

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Algoritmy řízení topného článku tepelného hmotnostního průtokoměru

Autor práce: Adam Chromý

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Václavek, Ph.D.

Oponent práce: Ing. Libor Veselý

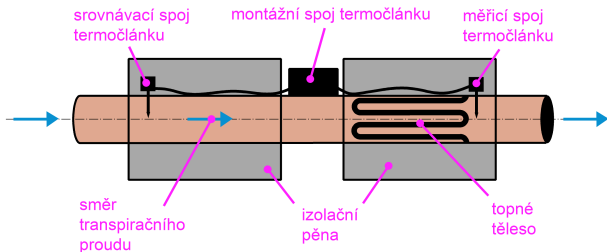
15. 6. 2011 v Brně

Přehled

- 1 Tepelný hmotnostní průtokoměr EMS62
- 2 Cíle práce
- 3 Konstrukce matematických modelů
 - Teoretický výpočet modelu regulované soustavy
 - Experimentální určení parametrů soustavy
 - Výpočet rozsahu parametrů
 - Sestavení modelu měřicího zařízení EMS62
 - Srovnání stávajícího a opraveného zařízení EMS62
- 4 Podmínky stability regulačního obvodu
- 5 Návrh nového regulačního algoritmu
- 6 Závěr

Tepelný hmotnostní průtokoměr EMS62

- Měření transpiračního proudu ve větvích (proudění vody s rozpuštěnými minerály směrem od kořenů k listům)
- Užití při výzkumech biosféry, atmosféry, skleníkového efektu
- Měřicí metoda: místo, které je známým výkonem ohříváno je současně transpiračním proudem ochlazováno



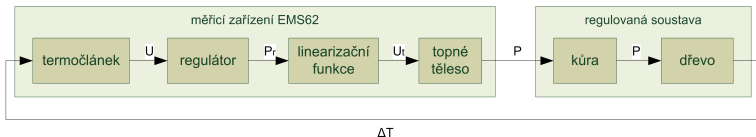
- Regulace teploty na konstantní žádanou hodnotu
- Výpočet hmotnostního průtoku z dodávaného výkonu:

$$Q_m = \frac{P}{c \cdot d \cdot T} - \frac{z}{c} \quad (1)$$

- 1 **Vytvořit matematické modely soustavy a regulátoru**
- 2 **Analyzovat příčinu a navrhnout opravu problému stávajícího zařízení**
 - ▶ za předem neznámých podmínek průběh naměřeného průtoků neodpovídal skutečnému transpiračnímu proudu
- 3 **Určit podmínky stability regulačního obvodu**
- 4 **Optimalizovat měřicí proces zařízení**
 - ▶ návrh nového regulačního algoritmu, který by předčil stávající v daném kritériu

Konstrukce matematických modelů

- Rozdělení regulačního obvodu na subsystémy:



Obrázek: Schematické znázornění regulačního obvodu

- Postup:
 - 1 Teoretický výpočet modelu regulované soustavy
 - 2 Experimentální určení parametrů regulované soustavy
 - 3 Výpočet rozsahu parametrů
 - 4 Sestavení modelu měřicího zařízení EMS62 ze zdrojových kódů

Teoretický výpočet modelu regulované soustavy

- fyzikální vztahy \Rightarrow stavové rovnice \Rightarrow operátorový přenos

Operátorový přenos regulované soustavy

$$F(p) = \frac{K_{f2}}{(T_{f1}p + 1)(T_{f2}p + 1)} \quad (2)$$

$$T_{f1} = \frac{m_k \cdot c_k \cdot x_k}{\lambda_k \cdot S_k} \quad (3) \quad K_{f2} = \frac{k_z^{-1}}{Q_m \cdot c + z} \quad (4) \quad T_{f2} = \frac{m \cdot c}{Q_m \cdot c + z} \quad (5)$$

- Systém lze aproximovat modelem časově variantního lineárního systému druhého řádu
- Parametr T_{f1} závisí pouze na parametrech kůry (časově invariantní)
- Parametry T_{f2} a K_{f2} jsou časově variantní a jsou výrazně ovlivněny transpiračním proudem

Experimentální určení parametrů soustavy

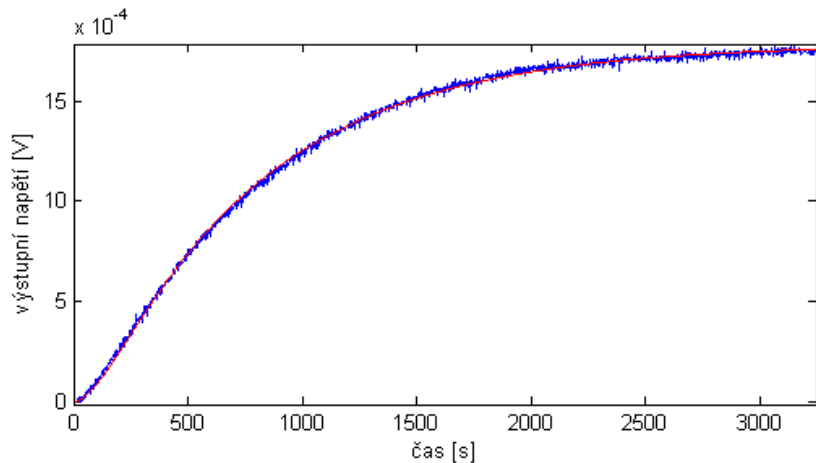
- Měření odezvy na skok výkonu pro větev s maximálním, středním a minimálním uváděným průměrem
- Z časových důvodů pouze 2 měření pro každý průměr
- Získáme řádový přehled o rozsahu parametrů:

Rozsah parametrů přenosové funkce $F(p)$

Tabulka: Přehled identifikovaných parametrů přenosové funkce

Průměr větve	6 mm		12 mm		20 mm	
Č. měření	1	2	1	2	1	2
T_{f1}	99,25	89,88	216,91	238,33	185,37	189,80
T_{f2}	740,31	749,64	1195,1	1187,5	2382,3	2542,4
K_{f2}	46,20	47,11	40,71	38,79	22,61	19,60

Experimentální určení parametrů soustavy



Obrázek: Odezva na skok výkonu do větve o průměru 6 mm

Výpočet rozsahu parametrů

- V laboratorních podmínkách nejsme schopni dosáhnout $Q_m > 0$
- Minimální hodnoty T_{f2} a K_{f2} musíme určit výpočtem z teoretických poznatků a výsledků experimentu

Výsledný model soustavy

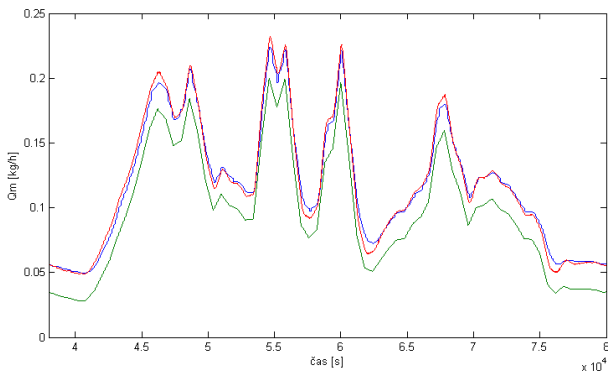
$$F(p) = \frac{K_{f2}}{(T_{f1}p + 1)(T_{f2}p + 1)} \quad (6)$$

$$T_{f1} \in \langle 40; 280 \rangle \quad (7) \quad T_{f2} \in \langle 3, 22; 2600 \rangle \quad (8) \quad K_{f2} \in \langle 2, 95; 48 \rangle \quad (9)$$

Sestavení modelu měřicího zařízení EMS62

- Výrobce poskytl zdrojové kódy \Rightarrow S-funkce v MATLAB Simulink
- V průběhu konstrukce modelu odhaleny konstrukční chyby:
 - ▶ nesprávně realizovaný anti wind-up (výstup saturuje velmi brzo)
 - ▶ nesprávná linearizační funkce (při vyšších výkonech nekompensuje nelinearitu)
 - ▶ přetékání proměnné (způsobuje rozkmitání regulačního obvodu)
- Příčiny těchto chyb byly odhaleny a chyby byly opraveny (2. cíl práce)

Srovnání stávajícího a opraveného zařízení EMS62



- Stávající zařízení plní svoji funkci i přes existenci významných chyb
- Anti wind-up omezuje výstup natolik, že nemůže nastat přetečení a navíc se linearizační funkce pohybuje v oblasti, kde plní svoji funkci
- Je ovlivněna přesnost měření, zejména při vyšších průtocích díky nepřesnosti měření malého rozdílu teplot

Podmínky stability regulačního obvodu

- Výpočet pomocí dvou metod (Charitonovy polynomy a Hurwitzovo kritérium)
- Stávající obvod je stabilní pro celý rozsah parametrů regulované soustavy

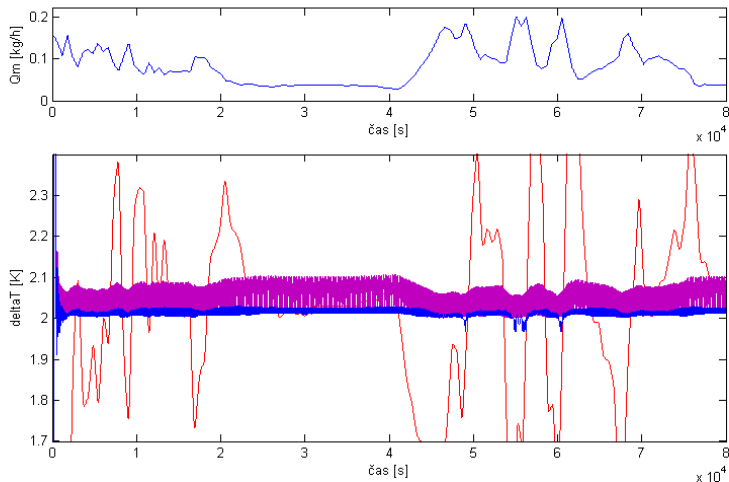
Podmínka stability

$$T_i > \frac{2.52 \cdot 10^2 K_R}{K_R + 2,08 \cdot 10^{-1}} \quad (10)$$

Návrh nového regulačního algoritmu

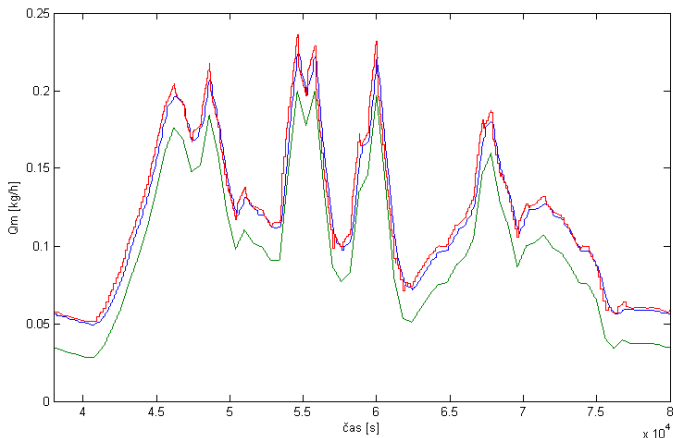
- Kritérium: Minimální součet odchylek regulované veličiny od žádané hodnoty po celý průběh měření
- Reléový regulátor - z hlediska kritéria lepší
- Vícestavový reléový regulátor - odstraňuje nežádoucí oscilace
- Problémy s číslicovou filtrací
- Nově navržené algoritmy jsou výrazně lepší z hlediska daného kritéria, ale rekonstrukce Q_m z dodávaného výkonu je velmi obtížná
- Nedosáhl jsem tak dobrého výsledku jako u opraveného stávajícího zařízení

Návrh nového regulačního algoritmu



Obrázek: Srovnání kvality regulace opraveného (červeně), reléového (fialově) a vícestavového reléového regulátoru (modře)

Návrh nového regulačního algoritmu



Obrázek: Srovnání výsledku měření stávajícího zařízení EMS62 (modře) a zařízení EMS62 s vícestavovým reléovým regulátorem (červeně) se simulovaným průběhem Q_m (zeleně)

- Odhaleny a opraveny významné konstrukční chyby, které však neměly významný vliv na přesnost měření
- Analyzována stabilita regulačního obvodu
- Navržen nový robustnější regulátor, který je výrazně lepší v daném kritériu, ale pro účely tohoto zařízení není vhodný
- Práce poskytuje modely a analýzy, které budou užitečné při dalším vývoji.

Děkuji za pozornost!

Otázky k obhajobě

Při identifikaci časové konstanty kůry v závislosti na průměru větve nejprve časová konstanta roste s průměrem a následně klesá. Pokuste se udělat hlubší analýzu tohoto jevu. Parametry c_k , λ_k a měrnou hustotu kůry uvažujte pro obě větve konstantní. Bylo by možné doložit, jaká je tloušťka kůry u jednotlivých větví?

- Pro m_k platí $m_k = \rho_k \cdot S_k \cdot x_k$, po dosazení do (3) získáme:

$$T_{f1} = \frac{\rho_k \cdot S_k \cdot c_k \cdot x_k^2}{\lambda_k \cdot S_k} = \frac{\rho_k \cdot c_k \cdot x_k^2}{\lambda_k} \quad (11)$$

- Dle zadání mám považovat parametry c_k , λ_k a ρ_k za konstantní, pak platí:

$$T_{f1} = c_1 \cdot x_k^2 \quad (12)$$

- Úpravou předchozí rovnice získáme vztah:

$$x_k = \sqrt{\frac{T_{f1}}{c_1}} = \frac{\sqrt{T_{f1}}}{\sqrt{c_1}} = c_2 \cdot \sqrt{T_{f1}} \quad (13)$$

Otázky k obhajobě

- Pro tloušťku kůry pro jednotlivé průměry větví pak z předchozího vztahu a výsledků experimentu určíme tyto hodnoty:

$$x_k(6 \text{ mm}) = 10,0c_2 \quad (14)$$

$$x_k(12 \text{ mm}) = 14,1c_2 \quad (15)$$

$$x_k(20 \text{ mm}) = 13,6c_2 \quad (16)$$

- Poměr tlouštěk kůry je tedy:

$$x_k(6 \text{ mm}) : x_k(12 \text{ mm}) : x_k(20 \text{ mm}) = 1,00 : 1,41 : 1,36 \quad (17)$$

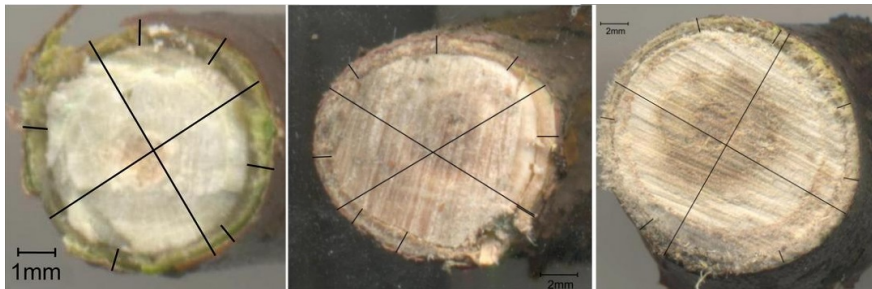
Otázky k obhajobě

- Platnost předchozího tvrzení se budeme snažit dokázat experimentem na reálné dřevině podobných průměrů
- Abychom dokázali změřit tloušťku kůry s dostatečnou přesností i bez speciálních měřidel, budeme postupovat takto:
 - 1 Vytvoříme příčný řez dřevinou
 - 2 Tento řez sejmeme scannerem při vysokém rozlišení (1200 DPI)
 - 3 V kartografickém programu OCAD vytvoříme plán o měřítku 1:1
 - 4 Vložíme sejmuté řezy jako podkladovou mapu (scanner i program zachovává měřítko)
 - 5 Užitím funkce měření vzdáleností změříme tloušťku kůry na několika místech a určíme aritmetický průměr získaných hodnot
- Naměřená data:

$$x_k(7 \text{ mm}) = 0,70 \text{ mm} \quad (18)$$

$$x_k(13 \text{ mm}) = 1,09 \text{ mm} \quad (19)$$

$$x_k(19 \text{ mm}) = 1,09 \text{ mm} \quad (20)$$



- Poměr změřených tlouštěk kůry je pak:

$$x_k(7 \text{ mm}) : x_k(13 \text{ mm}) : x_k(19 \text{ mm}) = 1,00 : 1,56 : 1,56 \quad (21)$$

- Růst tloušťky se od určitého průměru větve zastavil
- Ukázali jsme, že u této větve se rychlost růstu objemu kůry s přibývajícím věkem větve snižuje
- Logickým úsudkem můžeme usoudit, že ρ_k nebude konstantní (jak bylo uvažováno) a bude se s věkem větve snižovat díky pórovitosti tkáně.
- Výsledkem tohoto jevu pak bude pokles velikosti T_{f1}