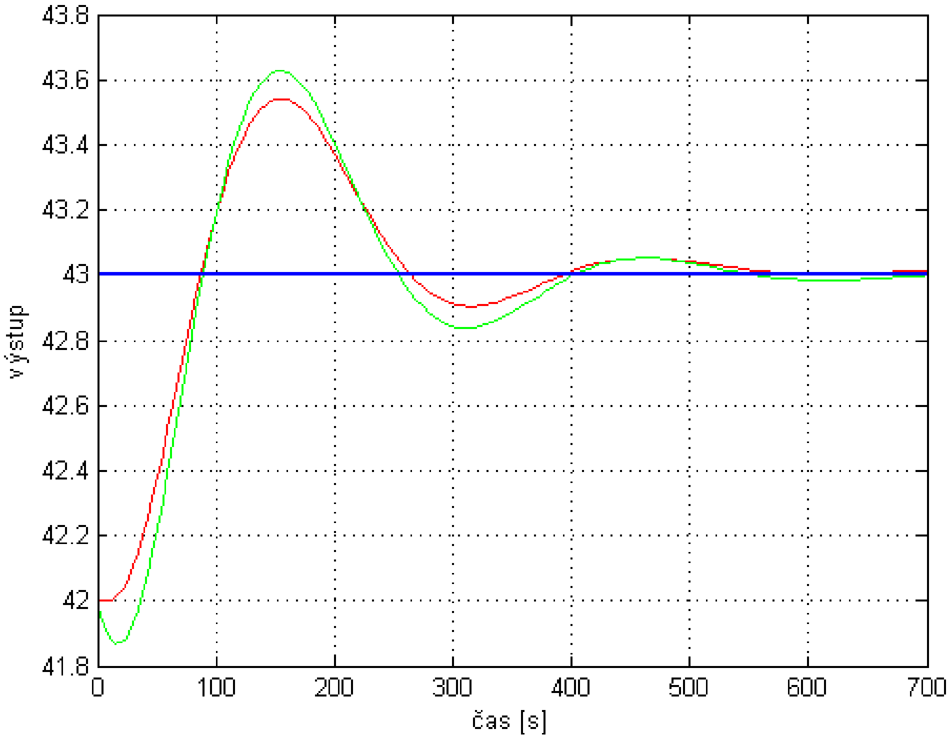
Z redukovaného modelu stavovom opise som získala vstupno-výstupnú charakteristiku 2.rádu a metódou Ziegler - Nicolson som navrhla PID regulátor s parametrami

Zr = 111.3389

Ti = 105.9717

D = 30

Schéma riadenia s použitím PID regulátora je znázornená v kapitole 2.1. Žiadaná hodnota je 43. Na Obr.38 je znázornení priebeh redukovaného modelu systému druhého rádu.



Obr.38 Riadenie redukovaného systém na druhý rád PID regulátorom

Záver

Táto práca bola zameraná na zoznámenie sa s metódami na zjednodušenie modelov systémov zložitých štruktúr s cieľom zjednodušiť návrh riadenia .

Cieľom diplomovej práce bolo poukázať na riadenie pôvodného systému prostredníctvom redukovaného modelu, ktorý bol navrhnutý použitím jednotlivých agregačných metód a to sú presná agregácia, modálna agregácia, vyvážená realizácia a redukcia modelu. Tieto metódy vedú na zjednodušenie modelov systémov zložitých štruktúr s cieľom zjednodušiť návrh riadenia .

Uvedené metódy boli aplikované na riadenie stabilného a nestabilného systému. Zo simulačných výsledkov je zrejmé, že návrh regulátorov použitím zjednodušených modelov splnil svoj cieľ.

V ďalšej časti práce som navrhla riadenie pre technologické systémy, ktorými boli trojkapacitný a dvojkapacitný rúrkový výmenník tepla. Na návrh riadenia som použila vybrané agregačné techniky. Riadená veličina bola teplota petroleja, ktorý bol ohrievaný horúcou vodu. Simulačné výsledky sú znázornené na odpovedajúcich obrázkoch.

Dosiahnuté výsledky simulácií dvojkapacitného a trojkapacitného výmenníka dokazujú, že agregačné metódy a následne návrh parametrov regulátorov pomocou týchto metód zjednodušili riadiacu štruktúru.

Vzhľadom na výsledky mojej práce, ktoré potvrdzujú vhodnosť riadenia s použitím agregačných techník. Tieto metódy môžu byť použité na širšie triedy technologických procesov.

Použitá literatúra

[1] Sizet, J. - Michailesco, G. - Bertrand, P. : Representation of Linear Dynamical Systems by Aggregated Models. Int. J. Control, 1977.

[2] Genesio, R. - Milanese, M. : A Note on Derivation and Use of Reduced Order Models. IEEE Trans. On Automatic Control, 1976.

[3] Redukcia modelu, Vyvážená realizácia. Dostupné na: http://www.kasr.elf.stuba.sk/predmety/rstp/Prednasky/Prednasky_RSTP.pdf,

[4] LýdiaPavúková Diplomová práca KIRP FCHPT, STU, Bratislava 2010

[5] Dostupné na : http://translate.google.sk/translate?hl=cs&sl=en&tl=sk&u=http%3A%2F%2Fwww.ams.org%2Fproc%2F1996-124-01%2FS0002-9939-96-03033-X%2FS0002-9939-96-03033-X.pdf