



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií



TECHNICKÉ PROSTŘEDKY ŘÍZENÍ

Oddělení řízení procesů

Lukáš Hubka, Petr Školník, Jaroslav Hlava





6. CVIČENÍ

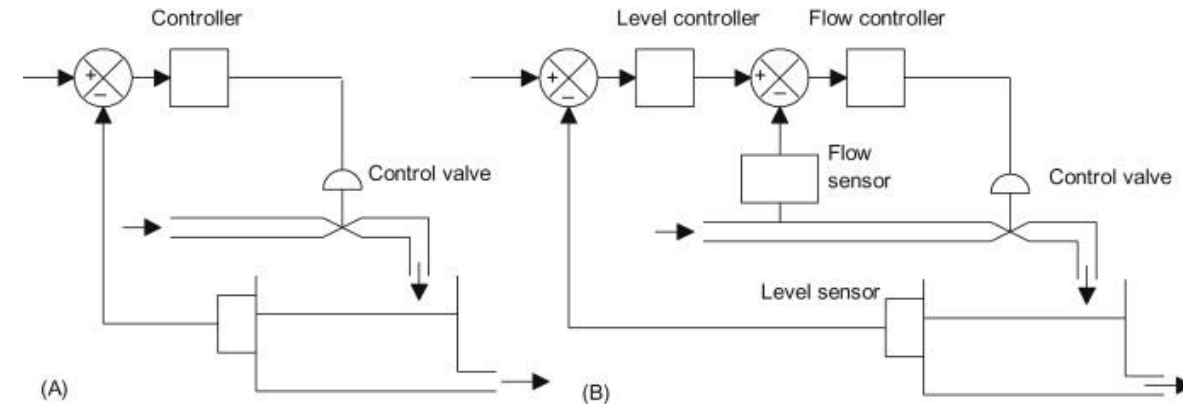
Kaskádní regulace.

Úvod k řízení systémů s dopravním zpožděním.

-

```

graph LR
    Input[ ] --> PWM[PWM Amplifier]
    PWM --> Motor[DC Servo Motor]
    Motor --> Load[LOAD]
    
```



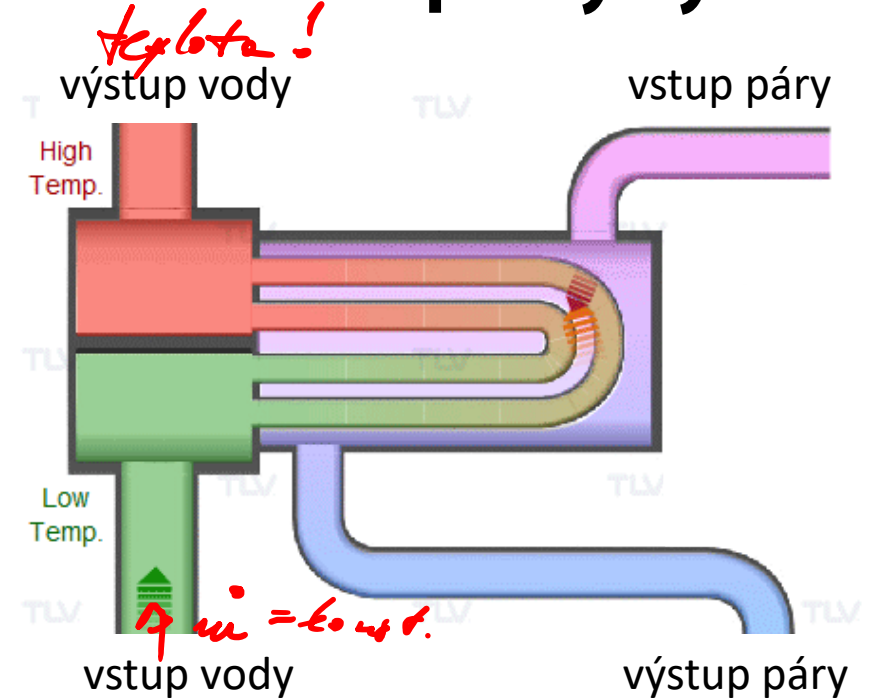
- Implementace kaskádové regulace nám umožní korigovat kolísání průtoku páry, která vstupuje do výměníku tepla, při řízení teploty procesní tekutiny (vody) vycházející z výměníku tepla.
- Základní kaskádní řízení používá dvě řídicí smyčky. Vnější (hlavní, primární) smyčka na základě měření teploty vody generuje žádanou teplotu páry. Ve druhé (vnitřní, podřízená, sekundární) smyčce se měří průtok páry, porovná se s žádaným (který je generován vnější smyčkou), a podle potřeby se změní otevření ventilu. Teplota vystupující vody závisí jak na průtoku páry, tak na teplotě páry (porucha na výstupu $G_d(s)$). Přenos $G_1(s)$ popisuje tepelnou výměnu ve výměníku, přenos $G_2(s)$ dynamické účinky změny polohy ventilu na průtok páry. Průtok vody nechť je konstantní.

$$G_1(s) = \frac{1}{(4s + 1)(8s + 1)^5}, G_2(s) = \frac{1}{5s + 1}$$

$$G_d(s) = \frac{0,2}{(10s + 1)}$$

- Nakreslete blokové schéma problému, kde zakomponujete kaskádní regulační strukturu. Pojmenujte všechny veličiny.
- Navrhněte řízení teploty vody pomocí změny průtoku páry pouze pomocí klasického PI regulátoru. (Testujte primárně na změnu teploty páry, ale i na změnu žádané teploty vody). *$r(t) = 1(t)$ v $t = 0$*
- Implementujte kaskádní řídicí strukturu a navrhněte oba regulátory (PI+P). Opět testujte na stejné signály.

Problém #1 – Tepelný výměník

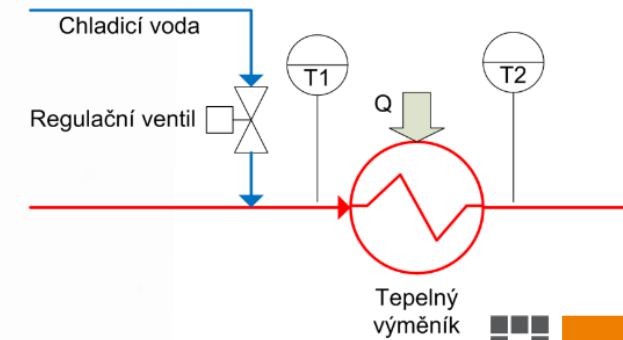
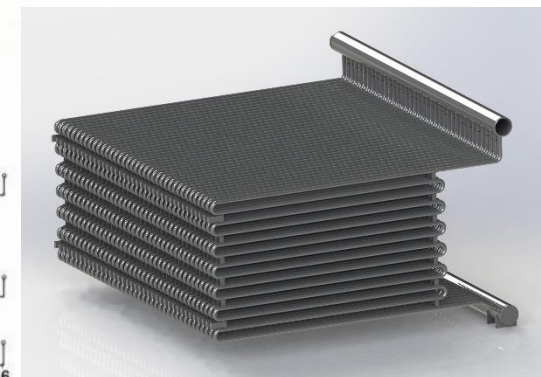
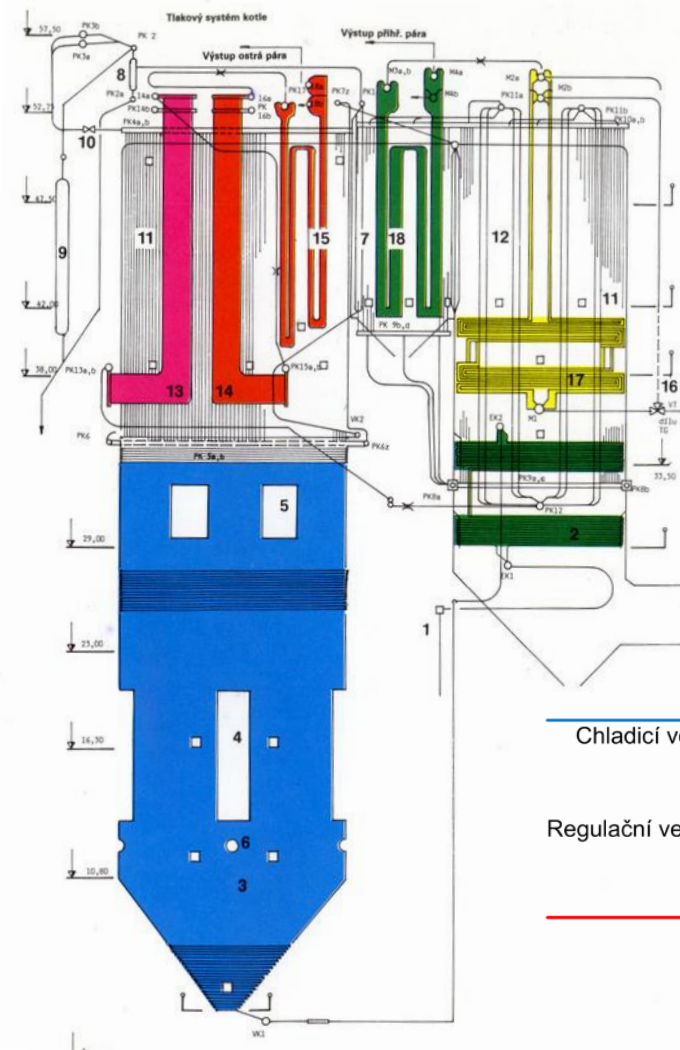


- ❑ V tepelných (ale i jaderných) elektrárnách se využívá energie páry pro výrobu elektrické energie. Elektrárenský kotol obsahuje velkou řádku složitých regulačních smyček a struktur. Soustředíme se na výrobu páry, resp. přehřívání, kdy pára získává energii, kterou pak na turbíně odevzdá. Výstupní parametry páry musí být striktně řízeny. Přehřívání je vystaveno množstvím poruchových vlivů (změny v hoření paliva, proměnný průtok, ...).
- ❑ (Nejen) u výstupního přehříváku se pro řízení teploty páry na výstupu z výměníku používá předřazený vstřikovací ventil, který pomocí vstřikované vody ochlazuje teplotu páry na vstupu do výměníku.
- ❑ Tepelná výměna v přehříváku může být popsána přenosem $G_1(s)$. Účinky vstřiku na teplotu páry před výměníkem přenosem $G_2(s)$.

$$G_1(s) = \frac{1,195}{(25s + 1)^3}, G_2(s) = \frac{-40,62}{(2,8s + 1)(3,9s + 1)}$$

1. **Navrhněte řízení teploty na výstupu z přehříváku pomocí vstřikování vody s využitím klasického PID regulátoru. (Testujte primárně na poruchu na průtoku/teplotě páry na vstupu. Změnu žádané teploty vystupující páry však také nelze opomenout).**
2. **Implementujte kaskádní řídicí strukturu a navrhněte oba regulátory. Opět testujte na stejné signály.**

Problém #2 – Přehřívák

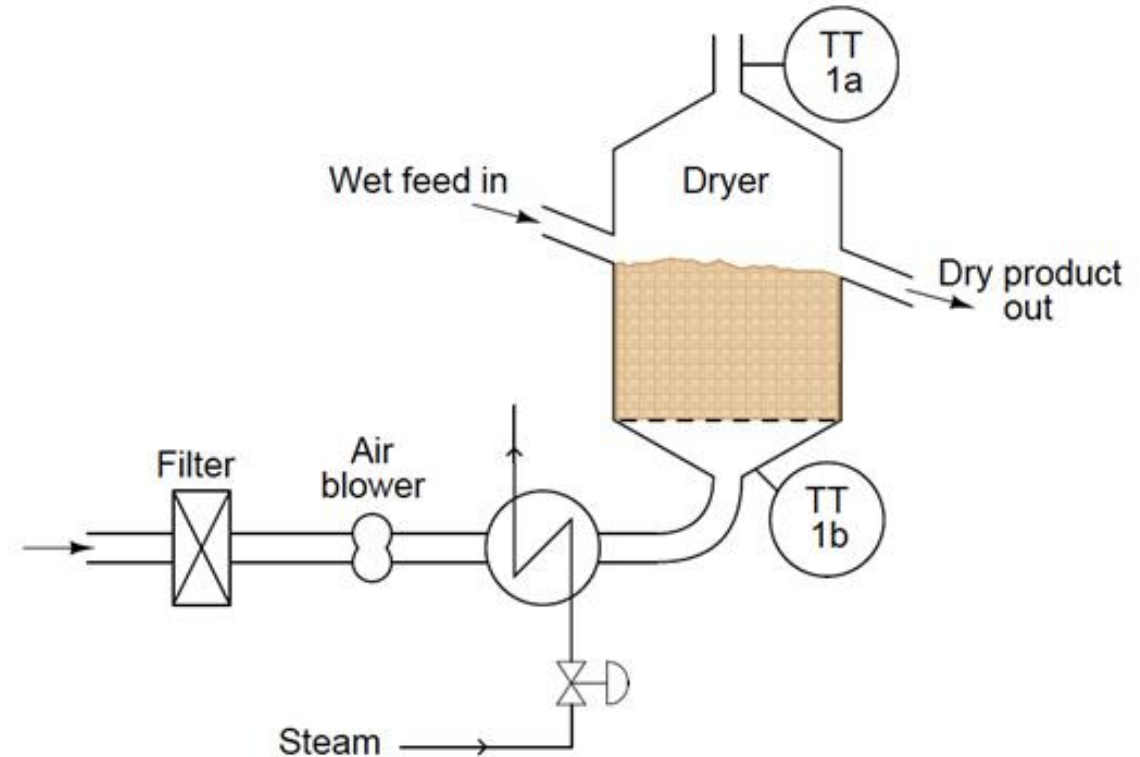


Problém #3 – Sušička

- ❑ Teplota výstupního vzduchu vycházejícího ze sušičky, by měla být udržována na dostatečně vysoké teplotě, aby se zajistilo, že voda nezůstane v horních vrstvách pevného materiálu. Výstupní teplota reaguje poměrně pomalu, protože hmota pevného materiálu vytváří velkou dobu prodlevy.
- ❑ Existuje několik parametrů (poruch) ovlivňujících teplotu výstupního vzduchu. Kromě obsahu vlhkosti v sušeném materiálu mezi ně patří rychlost proudění vzduchu, teplota okolního vzduchu a kolísání teploty páry.
- ❑ Přenos průtok páry – teplota vzduchu na vstupu je $G_1(s)$, přenos teplota vzduchu na vstupu – teplota vystupujícího vzduchu je $G_2(s)$.

$$G_1(s) = \frac{1}{(5s + 1)(3s + 1)^3}, G_2(s) = \frac{1}{(20s + 1)^3}$$

1. **Simulujte řízení teploty vystupujícího vzduchu klasickým zpětnovazebním PI regulátorem!**
2. **Navrhněte a simulujte kaskádní řízení!**
3. **Testujte rychlosti reakce na poruchu (změna teploty vzduchu $d_{IN} = 0,1 \cdot 1(t)$, změna vlhkosti vstupního materiálu $d_{OUT} = 0,1 \cdot 1(t)$) pro oba způsoby řízení!**



Problém #4 – Vypalovací pec (optional)

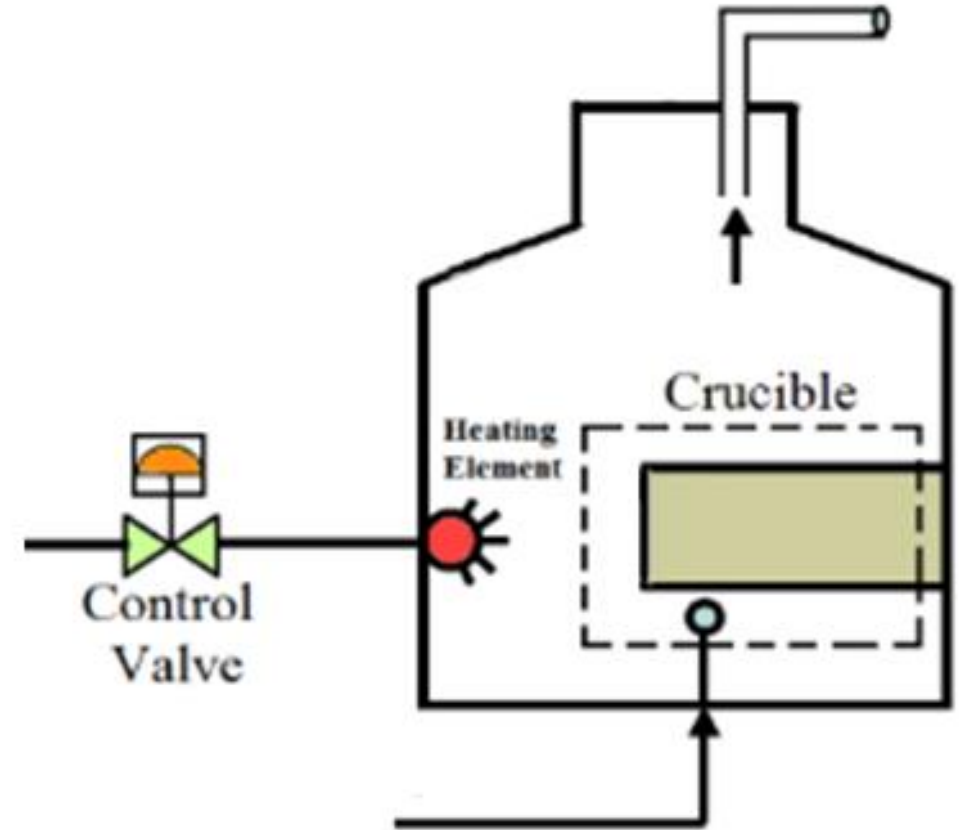
- ❑ Ve vypalovací peci se materiál, který je umístěn v komoře, ohřívá na stanovenou teplotu.
- ❑ Hlavní regulovanou veličinou je teplota materiálu vypalovaného předmětu.
- ❑ Předpokládejme, že dynamické účinky změny polohy ventilu na teplotu spalin jsou popsány přenosem G_1 a změny teploty spalin na teplotu materiálu přenosem G_2 .
- ❑ Na proces působí poruchy ovlivňující teplotu spalin: kvalita paliva (průtok, tlak) G_{d1} , teplota vnějšího vzduchu G_{d2} , a teplotu materiálu: otevření dveří pece G_{d3} .

$$G_1(s) = \frac{1}{(10s + 1)(s + 1)^2}, G_2(s) = \frac{1}{(30s + 1)(3s + 1)},$$

$$G_{d1}(s) = \frac{0,2}{2s + 1}, G_{d2}(s) = \frac{-0,1}{1,5s + 1},$$

$$G_{d3}(s) = -\frac{0,75}{(10s + 1)(2s + 1)^2}$$

1. **Navrhněte řízení teploty vypalovaného materiálu pomocí PI regulátoru. Simulujte odezvu na poruchu na dodávce/kvalitě paliva. Významné je dosažení požadované teploty i odolnost na změnu poruchových veličin (zejména skoky d_1 a d_3).**
2. **Vytvořte kaskádní strukturu řízení, kdy využijete měřenou teplotu spalin. Navrhněte regulátory. Porovnejte s první variantou.**

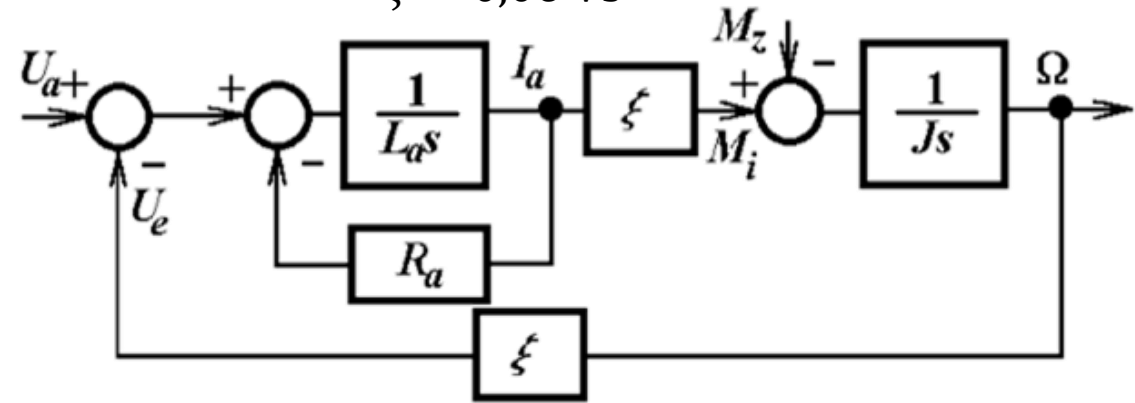


Problém #5 – Servomechanismus (DÚ)

- ❑ Pohon – servomechanismus – je klasický systém, kde se k řízení využívá kaskádní struktury.
- ❑ Předpokládejme simulační model pohonu aku vrtačky dle obrázku (parametry jsou uvedeny). Akční veličinou je stejnosměrné napětí $U_a \in \langle 0; 20 \rangle$ V. Proud I_a a otáčky Ω jsou měřitelné veličiny pohonu, zátěžný moment je neměřenou poruchou. Motor s vřeten je spojen převodovkou 1:12.

1. **Navrhněte řízení otáček motoru pomocí PI(D) regulátoru tak, aby byl odolný vůči změnám zátěžného momentu (vrtání do materiálu $M_z = 20$ Nm), poklesu napětí baterie $U_d = 2$ V a dosáhl požadované rychlosti $\Omega_{ref} = 1000$ ot/min!**
2. **Navrhněte řízení otáček motoru pomocí kaskádního zapojení P/PI regulátorů (proudová a otáčková smyčka) tak, aby odolný vůči změnám zátěžného momentu, poklesu napětí baterie a dosáhl požadované rychlosti! Porovnejte s výsledkem v bodě 1. Při nastavení vezměte v úvahu maximální napětí zdroje.**

$$J = 7,4 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2\text{s}^2; R_a = 0,094 \Omega; L_a = 4,8 \text{ mH}; \\ \xi = 0,06 \text{ Vs}$$

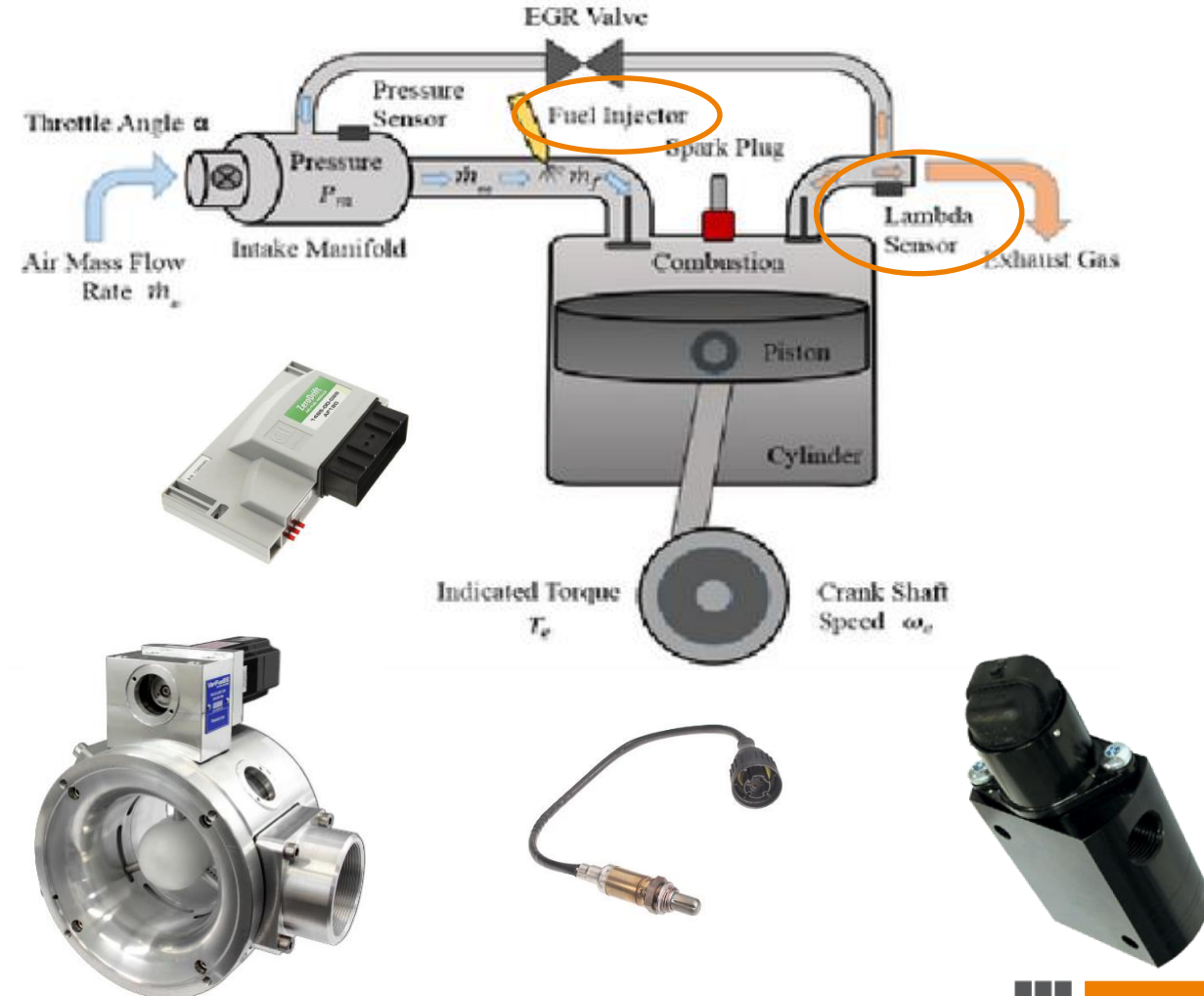


Problém #6 – Air-fuel ratio

- ❑ Pro správné spalování při procesu hoření je podstatný vzájemný poměr vzduchu a paliva ve směsi.
- ❑ Uvažujme spalovací motor (ale na stejném principu funguje třeba i výroba uhelné palivové směsi pro hořáky elektráren a tepláren, nebo palivové směsi v proudových motorech). Měření poměru vzduch-benzín se realizuje EGO senzorem (lambda sonda).
- ❑ Proces směřování lze popsat přenosem $G(s)$, měřicí senzor $G_\lambda(s)$, poruchu na vstupu v podobě změny tlaku/průtoku vzduchu pak přenosem $G_d(s)$.

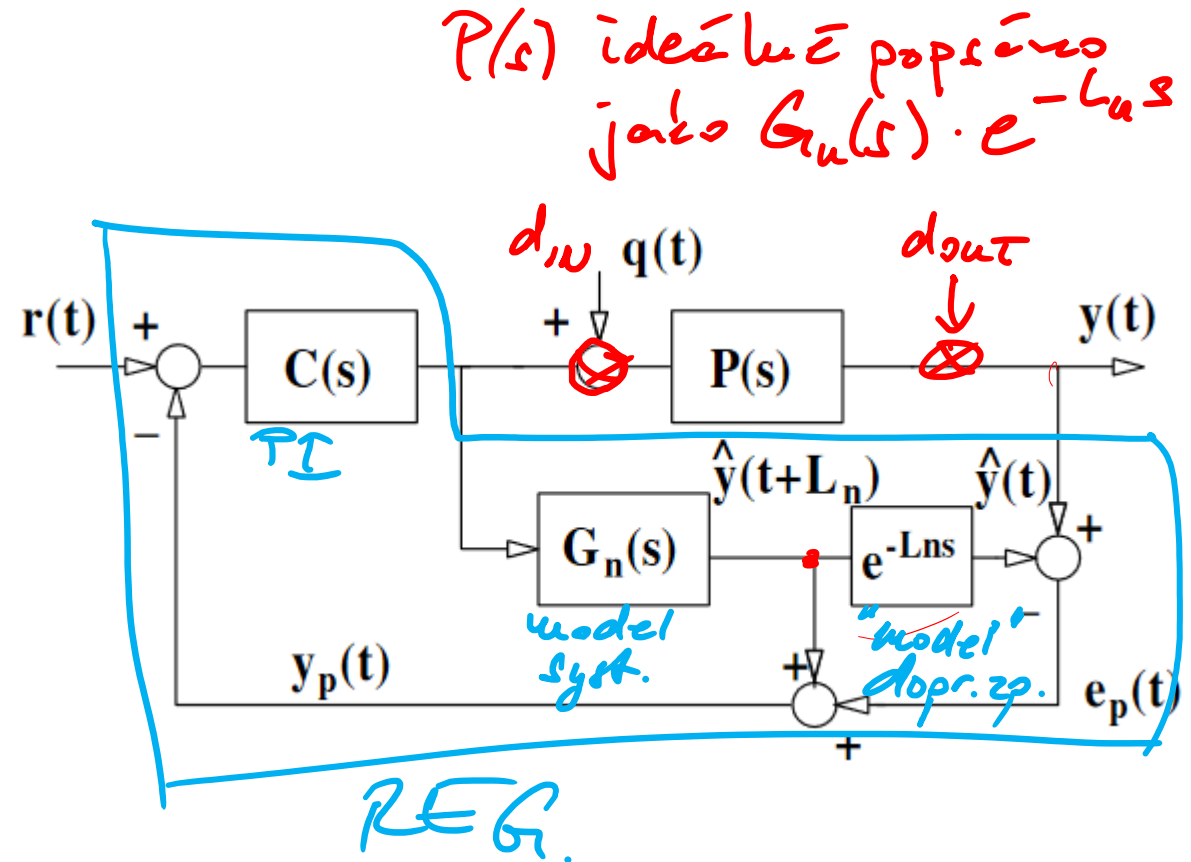
$$G(s) = \frac{1}{0,5s + 1}, G_\lambda(s) = e^{-s}, G_d(s) = \frac{1}{0,2s + 1}$$

- ❑ Zajistěte řízení procesu při jednotkovém skoku požadovaného poměru.
1. **Navrhněte klasické PI řízení (např. Ch-H-R) tak, aby doba ustálení byla pod 0,5 s a překmit do 2 %. Simulujte!**
 2. **Testujte pro skok na poruše (vstupní vzduch) o velikosti 0,2.**



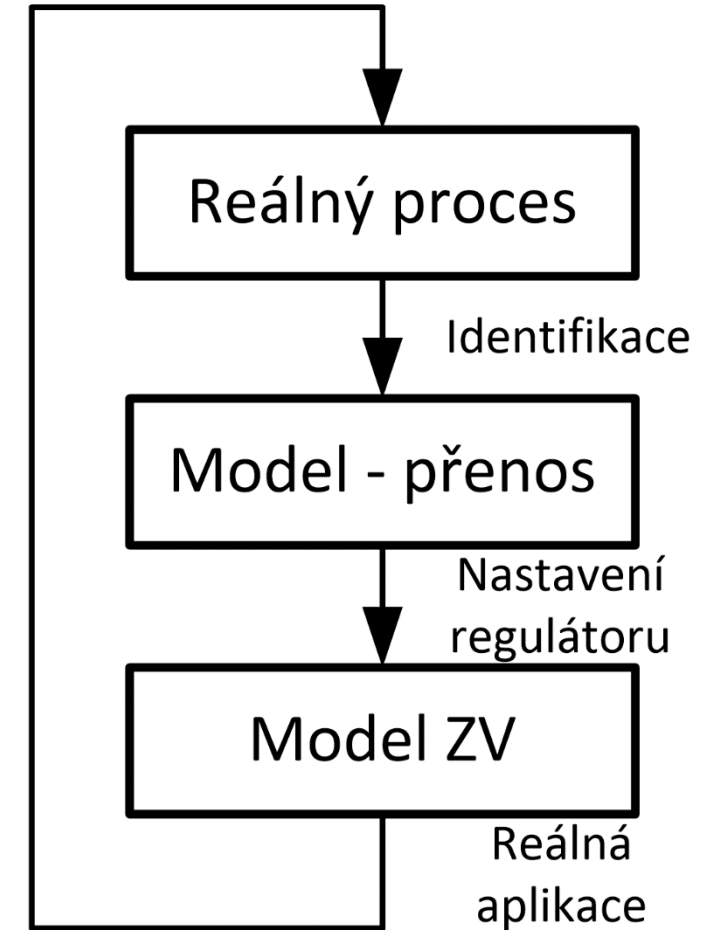
Smith prediktor

- Smithova predikční struktura (Smithův regulátor) má pro nominální případ (model zcela odpovídá realitě) tři základní vlastnosti:
 1. Kompenzace dopravního zpoždění
 2. Predikce
 3. Dynamická kompenzace
- **Regulátor je vždy laděn pro proces bez dopravního zpoždění $G_n(s)$!**



Princip nastavení regulátoru v praxi

1. Pracujeme s reálným procesem
2. Aproximujeme chování reálného systému pomocí vhodného přenosu – model reálného systému
3. Zvolíme (dostaneme) požadavky na regulaci
4. Nalezneme parametry regulátoru (pomocí modelu)
5. Pokud máme možnost, simulačně otestujeme nastavení regulátoru na modelu
6. Aplikujeme parametry regulátoru na reálném procesu



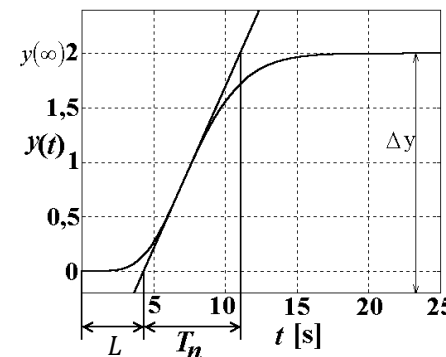
Metoda Ziegler-Nichols

1. **varianta:** metoda ustálených kmitů – při vypnutí I a D složce je postupně zvětšováno proporcionální zesílení až do okamžiku, kdy se celý obvod dostane na mez stability a objeví se netlumené kmity s konstantní amplitudou. Frekvence těchto kmitů je rovna kritické frekvenci $f_k = 1/T_k$ a zesílení P regulátoru (tzv. kritické zesílení) r_k je převrácenou hodnotou zesílení regulované soustavy na této frekvenci.

Regulátor	r_0	T_i	T_d
P	$0,5r_k$		
PI	$0,45r_k$	$0,85T_k$	
PID	$0,6r_k$	$0,5T_k$	$0,125T_k$

2. **varianta:** vyhodnocení přechodové charakteristiky. Na základě doby průtahu T_u , doby náběhu T_n a statického zesílení K pak lze nastavit regulátor podle pravidel v tabulce.

$$u(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) e(s)$$



Regulátor	r_0	T_i	T_d
P	$T_n/(KL)$		
PI	$0,9T_n/(KL)$	$1,2L$	
PID	$1,2T_n/(KL)$	$2L$	$0,5L$



Metoda Chiens, Hrones, Reswick

$G(s) = K \frac{e^{-Ls}}{Ts + 1}$ Regulátor	Aperiodický regulační pochod		Překmit max. 20%	
	Sledování skokových změn žádané hodnoty	Potlačení poruchových veličin	Sledování skokových změn žádané hodnoty	Potlačení poruchových veličin
P	$r_0 = 0,3 \frac{T}{K \cdot L}$	$r_0 = 0,3 \frac{T}{K \cdot L}$	$r_0 = 0,7 \frac{T}{K \cdot L}$	$r_0 = 0,7 \frac{T}{K \cdot L}$
PI	$r_0 = 0,35 \frac{T}{K \cdot L}$ $T_i = 1,2T$	$r_0 = 0,6 \frac{T}{K \cdot L}$ $T_i = 4L$	$r_0 = 0,6 \frac{T}{K \cdot L}$ $T_i = T$	$r_0 = 0,7 \frac{T}{K \cdot L}$ $T_i = 2,3L$
PID	$r_0 = 0,6 \frac{T}{K \cdot L}$ $T_i = T$ $T_d = 0,5L$	$r_0 = 0,95 \frac{T}{K \cdot L}$ $T_i = 2,4L$ $T_d = 0,42L$	$r_0 = 0,95 \frac{T}{K \cdot L}$ $T_i = 1,35T$ $T_d = 0,47L$	$r_0 = 1,2 \frac{T}{K \cdot L}$ $T_i = 2L$ $T_d = 0,42L$