

3. Teoretická časť

3.1 Základné pojmy [1]

- **Riadenie**

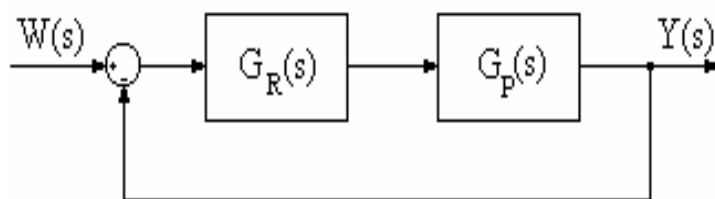
Proces zabezpečenia vopred predpísaných cieľov na základe hodnotenia a spracovania informácií, ktoré riadiaci člen dostáva o objekte riadenia, ako aj o vplyvoch okolia pôsobiacich na tento objekt.

- **Regulácia**

Je špeciálny prípad riadenia. Jeho cieľom je udržiavanie objektu regulácie na vopred predpísanom stave, pričom sa v priebehu regulácie priebežne zisťuje skutočný stav objektu a porovnáva sa so stavom predpísaným.

- **Uzavretý regulačný obvod (URO)**

Je obvod, ktorý pri riadení obsahuje spätnú väzbu (obr. 1).



Obr.1 Schéma uzavretého regulačného obvodu

• Proporcionálny regulátor (P regulátor) [3]

P regulátor pozostáva z proporcionálneho člena, ktorý generuje akčnú veličinu. Tá je priamo úmerná regulačnej odchýlke. Nevýhodou je, že zanecháva trvalú regulačnú odchýlku.

Takýto regulátor je opísaný rovnicou

$$u(t) = Z_R \cdot e(t)$$

a jeho prenosová funkcia je

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = Z_R$$

kde Z_R je zosilnenie.

• Proporcionálno-integračno-derivačný regulátor (PID regulátor) [3]

PID regulátor sa od P regulátora líši tým, že obsahuje okrem proporcionálneho člena aj integračný a derivačný člen.

-integračný člen má za úlohu odstrániť regulačnú odchýlku, ktorú zanecháva spomínaný P regulátor.

-derivačný člen slúži na odstránenie náhlych zmien regulovanej veličiny. Takýto regulátor je opísaný rovnicou

$$u(t) = Z_R \cdot \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right)$$

a jeho prenosová funkcia je :

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = Z_R \cdot \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$$

kde Z_R je zosilnenie, T_i je integračná časová konštanta a T_D je derivačná časová konštanta.

• Dopravné oneskorenie [1]

Dopravné oneskorenie je charakteristické pre mnohé chemické zariadenia. Môže byť spôsobené: – tokom látky a energie,

– oneskorením akčných členov, atď..

Regulácia systému s dopravným oneskorením jednoduchým spätnoväzbovým obvodom sa zhoršuje tým, že účinok riadiacich veličín sa prejavuje až po uplynutí doby dopravného oneskorenia. Dopravné oneskorenie môže byť hlavnou príčinou nestability regulačného obvodu.

3.1. Identifikácia [2]

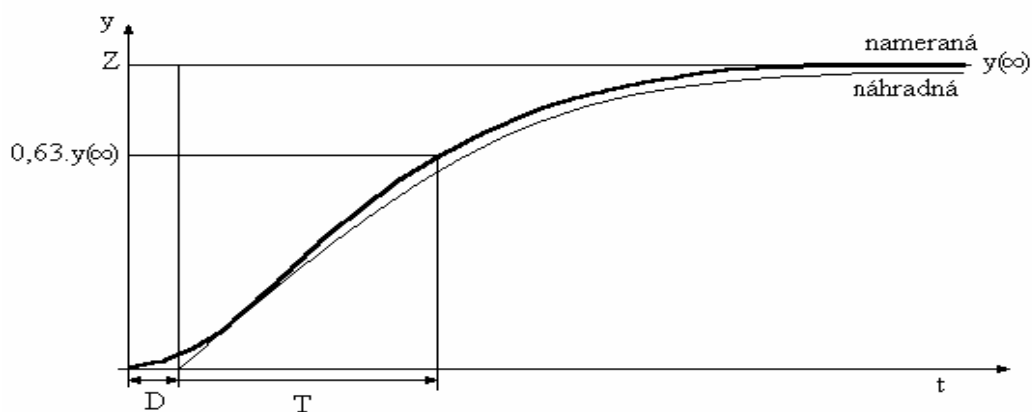
Uvažujeme náhradu modelu systému prenosom prvého rádu s dopravným oneskorením

$$G(s) = \frac{Z}{T \cdot s + 1} \cdot e^{-D \cdot s}$$

kde Z je zosilnenie, T je časová konštanta a D dopravné oneskorenie systému, ktoré potrebujeme určiť. Časová forma tejto rovnice pre výstup $y(t)$ sa dá získať pomocou spätnej Laplaceovej transformácie a je daná vzťahom

$$y(t) = \begin{cases} 0 & t < D \\ Z \left(1 - e^{-\frac{t-D}{T}} \right) & t \geq D \end{cases}$$

Na obr. 2 je znázornený postup určovania parametrov Z , D , T . Zosilnenie systému je dané ako ustálená hodnota výstupnej veličiny v čase $t(\infty)$, $Z=y(\infty)$, ak skoková zmena na vstupe má jednotkovú veľkosť.



Obr.2 Nameraná a náhradná prechodová charakteristika systému prvého rádu

Ak skoková zmena nie je jednotková, potom zosilnenie môžeme vypočítať zo vzťahu:

$$Z = \frac{y(\infty) - y(0)}{u(\infty) - u(0)}$$

Hodnota T sa dá približne odčítať z prechodovej charakteristiky ako čas, za ktorý dosiahne výstupná veličina 63% svojej ustálenej hodnoty, ako je to naznačené na obr. 2.

Dopravné oneskorenie sa dá odhadnúť z prechodovej charakteristiky. Je to čas, za ktorý sa počiatočná hodnota nemení, alebo sa mení len málo.

3.3. Kvalita regulácie [7], [2]

Kvalita riadenia sa dá posúdiť pomocou ukazovateľov kvality regulácie (obr. 3):

1. Trvalá regulačná odchýlka je rozdiel konštantnej žiadanej a výstupnej veličiny procesu v čase $t=\infty$. Trvalá odchýlka vznikne vtedy, ak v spätnej väzbe použijeme na riadenie procesu P – regulátor. Integračná zložka zabezpečí odstránenie TRO riadenia.

$$e(t) = w(t) - y(t)$$

2. Čas regulácie (T_{reg}) – čas, od ktorého sa riadená veličina dostane do δ -okolía žiadanej veličiny.
3. Maximálne preregulovanie (σ_{max}) – sa udáva ako:

$$\sigma_{\text{max}} [\%] = \frac{y_{\text{max}} - y(\infty)}{y(\infty) - y(0)} \cdot 100\%$$

4. Čas maximálneho preregulovania (T_{max}) – čas, v ktorom nastane maximálne preregulovanie.

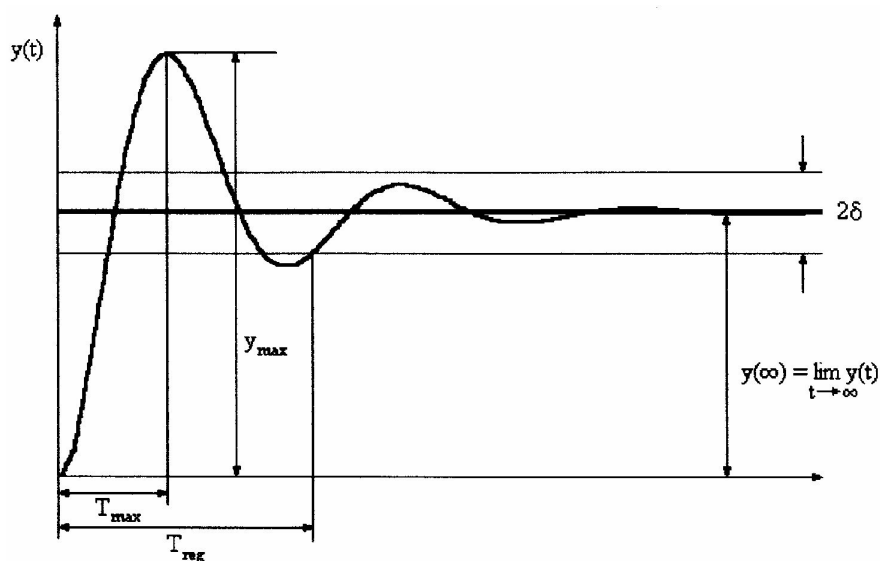
5. Integrálne kritéria kvality – kvalita automatického riadenia sa najčastejšie posudzuje podľa

- integrálu absolutnej regulačnej plochy (iae)

$$I_{iae} = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$

- integrálu kvadratickej regulačnej plochy (ise)

$$I_{ise} = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$$

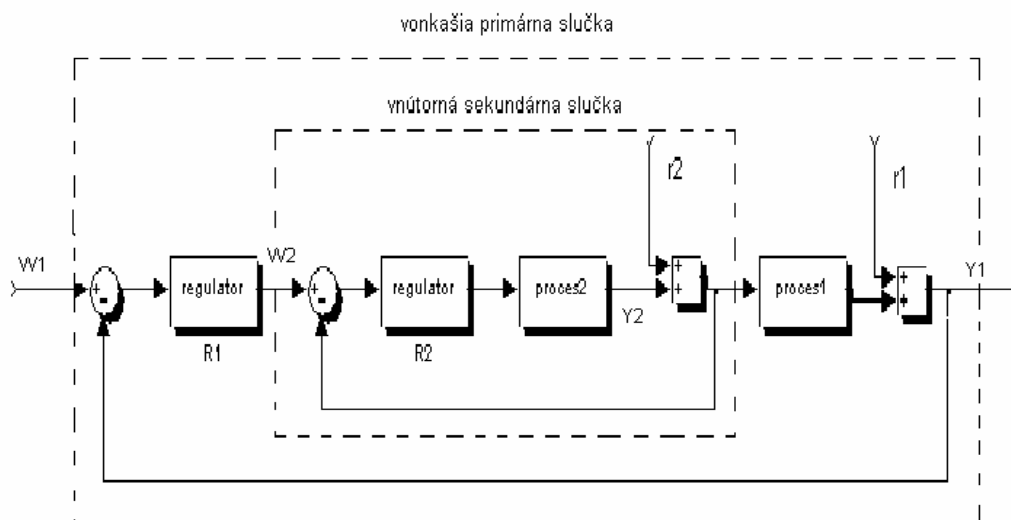


Obr.3 Prechodová charakteristika URO

3.4. Kaskádové riadenie [7], [1]

Kaskádové riadenie je jednou z najviac používaných metód na zvýšenie kvality regulácie regulačných obvodov s jednou slučkou, ak neznáme poruchy a šumy vplývajú na regulovanú veličinu, alebo ak regulovaná veličina má typické nelineárne správanie.

Pri kaskádovom riadení je k dispozícii viac ako jeden meraný výstup a len jedna akčná veličina. Je známe, že na zvolenú žiadanú hodnotu môže byť pomocou jednej akčnej veličiny riadený len jeden výstup. Tento riadený výstup považujeme za primárny, ďalšie merané výstupy majú pomocný charakter. Riadiaci systém je znázornený na obr.4.



Obr.4 Regulačný obvod v kaskádovom zapojení

Uvažujme riadený objekt s dvomi prebiehajúcimi procesmi, procesom 1 a procesom 2. Proces 1 považujeme za primárny, proces 2 za sekundárny. Riadeným výstupom, ktorý riadime na zvolenú žiadanú hodnotu, je meraný výstup z procesu 1. Riadiaci systém obsahuje dva spätnoväzbové obvody, primárny a sekundárny. Primárny spätnoväzbový obvod má v spätnej väzbe regulátor R_1 , sekundárny obvod regulátor R_2 . Výstup z procesu 2 je vstupom do procesu 1. Žiadanou hodnotou pre výstup z procesu 2 je výstup z regulátora R_1 .

Prenosova funkcia vnútornej slučky:

$$\frac{Y_2(s)}{W_2(s)} = \frac{G_{R2}(s)G_{P2}(s)}{1 + G_{R2}(s)G_{P2}(s)}$$

Prenosova funkcia vonkajšej slučky:

$$\frac{Y_1(s)}{W_1(s)} = \frac{G_{R1}(s)G_{R2}(s)G_{P1}(s)G_{P2}(s)}{1 + G_{R2}(s)G_{P2}(s) + G_{R1}(s)G_{R2}(s)G_{P1}(s)G_{P2}(s)}$$

Typickým prípadom kaskádového riadenia v chemickej praxi je riadenie teploty zmesi v prietokovom chemickom reaktore s exotermickou reakciou. Tiež sa často používajú pri riadení tepelných výmeníkov, rektifikačných kolón a rôznych typov chemických reaktorov.

3.5. Metódy návrhu parametrov regulátora [1], [4], [6]

Regulovaná sústava bola identifikovaná ako systém 1. rádu s dopravným oneskorením. Metódy návrhu parametrov regulátorov využívajúce identifikované parametre sú uvedené v nasledujúcich státiach.

3.5.1. Ziegler – Nicholsova metóda

Metóda Ziegler – Nichols je často používaná metóda návrhu regulátora. Parametre regulátorov môžeme vypočítať podľa vzorcov uvedených v tab. 1.

Regulátor	Z_R	T_I	T_D
P	$\frac{T}{D.Z}$	-	-
PI	$0,9 \cdot \frac{T}{D.Z}$	$3D$	
PID	$\frac{1,2T}{D.Z}$	$2D$	$0,5.D$

Tab. 1 Parametre regulátorov pre Ziegler-Nicholsovu metódu

3.5.2. Cohen – Coonova metóda

Z prechodovej charakteristiky sú určené konštanty Z , T , D . Potom parametre regulátora vypočítame podľa tab. 2.

Regulátor	Z_R	T_I	T_D
P	$\frac{T}{Z.D} \cdot \left[1 + \frac{D}{3.T} \right]$	-	-
PI	$\frac{T}{Z.D} \cdot \left[0,9 + \frac{D}{12.T} \right]$	$D \cdot \left[\frac{30 + \frac{3.D}{T}}{9 + \frac{20.D}{T}} \right]$	
PID	$\frac{T}{Z.D} \cdot \left[\frac{4}{3} + \frac{D}{4.T} \right]$	$D \cdot \left[\frac{32 + \frac{6.D}{T}}{13 + \frac{8.D}{T}} \right]$	$D \cdot \left[\frac{4}{11 + \frac{2.D}{T}} \right]$

Tab. 2 Parametre regulátora pre Cohen-Coonovou metódou

3.5.3. Chien, Hrones a Reswichova metóda (CHHR)

Chien, Hrones a Reswick vychádzali z ZN metódy, ale chceli dosiahnuť lepšie tlmenie v regulačnom obvode. Ako návrhové kritériá použili „najrýchlejšiu odozvu bez preregulovania“ a „najrýchlejšiu odozvu s 20%-ným preregulovaním“.

0%				20%		
Regulátor	Z_R	T_I	T_D	Z_R	T_I	T_D
P	$0,3 \cdot \frac{T}{Z.D}$	-	-	$0,7 \cdot \frac{T}{Z.D}$	-	-
PI	$0,35 \cdot \frac{T}{Z.D}$	$1,2.T$		$0,6 \cdot \frac{T}{Z.D}$	T	
PID	$0,6 \cdot \frac{T}{Z.D}$	T	$0,5.D$	$0,95 \cdot \frac{T}{Z.D}$	$1,4.T$	$0,47.D$

Tab. 3 Parametre regulátora pre Chien, Hrones a Reswickovu metódu

3.5.4. Smithova, Murrillova metóda (SM)

Smith, Murrill a spol. navrhli parametre regulátora tak, aby minimalizovali integrálne kritéria *iae* a *ise*. Vzťahy vychádzajú zo zmeny žiadanej hodnoty alebo poruchy.

Podmienka pre kritériá:

$$0,1 < \frac{D}{T} < 1$$

Vidíme, že pomer dopravného oneskorenia (D) a časovej konštanty (T) je veľmi dôležitý pri hľadaní parametrov regulátora.

Parametre pre PI regulátor sú uvedené tab. 4.

Regulátor	Z_R	T_I	T_D
PI	$\frac{0,586}{Z} \cdot \left(\frac{T}{D}\right)^{0,916}$	$\frac{T}{\left(1,03 - 0,165 \cdot \frac{T}{D}\right)}$	
PID	$\frac{0,965}{Z} \cdot \left(\frac{T}{D}\right)^{0,855}$	$\frac{T}{\left(0,796 - 0,147 \cdot \frac{T}{D}\right)}$	$0,308 \cdot T \cdot \left(\frac{D}{T}\right)^{0,929}$

Tab. 4 Parametre regulátora pre Smithovu, Murrillovu metódu

3.5.5. Metóda priamej syntézy s použitím aproximovaného modelu (PS)

Sú určené parametre: zosilnenie Z , časová konštanta T a dopravné oneskorenie D . Zvolí sa časová konštanta uzavretého regulačného obvodu (T_{URO}), menšia ako časová konštanta regulovaného systému.

$$\frac{Z_{URO}}{T_{URO} \cdot s + 1} \cdot e^{-D_{URO} \cdot s} \quad \text{kde } T_{URO} < T$$

Výpočet parametrov regulátora je uvedený v tab. 5.

Regulátor	Z_R	T_I	T_D
PI	$\frac{T}{Z \cdot (T_{URO} + D)}$	T	
PID	$\frac{2T + D}{2 \cdot Z \cdot (T_{URO} + D)}$	$T + \frac{D}{2}$	$\frac{D}{2} \cdot \frac{T_{URO}}{(T_{URO} + D)}$

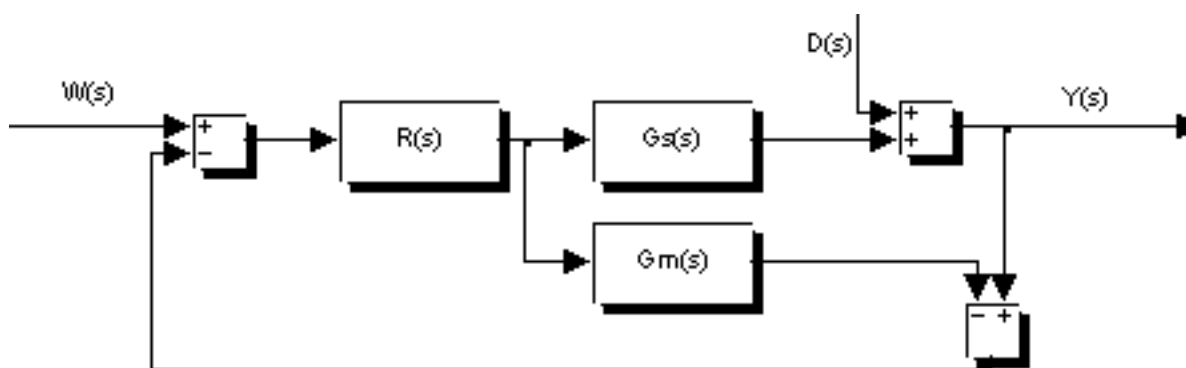
Tab. 5 Parametre regulátora pre metódu priamej syntézy

3.5.6. Internal Model Control (IMC)

Metódu IMC navrhol Morari spolu s Riverom v 80-tých rokoch. Podobnou metódou, navrhnutou o niečo skôr je napríklad Smithov prediktor pre riadenie s veľkým dopravným oneskorením. IMC regulátor zahrňuje v sebe výhody spätnoväzbového a priameho riadenia. IMC regulátor možno previesť na klasický PID regulátor, ktorého parametre sú

potom navrhované podľa typu sústavy. Táto metóda je vhodná pre stabilné systémy a zaručuje robustné nastavenie regulátora.

Bloková schéma regulačného obvodu s IMC regulátorom je znázornená na obr.5.



Obr.5 Bloková schéma regulačného obvodu s IMC regulátorom

Schému je možné tiež interpretovať ako klasický spätnoväzbový regulátor, pre ktorý platí:

$$G_R(s) = \frac{R(s)}{1 - R(s) \cdot G_M(s)}$$

Vnútorňý spätnoväzbový obvod môžeme nahradiť prenosom $R(s)$:

$$R(s) = \frac{G_R(s)}{1 + G_M(s) \cdot G_R(s)}$$

Metódu možno použiť pre stabilné sústavy, sústavy so stabilnými pólmi. Aby bola zabezpečená stabilita a fyzikálna realizovateľnosť regulátora, musíme odstrániť z prenosu $G_s(s)$ nestabilne nuly a dopravné

oneskorenie. Po inverzii sa nestabilné nuly zmenia na nestabilné póly a dopravné oneskorenie na fyzikálne nerealizovateľné záporné dopravné oneskorenie. Rozdelenie prenosu modelu na invertovateľnú (stabilnú) a neinvertovateľnú (nestabilnú) časť je dané vzťahom:

$$G_M(s) = G^P(s) \cdot G^n(s)$$

kde $G^P(s)$ je nestabilná časť prenosu s pólami, umiestnenými v kladnej polovici roviny s .

Aby regulátor vykazoval derivačné vlastnosti (rád čitateľa je o jeden väčší ako menovateľa), dopĺňa sa prenos regulátora filtrom $F(s)$,

$$R(s) = \frac{1}{G^n(s) \cdot F(s)}$$

a prenosová funkcia filtru sa volí v tvare:

$$F(s) = \frac{1}{(\lambda \cdot s + 1)^n}$$

kde n je rád menovateľa.

Forma ekvivalentného IMC regulátora sa implementuje ako:

$$G_R(s) = \frac{R(s)}{1 - R(s) \cdot G_M(s)}$$

3.5.6.1. Padeho aproximácia

Pri tejto metóde sa exponent prevedie do tvaru : $e^{-ds} = \frac{1 - 0,5 \cdot ds}{1 + 0,5 \cdot ds}$

Prenos systému rozložíme na invertovateľnú $G^p(s)$ a neinvertovateľnú časť $G^n(s)$.

$$G_s^p = \frac{Z}{(T.s+1)(1+0,5.ds)} \quad G_s^n = 1 - 0,5.d.s$$

Po navrhnutí filtra môžeme napísať tvar pre prenos regulátora :

$$G_R = \frac{F(s)}{G_s^p (1 - G_s^n F)} = \frac{T + 0,5.d}{Z(\lambda + 0,5.d)} + \frac{1}{Zs(\lambda + 0,5.d)} + \frac{0,5.T.d}{Z(\lambda + 0,5.d)} s$$

Podmienkou je : $\frac{\lambda}{T_U} \gg 0,25$

Parametre regulátora pre Padeho aproximáciu môžeme vypočítať z tab.6.

Regulátor	Z_R	T_I	T_D
PID	$\frac{2.T + d}{Z.(2\lambda + d)}$	$T + \frac{d}{2}$	$\frac{Td}{(2\lambda + d)}$

Tab. 6 Parametre regulátora pre Padeho aproximáciu

3.5.6.2. Maclaurinov rád

V tomto prípade prenos regulátora vyjadríme pomocou Maclaurinovho rádu.

$$G_R(s) = \frac{f(s)}{s} = \frac{1}{s} \left[f(0) + sf'(0) + \frac{f''(0)}{2} s^2 + \dots \right]$$

Ak tento prenos porovnáme s PID regulátorom, potom platí

$$Z_R = f'(0) \quad T_i = \frac{f'(0)}{f(0)} \quad T_d = \frac{f''(0)}{2f'(0)}$$

Po navrhnutí filtra môžeme napísať tvar pre prenos regulátora :

$$G_R = \frac{F}{G_s^p (1 - G_s^n F)} = \frac{Ts + 1}{sZ (\lambda s + 1 - e^{-ds}) / s}$$

Parametre regulátora pre Maclaurinov rád môžeme vypočítať z tab.7.

Regulátor	Z_R	T_I	T_D
PID	$\frac{T_I}{Z(\lambda + d)}$	$T + \frac{d^2}{2(\lambda + d)}$	$\frac{d^2}{2(\lambda + d)} \left[1 - \frac{d}{3T_I} \right]$

Tab. 7 Parametre regulátora pre Maclaurinov rád

4. Experimentálna časť

4.1. Rúrkový výmenník tepla

Poslaním výmenníkov tepla je ohrev alebo chladenie materiálových prúdov na žiadanú teplotu.

Najrozšírenejším druhom výmenníka tepla je výmenník typu rúrka v rúrke, teda rúrkový výmenník tepla. V týchto výmenníkoch, tak ako aj v ostatných zariadeniach využívajúcich prestup tepla, horúce médium sa nestýka bezprostredne so studeným, ale média sú od seba oddelené tuhou stenou. Z toho vyplýva, že jedno médium prúdi v rúrke a druhé v medzirúrkovom priestore. Vnútorne médium je také, ktoré prúdi v rúrkach, a vonkajším médium je to, ktoré prúdi v priestore medzi rúrkami.

Ak smer prúdenia jedného z médií vzhľadom na smer prúdenia druhého média sa zachováva pozdĺž celého výmenníka, ide o súprúdový výmenník tepla.

Rúrkové výmenníky tepla sa hlavne využívajú v energetickom a chemickom priemysle, ale aj v domácnostiach.

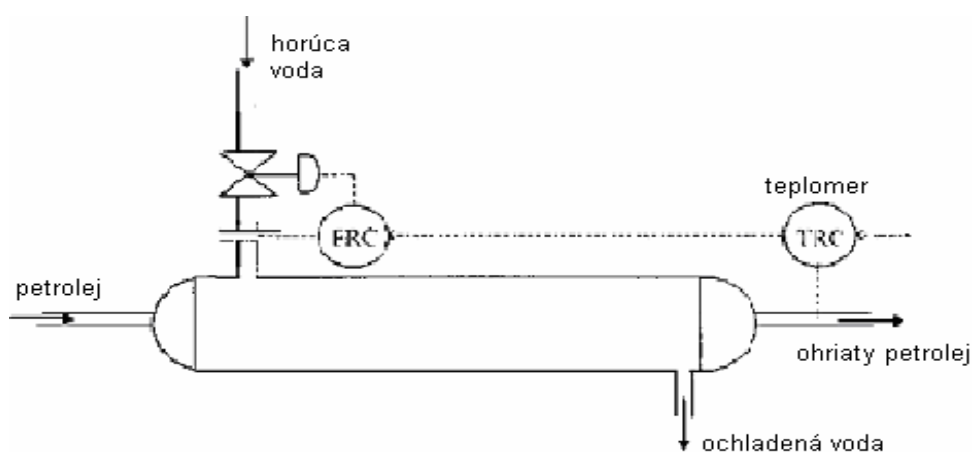
4.2. Popis rúrkového výmenníka tepla

V rúrkovom výmenníku tepla, ktorý treba riadiť, sa zohrieva petrolej horúcou vodou. Vnútorným médium v našom prípade je petrolej, vonkajším médium je voda. Riadi sa teplota petroleja na výstupe z výmenníka prietokom vstupujúceho prúdu horúcej vody vo výmenníku. Hodnoty

radiacej veličiny (akčná veličina) a riadenej veličiny (meraná veličina) na začiatku sú:

- prietok vstupného prúdu horúcej vody do výmenníka je $q_3=0,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- teplota petroleja na výstupe z tohoto výmenníka je $\vartheta_1=39 \text{ }^\circ\text{C}$.

Výmenník tepla má dĺžku $l=10 \text{ m}$, s vnútorným priemerom vnútornej rúrky $d_1=0,025 \text{ m}$, s vonkajším priemerom vnútornej rúrky $d_2=0,028 \text{ m}$ a s vonkajším priemerom vonkajšej rúrky $d_3=0,05 \text{ m}$. Koeficient prestupu tepla cez stenu vnútornej rúrky je $\alpha_1=750 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ a koeficient prestupu tepla zo steny do kvapaliny je $\alpha_2=1480 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Teplná kapacita petroleja má hodnotu $C_{P1}=2100 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, pre stenu je $C_{PS}=418 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a pre vodu $C_{P3}=4186 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Hustota petroleja $\rho_1=810 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, medenej rúrky $\rho_5=8960 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a hustota vody je $\rho_3=1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Objemové prитоky sú pre petrolej $q_1=0,38 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a pre vodu $q_3=0,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



Obr.6 Schéma rúrkového výmenníka tepla

4.3. Odvodenie matematického modelu trojkapacitného rúrkového výmenníka tepla

Uvažujeme súprudový rúrkový výmenník tepla, v ktorom sa ohrieva petrolej, prúdiaci v rúrkach výmenníka vodou, ktorá prúdi v jeho plášti. Teplota vody sa pritom mení v závislosti od priestorovej premennej.

Pri odvádzaní matematického modelu boli použité nasledovné zjednodušenia:

- ideálny piestový tok
- ani pozdĺžne, ani priečne premiešavanie médií
- šírenie tepla len prúdením, zanedbáme vedením a sálaním
- $q_1, \rho_1, c_{p1}, q_3, \rho_3, c_{p3}, \rho_s, c_{ps}, \alpha_1, \alpha_2$ sú konštanty
- zanedbáme tepelnú kapacitu vonkajšej steny
- dokonale izolovaný výmenník – straty do okolia sú nulové

Dynamický model :

Tepelná bilancia petroleja

$$\frac{\partial \left(dV_1 \rho_1 c_{p1} \vartheta_1(z, t) \right)}{\partial t} = q_1 \rho_1 c_{p1} \vartheta_1(z, t) - q_1 \rho_1 c_{p1} \left[\vartheta_1(z, t) + \frac{\partial \vartheta_1(z, t)}{\partial z} dz \right] - dA_1 \alpha_1 \left[\vartheta_1(z, t) - \vartheta_s(z, t) \right] \quad (4.3.1)$$

Tepelná bilancia vody

$$\frac{\partial \left(dV_3 \rho_3 c_{p3} \vartheta_3(z, t) \right)}{\partial t} = q_3 \rho_3 c_{p3} \vartheta_3(z, t) - q_3 \rho_3 c_{p3} \left[\vartheta_3(z, t) + \frac{\partial \vartheta_3(z, t)}{\partial z} dz \right] + dA_2 \alpha_2 \left[\vartheta_s(z, t) - \vartheta_3(z, t) \right] \quad (4.3.2)$$

Tepelná bilancia vnútornej rúrky

$$\frac{\partial \left(dV_s \rho_s c_{ps} \vartheta_s(z,t) \right)}{\partial t} = dA_1 \alpha_1 \left[\vartheta_1(z,t) - \vartheta_s(z,t) \right] - dA_2 \alpha_2 \left[\vartheta_s(z,t) - \vartheta_3(z,t) \right] \quad (4.3.3)$$

kde:

$$dA_1 = \pi d_1 dz, dA_2 = \pi d_2 dz$$

$$dV_1 = \pi \frac{d_1^2}{4} dz, dV_3 = \pi \frac{(d_3^2 - d_2^2)}{4} dz, dV_s = \pi \frac{(d_2^2 - d_1^2)}{4} dz$$

Počiatkové podmienky :

$$\vartheta_1(z,0) = \vartheta_1^s(z)$$

Tri začiatkové podmienky : $\vartheta_3(z,0) = \vartheta_3^s(z)$

$$\vartheta_s(z,0) = \vartheta_s^s(z)$$

$$\vartheta_1(0,t) = \vartheta_v(t)$$

Dve okrajové podmienky : $\vartheta_3(0,t) = \vartheta_{3v}(t)$

Úprava rovníc tepelných bilancií

$$\frac{dV_1 \rho_1 c_{p1}}{dA_1 \alpha_1} \frac{\partial \vartheta_1(z,t)}{\partial t} + \frac{q_1 \rho_1 c_{p1} dz}{dA_1 \alpha_1} \frac{\partial \vartheta_1(z,t)}{\partial z} = -\vartheta_1(z,t) + \vartheta_s(z,t) \quad (4.3.4)$$

$$\frac{dV_3 \rho_3 c_{p3}}{dA_2 \alpha_2} \frac{\partial \vartheta_3(z,t)}{\partial t} + \frac{q_3 \rho_3 c_{p3} dz}{dA_2 \alpha_2} \frac{\partial \vartheta_3(z,t)}{\partial z} = -\vartheta_3(z,t) + \vartheta_s(z,t) \quad (4.3.5)$$

$$\frac{dV_s \rho_s c_{ps}}{dA_1 \alpha_1 + dA_2 \alpha_2} \frac{\partial \vartheta_s(z,t)}{\partial t} + \vartheta_s(z,t) - \frac{dA_1 \alpha_1}{dA_1 \alpha_1 + dA_2 \alpha_2} \vartheta_1(z,t) = \frac{dA_2 \alpha_2}{dA_1 \alpha_1 + dA_2 \alpha_2} \vartheta_3(z,t) \quad (4.3.6)$$

Tieto bilancie môžeme potom upraviť do tvaru :

$$T_1 \frac{\partial \vartheta_1(z,t)}{\partial t} + T_1 v_1 \frac{\partial \vartheta_1(z,t)}{\partial z} = -\vartheta_1(z,t) + \vartheta_s(z,t) \quad (4.3.7)$$

$$T_s \frac{\partial \vartheta_s(z,t)}{\partial t} + \vartheta_s(z,t) - Z_1 \vartheta_1(z,t) = Z_2 \vartheta_3(z,t) \quad (4.3.8)$$

$$T_3 \frac{\partial \vartheta_3(z,t)}{\partial t} + T_3 v_3 \frac{\partial \vartheta_3(z,t)}{\partial z} = -\vartheta_3(z,t) + \vartheta_s(z,t) \quad (4.3.9)$$

kde :

$$T_1 = \frac{d_1 \rho_1^c p_1}{4 \alpha_1}, T_3 = \frac{(d_3^2 - d_2^2) \rho_3^c p_3}{4 d_2 \alpha_2}, T_s = \frac{(d_2^2 - d_1^2) \rho_s^c p_s}{4 (d_2 \alpha_2 + d_1 \alpha_1)}$$

$$Z_1 = \frac{d A_1 \alpha_1}{d A_1 \alpha_1 + d A_2 \alpha_2}, v_1 = \frac{4 q_1}{\pi d_1^2}, v_3 = \frac{4 q_3}{\pi (d_3^2 - d_2^2)}$$

T_1, T_3, T_s sú časové konštanty

v_1, v_3 sú rýchlosti prúdenia jednotlivých médií

Riešenie dynamiky diskretizáciou :

$$\frac{d \vartheta_{1i}(t)}{dt} = -\vartheta_{1i}(t) \frac{1}{T_1} \left(1 + \frac{T_1 v_1}{\Delta z} \right) + \frac{1}{T_1} \vartheta_{1i-1}(t) + \frac{1}{T_1} \vartheta_{si}(t) \quad (4.3.10)$$

$$\frac{d \vartheta_{3i}(t)}{dt} = -\vartheta_{3i}(t) \frac{1}{T_3} \left(1 + \frac{T_3 v_3}{\Delta z} \right) + \frac{1}{T_3} \vartheta_{3i-1}(t) + \frac{1}{T_3} \vartheta_{si}(t) \quad (4.3.11)$$

$$\frac{d \vartheta_{si}(t)}{dt} = -\vartheta_{si}(t) \frac{1}{T_s} + \frac{Z_1}{T_s} \vartheta_{1i}(t) + \frac{Z_2}{T_s} \vartheta_{3i}(t) \quad (4.3.12)$$

Ustálený stav :

Proces je v ustálenom stave ak sa vstupné a výstupné veličiny v čase t nemenia.

Teplota petroleja v i -tom úseku :

$$\vartheta_{1,i}^S = \frac{a}{b} \vartheta_{1,i-1}^S + \frac{1}{b} \vartheta_{s,i}^S \quad (4.3.13) \quad \text{kde } a = \frac{T_1 v_1}{\Delta z}, b = \frac{T_1 v_1}{\Delta z} + 1$$

Teplota steny rúrky v i -tom úseku :

$$\vartheta_{s,i}^S = Z_1 \vartheta_{1,i}^S + Z_2 \vartheta_{3,i}^S \quad (4.3.14)$$

teplota vody v i -tom úseku :

$$\vartheta_{3,i}^S = \frac{c}{d} \vartheta_{3,i-1}^S + \frac{1}{d} \vartheta_{s,i}^S \quad (4.3.15) \quad \text{kde } c = \frac{T_3 v_3}{\Delta z}, d = \frac{T_3 v_3}{\Delta z} + 1$$

Predpokladom na sledovanie dynamických vlastností systému je výpočet ustáleného stavu. Výmenník tepla je rozdelený na 5 úsekov. Ustálené stavy v jednotlivých úsekoch som vypočítala z rovníc 4.3.13, 4.3.14, 4.3.15. Tieto teploty platia pri objemovom prietoku vody $0,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

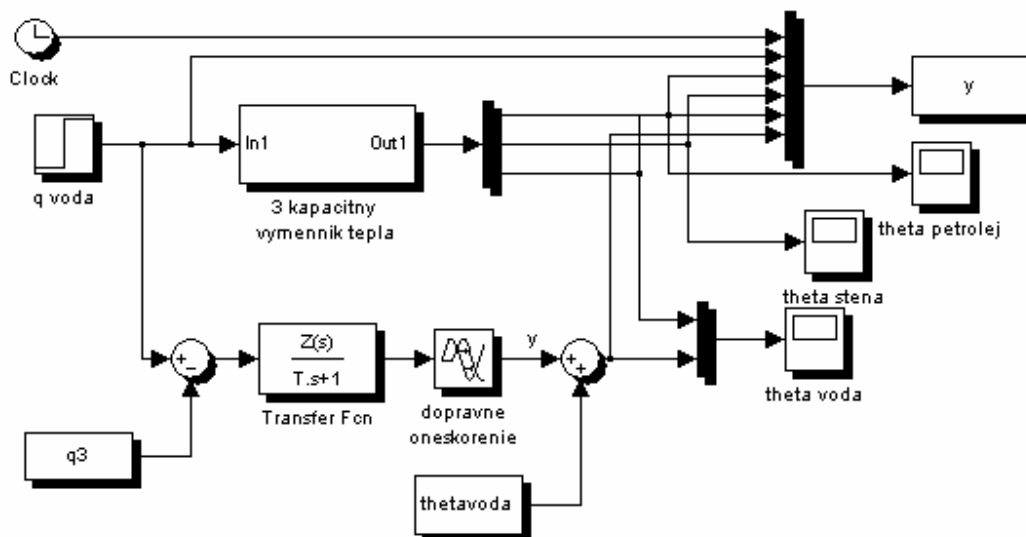
Teplota petroleja ϑ_1	Teplota steny ϑ_s	Teplota vody ϑ_3
20,0000	57,8668	75,0000
25,3447	54,4551	67,6265
29,4534	51,8324	61,9580
32,6121	49,8162	57,6004
35,0404	48,2662	54,2503
36,9071	47,0746	51,6750

Tab. 8 Teploty v ustálenom stave

4.4. Simulácia prechodovej charakteristiky a identifikácia systému pre návrh parametrov sekundárneho regulátora

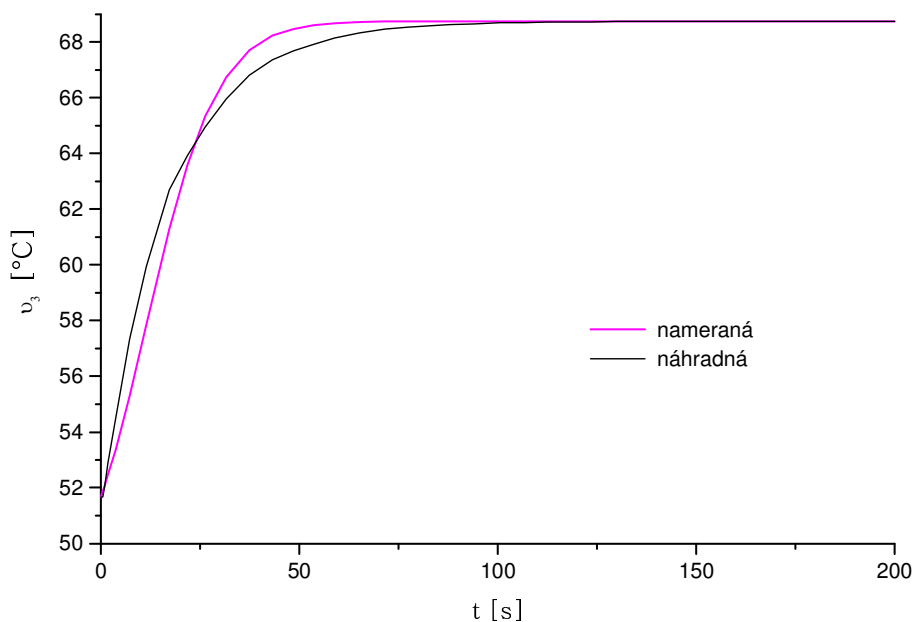
Dynamické vlastnosti som sledovala simuláciou prechodovej charakteristiky v simulačnom prostredí Matlab Simulink.

Vychádzala som z ustáleného stavu výmenníka tepla, ktorého hodnoty sú v tab.8. Pre dynamický model som vytvorila v simulačnom jazyku Matlab 5.3 tzv. s-funkciu. S-funkcie sú uvedené v prílohe. Simulácia vnútornej slučky prebiehala s jednou vstupnou veličinou – objemový prietok q_3 . Prechodovú charakteristiku som simulovala pomocou programu idsere (obr. 7) a to tak, že objemový prietok vody sa skokovo zmenil z $0,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



Obr.7 Bloková schéma pre identifikáciu výmenníka

Sledovala som odozvu teploty vody ϑ_3 od zmeny prietoku q_3 . Prechodovú charakteristiku, ktorú som získala, som používala na identifikáciu. Identifikácia je potrebná pri navrhovaní náhradného prenosu pre vnútornú slučku. Na obr.8 je znázornená identifikácia nameraného a náhradného systému. I keď PCH nameraného prenosu nie je celkom zhodná s PCH náhradného prenosu, môžem týmto porovnaním uvažovať, že systém je prvého rádu s dopravným oneskorením.



Obr.8 Identifikácia

Tvar náhradného prenosu pre vnútornú slučku je :

$$G_2(s) = \frac{38425}{18.s+1} \cdot e^{-0.5s}$$

Hodnotu zosilnenia Z som vypočítala z rovnice :

$$Z = \frac{y(\infty) - y(0)}{u(\infty) - u(0)} = \frac{68,740 - 51,675}{(0,15 - 0,1) \cdot 10^{-3}} = 38425 ,$$

kde $y(\infty)$ je teplota vody v ustálenom stave, $y(0)$ je počiatočná hodnota teploty vody v ustálenom stave, a v menovateli je skoková zmena $q_3^s = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na $q_3 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Pre systém prvého rádu s dopravným oneskorením platí, že v čase rovnajúcom sa časovej konštante T sa výstup dostane na 63% svojej novej ustálenej hodnoty. Potom pre novú 63% ustálenú hodnotu platí:

$$g_3^{0.63} = [y(\infty) - y(0)] \cdot 0,63 + y(0) = (68,74 - 51,675) \cdot 0,63 + 51,675 = 62,426$$

Takejto hodnote prislúcha čas 18, čo predstavuje časovú konštantu T .

Dopravné oneskorenie som odhadla z prechodovej charakteristiky. Približne sa $D = 0,5$.

4.5. Výpočet parametrov sekundárneho regulátora

Po identifikácii vnútornej slučky môžem navrhnúť sekundárny regulátor. Používala som konštanty už určené pri identifikácii.

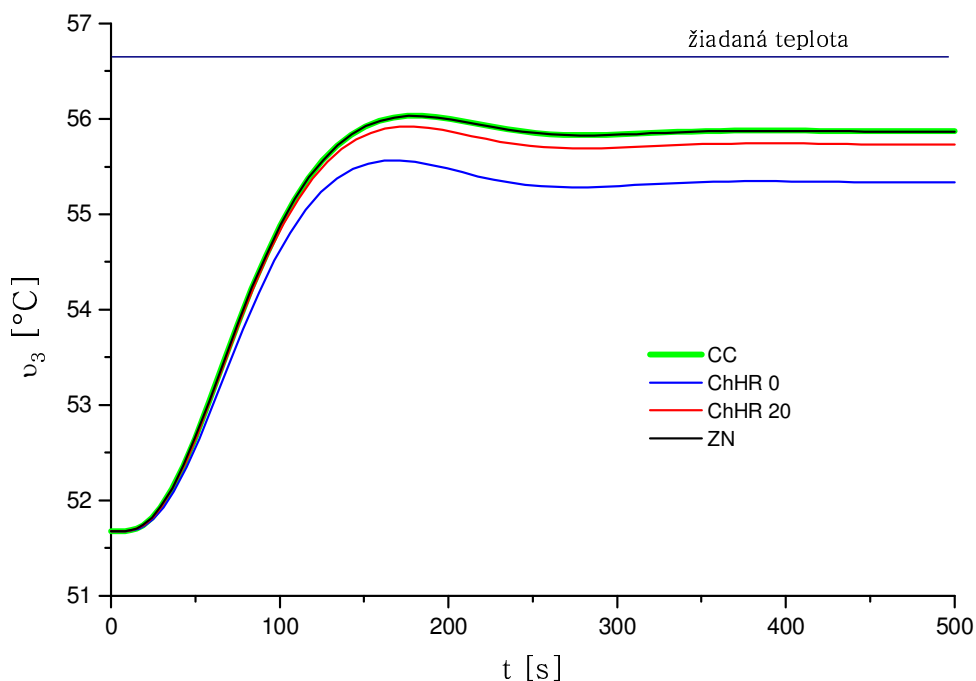
Na navrhovanie konštant PID regulátora je opísaných mnoho metód. Ja som navrhovala zosilnenie P regulátora pomocou týchto experimentálnych metód: Ziegler-Nicholsova metóda, Cohen-Coonova metóda a metóda Chien, Hrones a Reswicka s 0% a 20% preregulovaním.

Na výpočet parametrov som použila tab. 1, 2 a 3. Hodnoty parametrov regulátora sú v tab.9 .

Metóda	ZN	CC	ChHR 0%	ChHR 20%
Z_R	0,000937	0,000946	0,000282	0,000656

Tab. 9 : Hodnoty parametrov P regulátora

Najvhodnejším regulátorom je regulátor navrhnutý Cohen-Coonovou metódou, pretože sa jeho riadenie najviac priblížilo k žiadanej hodnote. Na obr. 9 je zobrazené riadenie vnútornej slučky regulátorom, ktorý som navrhla podľa použitých experimentálnych metód.

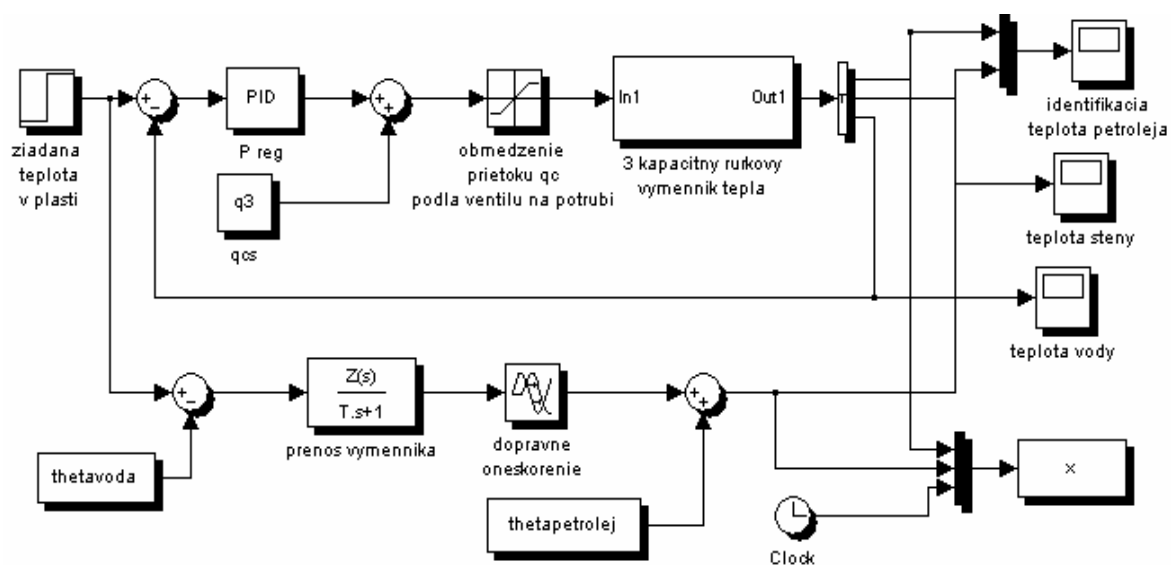


Obr.9 Riadenie vnútornej sekundárnej slučky

4.6. Identifikácia systému pre návrh parametrov primárneho regulátora

Pri hľadaní vhodného primárneho regulátora je už zapojený vo vnútornej slučke navrhnutý P regulátor.

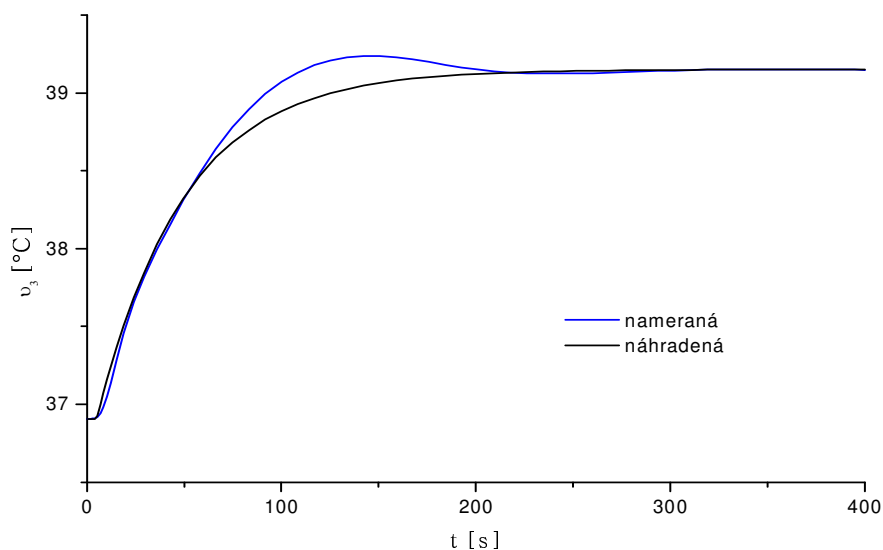
Pri simulácii primárnej slučky je vstupnou veličinou žiadaná teplota v plášti, teda teplota vody ϑ_3 a výstupnou veličinou je teplota vo výmenníku, teda teplota petroleja. Prechodovú charakteristiku som simulovala pomocou programu idprire (obr. 10) a to tak, že teplota vody vzrástla s pôvodnej hodnoty o 5°C .



Obr.10 Bloková schéma pre identifikáciu primárneho regulátora

Pomocný regulátor je regulátor navrhnutý pre vnútornú slučku. V tomto prípade som sledovala odozvu teploty petroleja ϑ_1 . Tak ako aj pre vnútornú slučku, tak aj pre túto slučku som navrhla náhradný prenos.

Správnosť prenosu som opäť overila porovnaním odoziev náhradného a nameraného prenosu (obr.11).



Obr.11 Identifikácia vonkajšej slučky

Náhradný prenos pre určenie parametrov primárneho regulátora je v tvare:

$$G_1(s) = \frac{0,449}{45 \cdot s + 1} \cdot e^{-5s}$$

Hodnota zosilnenia Z som vypočítala z rovnice :

$$Z = \frac{y(\infty) - y(0)}{u(\infty) - u(0)} = \frac{39,15 - 36,91}{(51,675 + 5) - 51,675} = 0,449$$

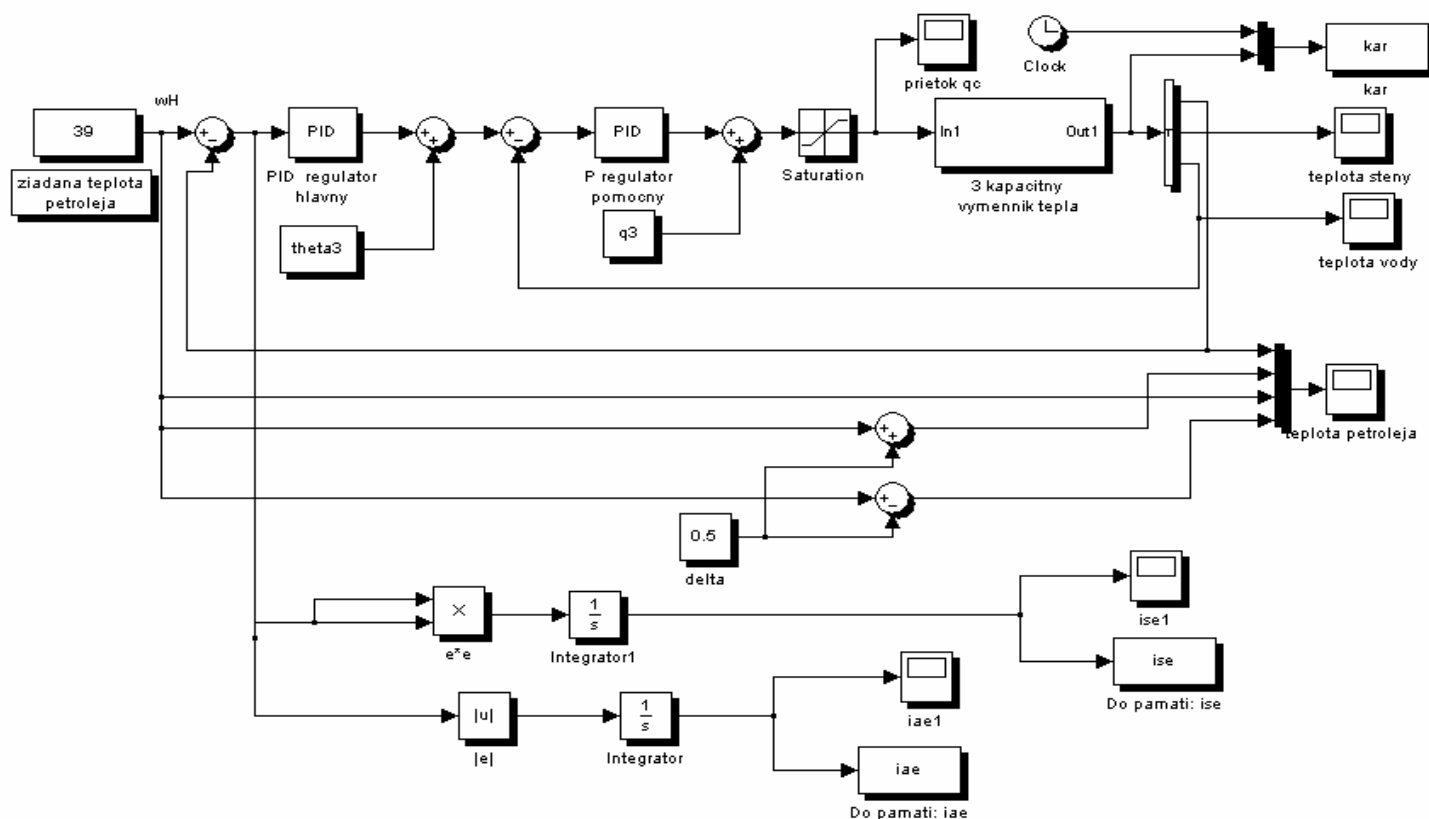
kde $y(\infty)$ je teplota petroleja v ustálenom stave, $y(0)$ je počiatočná hodnota teploty petroleja v ustálenom stave, a v menovateli je skoková zmena $\vartheta_3^s = 51,675^\circ\text{C}$ na $\vartheta_3 = 56,675^\circ\text{C}$.

Časovú konštantu som určila podobne ako aj pre vnútornú slučku. Potom pre novú 63% ustálenú hodnotu platí:

$$g_1^{0.63} = [y(\infty) - y(0)] \cdot 0,63 + y(0) = (39,15 - 36,91) \cdot 0,63 + 36,91 = 38,32^\circ\text{C}$$

Takejto hodnote prislúcha čas 45 s, čo predstavuje hodnotu časovej konštanty T . Dopravné oneskorenie odhadnuté z prechodovej charakteristiky je $D=5$.

Správnosť určenia prenosu som kontrolovala pomocou programu idprire.



Obr.12 Schéma simulácie riadenia pre regulátory navrhnuté experimentálnymi metódami

4.7. Návrh primárneho regulátora a riadenie výmenníka tepla

Po identifikácii vonkajšej slučky môžeme navrhnúť primárny regulátor. Ako primárny regulátor navrhujem PID regulátor. V PID regulátore integračný člen zabezpečí odstránenie trvalej regulačnej odchýlky a derivačný člen slúži na odstránenie náhlych zmien regulovanej veličiny.

Parametre regulátorov som vypočítala pomocou matlabovského programu, ktorý pre ilustráciu uvádzam v prílohe. Návrhy regulátorov sú uvedené v nasledujúcich statiach. Parametre PID regulátora sú v schéme zapísané nasledovne:

$$P = Z_R \quad I = \frac{Z_R}{T_I} \quad D = Z_R \cdot T_D$$

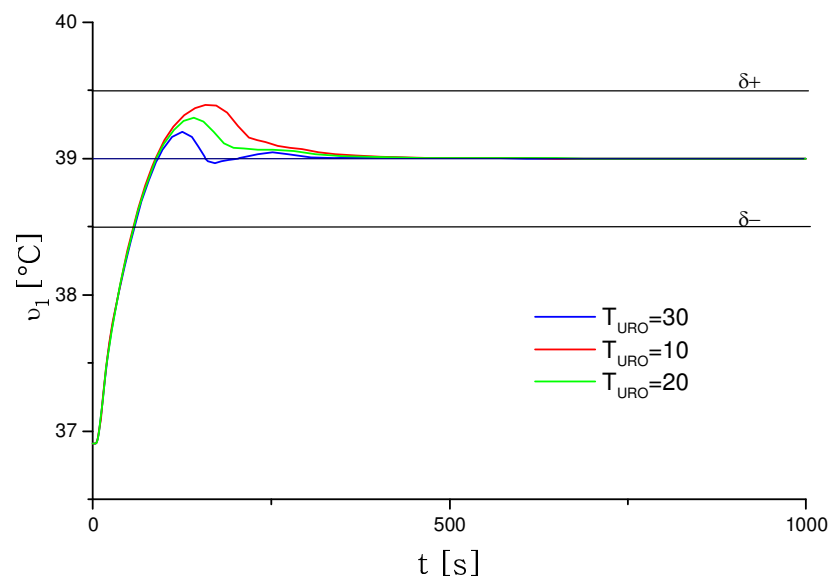
4.7.1. Návrh regulátora pomocou metódy priamej syntézy (PS)

Pri identifikácii vonkajšej slučky som určila konštanty Z , T , D (4.6.). Tieto konštanty sa používajú pri navrhovaní regulátorov. Pri metóde priamej syntézy treba zvoliť T_{URO} . Podmienkou je, že časová konštanta URO musí byť menšia ako časová konštanta regulovaného systému. Moja časová konštanta je rovná $T=45$, preto T_{URO} musím hľadať v intervale nižšom ako táto hodnota.

Interval použiteľnosti tejto metódy pre T_{URO} je (6, 40). Ako príklad uvádzam návrh regulátora pre $T_{URO}=30$. Pomocou tab.5 som vypočítala

parametre regulátora. Proporcionálna zložka je rovná $Z_R=3,0266$, integračná zložka $T_I=47,5$ a derivačná zložka $T_D=2,143$.

Na grafe (obr.13.) sú zobrazené tri rôzne PCH pre rôzne tri T_{URO} .



Obr.13 Riadenie systému pre rôzne T_{URO}

Podľa týchto PCH usudzujem, že čím sa T_{URO} blíži k hodnote T , tým je regulácia kvalitnejšia. V tab. 10 sú uvedené ukazovatele kvality regulácie pre rôzne T_{URO} .

T_{URO}	σ_{max} [%]	t_{max} [s]	t_{reg} [s]	iae	ise
10	19,1	163,75	87	128,28	122,16
20	14,3	138,23	90	110,21	115,80
30	9,56	124,88	58	93,86	113,18

Tab. 10 Ukazovatele kvality pre návrh regulátora metódou PS

4.7.2. Návrh regulátora metódou Internal Model Control (IMC)

4.7.2.1. Padeho aproximácia

Identifikovaný prenos je v tvare: $G_1(s) = \frac{0,449}{45 \cdot s + 1} \cdot e^{-5s}$

Regulátor som vypočítala pomocou postupu uvedeného v teoretickej časti.

- po dosadení a úprave som odvodila prenos regulátora v tvare:

$$G_R = \frac{F(s)}{G_S^P(1 - G_S^n F)} = \frac{45 + 0,5.5}{0,449(\lambda + 0,5.5)} + \frac{1}{0,449s(\lambda + 0,5.5)} + \frac{0,5.45.5}{0,449(\lambda + 0,5.5)} s$$

Parametre regulátora môžem vyjadriť v tvare:

$$P = \frac{45 + 0,5.5}{0,449(\lambda + 0,5.5)} \quad I = \frac{1}{0,449(\lambda + 0,5.5)} \quad D = \frac{0,5.45.5}{0,449(\lambda + 0,5.5)}$$

- pred použitím tohoto regulátora som si musela nájsť interval pre λ .

Podmienkou je : $\frac{\lambda}{T_U} \gg 0,25$

Interval použiteľnosti λ je (10, 40). Regulácia je tým kvalitnejšia, čím má λ väčšiu hodnotu. Ukazovatele kvality, pre $\lambda = 30$, sú v tab.11.

T_{URO}	σ_{max} [%]	t_{max} [s]	t_{reg} [s]	iae	ise
-----------	-----------------------	------------------	------------------	-----	-----

30	10	129	58	96,72	113,45
----	----	-----	----	-------	--------

Tab. 11 Ukazovatele kvality pre návrh regulátora metódou Padeho aproximácie

4.7.2.2. Odvodenie regulátora pomocou Maclaurinovho rádu

Pri tomto odvodení som vychádzala z postupu uvedeného v teoretickej časti. Prenos systému po rozložení na invertovateľnú a neinvertovateľnú časť má tvar:

$$G_s^p = \frac{0,449}{(45 \cdot s + 1)}$$

$$G_s^n = e^{-5s}$$

Tu som si, ako pri Padeho aproximácií, musela nájsť vhodný interval použiteľnosti regulátora λ . Interval pre použiteľnosti λ je (5,40). V tabuľke 12. som uviedla ukazovatele kvality pre $\lambda=10$, ktorého parametre regulátora sú: $Z_R=6,8052$, $T_I=45,82$ a $T_D=0,803$.

T_{URO}	σ_{max} [%]	t_{max} [s]	t_{reg} [s]	iae	ise
10	19,1	164,76	57	128,32	122,32

Tab. 12 Ukazovatele kvality pre návrh regulátora metódou Maclaurinovho rád

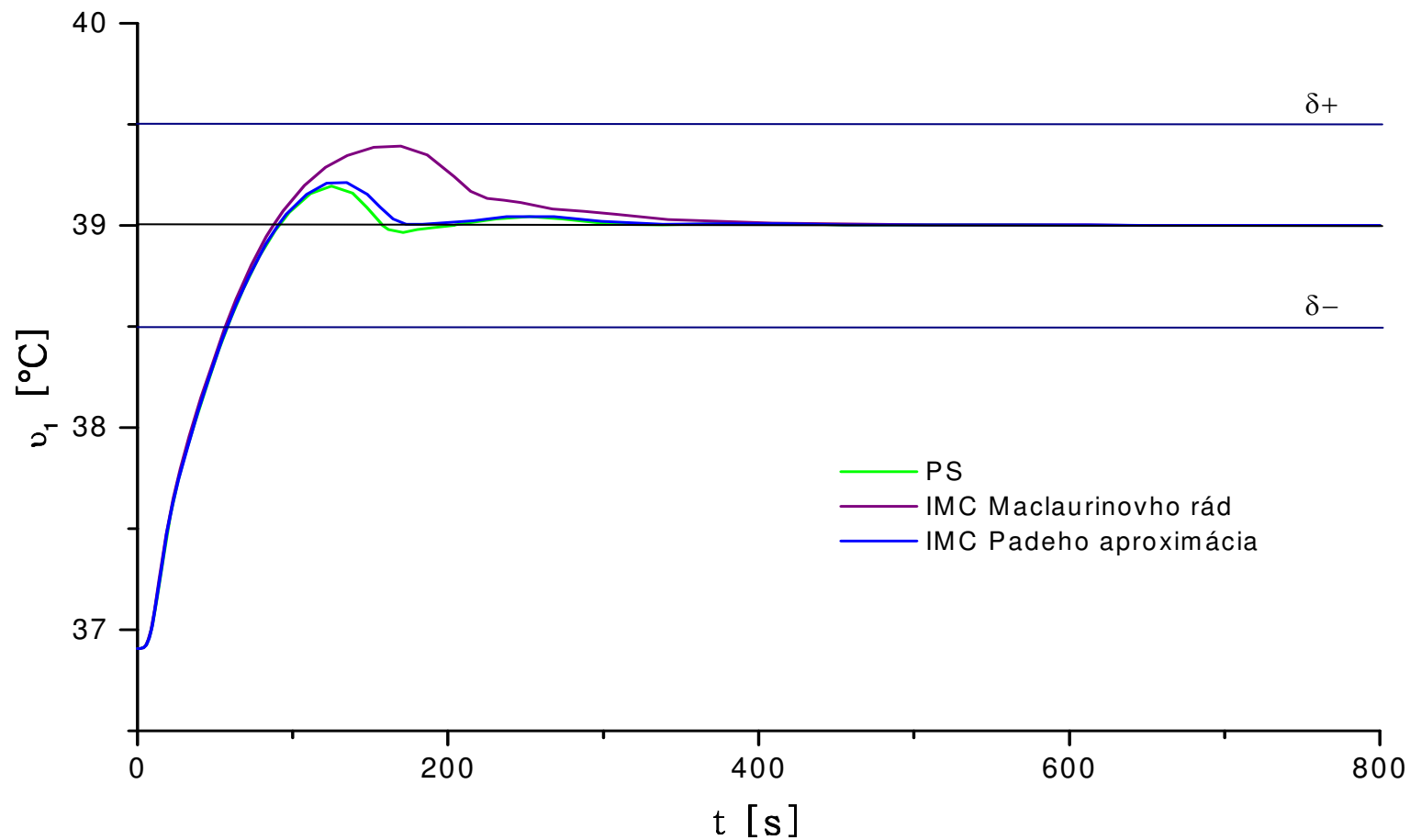
5. Záver

Tento projekt bol zameraný na návrh vhodného primárneho a sekundárneho regulátora pre kaskádové riadenie výmenníka tepla. Zo spracovania prechodovej charakteristiky a z následnej identifikácie vyplynulo, že systém je prvého rádu s dopravným oneskorením.

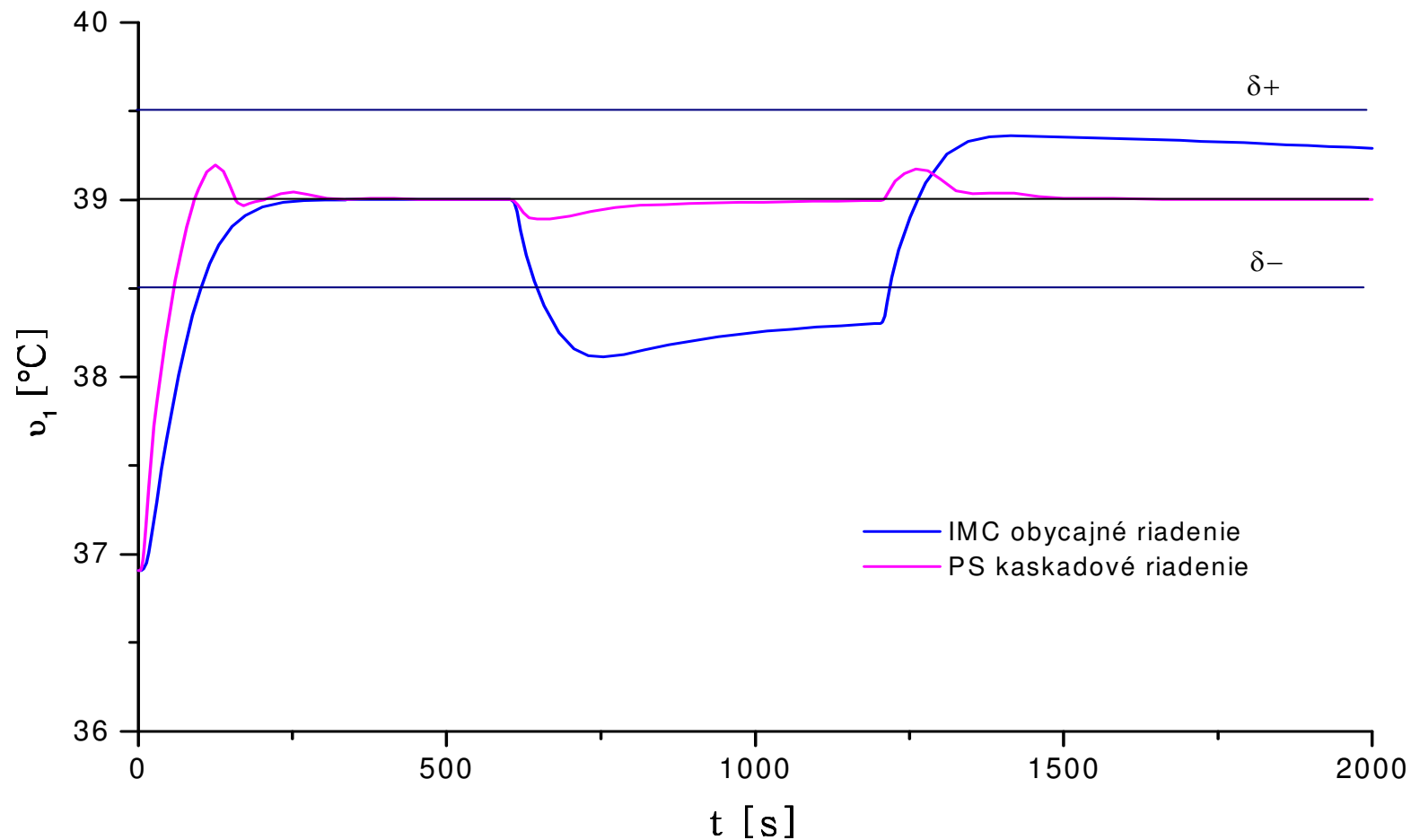
Návrh primárneho a sekundárneho regulátora som začala návrhom regulátora sekundárneho. Na získanie parametrov regulátora bol identifikovaný prenos ako odozva teploty v plášti na zmenu prietoku média v plášti. Sekundárny regulátor bol navrhnutý ako P-regulátor a bol vybraný regulátor navrhnutý Cohen-Coonovou metódou. Pri návrhu parametrov primárneho regulátora som vychádzala z odozvy systému meranej tak, že pomocný obvod už bol v činnosti, teda bol zapojený pomocný P-regulátor. Bola nameraná odozva teploty vo výmenníku na skokovú zmenu teploty v plášti. Primárny regulátor bol opäť navrhnutý rôznymi experimentálnymi metódami ako PID-regulátor. Z porovnania hodnôt ukazovateľov kvality vyplynulo, že najvhodnejší regulátor bol regulátor navrhnutý metódou priamej syntézy. Niektoré metódy ako Ziegler-Nicholsova, Chien-Hrones-Reswickova boli na návrh parametrov primárneho regulátora menej vhodné. Grafické porovnanie výsledkov simulácií riadenia pomocou vybraných regulátorov je v grafe 7.3.1.

Zo simulácií kaskádového riadenia výmenníka tepla vyplýva, že kaskádové riadenie je vhodnejšie na odstránenie poruchy, ako obyčajné riadenie, ako ukazuje aj graf. 7.3.2. , uvedený v prílohe.

8.3.1. Kaskádové riadenie výmenníka tepla



8.3.2. Riadenie výmenníka tepla, ak uvažujeme poruchu



8.3.3. Riadenie v uzavretom regulačnom obvode, ak neuvažujeme poruchu

