

**Dílčí cíl V302: Pokročilé algoritmy řízení pro zvýšení  
efektivitu provozu elektrárenského bloku a minimalizaci  
ekologických dopadů.**

**Výsledky za rok 2007**

**TU v Liberci, Fakulta mechatroniky**

## **Dílčí úkoly uvedené v přihlášce projektu:**

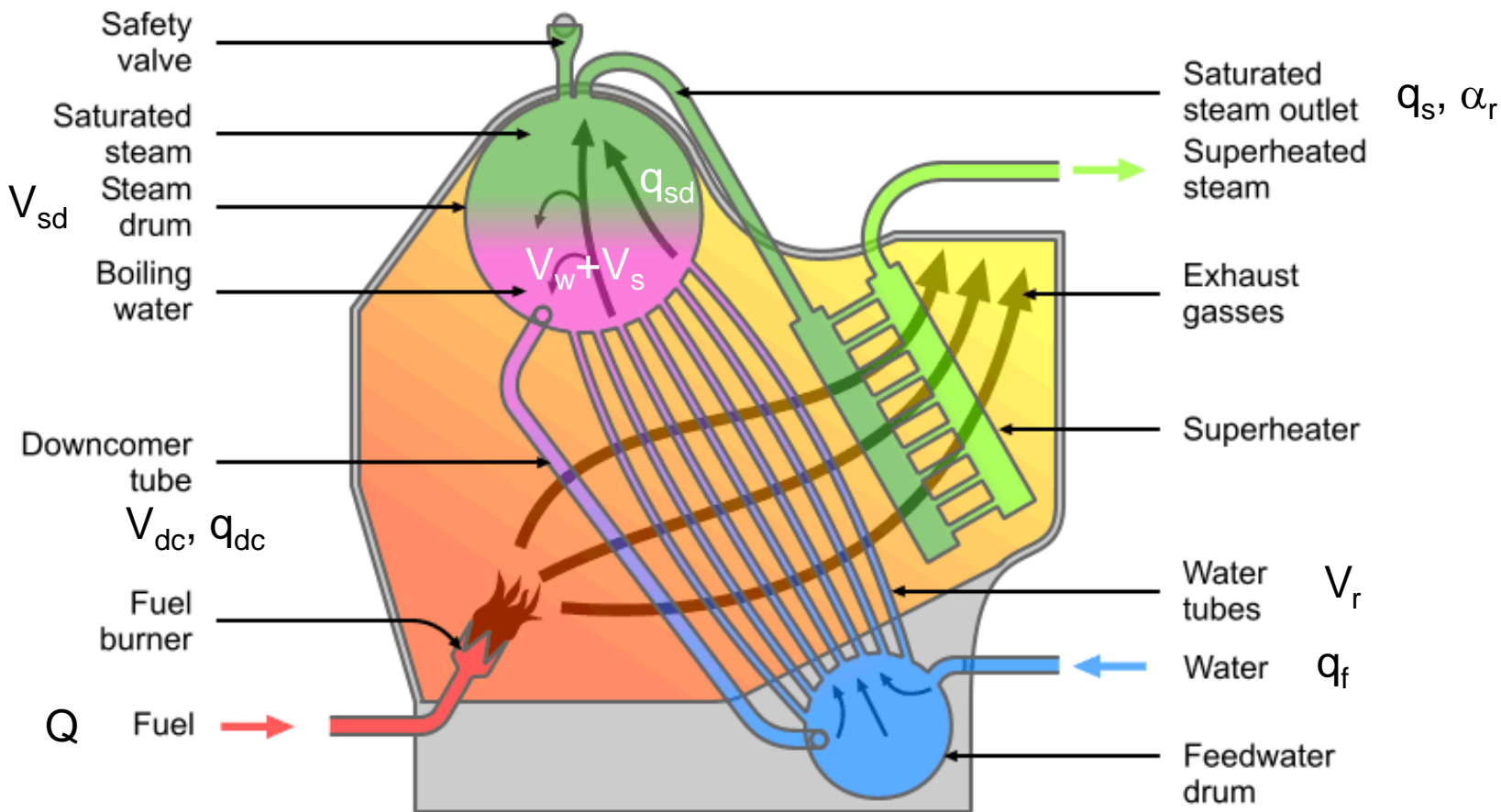
- a) Zvýšení kvality řízení teploty páry.***
- b) Koordinace řízení kotle a turbíny.***
- c) Regulace najíždění bloku.***

V principu se tak jedná o modelování a řízení podstatných funkčních bloků elektrárny.

V modelování pro účely řízení byl učiněn pokus použít některé komerční produkty zejm. toolbox Simsteam pro MATLAB/Simulink, výsledky však nejsou zcela uspokojivé, proto bylo přikročeno k vytváření vlastní knihovny simulačních modelů důležitých funkčních bloků elektrárny

# Model kotle

Vytvořeno na základě: K.J. Astrom, R.D. Bell: Drum-boiler dynamics, Automatica 36



Základní výchozí model popisovaného kotle

## Popis na základě bilančních rovnic


### Proměnné a značení:

- $Q$  – dodané teplo
- $q_f$  – průtok napájecí vody
- $q_s$  – průtok páry
- $p$  – tlak
- $l$  – hladina

### Indexy:

- s – pára
- w – voda
- f – napájecí voda
- m – železo
- t – systém
- d – kotel
- r – riser  
(stoupací potrubí)


Hmotnostní rovnováha (zákon zachování hmoty)


$$\frac{d}{dt}[\varrho_s V_{st} + \varrho_w V_{wt}] = q_f - q_s$$

Energetická rovnováha (zákon zachování energie)

$$\frac{d}{dt}[\varrho_s u_s V_{st} + \varrho_w u_w V_{wt} + m_t C_p t_m] = Q + q_f h_f - q_s h_s$$

Po úpravě  $u = h - p/\varrho$


$$\frac{d}{dt}[\varrho_s h_s V_{st} + \varrho_w h_w V_{wt} - p V_t + m_t C_p t_m] = Q + q_f h_f - q_s h_s$$

+ zachování objemů


$$V_t = V_{st} + V_{wt}$$

## Základní model, pouze p, V<sub>wt</sub>

$$e_{11} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{12} \frac{dp}{dt} = q_f - q_s$$

$$e_{21} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{22} \frac{dp}{dt} = Q + q_f h_f - q_s h_s$$

kde

$$e_{11} = Q_w - Q_s$$

$$e_{12} = V_{st} \frac{\partial Q_s}{\partial p} + V_{wt} \frac{\partial Q_w}{\partial p}$$

$$e_{21} = Q_w h_w - Q_s h_s$$

$$e_{22} = V_{st} \left( h_s \frac{\partial Q_s}{\partial p} + Q_s \frac{\partial h_s}{\partial p} \right) + V_{wt} \left( h_w \frac{\partial Q_w}{\partial p} + Q_w \frac{\partial h_w}{\partial p} \right) - V_t + m_t C_p \frac{\partial t_s}{\partial p}$$

# Komplexní model, kotel + fáze voda-pára

$$e_{11} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{12} \frac{dp}{dt} = q_f - q_s$$

$$e_{21} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{22} \frac{dp}{dt} = Q + q_f h_f - q_s h_s$$

$$e_{32} \frac{dp}{dt} + e_{33} \frac{d\alpha_r}{dt} = Q - \alpha_r h_c q_{dc}$$

$$e_{42} \frac{dp}{dt} + e_{43} \frac{d\alpha_r}{dt} + e_{44} \frac{dV_{sd}}{dt} = \frac{Q_s}{T_d} (V_{sd}^0 - V_{sd}) + \frac{h_f - h_w}{h_c} q_f$$

$$e_{11} = Q_w - Q_s,$$

$$e_{12} = V_{wt} \frac{\partial Q_w}{\partial p} + V_{st} \frac{\partial Q_s}{\partial p},$$

$$e_{21} = Q_w h_w - Q_s h_s,$$

$$e_{22} = V_{wt} \left( h_w \frac{\partial Q_w}{\partial p} + Q_w \frac{\partial h_w}{\partial p} \right) + V_{st} \left( h_s \frac{\partial Q_s}{\partial p} + Q_s \frac{\partial h_s}{\partial p} \right) - V_t + m_t C_p \frac{\partial t_s}{\partial p}$$

$$e_{32} = \left( Q_w \frac{\partial h_w}{\partial p} - \alpha_r h_c \frac{\partial Q_w}{\partial p} \right) (1 - \bar{\alpha}_v) V_r + \left( (1 - \alpha_r) h_c \frac{\partial Q_s}{\partial p} + Q_s \frac{\partial h_s}{\partial p} \right) \bar{\alpha}_v V_r$$

$$+ (Q_s + (Q_w - Q_s) \alpha_r) h_c V_r \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial p} - V_r + m_r C_p \frac{\partial t_s}{\partial p}$$

$$e_{33} = ((1 - \alpha_r) Q_s + \alpha_r Q_w) h_c V_r \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial \alpha_r}$$

$$e_{42} = V_{sd} \frac{\partial Q_s}{\partial p} + \frac{1}{h_c} \left( Q_s V_{sd} \frac{\partial h_s}{\partial p} + Q_w V_{wd} \frac{\partial h_w}{\partial p} - V_{sd} - V_{wd} + m_d C_p \frac{\partial t_s}{\partial p} \right) + \alpha_r (1 + \beta) V_r$$

$$\left( \bar{\alpha}_v \frac{\partial Q_s}{\partial p} + (1 - \bar{\alpha}_v) \frac{\partial Q_w}{\partial p} + (Q_s - Q_w) \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial p} \right)$$

$$e_{43} = \alpha_r (1 + \beta) (\rho_s - \rho_w) V_r \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial \alpha_r}$$

$$e_{44} = Q_s$$

## Potřebné parametry:

- objem kotle  $V_d$
- objem riseru  $V_r$
- objem spádové trubky  $V_{dc}$
- povrch kotle při normální hladině  $A_d$
- celková hmotnost železa  $m_t$
- celková hmotnost riseru  $m_r$
- třecí koeficient v okruhu riser-spádová trubka  $k$
- doba zdržení páry v kotli  $T_d$
- parametr v empirické rovnici  $\beta$

} 9 základních parametrů  
dle popisu v článku

- 
- tabulky pro sytou vodní páru ( $h_s, h_w, \rho_s, \rho_w$  + derivace podle tlaku,  $t$ )

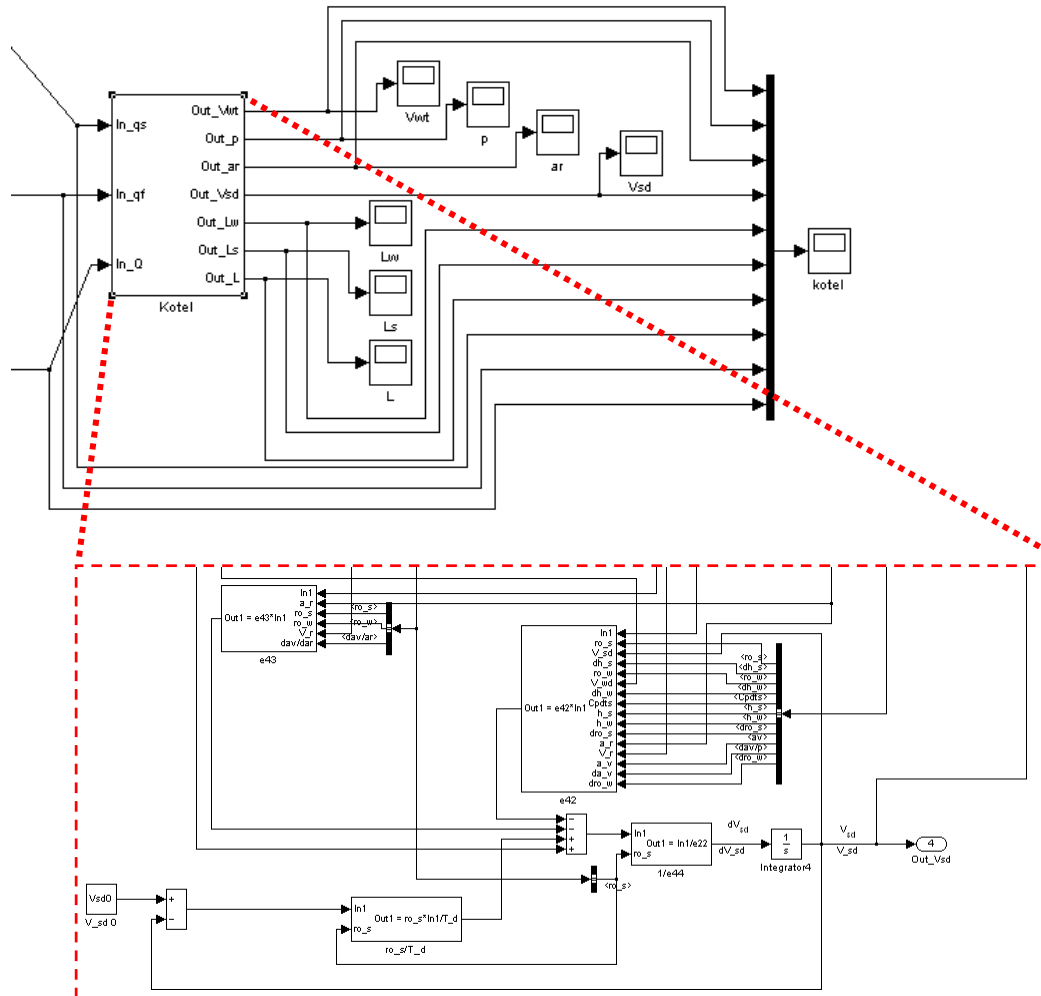
- 
- objem páry v kotli  $V_{sd}^0$  v hypotetické situaci, kdy není žádná kondenzace páry a  $T_d$  je doba zdržení páry v kotli
  - hmotnost kotle  $m_d$
  - povrch spádových trubek  $A_{dc}$

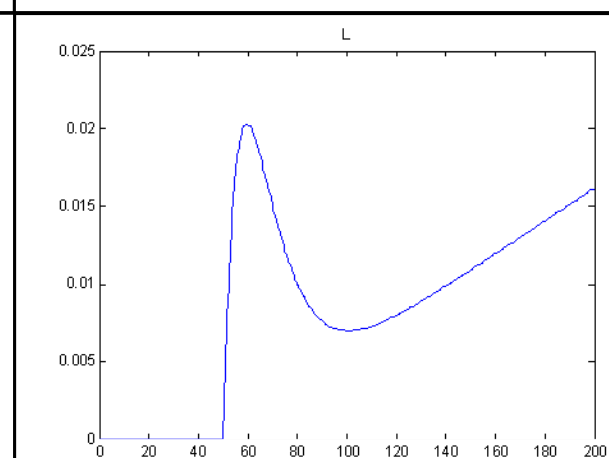
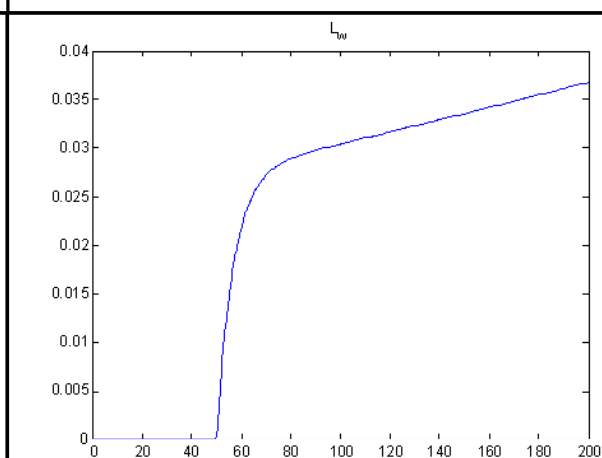
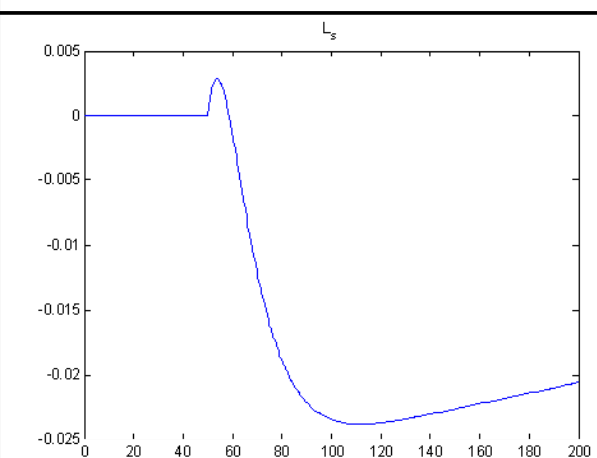
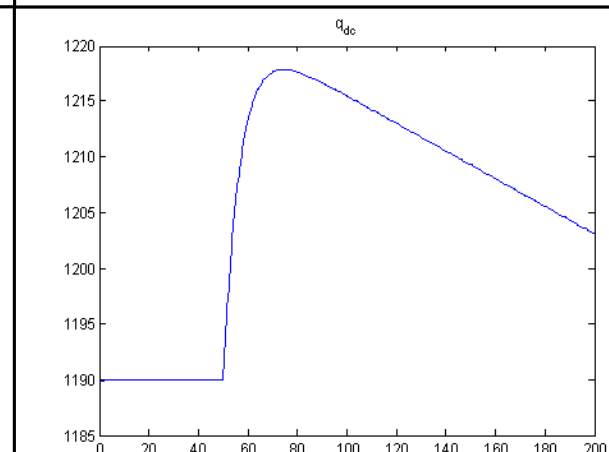
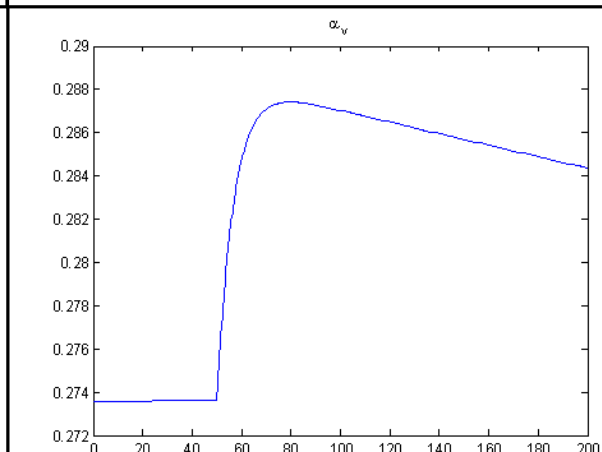
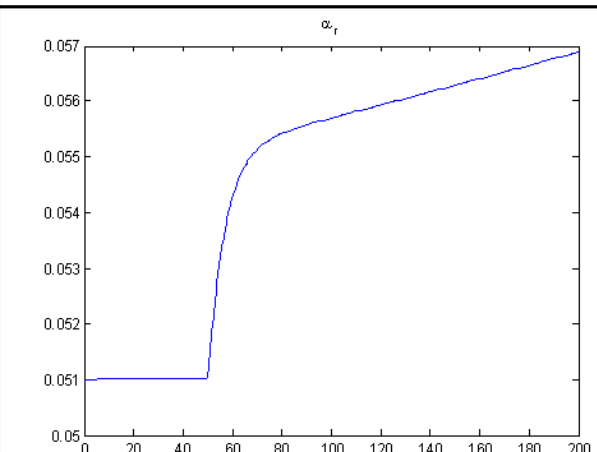
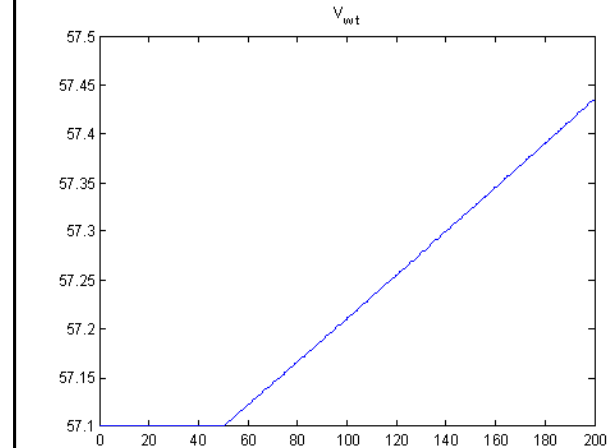
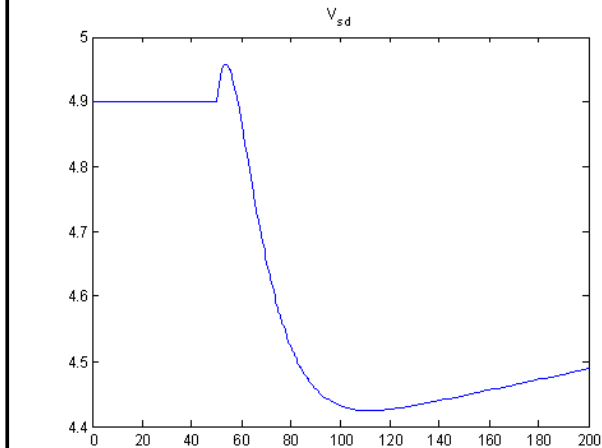
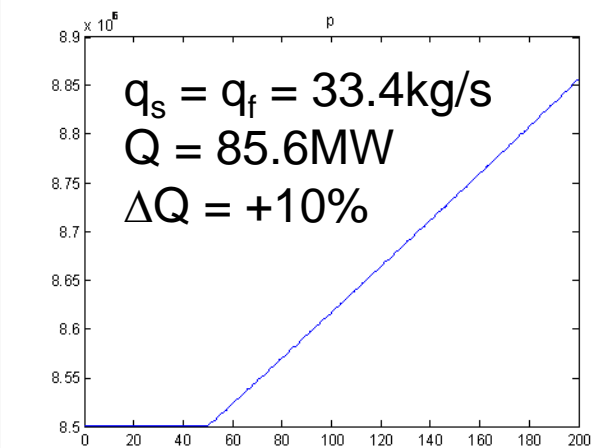
- 
- nastavení počátečních podmínek a kalibrace modelu



# Část simulačního modelu bubnového kotle

(MATLAB/Simulink)



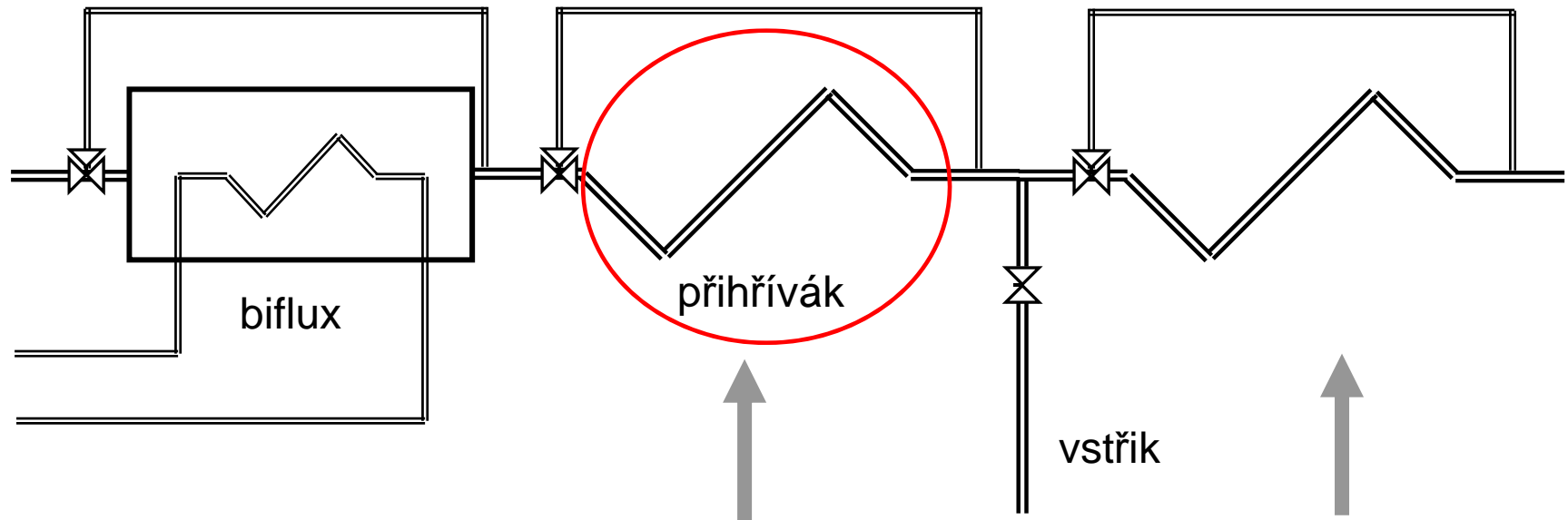


# Modely komponent průtočného kotle použitelné v regulaci

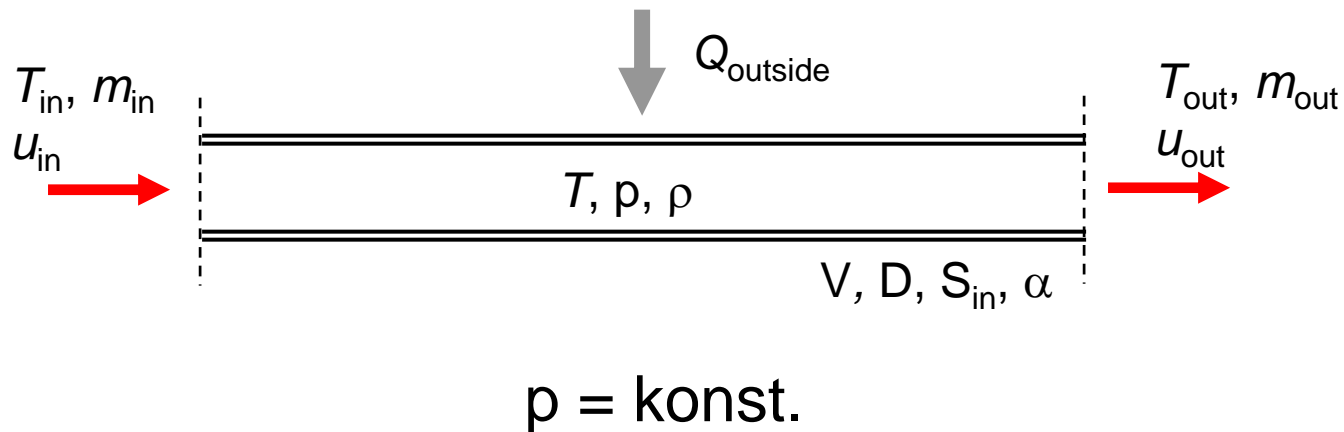
- Matematicko-fyzikální analýza vychází pro projektované systémy z koncepce stavového popisu
- Modely tohoto typu vyžadují fázi *kalibrace* modelu na základě **reálných** měření na kotli
- Zahrnutí do modelování **formou neurčitostí** technologické změny na zařízení jako např. zanášení trubek, ...
- Výsledkem jsou zkalibrované a verifikované nelineární modely vstupující do **fáze návrhu** regulačních obvodů

- Podle požadavků zadavatele v této fázi vycházíme z modelu řetězce – biflux + přehřívák + vstřík (obr.)
- Pro určení množství dodaného tepla by bylo vhodné vycházet z mat. modelu ohniště uhelného bloku
- Cílem návrhu regulačních smyček je **zlepšit účinnost**
- Vycházíme *zatím* z předpokladu, že budou použity klasické regulátory typu PID, které budou navrženy jako **robustní vzhledem k uvažovaným neurčitostem**
- Podle zadavatele je uvažován následující řetězec na přehřáté páře

# Simulace vybrané části průtočného kotle



Pro první fázi simulace a ověření předpokladů byla vybrána následující část:



Předpokládáme malé tlakové ztráty, tj. v modelu uvažujeme **konstantní tlak**

## Popis na základě globálních rovnic hmotnostní a energetické rovnováhy

### Proměnné a značení:

- Q – dodané teplo
- m – průtok páry trubkou
- p – tlak
- V – objem

### Indexy:

- in – vstupní strana
- out – výstupní strana
- Fe – železo –trubky
- s - pára

Hmotnostní rovnováha (zákon zachování hmoty)

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \frac{d}{dt}(V \rho(t))$$

Energetická rovnováha (zákon zachování energie)

$$\dot{Q}_{outside} - \dot{Q}_{Fe} = \frac{d}{dt}(m_{Fe} c_{Fe} T_{Fe}(t)) \quad \text{trubka}$$

$$\dot{Q}_{Fe} + \dot{Q}_s^{in} - \dot{Q}_s^{out}(t) = \frac{d}{dt}(\rho(t) \cdot u(t) \cdot V) \quad \text{pára}$$

$$\dot{Q}_{outside} - \alpha_1 S_{in} \left( T_{Fe}(t) - \frac{T_{in} + T_{out}(t)}{2} \right) = \frac{d}{dt} (m_{Fe} c_{Fe} T_{Fe}(t))$$

trubka

Po úpravě

$$u = h - p/\rho$$

$$\alpha_1 S_{in} \left( T_{Fe}(t) - \frac{T_{in} + T_{out}(t)}{2} \right) + \dot{m}_{in} h_{in} - \dot{m}_{out}(t) h_{out}(t) = \frac{d}{dt} (\rho(t) \cdot u(t) \cdot V) =$$

$$= \left[ u(t) = h(t) - \frac{p}{\rho(t)} \right] = \frac{d}{dt} (\rho(t) \cdot h(t) \cdot V - p \cdot V) =$$

$$= V \left( \rho(t) \frac{dh(t)}{dt} + h(t) \frac{d\rho(t)}{dt} \right) = V \left( \rho_{out}(t) \frac{\partial h(T_{out})}{\partial T_{out}} \frac{dT_{out}}{dt} + h_{out}(t) \frac{\partial \rho(T_{out})}{\partial T_{out}} \frac{dT_{out}}{dt} \right) =$$

$$= V \frac{dT_{out}}{dt} \left( \rho_{out}(t) \frac{\partial h(T_{out})}{\partial T_{out}} + h_{out}(t) \frac{\partial \rho(T_{out})}{\partial T_{out}} \right)$$

pára

Pozn.: předpokládá se i varianta že člen  $\frac{T_{in} + T_{out}(t)}{2}$  může být nahrazen  $T_{out}(t)$

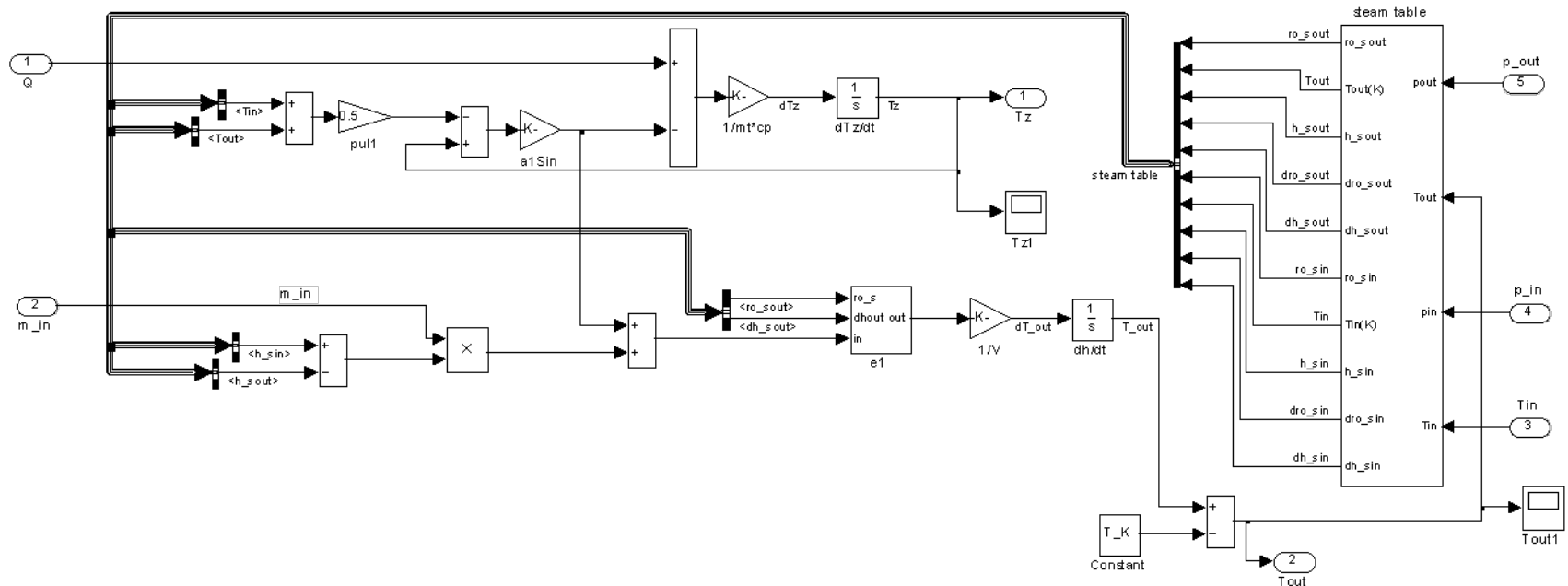


# Provedené simulace

Základní předpoklad výpočtů je start z ustálených stavů a skokové změny na dodaném teple.

Vzhledem k tomu, že výpočet se neprovádí pro reálný objekt, je simulace provedena na hypotetickém objektu

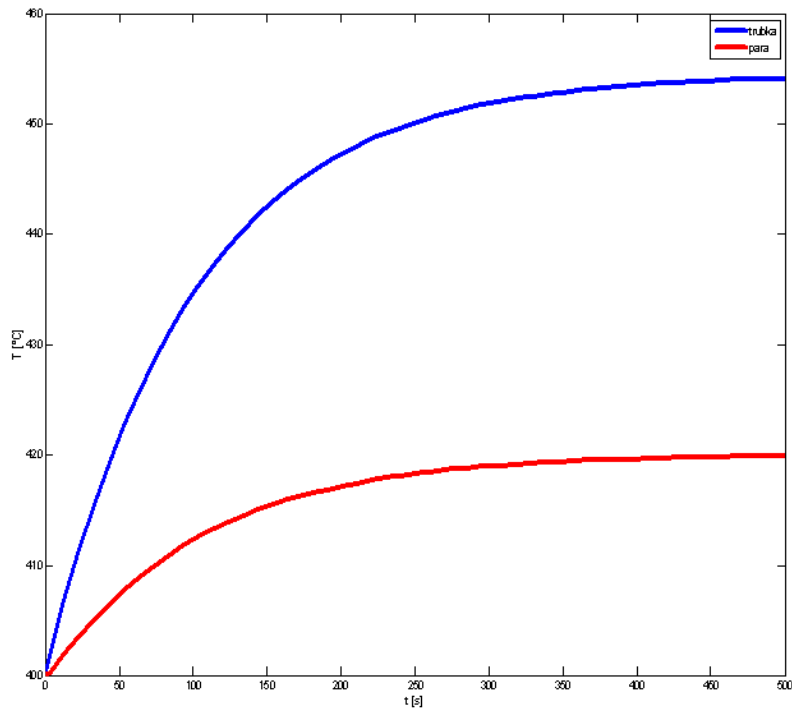
1. Teplota trubky = ustálená teplota páry,  $T = 400^{\circ}\text{C}$  ( $Q = 0$ , dokonalá izolace)
2. Teplota trubky ( $= 430^{\circ}\text{C}$ )  $>$  ustálená teplota páry ( $= 400^{\circ}\text{C}$ )



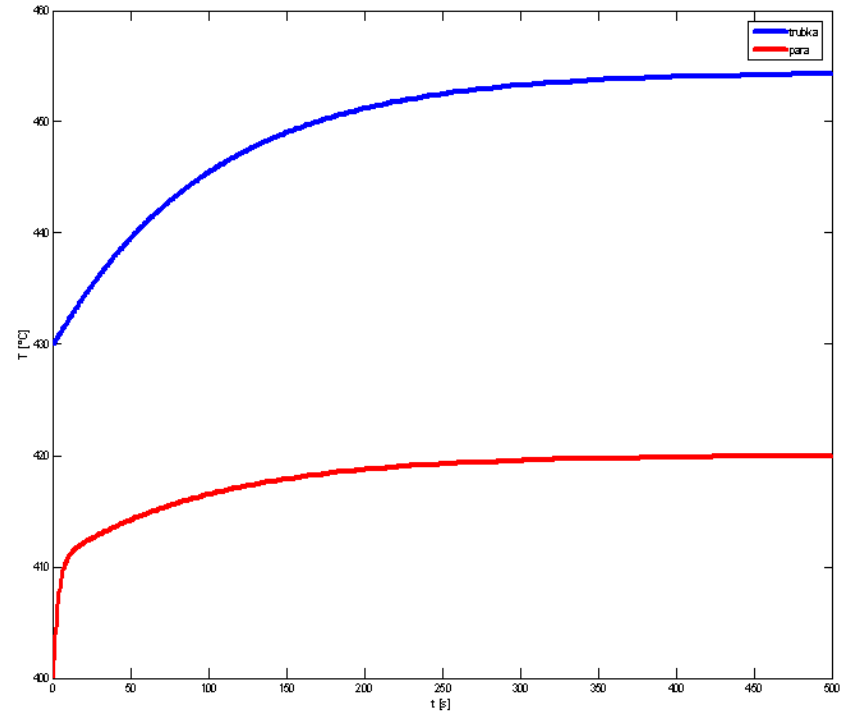
# Výsledky simulací

$m_{in} = 1 \text{ kg/s}$ ,  $p = 130 \text{ b}$ ,  $\alpha = 500 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}$ ,  $DS = 100 \text{ mm}$ , délka = 10m,  
stěna 2 cm,  $Q = 70 \text{ kW}$

1. Teplota trubky = ustálená teplota páry,  $T = 400^\circ\text{C}$  ( $Q = 0$ , dokonalá izolace)
2. Teplota trubky (=  $430^\circ\text{C}$ ) > ustálená teplota páry (=  $400^\circ\text{C}$ )



1.



2.

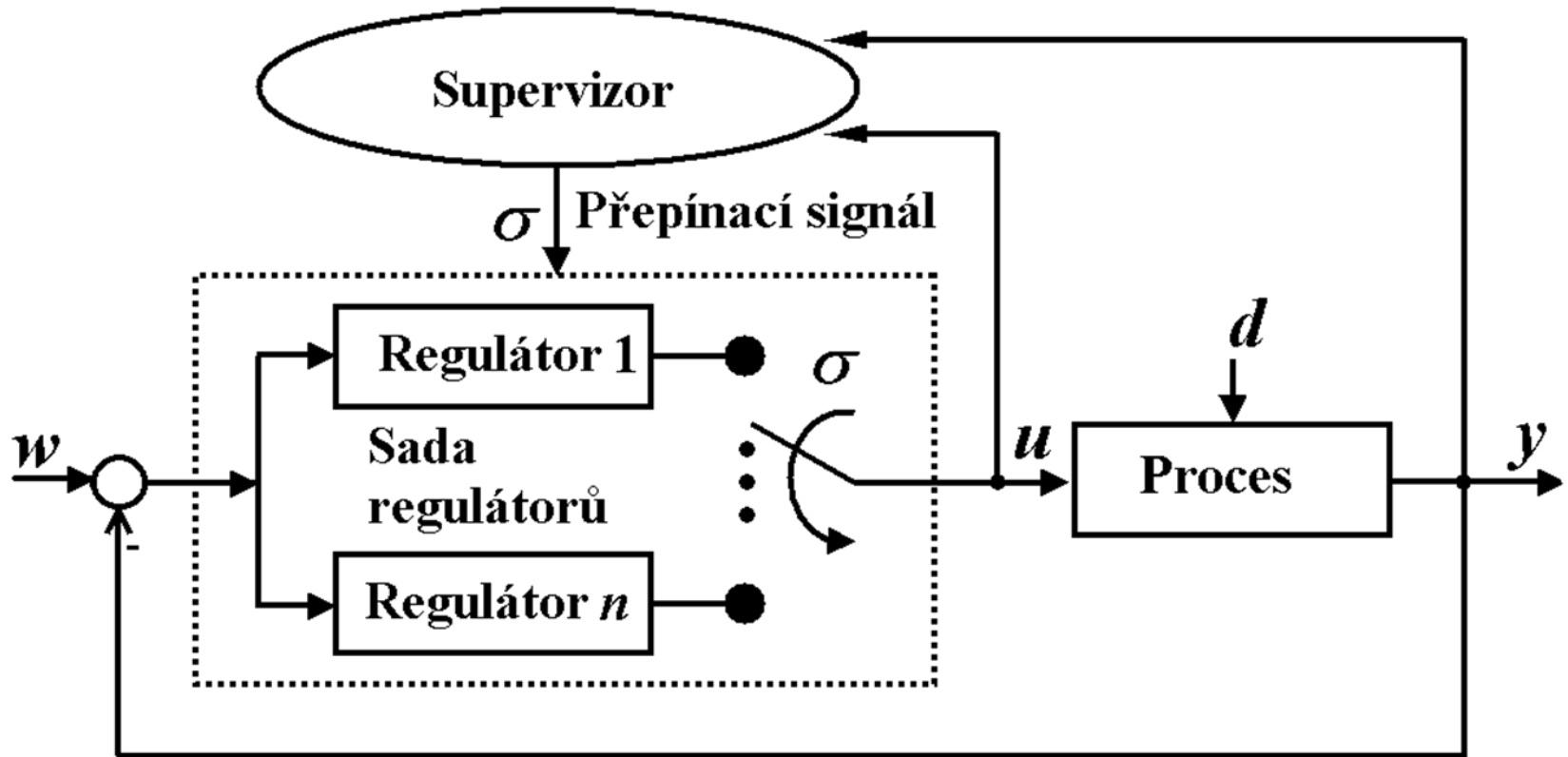
# Návrh regulačních obvodů

V této fázi řešena zejména regulace teploty páry. Uvedené modely jsou výrazně nelineární, náhrada lineárním modelem možná jen v malém výkonovém rozsahu  $\Rightarrow$  lineární regulační obvody navržené na základě linearizovaných modelů nemohu zaručit dostatečnou kvalitu regulace.

## Možná klasická řešení:

- **Robustní řízení:** při velkých změnách dynamického chování soustavy v různých pracovních bodech vede robustní návrh na příliš pomalé jmenovité regulační průběhy
- **Adaptivní řízení:** řada problémů se spojitou parametrizací množiny vhodných regulátorů, on-line identifikací, možné selhání adaptace

# Navrhované a rozpracovávané řešení: **Přepínané regulátory**



Chování regulátoru je měněno pomocí přepínací logiky nikoliv spojitou adaptací

## Potenciální výhody:

- **Rychlá adaptace:**  $\sigma$  se nemusí měnit spojitě
- **Flexibilita a modularita:** lze kombinovat různé typy a struktury regulátorů a estimátorů
- **Rozvolnění vazby mezi adaptací a řízením:** v intervalech mezi přepnutími se regulátor chová jako neadaptivní

**Zatím dosažené výsledky jsou publikovány časopisecky v:** Tůma L., Hanuš B. & Hlava J. (2007), Control architecture suitable for wide range operation of power plants, *WSEAS Transactions on Systems*, Vol. 6, No. 3, pp. 438-443

## Prediktivní řízení založené na modelu (MPC model predictive control):

Vícerozměrová regulační metoda, koordinace řízení a kompenzace interakcí je tak obsažena přímo v principu regulačního algoritmu bez nutnosti přidávat dodatečné kompenzační obvody pro odstranění vazeb mezi jednotlivými veličinami

Dva řešené problémy:

- Spolupráce s klasickým řízením a operátorské řízení
  - Zařazení přepínaných modelů do struktury MPC
- Paralelní struktura: MPC koriguje a dorovnává akční zásahy klasických regulátorů

